

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Суконкин Максим Алексеевич

**Подавление влияния
приповерхностных неоднородностей
на магнитотеллурические данные**

1.6.9. Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук, доцент
Пушкарев Павел Юрьевич

Москва – 2025

Оглавление

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....	8
ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В МТ ДАННЫХ.....	17
1.1. Природа приповерхностных аномалий.....	17
1.2. Нормализация кривых МТЗ	22
1.3. Методы локально-регионального разложения	30
1.4. Другие способы борьбы с влиянием ЛППН.....	39
1.5. Выводы	40
ГЛАВА 2. ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ С НЕОДНОРОДНЫМ ВЕРХНИМ СЛОЕМ И АНАЛИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ МТ ДАННЫХ	42
2.1. Геоэлектрическая модель	42
2.2. Анализ эффективного импеданса	46
2.3. Особенности влияния ЛППН одного знака и различной мощности	53
2.4. Анализ инвариантных параметров тензора импеданса.....	59
2.5. Анализ норм матрицы Визе-Паркинсона, магнитного и теллурического тензора.....	63
2.6. Выводы	68
ГЛАВА 3. ЛОКАЛЬНО-РЕГИОНАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ТЕНЗОРА ИМПЕДАНСА	69
3.1. Определение главных направлений.....	69
3.2. Анализ параметров асимметрии.....	72
3.3. Полярные диаграммы и эллипсы.....	75

3.4. Выводы	84
ГЛАВА 4. ЛОКАЛЬНО-РЕГИОНАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ТЕНЗОРА	86
4.1. О методе теллурических токов	86
4.2. Теллурический тензор в средах различной размерности.....	87
4.3. Локально-региональное разложение теллурического тензора $[T]$	88
4.4. Метод теллурического фазового тензора $[\Phi^T]$	89
4.5. Кривые компонент тензоров $[T]$ и $[\Phi^T]$	91
4.6. Карты инвариантных параметров.....	98
4.7. Анализ полярных диаграмм	103
4.8. Выводы	112
ГЛАВА 5. НОРМАЛИЗАЦИЯ КРИВЫХ МТЗ С ПОМОЩЬЮ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ	114
5.1. Используемые сглаживающие фильтры	114
5.2. Анализ результатов нормализации на примере кривой МТЗ	119
5.3. Анализ результатов нормализации вдоль профиля.....	122
5.4. Анализ результатов нормализации по площади.....	125
5.5. Нормализация дополнительных компонент тензора импеданса и теллурического тензора	130
5.6. Результаты нормализации данных на периоде 1000с	137
5.7. Результаты нормализации данных для моделей с ЛППН одного знака .	140
5.8. Выводы	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	148

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

1D – одномерный

2D – двумерный

3D – трехмерный

ВЧР – верхняя часть разреза

ГИС – геофизические исследования скважин

ГМВЗ – глубинное магнитовариационное зондирование

ЗСБ – зондирование становлением поля в ближней зоне

ЛППН – локальные приповерхностные неоднородности

МТ – магнитотеллурический

МТЗ – магнитотеллурическое зондирование

МТТ – метод теллурических токов

УЭС – удельное электрическое сопротивление

ФТ – фазовый тензор

EMAP – electro-magnetic array profiling

REBOCC – reduced basis Occam's inversion

Тензоры и матрицы:

$[Z]$ – тензор импеданса

$[T]$ – теллурический тензор

$[W]$ – матрица Визе-Паркинсона

$[M]$ – горизонтальный магнитный тензор

$[\Phi]$ – фазовый тензор (для импеданса)

$[\Phi^T]$ – теллурический фазовый тензор

$[P]$ – амплитудный тензор

$[e]$ – матрица электрических искажений

$[h]$ – матрица магнитных искажений

$[Z^R]$ – региональный тензор импеданса

$[Z^S]$ – искаженный тензор импеданса (влиянием ЛППН)

$[T^R]$ – региональный теллурический тензор

$[T^S]$ – искаженный теллурический тензор

Компоненты тензоров:

$Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$ – компоненты тензора импеданса

$T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ – компоненты теллурического тензора

$\Phi_{xx}, \Phi_{xy}, \Phi_{yx}, \Phi_{yy}$ – компоненты фазового тензора

$\Phi_{xx}^T, \Phi_{xy}^T, \Phi_{yx}^T, \Phi_{yy}^T$ – компоненты теллурического фазового тензора

Инвариантные параметры:

Z_{eff} – эффективный импеданс

Z_{ssq} – среднеквадратичный импеданс

Z_s – последовательный импеданс

Z_p – параллельный импеданс

Z_0 – импеданс Тихонова-Каньяра

T_{eff} – эффективная компонента теллурического тензора

ρ_{eff} – эффективное кажущееся сопротивление

ρ_{xy}, ρ_{yx} – кажущиеся сопротивления по компонентам тензора импеданса

ρ_s, ρ_p – комплексные кажущиеся сопротивления, вычисленные из последовательного и параллельного импедансов соответственно

$\|W\|, \|M\|, \|T\|$ – нормы соответствующих матриц

$skew_S$ – параметр асимметрии Свифта (для импеданса)

$skew_B$ – параметр асимметрии Бара (для импеданса)

$skew_S^T$ – параметр асимметрии Свифта для теллурического тензора

$skew_B^T$ – параметр асимметрии Бара для теллурического тензора

N – параметр неоднородности

β – параметр асимметрии фазового тензора

β^T – параметр асимметрии теллурического фазового тензора

Δ – разность фаз главных значений импедансов

Азимутальные углы (направления):

α_R – азимут простирания региональных структур (метод Бара)

α – азимут простирания (фазовый тензор)

α^T – азимут простирания (теллурический фазовый тензор)

α_1, α_2 – главные направления фазового тензора

PDe – главные направления, определенные методом Эгтерса

PDb – главные направления, определенные методом Бара

Прочие обозначения:

$\vec{E}_\tau$ – горизонтальное электрическое поле

$\vec{H}_\tau$ – горизонтальное магнитное поле

$\vec{E}_\tau^0$ – электрическое поле в базовой точке

E_x, E_y – горизонтальные компоненты электрического поля

H_x, H_y – горизонтальные компоненты магнитного поля

H_z – вертикальная компонента магнитного поля

ω – круговая частота

T – период колебаний поля

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума

$Z^\perp$ – поперечный импеданс (2D среда)

$Z^\parallel$ – продольный импеданс (2D среда)

$T^\perp$ – поперечная компонента теллурического тензора

$T^\parallel$ – продольная компонента теллурического тензора

W_{lin}^R – вес за удаление точки от центра скользящего окна с линейной зависимостью

W_{exp}^R – вес за удаление точки от центра скользящего окна с экспоненциальной зависимостью

W^A – вес за отклонение амплитуды в точке от средней в скользящем окне

W^D – вес за различие в ориентировке полярных диаграмм главной компоненты тензора импеданса и фазового тензора

$\sigma_{\text{лппн}}$ – отклонение данных для модели с ЛППН от данных для модели с однородным верхним слоем

σ – отклонение нормализованных данных от данных для модели с однородным верхним слоем

T_0 – период нормализации

$k(T_0)$ – коэффициент смещения кривой при нормализации на заданном периоде

f – нормализуемое значение компоненты МТ данных

$f^{\text{сглаж.}}(T_0)$ – сглаженные значения компонент МТ поля на заданном периоде

f_k – значение в k -й точке для модели с однородным верхним слоем

$f_k^{\text{норм}}$ – значение в k -й точке для модели с множеством ЛППН после нормализации

$f^{\text{средн.}}$ – среднегеометрическое значение, вычисленное в пределах скользящего окна

R_0 – полуширина фильтра или радиус скользящего окна

R – расстояние от точки до центра скользящего окна

q – параметр крутизны экспоненциального фильтра

δ – расхождение двух наиболее близких осей амплитудной и фазовой диаграмм

M – число точек наблюдения внутри заданного круга

L – сумма весов

K – общее количество точек, по которым рассчитывалось отклонение

K_{xy}, K_{yx} – коэффициенты нормализации компонент тензора импеданса или теллурического тензора

$K^{\text{мод}}$ – коэффициент сдвига, рассчитанный как отношение данных для моделей с множеством ЛППН к данным модели с однородным верхним слоем

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) применяется при изучении глубинного строения земной коры и верхней мантии, при поиске и разведке месторождений углеводородов, твердых полезных ископаемых и геотермальных ресурсов, а в высокочастотных модификациях – и при решении разных малоглубинных задач. Метод МТЗ использует принцип индукционного зондирования, при этом глубинность исследований определяется периодом колебаний магнитотеллурического (МТ) поля.

Верхняя часть разреза обычно сложена изменчивыми по составу и состоянию горными породами, что выражается в появлении локальных приповерхностных неоднородностей (ЛППН). Они распространены практически повсеместно, но наиболее ярко проявляются в областях, где отсутствует непрерывный осадочный чехол, в зонах развития многолетнемерзлых пород, в горных регионах. ЛППН могут обладать хаотичными значениями удельного электрического сопротивления (ρ), а могут быть преимущественно высокоомными или проводящими.

ЛППН могут существенно искажать МТ данные, причем такие искажения имеют гальванический характер и проявляются в электрическом поле практически во всем диапазоне периодов. Возникают статические смещения амплитудных кривых МТЗ, построенных с использованием компонент тензора импеданса $[Z]$ и теллурического тензора $[T]$. Это затрудняет интерпретацию МТ данных и может привести к ошибкам при построении геоэлектрических моделей.

Таким образом, подавление эффектов ЛППН в МТ данных является актуальной научной проблемой. Существует ряд подходов к ее решению, связанных с выделением устойчивых к влиянию ЛППН характеристик и с коррекцией этого влияния на амплитудные кривые МТЗ. Диссертационная

работа направлена на анализ эффективности и дальнейшее развитие этих подходов.

Степень разработанности темы

Проблема, связанная с искажающим влиянием ЛППН, известна давно, с начала практического применения метода МТЗ. Ей посвящены работы основателей магнитотеллурики М.Н. Бердичевского, Л.Л. Ваньяна, В.И. Дмитриева, А.А. Кауфмана, А.А. Ковтун, И.И. Рокитянского и многих других исследователей.

К настоящему времени сложились три основных группы методов, направленных на подавление влияния ЛППН и извлечение информации о глубинных структурах.

1. Методы декомпозиции тензора импеданса. В их основе лежит представление тензора $[Z]$ как произведения матрицы локальных электрических искажений $[e]$, связанных с влиянием ЛППН, и региональной составляющей $[Z^R]$, связанной с глубинными структурами. Эта идея была сформулирована в работе (Zhang, Roberts, Pedersen, 1987). Свое развитие она получила в методах Бара (Bahr, 1988), Грума-Бэйли (Groom, Bailey, 1989), фазового тензора (Caldwell, Bibby, Brown, 2004) и других. В результате применения подобных методов осуществляется переход от тензора импеданса к характеристикам, свободным от влияния ЛППН и чувствительным к глубинным структурам.

2. Методы нормализации кривых МТЗ. Их идея заключается в том, чтобы исправить искаженный уровень амплитудных кривых. Например, кривые кажущегося сопротивления могут быть приведены к уровню кривых методов индукционного зондирования с измерением магнитного поля – глубинного магнитовариационного зондирования (ГМВЗ) или зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) (Рокитянский, 1971; Andrieux, Wightman, 1984; Pellerin, Hohmann, 1990). Широкое распространение получила пространственная низкочастотная фильтрация, при которой кривые приводятся к уровню, медленно

меняющемуся в пространстве. Большое число работ, посвященной этой методике были написаны М. Н. Бердичевским (Бердичевский и др., 1989; Бердичевский и др., 1995).

3. Методы коррекции статических смещений в ходе инверсии. В ряде программ решения обратных 2D и 3D задач, помимо параметров модели, подбираются коэффициенты смещения кривых или элементы частотно-независимой матрицы гальванических искажений (Sasaki, Meju, 2006; Avdeeva et al., 2015). Это, однако, повышает число неизвестных параметров и неустойчивость решения.

Цель исследования

Целью исследования является анализ эффективности методов декомпозиции тензора импеданса $[Z]$ и теллурического тензора $[T]$, а также нормализации кривых МТЗ с помощью пространственной фильтрации, и в конечном итоге выбор оптимальной методики подавления приповерхностных искажений в данных МТЗ.

Задачи исследования

1. Построение геоэлектрической модели, содержащей глубинную структуру и приповерхностный неоднородный слой. Численное моделирование МТ поля для модели с разными вариантами приповерхностного слоя.

2. Разработка программного обеспечения для анализа МТ данных, разделения локальных и региональных эффектов, нормализации амплитудных кривых МТЗ.

3. Анализ синтетических МТ данных для оценки искажающего влияния ЛППН в тензоре импеданса и теллурическом тензоре.

4. Оценка возможностей методов разделения локальных и региональных эффектов в тензоре импеданса.

5. Адаптация методов разделения локальных и региональных эффектов к теллурическому тензору и оценка их возможностей.

6. Исследование эффективности использования различных весов при пространственной низкочастотной фильтрации кривых МТЗ.

7. Выбор оптимального способа нормализации дополнительных компонент тензора импеданса и теллурического тензора.

8. Определение места рассмотренных методов в общем графе МТ исследований.

Научная новизна исследования

Составлена характерная геоэлектрическая модель, содержащая проводящую впадину в верхней части высокоомного фундамента и неоднородную верхнюю часть разреза. С использованием синтетических данных, рассчитанных для этой модели, исследованы возможности методов разделения локальных и региональных эффектов в тензоре импеданса $[Z]$. Эти методы адаптированы к теллурическому тензору $[T]$.

Исследованы возможности коррекции статического смещения с помощью пространственной низкочастотной фильтрации. Впервые опробованы дополнительные весовые характеристики, связанные с различием в уровнях кривых на соседних точках наблюдения и с различием в ориентации амплитудных и фазовых полярных диаграмм. Предложена методика нормализации дополнительных компонент $[Z]$ и $[T]$ с использованием коэффициентов нормализации, вычисленных для основных компонент.

Практическая значимость работы

Применение методов выделения из-под приповерхностного шума неискаженной информации о глубинных структурах и понимание возможностей этих методов позволит более надежно интерпретировать МТ данные и решать

геологические задачи, связанные с изучением глубинного строения и месторождений полезных ископаемых.

Разработанное программное обеспечение может применяться для анализа МТ данных, для подавления в них приповерхностных эффектов, для их визуализации и преобразования в различные форматы.

Полученные результаты рассматриваются в учебном курсе «Прямые и обратные задачи электромагнитных зондирований», читаемом для магистрантов кафедры геофизики геологического факультета МГУ.

Методология и методы диссертационного исследования

Методология исследования построена на использовании синтетических МТ данных, рассчитанных для составленных автором геоэлектрических моделей, для оценки эффективности и дальнейшего развития различных методов подавления приповерхностных эффектов. При этом рассматривались методы, которые можно отнести к двум группам: (1) декомпозиции тензора импеданса $[Z]$ и теллурического тензора $[T]$; и (2) нормализации амплитудных кривых МТЗ.

В ходе исследования для расчета синтетических МТ данных использовалось программное обеспечение для 3D моделирования MT3DFwd (автор – R. Mackie). Для анализа и сопоставления результатов применения методов подавления приповерхностных эффектов использовалась программа MTDA, разработанная с участием автора диссертации. Для визуализации результатов в основном применялись программы Grapher и Surfer компании Golden Software.

Защищаемые положения

1 В условиях искажения магнитотеллурического поля влиянием локальных приповерхностных неоднородностей фазовый теллурический тензор эффективно решает задачу оценки размерности среды и определения направления простирания региональных структур.

2. Эффективность нормализации кривых МТЗ с применением пространственной низкочастотной фильтрации повышается с введением системы дополнительных весов за расхождение между осями амплитудных и фазовых полярных диаграмм, и за отклонение уровня кривой от среднего в скользящем окне.

3. Для нормализации дополнительных компонент тензора импеданса и теллурического тензора эффективно использование коэффициентов нормализации, определенных для главных компонент.

Степень достоверности полученных в ходе исследования результатов

Достоверность сделанных выводов об эффективности подходов к подавлению влияния ЛППН на МТ данные подтверждается сравнением результатов применения этих подходов с результатами расчётов для геоэлектрической модели без ЛППН. Также эта достоверность подтверждается согласием с результатами исследований других авторов в той части, в которой они перекрываются.

Основные результаты работы докладывались в ходе серии научных конференций и опубликованы в статьях.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались автором самостоятельно или соавторами докладов на следующих научных конференциях: XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2023» (Москва, 2023), Всероссийский семинар по электромагнитным зондированиям Земли, посвященный 100-летию профессора М.Н. Бердичевского (Москва, 2023), 50-я сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (Москва, 2024), VII Международная геолого-геофизическая конференция и выставка

«ГеоЕвразия 2024. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес» (Москва, 2024), Научная конференция «Ломоносовские чтения - 2024», секция «Геология», подсекция «Геофизика» (Москва, 2024), 6-я Всероссийская научная конференция МФТИ, направление «Фундаментальная и прикладная физика», Секция прикладной геофизики (Долгопрудный, 2024), IX Международный симпозиум «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (Бишкек, 2024), III Научно-практическая конференция «Электроразведка-2024» имени И.Х. Абизгильдина (Москва, 2024), 51-я сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова "Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей" (Пермь, 2025), Научная конференция «Ломоносовские чтения – 2025», секция «Геология», подсекция «Геофизика» (Москва, 2025), VIII Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес» (Москва, 2025), 10-я Международная научно-практическая конференция «Инновации в геологии, геофизике и географии — 2025» (Москва, 2025), IX Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского, Л.Л. Ваньяна и В.И. Дмитриева (Иркутск, 2025). В сборниках материалов всероссийских и международных конференций опубликовано 2 статьи. Получено 2 свидетельства о регистрации прав на программное обеспечение.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, из них 5 в изданиях, рекомендованных Ученым советом МГУ для защиты по специальности.

Личный вклад

Автор принимал непосредственное участие в создании геоэлектрической модели и численном моделировании МТ поля, в написании двух зарегистрированных программ (GMC и MTDA) для построения моделей и коррекции магнитотеллурических данных. Автор самостоятельно тестировал методы разделения локальных и региональных магнитотеллурических эффектов, а также адаптировал метод фазового тензора для теллурического тензора. Автором лично была осуществлена нормализация синтетических данных, включая реализацию новых весовых характеристик и методики нормализации дополнительных компонент тензоров.

Во всех опубликованных работах вклад автора является определяющим. Автор принимал активное участие в постановке научных задач, проведении численных исследований, разработке моделей, оценке полученных результатов и подготовке их к печати. Автором была проделана значительная работа над текстом статей с последующим представлением их в редакции журналов, осуществлена переписка с редакторами и рецензентами.

Поддержка работы

В 2024 и 2025 годах работа велась при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-27-00147.

Благодарности

Автор выражает сердечную благодарность своему научному руководителю, д.г.-м.н., профессору кафедры геофизики геологического факультета МГУ Пушкарёву Павлу Юрьевичу за неоценимую помощь и поддержку на всех этапах выполнения работы, а также за содействие в написании и публикации статей.

Автор благодарен всем преподавателям, научным сотрудникам, аспирантам и студентам отделения геофизики Московского Государственного Университета

за предоставленную возможность получить необходимые для написания представленной работы навыки и знания, за предоставленное программное обеспечение.

Автор выражает свою признательность сотрудникам ООО «НТЦ Северо-Запад» за помощь и советы на разных этапах диссертационного исследования, а также за предоставленные источники литературы.

Отдельно автор хочет поблагодарить начальника отдела комплексных инженерных изысканий БКИИ АО «Атомэнергопроект» Собчинского Николая Сергеевича за помощь с организацией рабочего процесса.

ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В МТ ДАННЫХ¹

1.1. Природа приповерхностных аномалий

Магнитотеллурическое зондирование является одним из ключевых методов геофизических исследований, позволяющим получать информацию об электрической проводимости земных недр. Теоретическая основа метода была заложена в 50-х годах двадцатого века в работах (Тихонов, 1950; Rikitake, 1950; Cagniard, 1953). Метод МТЗ основан на измерении естественного переменного электромагнитного поля Земли, имеющего на частотах порядка 1 Гц и ниже космическую природу. Точнее говоря, вариации поля возникают при воздействии излучения Солнца на магнитосферу и ионосферу Земли. На частотах выше 1 Гц (диапазон аудио-частот) преобладает поле удаленных гроз, распространяющееся по непроводящей атмосфере. Обработка данных МТЗ заключается в вычислении спектров компонент поля и переходе к независимым от возбудителей поля передаточным функциям, основной из которых является тензор импеданса $[Z]$. Интерпретация этих данных заключается в решении обратной задачи с получением геоэлектрических моделей (распределений электрической проводимости в Земле) и в их геологическом истолковании.

Интерпретация данных МТЗ часто осложняется наличием искажений, вызванных локальными приповерхностными неоднородностями. Эти неоднородности имеют небольшой размер и расположены близко к поверхности. Влияние ЛППН в электрической составляющей МТ поля проявляется во всем диапазоне частот, искажая информацию о глубинных структурах (Menvielle, 1988, Beamish, Travassos, 1992; Jiracek, 1990). Пример влияния ЛППН на

¹ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Суконкин М.А., Пушкарев П.Ю. Эффекты локальных приповерхностных неоднородностей в магнитотеллурических данных и методы их подавления (обзор) // Гелиогеофизические исследования. — 2025 — №. 47. — С. 37-51. EDN: [DLYVAF](#) (2 п.л., вклад автора 55%), Импакт-фактор 0,370 (РИНЦ).

частотные псевдорезы представлен на рисунке 1.1, черным прямоугольником на рисунке 1.1а выделена область с характерными столбообразными искажениями от ЛППН.

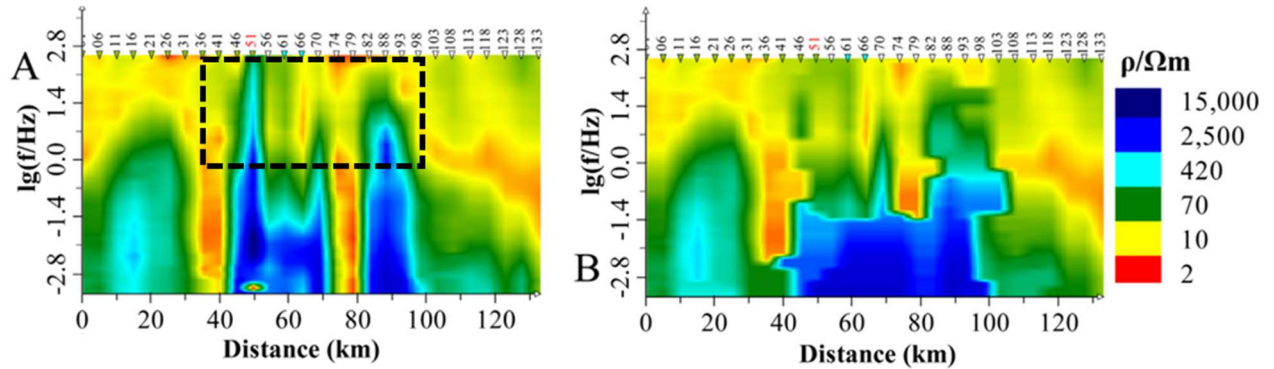


Рисунок 1.1 — Частотные псевдорезы эффективного кажущегося сопротивления (Zeng et al., 2025): а – искаженный псевдорез, б – скорректированный псевдорез.

Выходящие на поверхность тектонические нарушения, такие как разломы и зоны трещиноватости, часто создают резкие изменения электрической проводимости. Например, в тектонически активных областях, таких как рифтовые зоны или области субдукции, в данных МТЗ наблюдаются значительные аномалии такого типа (Jones et al, 2014).

Изменения в составе приповерхностных горных пород, такие как переходы между осадочными и магматическими породами, также порождают искажения в наблюдаемых данных. Например, в осадочных бассейнах, где слои песчаника и глины чередуются, наблюдаются значительные вариации проводимости (Chave, Jones, 2012).

Наличие подземных вод, особенно минерализованных, может существенно влиять на электрическую проводимость верхней части разреза. В районах с высокой влажностью или вблизи водоносных горизонтов наблюдаются сильные аномалии в данных МТЗ (Unsworth, 2010). Такие неоднородности часто имеют сложную форму и могут быть связаны с карстовыми процессами или зонами выветривания.

Гидротермальные системы также являются зонами распространения ЛППН. Термальные минерализованные флюиды обладают высокой электрической проводимостью, а их циркуляция внутри пород создает зоны с резкими изменениями сопротивления, которые могут быть как локальными (например, вблизи трещин и разломов), так и протяженными (например, в зонах разгрузки гидротермальных источников) (Ussher et al., 2000). Под воздействием высоких температур и химически активных флюидов породы подвергаются гидротермальному изменению, приводящему к образованию минералов с высокой проводимостью, таких как глинистые минералы (например, смектит) и сульфиды (например, пирит). Эти изменения создают контрасты в электрических свойствах пород (Cumming, Mackie, 2010). Гидротермальные системы часто связаны с разломами и зонами трещиноватости, которые служат каналами для циркуляции флюидов. Такие структуры создают линейные или сетчатые неоднородности проводимости (Heise et al., 2008). Пример влияния таких неоднородностей на псевдоразрезы кажущегося сопротивления показаны на рисунке 1.2а, где сильно искаженная область выделена желтым пунктиром. На рисунке 1.2б показан скорректированный разрез.

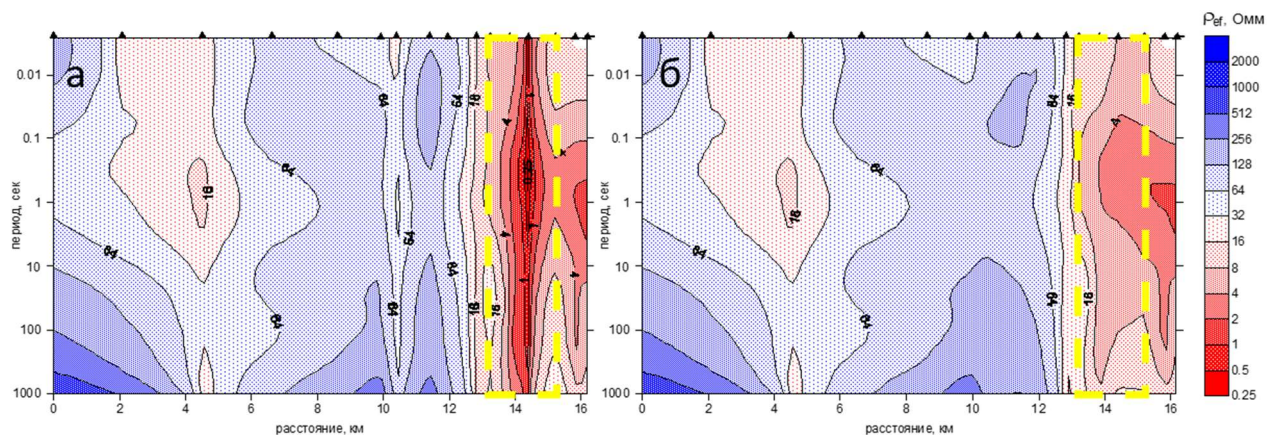


Рисунок 1.2 — Частотные псевдоразрезы эффективного кажущегося сопротивления в геотермальной зоне Травале, Италия (Пушкарев и др., 2007): а — искаженный псевдоразрез, б — скорректированный псевдоразрез.

Многолетнемерзлые породы характеризуются сложной структурой, которая формируется под влиянием климатических, геологических и гидрологических факторов. Основные причины возникновения приповерхностных неоднородностей в областях развития многолетнемерзлых пород включают переход воды из жидкого состояния в твердое (лед) и обратно, что приводит к резким изменениям электрической проводимости. Мерзлые породы, содержащие лед, обладают низкой проводимостью, тогда как талые породы или зоны с жидкой водой имеют значительно более высокую проводимость. Ледяные линзы, жилы и другие формы подземного льда создают локальные неоднородности, которые могут иметь сложную геометрию и существенно влиять на распределение электромагнитных полей (Minsley et al., 2012). Процесс образования термокарста приводит к проседанию грунта вследствие таяния подземного льда, что влечет за собой образование озер, впадин и других форм рельефа (Левков, 1980), которые создают резкие изменения в проводимости. Мерзлые породы часто имеют слоистую или сетчатую структуру, обусловленную чередованием льда и минеральных частиц, что может создавать анизотропию электрических свойств.

Рельеф горных регионов также может вызывать значительные статические смещения кривых МТЗ (Зингер, 1992). В горных регионах перепады высот и крутые склоны приводят к изменению толщины приповерхностного слоя (Chave, Smith, 1994). Там, где слой тоньше (например, на вершинах гор), проводимость может быть ниже, а там, где слой толще (например, в долинах), проводимость может быть выше. На крутых склонах и вершинах гор часто обнажаются коренные породы, которые имеют низкую проводимость. Это создает локальные аномалии, которые могут вызывать статические смещения. Рельеф влияет на распределение грунтовых вод. В долинах и у подножий гор грунтовые воды могут накапливаться, увеличивая проводимость приповерхностного слоя. На вершинах и склонах грунтовые воды могут отсутствовать, что снижает проводимость (Booker et al., 2004).

Однако не только при глубинных, но и при разведочных и даже при малоглубинных зондированиях существует проблема, связанная с ЛППН. Небольшие приповерхностные неоднородности вещественного состава могут быть вызваны различными геологическими и физико-химическими процессами. В частности, верхние слои горных пород часто подвержены выветриванию, что приводит к изменению их состава и структуры. Микроразломы и трещины могут создавать локальные аномалии проводимости, особенно если они заполнены проводящими материалами (например, глиной или водой).

Проблема влияния ЛППН существует с самого зарождения метода МТЗ, до сих пор полностью подавить их искажающий эффект не удастся. Существует ряд подходов к подавлению искажений от ЛППН. Так, нормализация направлена на коррекцию искаженных амплитудных кривых МТЗ (Бердичевский и др., 1986), методы локально-регионального разложения тензора импеданса – на выделение характеристик региональных структур, также возможна коррекция статических смещений в процессе инверсии. На рисунке 1.3 приведена классификация этих методов, а ниже они будут рассмотрены подробно.

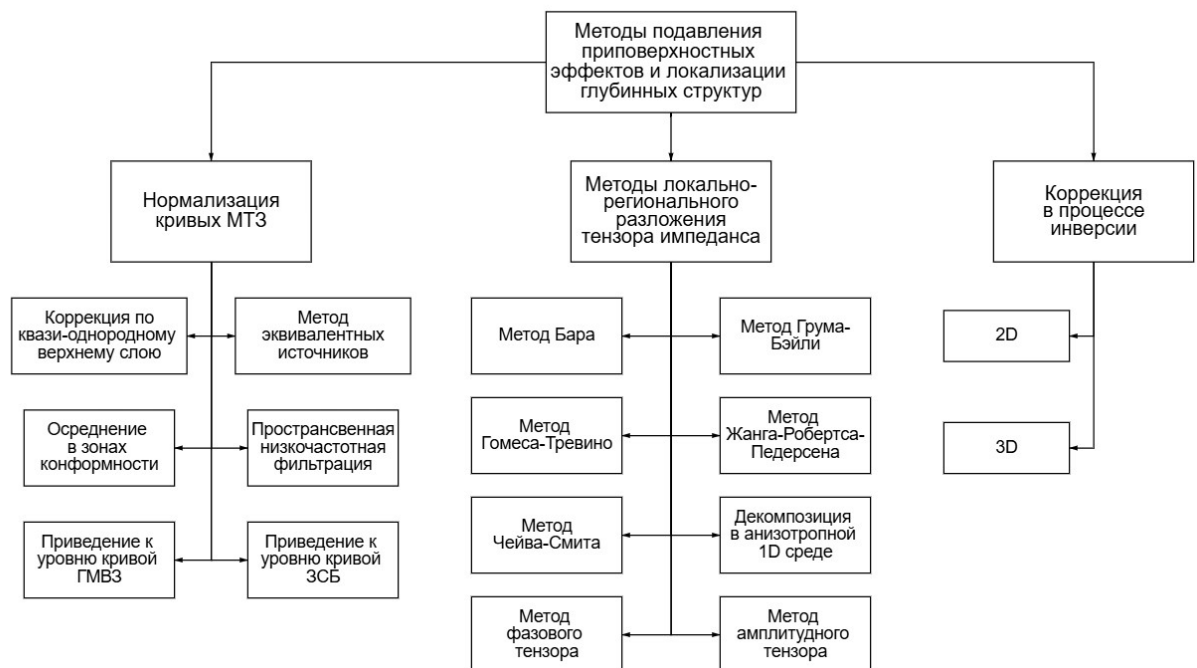


Рисунок 1.3 – Классификация методов подавления эффектов ЛППН и локализации глубинных структур.

1.2. Нормализация кривых МТЗ

1.2.1. Коррекция по квази-однородному верхнему слою

В работе (Jones, 1988) было предположено, что статические смещения кривых кажущегося сопротивления могут быть описаны коэффициентами, которые сдвигают кривые вверх или вниз. Эти коэффициенты зависят от локальных изменений проводимости вблизи поверхности и могут быть различными для разных компонент тензора импеданса.

Метод основан на предположении, что в исследуемой области существует слой, сопротивление которого можно описать с помощью простой параметрической модели. Этот слой должен быть достаточно однородным по своим свойствам, чтобы его сопротивление можно было аппроксимировать функцией, зависящей от положения вдоль профиля. Для каждой точки МТЗ определяются сопротивление слоя и глубина до его основания. Далее в каждой точке МТЗ рассчитывается коэффициент сдвига D_x (для электрического поля вдоль оси x) на основе соотношения между оценками сопротивления слоя, полученными из инверсии, и параметрической моделью сопротивления по следующей формуле:

$$D_x = \sqrt{\frac{\rho_x}{\rho_{model}}}, \quad (1.1)$$

где ρ_{model} – сопротивление слоя, описанного параметрической моделью, ρ_x – сопротивление того же слоя, полученное из инверсии. Аналогичная формула применяется для расчета параметра D_y . Далее значения кажущегося сопротивления умножаются на соответствующий коэффициент сдвига (D_x или D_y) в каждой точке наблюдения.

1.2.2. Метод эквивалентных источников

В статье (Tang et al, 2018) был предложен подход подавления гальванических искажений с использованием метода эквивалентных источников. Он основан на принципе замены реальных источников аномального поля (геологических неоднородностей) на фиктивные (эквивалентные) источники, расположенные на некоторой глубине или в определенной области. Эти эквивалентные источники создают такое же поле на поверхности наблюдения, как и реальные источники, но при этом они удобны для математического описания.

Эквивалентный источник представляется в виде горизонтального слоя, состоящего из множества маленьких прямоугольных призм, каждая из которых имеет постоянную электрическую поляризацию. Этот слой располагается на глубине, превышающей 10-кратное расстояние между точками МТЗ, чтобы разделять низкочастотные (глубинные) и высокочастотные (приповерхностные) компоненты поля. Эквивалентный слой электрической поляризации строится таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемые электрические поля на поверхности, исключая при этом приповерхностные гальванические искажения. Это достигается за счет того, что гальванические искажения имеют случайный характер и не коррелируют между точками МТЗ, то есть они могут быть отделены от полезного сигнала, который имеет более длинные пространственные частоты.

Электрическое поле на поверхности Земли, вызванное эквивалентным слоем электрической поляризации, описывается следующим образом:

$$\vec{d}^{obs} = [G]\vec{m}, \quad (1.2)$$

где $\vec{d}^{obs}$ — наблюдаемые данные, $[G]$ — матрица ядра, которая связывает электрическую поляризацию в эквивалентном слое с наблюдаемыми полями, $\vec{m}$ — вектор электрической поляризации в эквивалентном слое. Для решения этого уравнения используется метод регуляризации, который позволяет найти

оптимальную электрическую поляризацию, минимизирующую разницу между наблюдаемыми и модельными данными.

1.2.3. Осреднение кривых МТЗ в зонах конформности

В Советском Союзе М.Н. Бердичевским была предложена идея осреднения кривых МТЗ для устранения локальных искажений. В работе (Berdichevsky et al., 1980) рассмотрен Байкальский регион, который был разделен на зоны, в каждой из которых преобладают кривые определенной формы. Интерпретация проводилась в три этапа: разделение региона на зоны, усреднение кривых кажущегося сопротивления в пределах каждой зоны и интерпретация усредненных кривых. Для количественной интерпретации использовался метод дифференциальной трансформации, который позволяет построить приближенную геоэлектрическую модель литосферы. Использовались кривые эффективного импеданса Z_{eff} , определяемого как корень из определителя тензора импеданса (Berdichevsky, Dmitriev, 1976).

Позже этот подход получил применение и за рубежом. В качестве альтернативы определителю тензора импеданса в работе (Rung-Arunwan, 2016) предлагается использовать инвариантный (то есть не меняющийся при вращении системы координат) параметр Z_{ssq} , вычисляемый из компонент $[Z]$ по формуле:

$$Z_{ssq} = \sqrt{\frac{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2}{2}}. \quad (1.3)$$

На основе этого импеданса рассчитываются несколько параметров. Используется локальный индикатор искажений, который показывает наличие искажений в каждой точке МТЗ, региональный индикатор искажений, который указывает на наличие гальванических искажений в регионе, а также параметр, который оценивает статический сдвиг в каждой точке (Rung-Arunwan, 2017).

1.2.4. Нормализация с помощью низкочастотной фильтрации

Для подавления искажений, вызванных приповерхностными неоднородностями, применяется метод пространственной фильтрации, основанный на усреднении электромагнитных полей в определенной области. В работе (Berdichevsky et al, 1989) предложен статистический подход коррекции искаженных амплитудных кривых, основанный на принципе пространственной фильтрации, аналогичный тем, что используются в гравиметрии и магнитометрии для выделения регионального фона. Процедура фильтрации включает представление данных МТ зондирования в виде карт кажущегося сопротивления для различных периодов. Эти карты затем подвергаются низкочастотной фильтрации, что позволяет устранить мелкомасштабные аномалии и получить сглаженные карты, отражающие региональные закономерности.

В статье (Avdeev et al., 1990) также рассматривается пространственная фильтрация как эффективный метод подавления влияния ЛППН. Коррекция статического сдвига в работе разделена на несколько этапов: данные преобразуются из пространственной области в частотную с использованием преобразования Фурье. Это позволяет выделить пространственные частоты, соответствующие различным размерам ЛППН. Далее создается низкочастотный фильтр, который подавляет высокие пространственные частоты. Фильтр может быть задан в виде гауссовой функции или скользящего окна подходящей под тип данных формы. Пространственная фильтрация предполагает усреднение полей в пределах области, размер которой (P) определяется следующим условием:

$$P > \max\{|\lambda_0|, |\lambda_L|\}. \quad (1.4)$$

Здесь λ_0 – толщина скин-слоя, характеризующая индукционное затухание поля, λ_L – параметр, связанный с гальваническим затуханием поля:

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{T}{S^{-1} + Z_0}}, \quad (1.5)$$

где T – суммарное поперечное сопротивление глубинного разреза, S – интегральная проводимость верхнего слоя, Z_0 – импеданс Тихонова-Каньяра для глубинного разреза.

После фильтрации данных в частотной области они преобразуются обратно в пространственную область с использованием обратного преобразования Фурье. В результате получаются данные, очищенные от локальных искажений.

Выделяется несколько видов низкочастотной пространственной фильтрации (Jones, 2012), которые могут быть применены к МТ данным в зависимости от характера искажений и целей исследования.

1. Фильтры с осреднением в скользящем окне. Они обеспечивают один из самых простых видов пространственной фильтрации, работающий путем усреднения данных в пределах заданного пространственного окна, сглаживая высокочастотный шум, вызванный локальными искажениями. Этот метод эффективен для устранения гальванических искажений от ЛППН. Однако такой подход может ослабить и региональную составляющую, поэтому важно тщательно выбирать размер окна.

2. Вейвлет-преобразование представляет собой современный метод пространственной фильтрации, основанный на разложении сигнала на частотные компоненты с использованием специальных функций – вейвлетов. В результате вейвлет-преобразования сигнал декомпозируется на два типа коэффициентов: аппроксимирующие, отражающие низкочастотные компоненты (например, региональные геоэлектрические структуры), и детализирующие, соответствующие высокочастотным компонентам (например, мелкомасштабные неоднородности). В статье (Jifeng et al., 2014) авторами выполнен анализ вейвлет-коэффициентов, который позволил выделить статические смещения как резкие скачки или аномальные значения в детализирующих коэффициентах. Последующее применение обратного вейвлет-преобразования восстанавливает сигнал с устранением искажений.

1.2.5. Приведение к уровню кривой ГМВЗ

И.И. Рокитянским в книге (Рокитянский, 1971) был предложен метод, который предполагает использование глобальной или региональной кривой кажущегося сопротивления для коррекции искажений, вызванных поверхностными неоднородностями. Стандартная кривая кажущегося сопротивления строится на основе данных глобального магнитовариационного зондирования (ГМВЗ) или данных МТЗ, полученных в стабильных регионах с однородным поверхностным слоем. Эта кривая служит эталоном, с которым сравниваются наблюдаемые данные для выявления и последующей коррекции статических смещений. Если низкочастотные ветви экспериментальных МТ кривых не совпадают со стандартной кривой, это свидетельствует о наличии статических смещений, вызванных поверхностными неоднородностями. Степень искажения определяется как отношение кажущегося сопротивления экспериментальной кривой к стандартной кривой на низких частотах (Рокитянский, 1975).

Похожая методика применялась, например, в проекте CEMES (Central Europe Mantle geoElectrical Structure). Одним из ключевых аспектов этого проекта (Semenov et al, 2008) стало объединение данных магнитотеллурических и магнитовариационных измерений по сети геомагнитных обсерваторий для изучения строения верхней мантии в Центральной Европе. Важной проблемой при объединении магнитотеллурических и магнитовариационных данных является, то, что первые представляют собой тензорные величины, которые зависят от направления измерений, в то время как данные ГМВЗ - скалярные и не зависят от направления. Это создает сложности при совместной интерпретации данных, особенно в условиях горизонтально-неоднородной среды. Поэтому выбирались направления, при которых дополнительные компоненты тензора импеданса были минимальны. После объединения кривых МТЗ и ГМВЗ проводилась 1D совместная инверсия разными методами. Фазовые

кривые МТЗ получали больший вес при построении модели, так как они не подвержены влиянию статического сдвига. Затем кривая кажущегося сопротивления МТЗ сдвигалась к полученному уровню модельной кривой, как правило, совпадая с ней достаточно хорошо.

Метод Рокитянского использовался и, например, в рамках эксперимента BEAR, включавшего в себя проведение синхронных МТЗ в точках, расположенных на территории Швеции, Финляндии и России (Жамалетдинов, Петрищев, 2015). Этими авторами вначале проводилась первичная обработка, при которой создавался массив кривых эффективного кажущегося сопротивления и фазы импеданса. Затем производилась коррекция статических смещений с использованием кривой ГМВЗ. Коррекция высокочастотных ветвей кривых кажущегося сопротивления выполнялась с использованием «нормальной» кривой, полученной по результатам зондирований с контролируемыми источниками.

1.2.6. Приведение к уровню кривой ЗСБ

Поскольку искажения от ЛППН имеют гальваническую природу, одним из популярных методов борьбы с подобными искажениями является комплексирование магнитотеллурики с методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), поскольку в нем, при работе с петлевыми установками, используется индукционное возбуждение поля и измеряется его магнитная составляющая, то есть эти данные свободны от влияния гальванических эффектов. Подобная методика применяется с восьмидесятых годов прошлого века. В работе (Sternberg et al, 1988) описана коррекция статического сдвига с использованием данных ЗСБ при обработке МТ данных из Орегона. Основной проблемой данного участка был район Каскадных гор, где статический сдвиг мог достигать половины декады. Учет данных ЗСБ позволил существенно уменьшить влияние статического сдвига, в данной работе это было подтверждено данными каротажа скважин.

Комплексирование с данными ЗСБ может проводиться и при совместной инверсии с данными МТЗ. В работе (Meju, 1996) предложен метод такой инверсии, исключаящий необходимость предварительной коррекции статического сдвига. Вместо этого используется информация о фазе импеданса, которая слабо подвержена влиянию искажающих эффектов ЛППН, и данные ЗСБ. Совместная инверсия позволяет получить более точную модель геоэлектрического разреза без необходимости сдвига кривых кажущегося сопротивления по уровню.

Совместная одномерная инверсия данных МТЗ и ЗСБ также применяется в работе (Arnason et al, 2010) при исследовании геотермальных источников Исландии. Помимо совместной инверсии в работе использовалась трехмерная инверсия исключительно МТЗ для картирования глубоких проводящих зон, которые в этом районе связаны с магматическими интрузиями или зонами частичного плавления. Оба подхода дополняют друг друга. Совместная 1D инверсия ЗСБ и МТ данных обеспечила хорошее разрешение на малых и средних глубинах, но не учитывала сложные трехмерные структуры. 3D инверсия МТ-данных позволила более детально изучить глубинные структуры, включая разломы и зоны с высокой проводимостью.

Также в рамках коррекции статического сдвига возможно использование данных аэро-ЗСБ. В статье (Delhaye et al, 2017) представлен подобный подход в рамках изучения геотермальных источников в Северной Ирландии. В работе описана следующая многоэтапная методика коррекции статического сдвига.

1. Трехмерная инверсия МТ данных для получения базовой модели удельного сопротивления.
2. Данные аэро-ЗСБ моделируются как однослойная структура (полупространство) для получения кажущегося сопротивления.
3. Производится интерполяция данных аэрогеофизики: полученные значения сопротивления интерполируются для создания трехмерной модели.

4. Модель, полученная по аэро-ЗСБ, используется для решения прямой задачи МТЗ.

5. Определяются корректирующие коэффициенты для нивелирования статического сдвига путем сравнения наблюдаемых и синтетических МТ-данных.

6. На заключительном этапе производится трехмерная инверсия скорректированных данных МТЗ.

Как видно, коррекция статического сдвига с привлечением данных ЗСБ является одним из популярных методов борьбы с искажениями от ЛППН, однако далеко не во всех случаях данные этого метода доступны для использования. В работе (Rahman et al, 2022) предлагается использовать 2D электротомографию для коррекции статического сдвига. По данным электротомографии строились модели распределения сопротивлений в верхней части разреза, впоследствии по этим моделям восстанавливался истинный уровень амплитудных кривых МТЗ. Для наиболее достоверного результата необходимо, чтобы при полевых работах профили электротомографии точно совпадали с положением точек МТЗ.

1.3. Методы локально-регионального разложения

1.3.1. Методы декомпозиции тензора импеданса

Данная группа методов основана на разложении тензора импеданса $[Z]$ на составляющие, связанные с влиянием ЛППН и региональных глубинных структур.

Одной из первых работ по этой теме была статья (Larsen, 1977). В этой работе полагается, что локальные неоднородности проводимости вблизи поверхности могут быть описаны как тонкий проводящий слой, залегающий на одномерном глубинном разрезе. Этот слой вызывает статические сдвиги в кажущемся сопротивлении, которые можно устранить, если правильно оценить вклад локальных эффектов. Вводятся приповерхностные параметры A , B и C , которые представляют собой коэффициенты, описывающие влияние ЛППН на

наблюдаемое поле. Эти параметры используются для разделения эффектов, вызванных поверхностной проводимостью, от мантийного отклика, они вещественны и не зависят от частоты. A и C связаны с анизотропией поверхностной проводимости, они описывают, как ЛППН влияют на электрическое поле в разных направлениях. Параметр B связан с асимметрией поверхностной проводимости, он описывает, как ЛППН вызывают смещение или вращение электрического поля.

Параметры A , B и C вычисляются через преобразованные компоненты тензора импеданса, вычисляемые из его компонент по следующим формулам:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{Z_{xx} + Z_{yy}}{2}; & Z_2 &= \frac{Z_{xy} + Z_{yx}}{2}; \\ Z_3 &= \frac{Z_{yx} - Z_{xy}}{2}; & Z_4 &= \frac{Z_{xx} - Z_{yy}}{2}. \end{aligned}$$

Затем приповерхностные параметры находятся методом наименьших квадратов: $A = G\langle Z_1 Z_3^* \rangle$, $B = G\langle Z_2 Z_3^* \rangle$, $C = G\langle Z_4 Z_3^* \rangle$, где скобки означают усреднение данных, множитель $G = \langle Z_3 Z_3^* \rangle^{-1}$ выступает в роли нормировочного в методе наименьших квадратов, а звездочка означает комплексное сопряженное. После определения параметров A , B и C определяется Z_D - функция, описывающая мантийный отклик под поверхностным слоем:

$$Z_D = \frac{AZ_1 + BZ_2 + Z_3 + CZ_4}{1 + A^2 + B^2 + C^2}. \quad (1.6)$$

Таким образом, сначала определяются параметры A , B и C , непосредственно связанные с приповерхностными неоднородностями. Затем на их основе вычисляется функция Z_D , которая уже отражает только мантийный отклик. Очевидно, что рассмотренный подход может хорошо работать, если глубинный разрез является одномерным с соответствующим импедансом Z_D .

Фундаментальное значение имела работа (Zhang et al., 1987), в которой было предложено разделение тензора импеданса на множители, связанные с региональной и локальной составляющими. Если $[Z^S]$, $\vec{E}_t^S$, $\vec{H}_t^S$ – тензор импеданса и горизонтальные компоненты поля, отвечающие суперпозиции

региональных и локальных структур, $[Z^R]$, $\overrightarrow{E}_t^R$, $\overrightarrow{H}_t^R$ – их региональные составляющие, а $[e]$ и $[h]$ – матрицы локальных электрических и магнитных искажений (Бердичевский, Дмитриев, 2009), то:

$$\overrightarrow{E}_t^S = [e]\overrightarrow{E}_t^R = [e][Z^R]\overrightarrow{H}_t^R = [e][Z^R][h]^{-1}\overrightarrow{H}_t^S = [Z^S]\overrightarrow{H}_t^S,$$

откуда

$$[Z^S] = [e][Z^R][h]^{-1}. \quad (1.7)$$

Задача состоит в том, чтобы выделить региональную составляющую $[Z^R]$. Если предположить, что ЛППН сосредоточены в тонком слое и частота настолько мала, что электрические искажения имеют гальванический характер, не затрагивая фазы, а магнитными искажениями можно пренебречь, то последняя формула упрощается:

$$[Z^S] = [e][Z^R], \quad (1.8)$$

где матрица $[e]$ является вещественно-значной и независимой от частоты. В качестве критерия применимости модели, в которой справедливо это разложение, а региональная среда является двухмерной (или осесимметричной), в работе (Bahr, 1991) была предложена близость к нулю параметра, который позже был назван параметром асимметрии Бара:

$$skew_B = \frac{\sqrt{|Im(ZxyZyy^* + ZxxZyx^*)|}}{|Zxy - Zyx|}, \quad (1.9)$$

где звездочка означает комплексно-сопряженную величину.

В той же работе (Bahr, 1988) был предложен метод, известный сейчас как метод Бара. В нем оценивается азимут простираения региональных структур (с точностью до 90°):

$$\alpha_R = \frac{1}{2} \arctg \frac{Im(ZyxZxx^* + ZxyZyy^*)}{Im(ZxxZyy^* + ZxyZyx^*)}. \quad (1.10)$$

Далее, поворачивая систему координат, можно перейти к направлениям α_R и $\alpha_R + 90^\circ$ и получить отвечающие им импедансы Z_1 и Z_2 . В региональной 2D среде один из них будет продольным, а второй – поперечным по отношению к структурам. В осесимметричной среде один будет отвечать азимутальному,

другой – радиальному направлению, а амплитуды $|Z_1|$ и $|Z_2|$ будут по-прежнему подвержены статическим смещениям. На рисунке 1.46 показаны главные направления PD_E и PD_B тензора импеданса, полученные в точках профиля III-III, отмеченного на рисунке 1.4а красным цветом. Направления PD_E определены методом Эггерса, они отражают суммарный эффект как локальных, так и региональных неоднородностей. Они хаотично меняются вдоль профиля. Направления PD_B определены с помощью разложения Бара, свободного от влияния локальных приповерхностных неоднородностей. Эти направления отражают широтное и меридиональное направления.

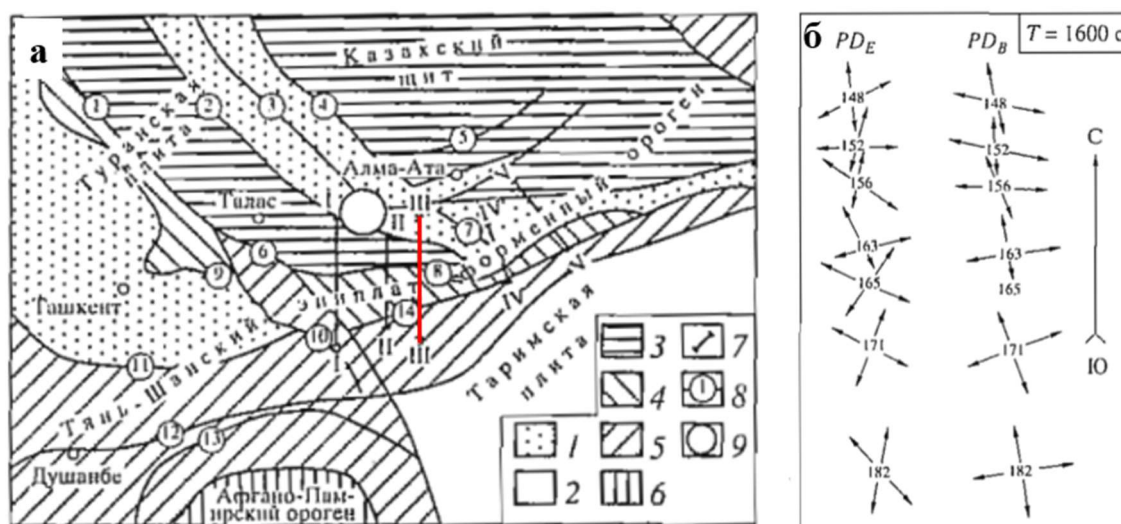


Рисунок 1.4 — Результаты определения главных направлений на Тянь-Шане (Трапезников и др., 1997): а – карта тектонического районирования Тянь-Шаня и сопредельных территорий, профиль III-III выделен красным цветом; б – главные направления импеданса, определенные на профиле III-III методом Эггерса (PD_E) и методом Бара (PD_B).

В случае, если фазы импедансов $\arg(Z_1)$ и $\arg(Z_2)$ близки (например, региональный разрез горизонтально-однороден), метод Бара работает неустойчиво. Поэтому в дополнение к условию малости $skew_B$ был предложен дополнительный критерий применимости метода Бара - параметр Δ , определяемый по разности фаз (Бердичевский и Дмитриев, 2009):

$$\Delta = |\arg(Z_1) - \arg(Z_2)|. \quad (1.11)$$

Другой метод декомпозиции был предложен в работе (Groom, Bailey, 1989). В методе Грума-Бэйли используются в целом те же допущения, что и в методе Бара. Здесь также подразумевается наличие 2D региональной структуры и 3D поверхностных локальных неоднородностей. Матрица $[e]$ в нем представлена как произведение масштабного коэффициента g и трех матриц, отвечающих за искажения $[Z]$, аналогичные эффектам кручения $[T]$, сдвига $[S]$ и анизотропии $[A]$:

$$[e] = g[T][S][A]. \quad (1.12)$$

Простирание региональных структур и другие параметры оцениваются в методе Грума-Бэйли методом наименьших квадратов (Groom, Bailey, 1991).

В классическом варианте метода Грума-Бэйли параметры искажения и региональное направление определяются для каждой частоты и точки МТЗ отдельно, что дает неустойчивый результат. В работе (McNeice, Jones, 2001) авторы предлагают расширение метода, при котором параметры искажения и региональное направление определяются с помощью многочастотной и многоточечной схемы.

Рассмотрим относительно новый подход, представленный в работе (Gómez-Treviño et al, 2013), основанный на аналитическом решении квадратного уравнения. Основная идея заключается в использовании инвариантов тензора импеданса, которые обладают устойчивостью к некоторым типам искажений, описанным в методе Грума-Бэйли. В статье используется три таких инварианта:

- 1) $Z_{eff} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}}$ — эффективный импеданс;
- 2) $Z_s = \sqrt{\frac{Z_{xx}^2 + Z_{yy}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2}{2}}$ — последовательный импеданс (Szarka, Menville, 1997);
- 3) $Z_p = 2 \frac{(Z_{xy}Z_{yx} - Z_{xx}Z_{yy})^2}{Z_{xx}^2 + Z_{yy}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2}$ — параллельный импеданс (Romo et al., 2005).

На основе параллельного и последовательного импеданса выводится квадратное уравнение (Gómez-Treviño et al, 2014):

$$\rho_{\pm}^2 - 2\rho_s\rho_{\pm} + \rho_s\rho_p = 0, \quad (1.13)$$

где ρ_s и ρ_p — это комплексные кажущиеся сопротивления, вычисленные из последовательного и параллельного импедансов соответственно, а $\rho_{\pm}$ — искомое неискаженное кажущееся сопротивление для 2D среды. Это квадратное уравнение имеет два решения:

$$\rho_{\pm} = \rho_s \pm \sqrt{\rho_s^2 - \rho_s\rho_p}. \quad (1.14)$$

Кажущиеся сопротивления ρ_+ и ρ_- свободны от гальванических искажений кручения и сдвига и их можно интерпретировать как данные для двух поляризаций поля в 2D среде.

В отличие от рассмотренных выше методов локально-регионального разложения, в методе Жанга-Робертса-Педерсена (Zhang et al., 1987, Zhang et al., 1992) полагается, что над двухмерной региональной структурой R расположена двухмерная (а не трехмерная) локальная приповерхностная неоднородность L . Углы простирания региональной и локальной структуры обозначаются a_R и a_L соответственно. В региональной системе координат оси x и y направлены вдоль и поперек региональной структуры, соответственно тензор регионального импеданса $[Z^R]$ будет антидиагональным. Для перехода к локальной системе координат $[Z^L]$ поворачивают по часовой стрелке на угол $\Delta a = a_L - a_R$. В таком случае тензор локальных электрических искажений $[e]$ будет диагональным. Метод дает возможность, после перехода к локальной системе координат и некоторых преобразований, определить простирание локальной структуры:

$$a = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\text{Im}Z_{xx}Z_{yy}^*}{\text{Im}(Z_{xy} + Z_{yx})(Z_{xx}^* + Z_{yy}^*)} = \begin{cases} a_L \\ a_L + \frac{\pi}{2} \end{cases}. \quad (1.15)$$

В рассмотренных методах полагалось, что вектором магнитных искажений из разложения тензора импеданса $[Z^S] = [e][Z^R][h^{-1}]$ можно пренебречь. Метод Чейва-Смита (Chave, Smith, 1994) учитывает влияние и локальных магнитных аномалий. В нем используется дополненное матрицей магнитных искажений уравнение из метода Грума-Бэйли:

$$[Z^S] = g[T][S][A][Z^R][h]^{-1}. \quad (1.16)$$

При решении этой задачи получается недоопределенная система уравнений, которую можно решить на множестве частот (полагая независимость искомых параметров от частоты). В итоге определяется азимут регионального простирания, а также локальные углы кручения и сдвига (Chave, Jones, 1997).

В статье (Dai et al., 2025) представлен метод декомпозиции тензора импеданса в одномерных (1-D) электрически анизотропных средах с учетом как электрических, так и магнитных гальванических искажений. Для получения региональных и локальных параметров авторы используют модифицированный алгоритм оптимизации Бroyдена–Флетчера–Гольдфарба–Шанно (BFGS) в сочетании с анализом фазового тензора (см. ниже) и методом доверительной области. Тесты на использованных в работе как синтетических, так и полевых данных показывают, что включение магнитного гальванического эффекта в традиционную схему декомпозиции эффективно, особенно в присутствии электрической анизотропии в локальных неоднородностях проводимости и региональном фоне.

1.3.2. Метод фазового тензора

Этот метод был предложен в работе (Caldwell et al., 2004). Его отличием и сильной стороной является отсутствие требования к двумерности регионального разреза.

Для расчета фазового тензора следует записать полученную выше формулу декомпозиции $[Z^S] = [e][Z^R]$ отдельно для вещественных и мнимых частей:

$$[ReZ^S] = [e][ReZ^R], \quad [ImZ^S] = [e][ImZ^R].$$

Далее вводится вещественно-значный фазовый тензор:

$$[\Phi] = [ImZ^S][ReZ^S]^{-1} = [e][ImZ^R][e][ReZ^R]^{-1} = [ImZ^R][ReZ^R]^{-1} = \begin{bmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{bmatrix}. \quad (1.17)$$

Как видно, он связан только с региональным импедансом, и не подвержен влиянию ЛППН (Bibby et al., 2005).

В одномерной среде фазовый тензор приобретает вид:

$$[\Phi^{1D}] = \begin{bmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{tg} \arg Z^N & 0 \\ 0 & \operatorname{tg} \arg Z^N \end{bmatrix}. \quad (1.18)$$

В двумерной среде, если y – ось однородности среды:

$$[\Phi^{2D}] = \begin{bmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{tg} \arg Z^{\parallel} & 0 \\ 0 & \operatorname{tg} \arg Z^{\perp} \end{bmatrix}. \quad (1.19)$$

По фазовому тензору можно определить азимут простирания региональных двумерных структур α (с точностью до 90°), причем (Бердичевский и Дмитриев, 2009):

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\Phi_{xy} + \Phi_{yx}}{\Phi_{xx} - \Phi_{yy}} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(Z_{yx}Z_{xx}^* + Z_{xy}Z_{yy}^*)}{\operatorname{Im}(Z_{xx}Z_{yy}^* + Z_{xy}Z_{yx}^*)}. \quad (1.20)$$

То есть, в случае когда региональный разрез является двумерным, метод фазового тензора дает тот же результат, что и метод Бара.

Также в методе фазового тензора вводится инвариантный параметр β , который характеризует региональную асимметрию среды:

$$\beta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\Phi_{xy} - \Phi_{yx}}{\Phi_{xx} + \Phi_{yy}}. \quad (1.21)$$

Параметр β является аналогом $skew_B$, его величина тем больше, чем сильнее региональные трехмерные эффекты. С его помощью можно определить главные направления фазового тензора:

$$\alpha_1 = \alpha - \beta, \quad \alpha_2 = \alpha_1 + 90^\circ.$$

Стоит отметить, что в трехмерных средах $\beta \neq 0$, и азимутальные углы α_1 и α_2 будут отличаться от азимутального угла α , определяемого методом Бара.

1.3.3. Метод амплитудного тензора

Как было сказано выше, фазовый тензор не зависит от гальванических приповерхностных искажений, но и не содержит информации об амплитуде импеданса, что ограничивает его применение. Поэтому в работе (Neukirch et al, 2017) был предложен метод декомпозиции тензора импеданса на фазовый тензор и амплитудный тензор. Такой подход позволяет учитывать как фазовую, так и амплитудную информацию.

Вещественный амплитудный тензор $[P]$ вводится как математический объект, который содержит информацию об амплитуде импеданса и является независимым от фазового тензора $[\Phi]$. Он связан с тензором импеданса $[Z^S]$ через функцию фазового тензора $e([\Phi])$ (Neukirch et al, 2020):

$$[Z^S] = [P]e([\Phi]), (1.22)$$

$$e([\Phi]) = \left(\sqrt{([I] + [\Phi][\Phi]^T)} \right)^{-1} + i \left(\sqrt{([I] + [\Phi][\Phi]^T)} \right)^{-1} [\Phi], (1.23)$$

где $[I]$ – единичная матрица 2×2 , i – мнимая единица.

Амплитудный и фазовый тензоры содержат различную информацию, что делает их взаимодополняющими и позволяет использовать амплитудный тензор для улучшения интерпретации данных фазового тензора. Амплитудный тензор содержит информацию как о приповерхностных гальванических, так и об индукционных эффектах, в то время как фазовый – преимущественно об индукционных. Таким образом, для чисто индукционного отклика параметры амплитудного и фазового тензоров (параметр асимметрии, азимут простирания и параметр анизотропии) должны быть схожими. То есть разница между этими параметрами может быть использована как индикатор наличия гальванических искажений. Для определения элементов матрицы искажений минимизируется разница между параметрами амплитудного и фазового тензоров, задаваемая в виде целевой функции:

$$f(C) = \ln|\varphi_P W_\varphi \varphi_P^*| + \ln|d W_\varphi d^*| + \ln|\Gamma W_\theta \Gamma^*| + |\ln(A_\Phi W_\alpha A_\Phi^*) - \ln(A_P W_\alpha A_P^*)|, (1.24)$$

куда входят следующие векторы с компонентами, отвечающими разным частотам:

- φ_P – нормализованный параметр асимметрии амплитудного тензора;
- d – разница параметров асимметрии амплитудного и фазового тензоров;
- Γ – разница азимутов простирания амплитудного и фазового тензоров;
- A_P и A_Φ – логарифмическая анизотропия амплитудного тензора и анизотропия фазового тензора;

– W_φ , W_θ и W_α – весовые матрицы, учитывающие дисперсию параметров фазового тензора.

Применение алгоритма для поиска оптимальных параметров искажений, которые минимизируют разницу между параметрами амплитудного и фазового тензоров, позволяет анализировать гальванические искажения без предположения о 2D-региональном импедансе, что делает его применимым для 3D-сред (Neukirch et al, 2017).

1.4. Другие способы борьбы с влиянием ЛППН

В работе Куниля, Ле Моэля и Менвиля (Counil et al, 1986) предложена идея минимизации влияния ЛППН на магнитотеллурические данные за счет определения инвариантных направлений магнитного поля, в которых электрическое поле, индуцированное этим магнитным полем, достигает своих экстремальных значений. Вдоль этих направлений достигается максимальная корреляция электрического и магнитного полей, причем последнее свободно от влияния приповерхностных неоднородностей. Далее для этих направлений рассчитываются импедансы максимума и минимума индукции. В случае двухмерной геоэлектрической среды эти импедансы соответствуют классическим продольному и поперечному импедансам. Их фазы в этом случае свободны от искажающего влияния мелких неоднородностей в верхней части разреза. Это позволяет избегать искажений при квазидвумерном верхнем этаже и определять параметры нижнего этажа (Белявский, 2020).

Учет статического сдвига амплитудных кривых также возможен в процессе инверсии данных. В работе (Siripunvaraporn, Egbert, 2000) статические сдвиги включаются в процесс 2D инверсии как дополнительные определяемые параметры в алгоритме REBOCC (Reduced Basis Occam's Inversion). В работе (Sasaki, Meju, 2006) продемонстрирована 3D-инверсия МТ-данных, которая позволяет одновременно восстанавливать распределение удельного сопротивления и параметры статического сдвига. Этот метод основан на

минимизации целевой функции, которая включает в себя три компонента: невязку данных, сглаживающий стабилизатор и ограничение на параметры статического сдвига. Математически задача формулируется как минимизация представленного ниже функционала:

$$U = Q + \alpha^2 R + \beta^2 S, \quad (1.25)$$

где Q – невязка модельных и наблюдаемых данных, R – мера гладкости модели, S – ограничения, наложенные на параметры статического сдвига, а α и β – параметры регуляризации. Как и в случае с применением декомпозиции и низкочастотной фильтрации, такой подход не требует дополнительных данных, например, метода ЗСБ, что делает его более практичным для полевых исследований. В работе (Avdeeva et al, 2015) описан процесс инверсии с учетом полной частотно-независимой матрицы искажений. В этом методе минимизируемый функционал включает как параметры геоэлектрической модели, так и элементы матрицы искажений.

В последнее время появляются работы, посвященные инверсии данных МТЗ с использованием методов машинного обучения. Например, в работе (Zhou et al, 2023) для подавления статического сдвига предложено использовать нейронную сеть, которая обучается на синтетических данных. Создаются геоэлектрические модели на основе априорных данных об исследуемой области. Затем добавляется статический сдвиг, который моделируется как случайное смещение кривых кажущегося сопротивления. Нейронная сеть SCNet (Static Shift Correction Network) обучается на этих синтетических данных, чтобы установить соответствие между искаженными и исходными данными. После обучения SCNet может автоматически удалять статический сдвиг из новых МТ-данных.

1.5. Выводы

Данные МТЗ часто искажаются локальными приповерхностными неоднородностями. Эти искажения, вызывающие статические сдвиги амплитудных кривых МТЗ, затрудняют интерпретацию данных. Для борьбы с

искажениями, вызванными ЛППН, разработаны различные подходы. Нормализация кривых МТЗ, включая статистическое осреднение и низкочастотную фильтрацию, помогает скорректировать искаженные кривые. Методы декомпозиции тензора импеданса, такие как подходы Бара, Грума-Бэйли и фазового тензора, позволяют разделить локальные и региональные эффекты для определения характеристик глубинных структур. Несмотря на прогресс, проблема искажений остается актуальной, особенно в сложных геологических условиях.

ГЛАВА 2. ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ С НЕОДНОРОДНЫМ ВЕРХНИМ СЛОЕМ И АНАЛИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ МТ ДАННЫХ²

2.1. Геоэлектрическая модель

Геоэлектрическая модель включает в себя фоновый слоистый разрез, глубинную трехмерную неоднородность, а также приповерхностный слой. В первом варианте модели этот слой является однородным, а во втором варианте – содержит в себе множество трехмерных ЛППН. Фоновый разрез состоит из трех слоев, имитирующих проводящий осадочный чехол, высокоомную литосферу и проводящую мантию. Глубинная неоднородность представляет собой проводящую впадину под осадочным чехлом.

Для создания глубинной модели была использована программа 2D моделирования IGF_MT2D (Новожинский, Пушкарев, 2001), обладающая удобным интерфейсом для построения геоэлектрических моделей. Затем вручную проводилось ограничение проводящей впадины по простираанию и превращение модели в трехмерную.

Начальная 2D модель состояла из 42 вертикальных ячеек и 59 горизонтальных ячеек. Размеры этих ячеек были подобраны следующим образом: по оси Z – 10 метров, 15 метров, 25 метров, 3 ячейки по 50 метров, 10 ячеек по 100 метров, 10 ячеек по 200 метров, 4 ячейки по 500 метров, по одной ячейке размером в 1, 2 и 5 км, 7 ячеек по 10 км, одна ячейка в 20 км и одна в 50 км. По горизонтальной оси был подобран следующий набор ячеек: 2 по 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1 км, а также 45 ячеек по 0.5 км. В центре модели расположены ячейки по 0.5 км, по краям их размер увеличивается симметрично в обе стороны. Фоновый разрез состоит из трех слоев: осадочного - до глубины 1 км с удельным

² При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Суконкин М.А., Пушкарев П.Ю. Анализ синтетических магнитотеллурических данных, рассчитанных для геоэлектрической модели с приповерхностными неоднородностями // Геофизика. — 2023. — № 6. — С. 65-69. EDN: [GVVAUW](#) (1,5 п.л, вклад автора 60%), Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ).

электрическим сопротивлением (УЭС) 10 Ом·м; литосферы - до 73 км с УЭС 1000 Ом·м; верхней мантии с УЭС 100 Ом·м. В верхней части второго слоя расположена проводящая впадина шириной 7 км (14 ячеек) и мощностью 2 км (рисунок 2.1).

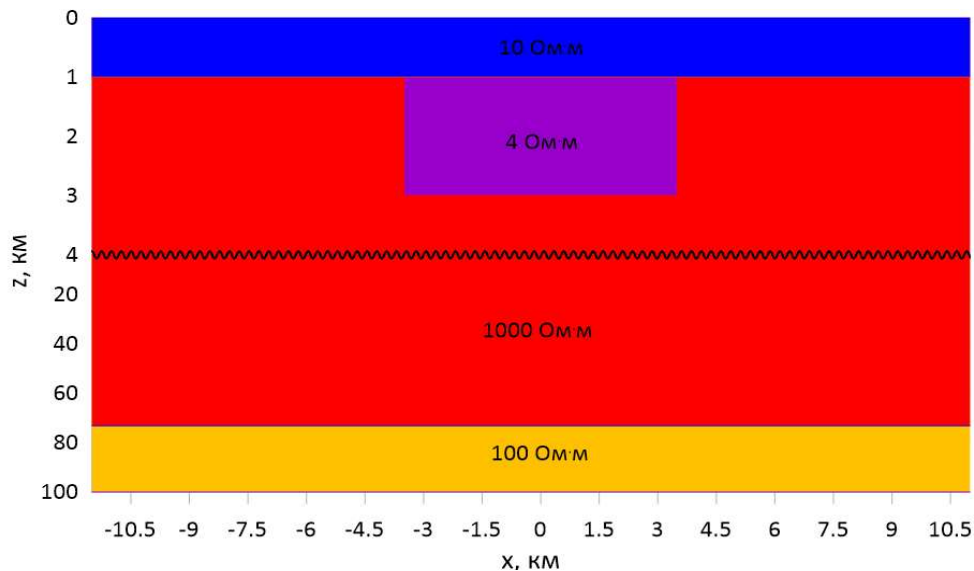


Рисунок 2.1 — Разрез геоэлектрической модели.

Из программы IGF_MT2D модель среды была экспортирована в файл формата программы 3D моделирования MT3DFwd (Mackie, Madden, 1997), при этом сетка по оси простирания Y была сформирована такая же, как по оси X . Таким образом, сетка для 3D модели составила 59 ячеек по осям X и Y , а также 42 по оси Z . Модель была вручную скорректирована так, чтобы проводящая впадина в плане стала прямоугольной, состоящей из 14 ячеек по оси X (7 км) и 21 ячейки по оси Y (10.5 км), как показано на рисунке 2.2.

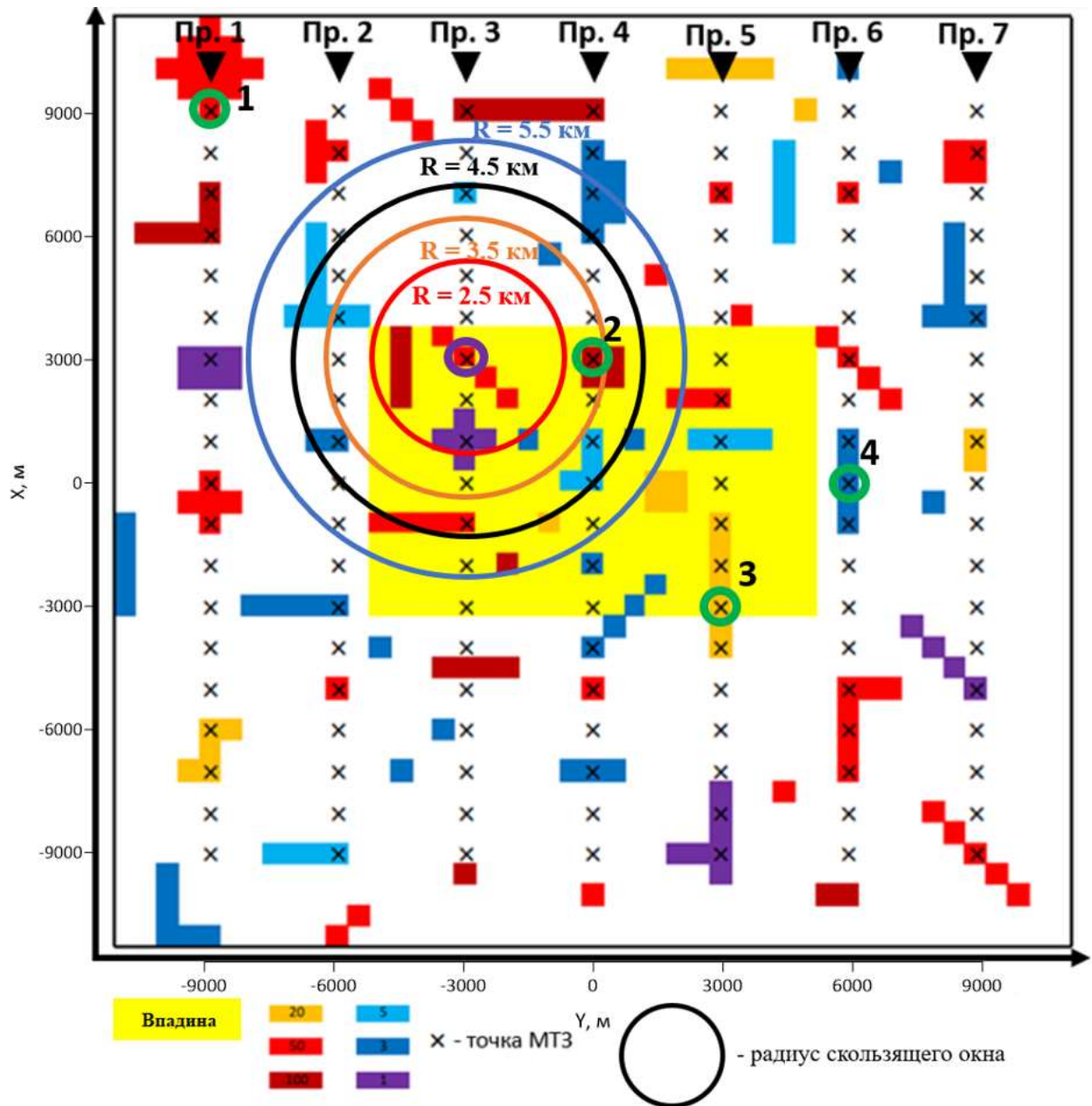


Рисунок 2.2 — Карта верхнего слоя модели, содержащего ЛППН.

Фоновое значение УЭС – 10 Ом·м, УЭС ЛППН меняются от 1 до 100 Ом·м.

Желтым прямоугольником показано положение глубинной проводящей структуры. Крестики – точки МТЗ. Треугольниками обозначено направление профилей. Зелеными кружками обведены точки, данные которых представлены на следующих рисунках, а фиолетовым – точка, в которой проводился анализ нормализованных данных в 5 главе. Тонкими кругами обозначены радиусы скользящего окна, в котором проводилась пространственная фильтрация.

Для оценки приповерхностных искажений, помимо варианта модели с однородным верхним слоем, был создан вариант с ЛППН, распределение которых отображено на рисунке 2.2. Эти неоднородности были помещены в верхние две ячейки модели, размером по оси Z 10 и 15 м, то есть в слой мощностью 25 метров. Значения УЭС неоднородностей варьируются от 1 Ом·м до 100 Ом·м, при фоновом УЭС верхнего слоя 10 Ом·м.

Для добавления слоя с ЛППН в геоэлектрическую модель была применена программа GMC (Geophysical Models Creator), написанная автором работы совместно с профессором Пушкаревым Павлом Юрьевичем и аспирантом Поповым Даниилом Денисовичем (Пушкарев и др., 2024). Эта программа предназначена для построения трехмерных геофизических моделей, т.е. распределения электропроводности в земле на определенной площади и до определенной глубины. Программа позволяет автоматически создавать распределение свойств на основе имеющихся карт глубин, значений свойств слоев/блоков и прочих параметров. Для данной работы в качестве входных данных для нее использовались файл с 3D моделью в формате программы MT3DFwd (Mackie and Madden, 1997) и файл с картой значений УЭС верхнего неоднородного слоя. В последнем файле также указываются размеры этого слоя и число ячеек по вертикали, которое он занимает. В данной работе карта представляет собой квадрат 22.5 км на 22.5 км (45x45 ячеек), слой занимает верхние 25 м модели. В выходном файле программы GMC содержится та же глубинная модель с добавленным неоднородным верхним слоем.

Для решения прямой 3D задачи для вариантов модели с однородным и неоднородным верхним слоем применялась программа MT3DFwd. Были использованы 15 периодов от 0.1 с до 5000 с. Результатом расчетов были значения компонент электрического и магнитного поля на поверхности модели для двух поляризаций поля.

Для расчета компонент МТ матриц $[Z]$, $[U]$, $[M]$, $[T]$ была задействована программа MTDA (Magnetotelluric Data Analysis), написанная теми же авторами

в системе MATLAB (Пушкарев и др., 2024). Здесь $[Z]$ – тензор импеданса, $[I]$ – матрица Визе-Паркинсона, $[M]$ – горизонтальный магнитный тензор, $[T]$ – теллурический тензор. В программе реализованы: методы вычисления инвариантов магнитотеллурических матриц, в том числе устойчивых к влиянию приповерхностных неоднородностей; возможность зашумления данных для проведения различных экспериментов; подготовка данных к визуализации в виде кривых зондирования, частотных разрезов, карт на выбранной частоте и полярных диаграмм; сохранение в форматы, используемые другими геофизическими программами.

2.2. Анализ эффективного импеданса

В работе будут сравниваться МТ данные, полученные для моделей с однородным и неоднородным верхним слоем. В этой главе будут рассмотрены инвариантные характеристики МТ матриц, то есть такие, которые не меняются при повороте системы координат. Для тензора $[Z]$ важным инвариантом является эффективный импеданс:

$$Z_{eff} = \sqrt{Z_{xx} \cdot Z_{yy} - Z_{xy} \cdot Z_{yx}}. \quad (2.1)$$

Его модуль может быть пересчитан в эффективное кажущееся сопротивление $\rho_{eff} = 0.2 \cdot T \cdot |Z_{eff}|^2$, где T – период вариаций МТ поля.

Оценить влияние ЛППН можно, рассчитав коэффициент смещения кривых для каждой точки зондирования. Для этого на достаточно длинном периоде (в представленном исследовании это 10 с) берется отношение кажущегося сопротивления, рассчитанного для модели с ЛППН, к кажущемуся сопротивлению, полученному для модели с однородным верхним слоем. Если коэффициент примерно равен 1, то в данной точке статического смещения не наблюдается, если больше – то точка находится на высокоомной неоднородности (такие аномалии далее в работе будут именоваться «положительными»), если меньше – то, соответственно, на проводящей (рядом с неоднородностями может наблюдаться обратный эффект), такие аномалии далее в работе будут

именоваться, соответственно, «отрицательными». На рисунке 2.3 представлены гистограммы распределения таких коэффициентов, рассчитанных для эффективного кажущегося сопротивления ρ_{eff} (черный цвет), а также для компонент ρ_{xy} (красный цвет) и ρ_{yx} (синий цвет). Центральные столбики соответствуют точкам МТЗ вне ЛППН, в остальном для всех трех компонент наблюдается почти равномерное распределение относительно единицы.

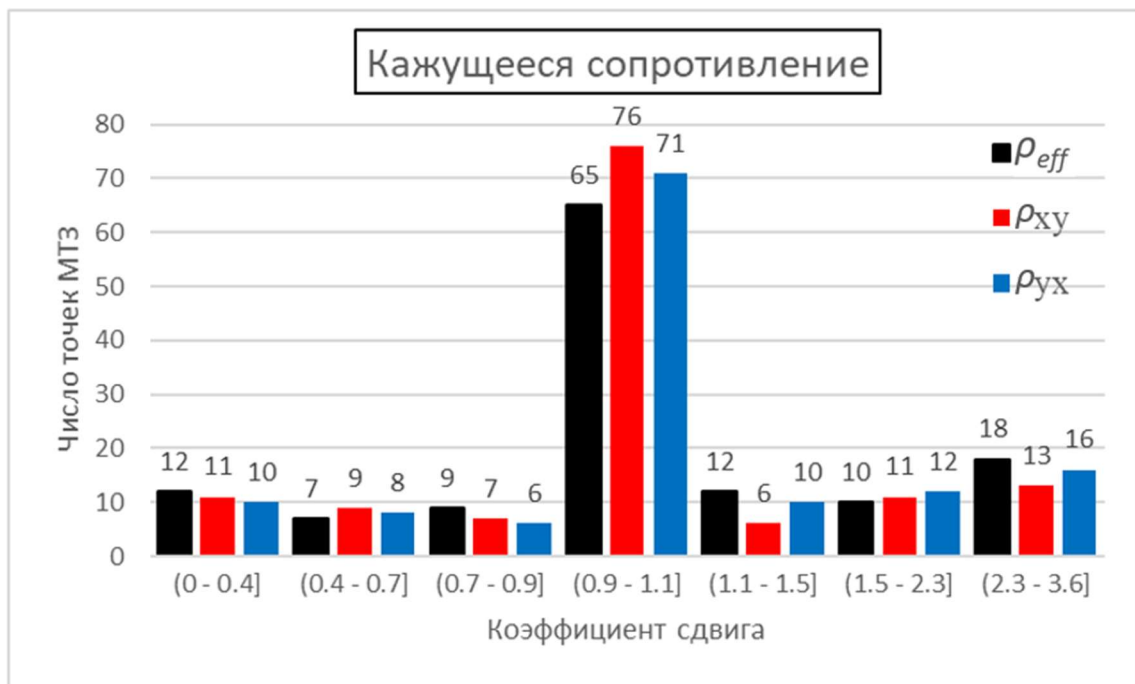


Рисунок 2.3 — Гистограммы распределения коэффициентов сдвига: черный цвет — ρ_{eff} , красный цвет — ρ_{xy} , синий цвет — ρ_{yx} , период 10 с.

На рисунке 2.4 приведена карта коэффициента сдвига кривых ρ_{eff} . Сравнивая ее с рисунком 2.2, можно наглядно увидеть влияние разных ЛППН на МТ данные.

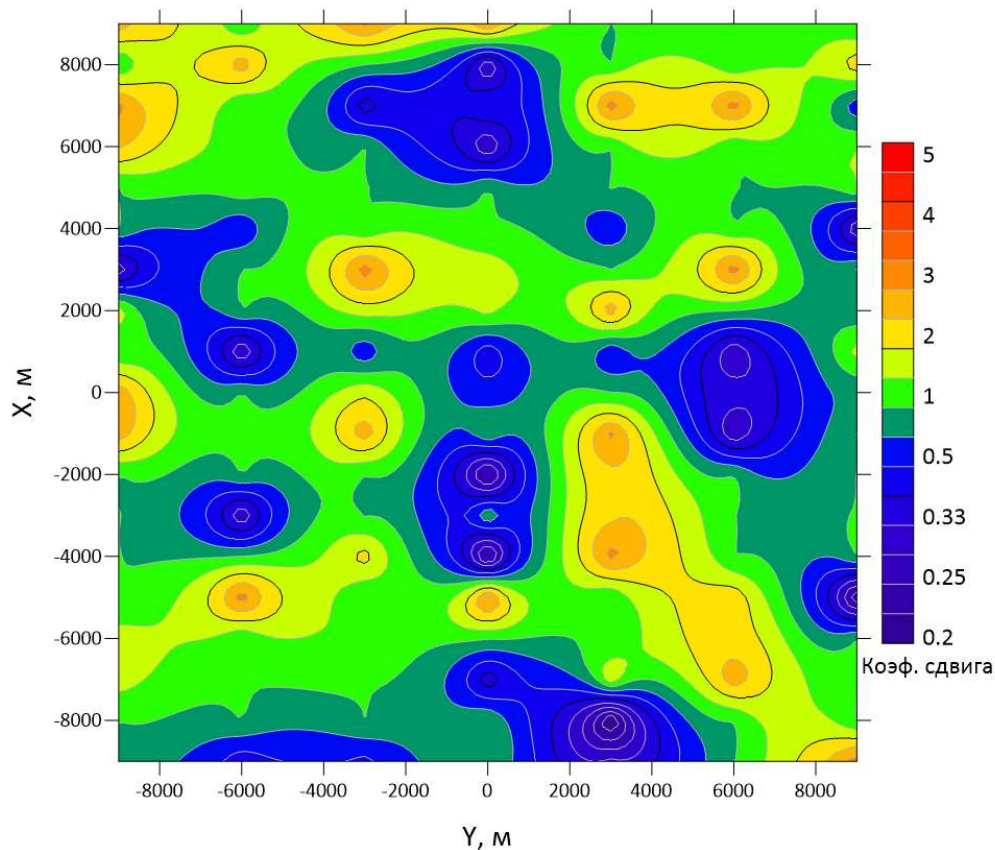


Рисунок 2.4 — Карта коэффициента сдвига кривых ρ_{eff} , период 10 с.

На рисунках 2.5 и 2.6 представлены кривые эффективного кажущегося сопротивления и фазы эффективного импеданса, полученные в точках, обведенных кружками на карте (рисунок 2.2). Как уже упоминалось ранее, под влиянием аномального поля, связанного с ЛППН, происходит статический сдвиг кривых кажущегося сопротивления, а фазовые кривые остаются неизменными. На рисунке 2.5 а,б изображены кривые МТЗ в точке 1 над изометричной высокоомной ЛППН сопротивлением в 50 Ом·м, здесь кривая кажущегося сопротивления смещается вверх (по сравнению с результатами для модели с однородным приповерхностным слоем). На рисунке 2.5 в,г показаны кривые также над высокоомной ЛППН сопротивлением в 100 Ом·м, но меньших размеров. В этом случае кривая кажущегося сопротивления также смещается вверх, но не так сильно.

На рисунке 2.6 а,б продемонстрированы кривые над еще одной высокоомной неоднородностью с сопротивлением 20 Ом·м. В этом случае искажающий эффект закономерно становится еще слабее в сравнении с предыдущими точками. На рисунке 2.6 в,г показаны кривые уже над проводящей ЛППН (точка 4), в этом случае, соответственно, кривая кажущегося сопротивления смещается вниз. Если точка наблюдения располагается рядом с приповерхностной неоднородностью, искажающий эффект проявляется слабее и полностью затухает при удалении от ЛППН.

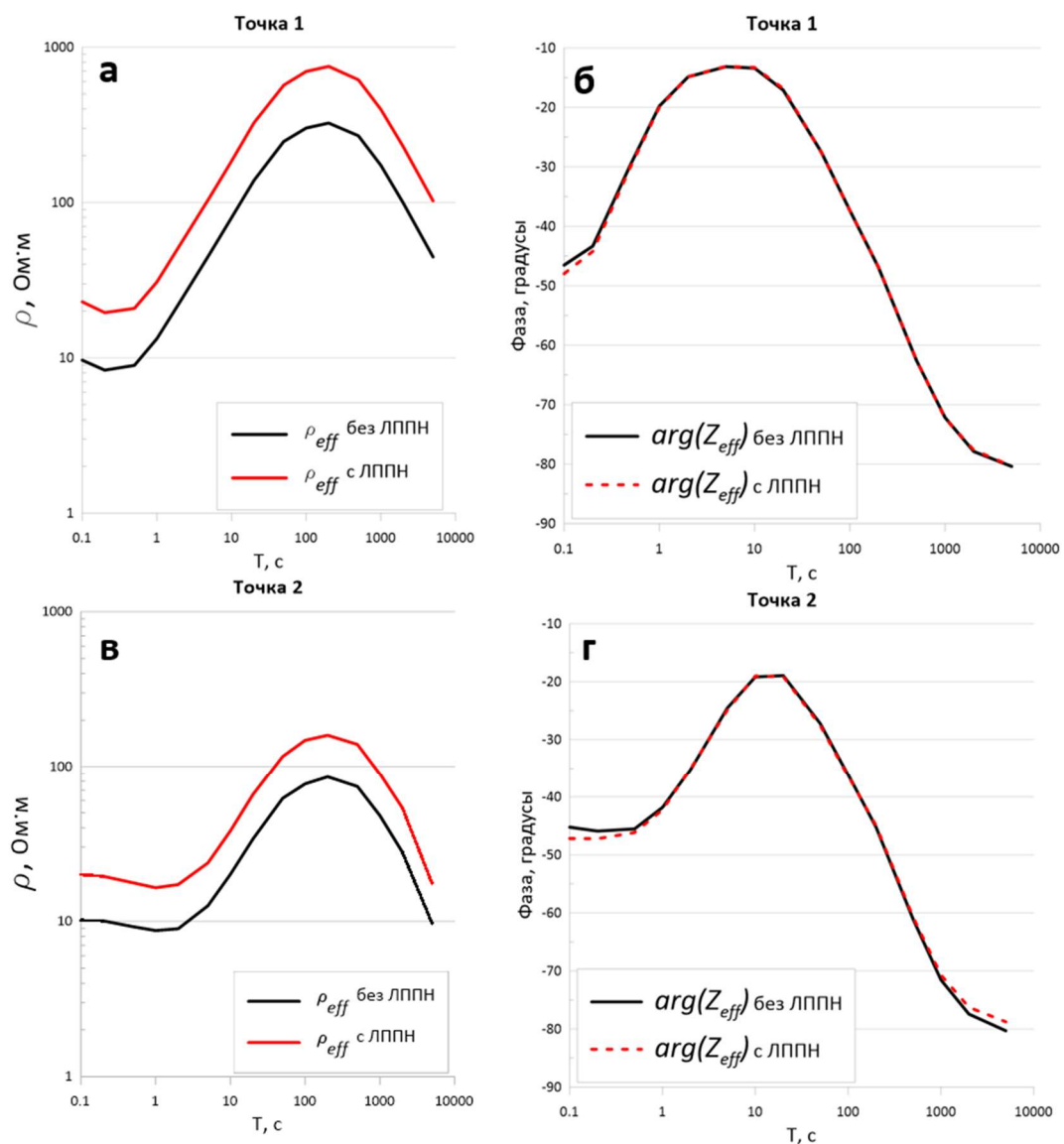


Рисунок 2.5 — Кривые эффективного кажущегося сопротивления (а, в) и фазы эффективного импеданса (б, г). Вверху (а, б) – точка 1 над высокоомной ЛППН (50 Ом·м), внизу (в, г) – точка 2 над высокоомной ЛППН (100 Ом·м).

На рисунке 2.5 в,г показаны кривые также над высокоомной ЛППН сопротивлением в 100 Ом·м, но меньших размеров. В этом случае кривая кажущегося сопротивления также смещается вверх, но не так сильно.

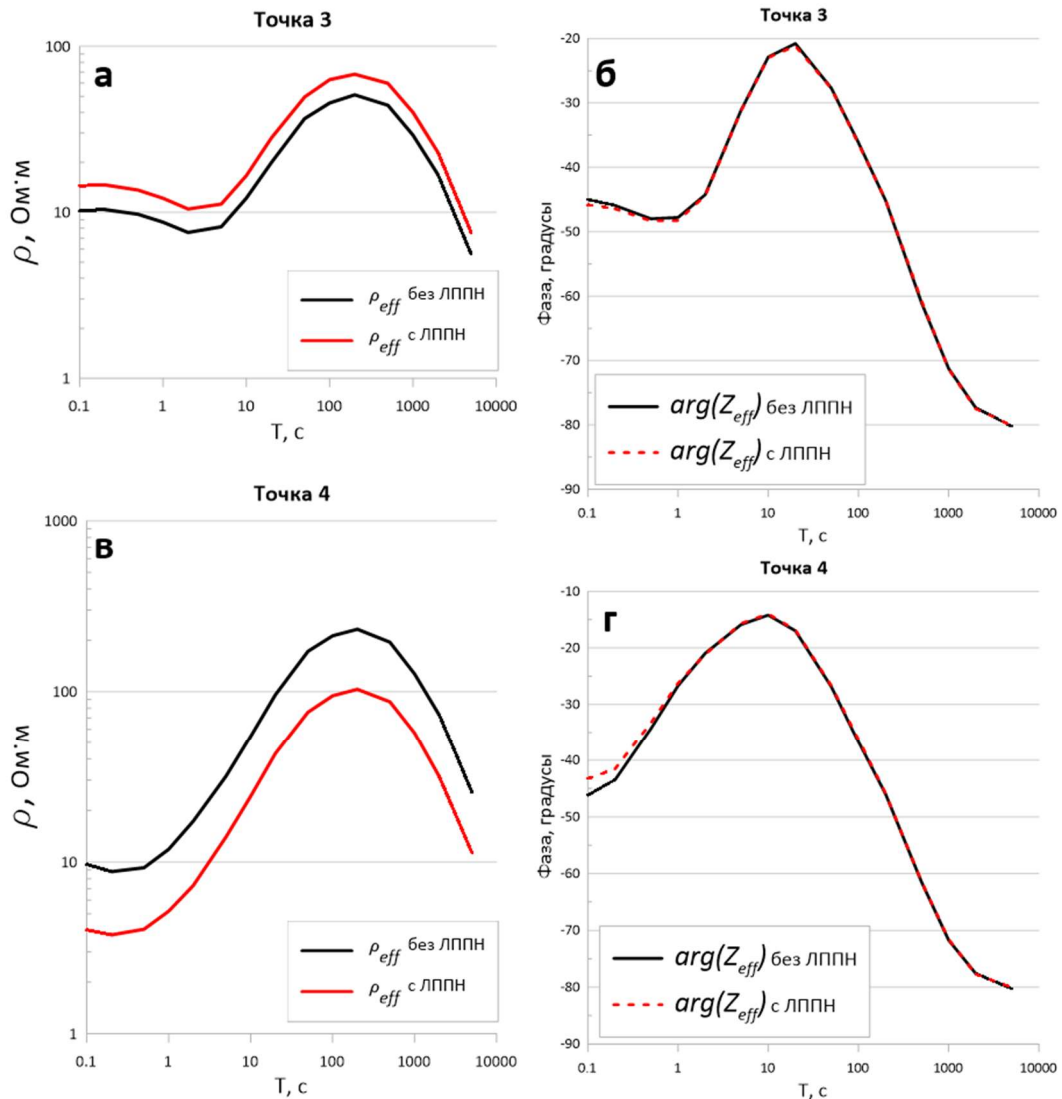


Рисунок 2.6 — Кривые эффективного кажущегося сопротивления (а, в) и фазы эффективного импеданса (б, г). Вверху (а, б) – точка 3 над высокоомной ЛППН (20 Ом·м), внизу (в, г) – точка 4 над проводящей ЛППН (3 Ом·м).

На рисунке 2.6 а,б продемонстрированы кривые над еще одной высокоомной неоднородностью с сопротивлением 20 Ом·м. В этом случае искажающий эффект закономерно становится еще слабее, в сравнении с предыдущими точками. На рисунке 2.6 в,г показаны кривые уже над проводящей

ЛППН (точка 4), в этом случае, соответственно, кривая кажущегося сопротивления смещается вниз. Если точка наблюдения располагается рядом с приповерхностной неоднородностью, искажающий эффект проявляется слабее и полностью затухает при удалении от ЛППН.

При анализе данных МТЗ по профилю обычно используются частотные разрезы или псевдоразрезы. При этом по горизонтали откладывается расстояние по профилю (дистанция), а по вертикали – период колебаний поля. На рисунке 2.7 представлены частотные разрезы эффективного кажущегося сопротивления по центральному профилю (расположение профилей см. на рис. 2.2). Верхний частотный разрез (а) получен для модели без ЛППН, нижний (б) – для модели с ЛППН. На рисунке 2.7а исследуемая глубинная неоднородность отчетливо наблюдается как область пониженных сопротивлений по центру разреза между периодами 1 и 10 секунд, ее влияние сохраняется и до самых больших периодов.

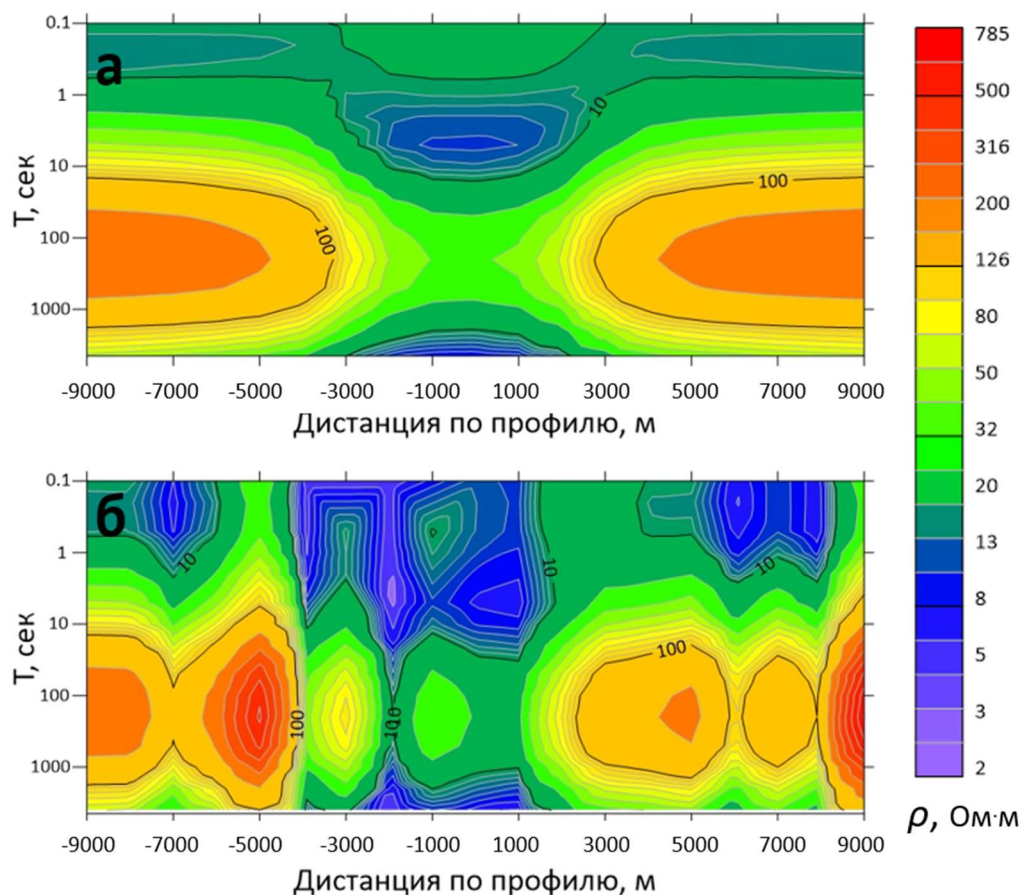


Рисунок 2.7 — Псевдоразрезы эффективного кажущегося сопротивления по центральному профилю: а – модель без ЛППН, б – модель с ЛППН.

На рисунке 2.7б также можно выделить эту область пониженных сопротивлений, но она маскируется влиянием ЛППН, которые приводят к появлению на частотном разрезе характерных вертикальных «столбов».

При анализе площадных данных МТЗ удобно использовать карты, которые строятся на различных периодах. На рисунке 2.8 приведены карты эффективного кажущегося сопротивления для периодов 1, 10 и 100 секунд. На периоде 1 с эффект от исследуемой глубинной структуры только начинает проявляться, а начиная с периода 10 с он дает существенную низкоомную аномалию. При добавлении в модель слоя с ЛППН границы глубинной структуры видны менее точно, появляются мелкие аномалии как повышенного, так и пониженного сопротивления. Их характерной особенностью является то, что они сохраняют свое положение и форму на всех периодах.

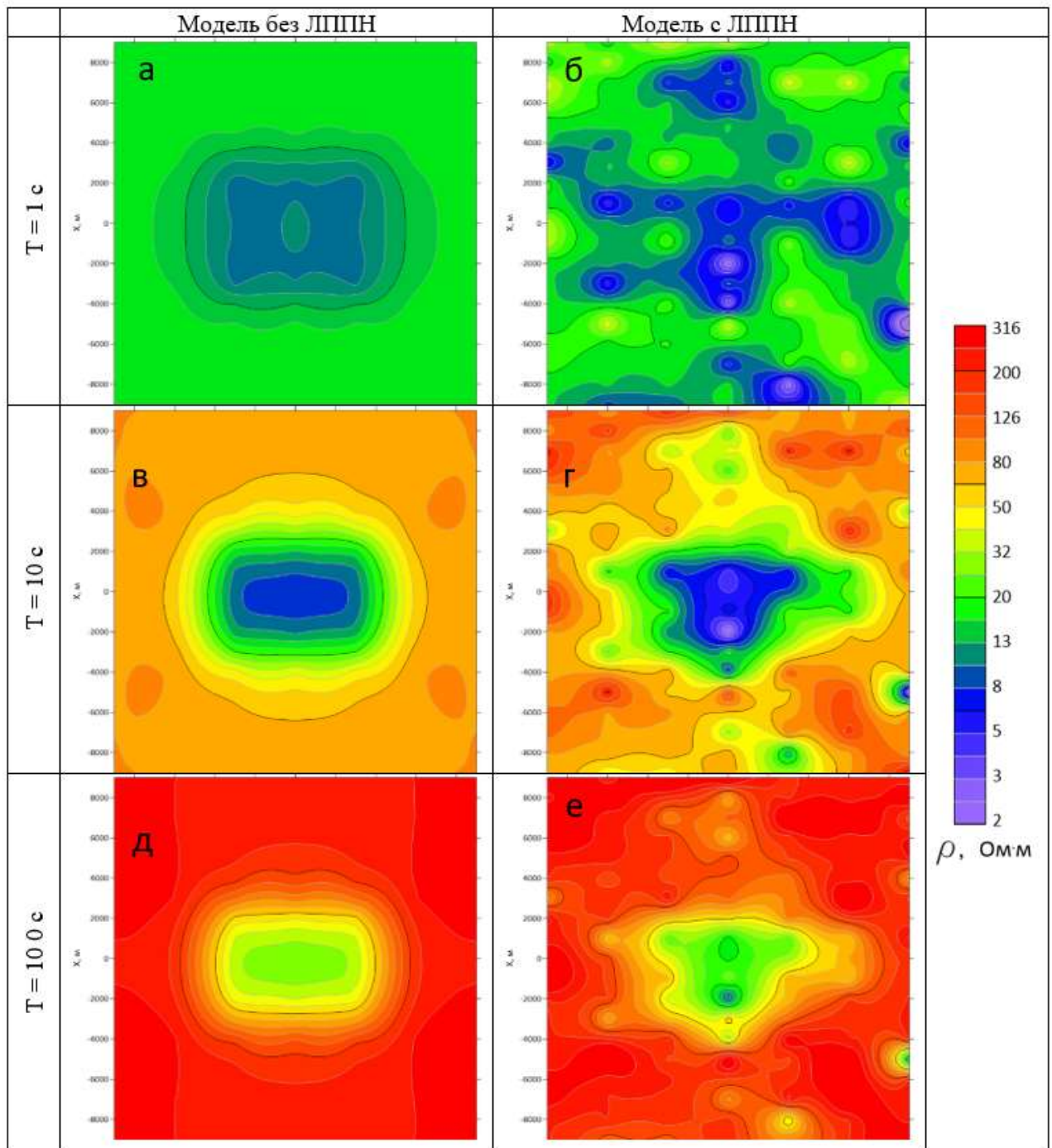


Рисунок 2.8 — Карты эффективного кажущегося сопротивления на периодах 1 с (а, б), 10 с (в, г) и 100 с (д, е). Слева (а, в, д) – модель без ЛППН, справа (б, г, е) – модель с ЛППН.

2.3. Особенности влияния ЛППН одного знака и различной мощности

Большинство разобранных в работе методов коррекции и подавления статического сдвига применялись к модели с неоднородным верхним слоем,

описанной выше, однако в данном параграфе также будет рассмотрено влияние ЛППН большей мощности и с неоднородностями одного знака. Помимо модели с хаотичным распределением неоднородностей как большого, так и меньшего УЭС относительно вмещающего слоя, были созданы модели, состоящие исключительно из высокоомных ЛППН (от 20 до 100 Ом·м), а также исключительно из проводящих с УЭС от 1 до 5 Ом·м, их расположение и ориентация при этом не менялись. Поскольку в первом случае сопротивление всех неоднородностей больше УЭС вмещающей толщи, а во втором случае соответственно меньше, то эти модели можно называть «моделями с ЛППН одного знака». На рисунке 2.9 представлены гистограммы распределения коэффициентов сдвига, рассчитанных для эффективного кажущегося сопротивления ρ_{eff} исходной модели как с высокоомными, так и с проводящими неоднородностями (черный цвет), а также для модели с высокоомными ЛППН (красный цвет) и низкоомными (синий цвет). Центральные столбики соответствуют точкам МТЗ, не подверженным влиянию ЛППН. Ожидаемо, что для последних двух моделей в существенном количестве точек преобладают коэффициенты или больше или меньше единицы, в зависимости от типа модели. Однако в обоих случаях также около 15 точек смещены в противоположную сторону от единицы относительно общей массы точек.

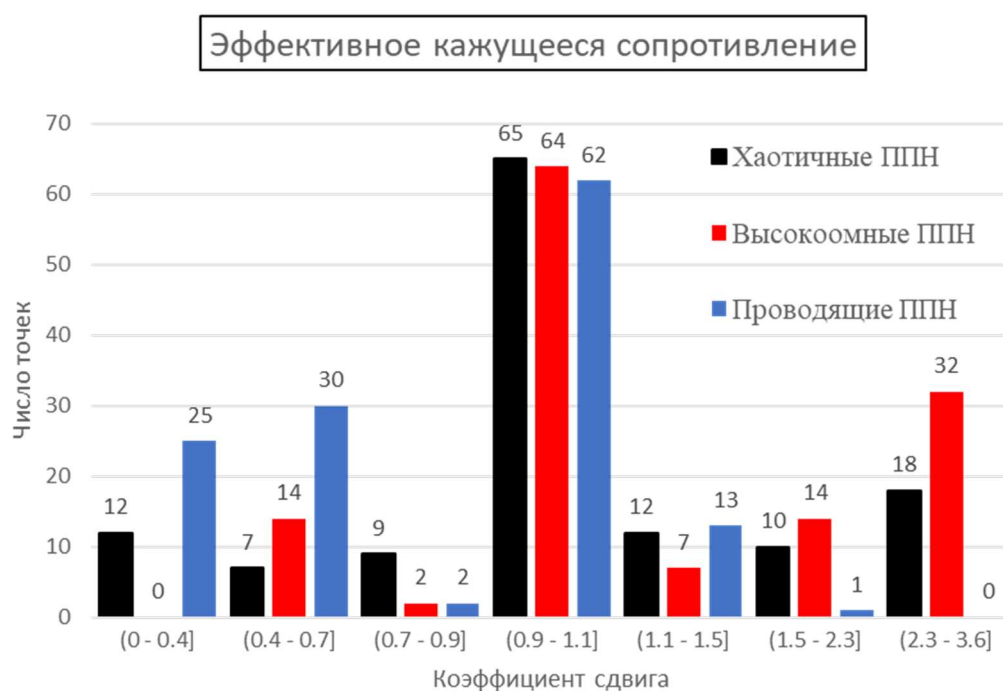


Рисунок 2.9 — Гистограммы распределения коэффициентов сдвига: черный цвет — модель как с высокоомными, так и с проводящими ЛППН, красный цвет — модель только с высокоомными ЛППН, синий цвет — модель только с проводящими ЛППН, период 10 с.

Схожий эффект наблюдается и при анализе карт распределения коэффициента сдвига для моделей с высокоомными и проводящими неоднородностями (рисунок 2.10). На картах видно, что точки, в которых коэффициенты сдвига смещены в противоположную сторону от единицы относительно общей массы точек, одинаковы для обеих моделей. Более того, если сравнить положение этих точек с картой распределения ЛППН на рисунке 2.2, то видно, что все они располагаются в ячейках без неоднородностей, но граничат с ними. Таким образом, можно сделать следующий вывод: если точка наблюдения располагается рядом, например, с высокоомной ЛППН, то коэффициент сдвига в этой точке будет меньше единицы, что дает ложное представление об истинном УЭС неоднородности.

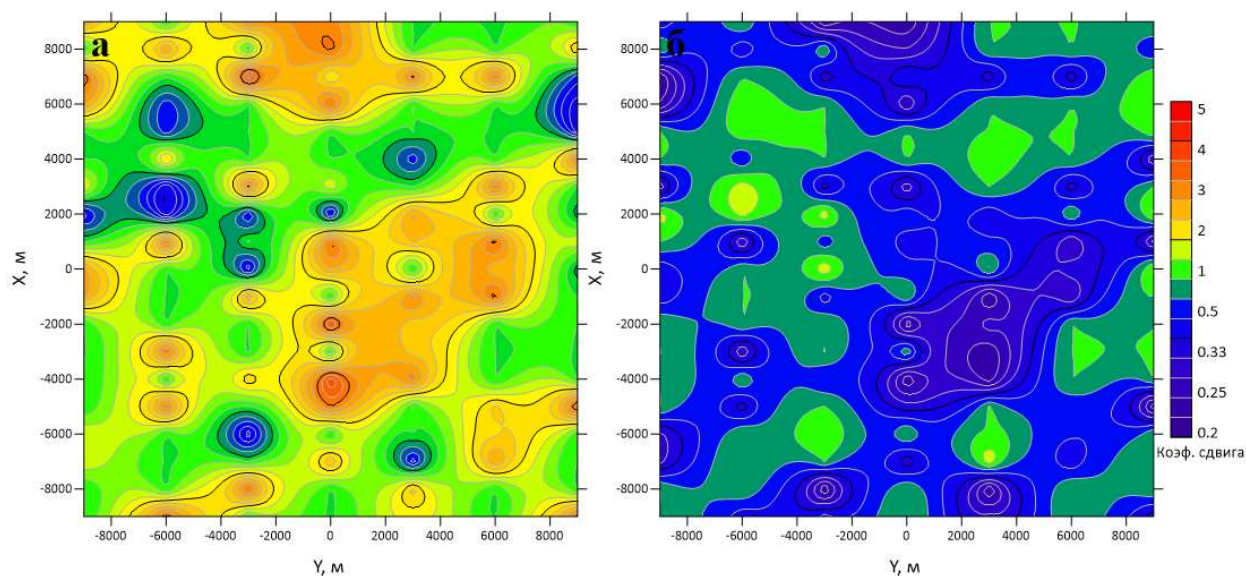


Рисунок 2.10 — Карта коэффициента сдвига кривых ρ_{ef} , период 10 с. а – модель с исключительно высокоомными ЛППН, б – модель с исключительно проводящими неоднородностями.

Также были рассмотрены модели, в которых УЭС неоднородностей соответствует карте на рисунке 2.2, однако существенно увеличена их мощность. На рисунке 2.11 представлены кривые кажущегося сопротивления для модели без ЛППН (черный цвет), модели с ЛППН мощностью 25 м (красный цвет), с мощностью ЛППН 100 м (зеленый цвет) и ЛППН мощностью 500 м (желтый цвет). На кривых видно, что увеличение мощности неоднородностей оказывает частотно-зависимое влияние на высокочастотную часть кривой (период до 1с), на остальной же части происходит параллельный сдвиг вверх по уровню, что логично, поскольку при увеличении мощности влияние неоднородностей возрастает. На кривых фазы эффективного импеданса $\arg(Z_{eff})$ это влияние проявляется еще сильнее, что видно на рисунке 2.12. Связано это с тем, что фаза имеет смысл сглаженной производной эффективной компоненты тензора импеданса и, соответственно, начинает меняться раньше. Таким образом, расхождение кривых на ранних периодах можно связать с влиянием индукционных искажений, вызванными ЛППН.

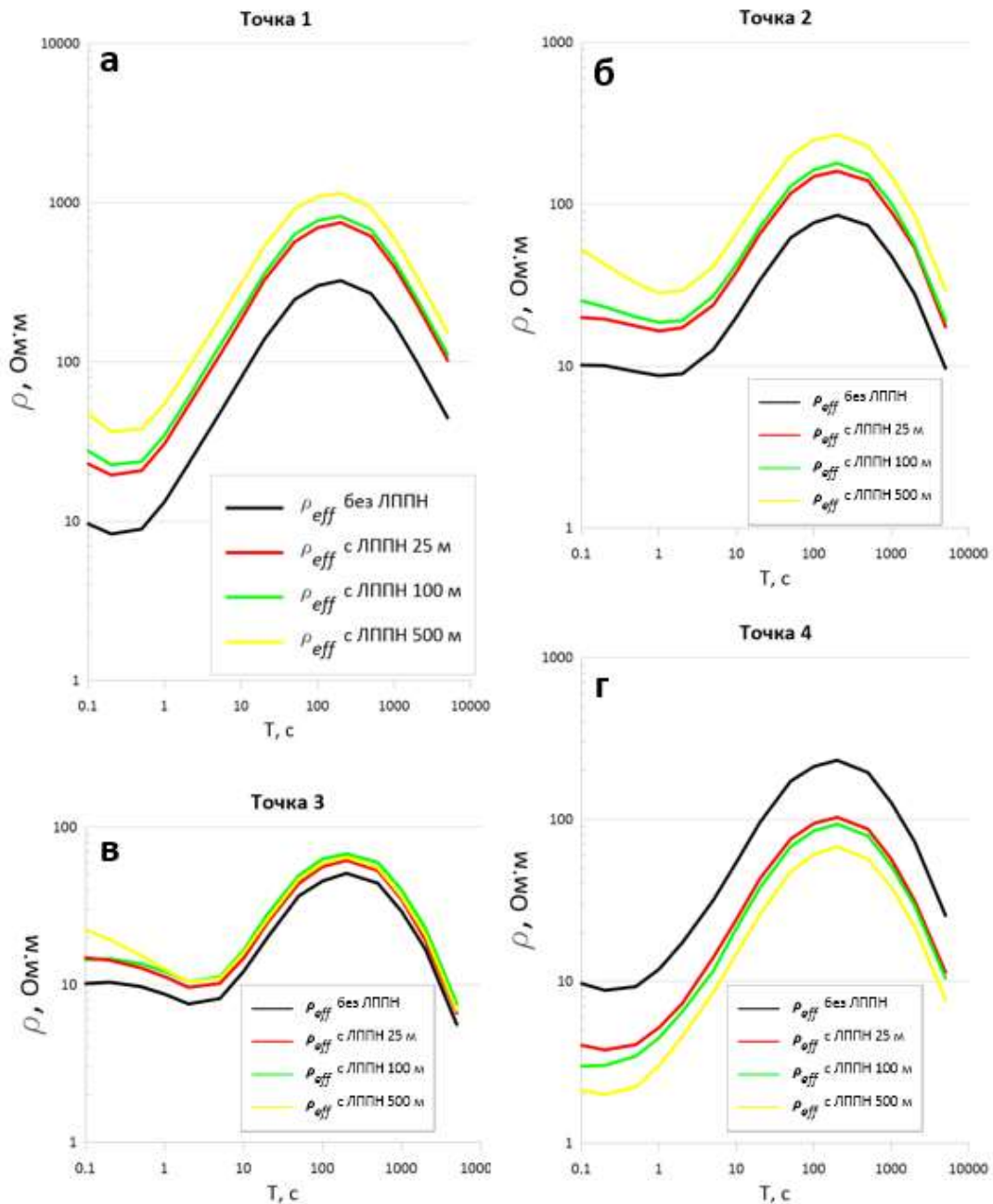


Рисунок 2.11 — Кривые эффективного кажущегося сопротивления для моделей с ЛППН различных мощностей: а – точка 1, б – точка 2, в – точка 3, г – точка 4.

Увеличение мощности ЛППН на картах на периоде 10 с выражается в возрастании амплитуды аномалий, однако их форма, расположение и ориентация остаются неизменными, что видно по рисунку 2.12.

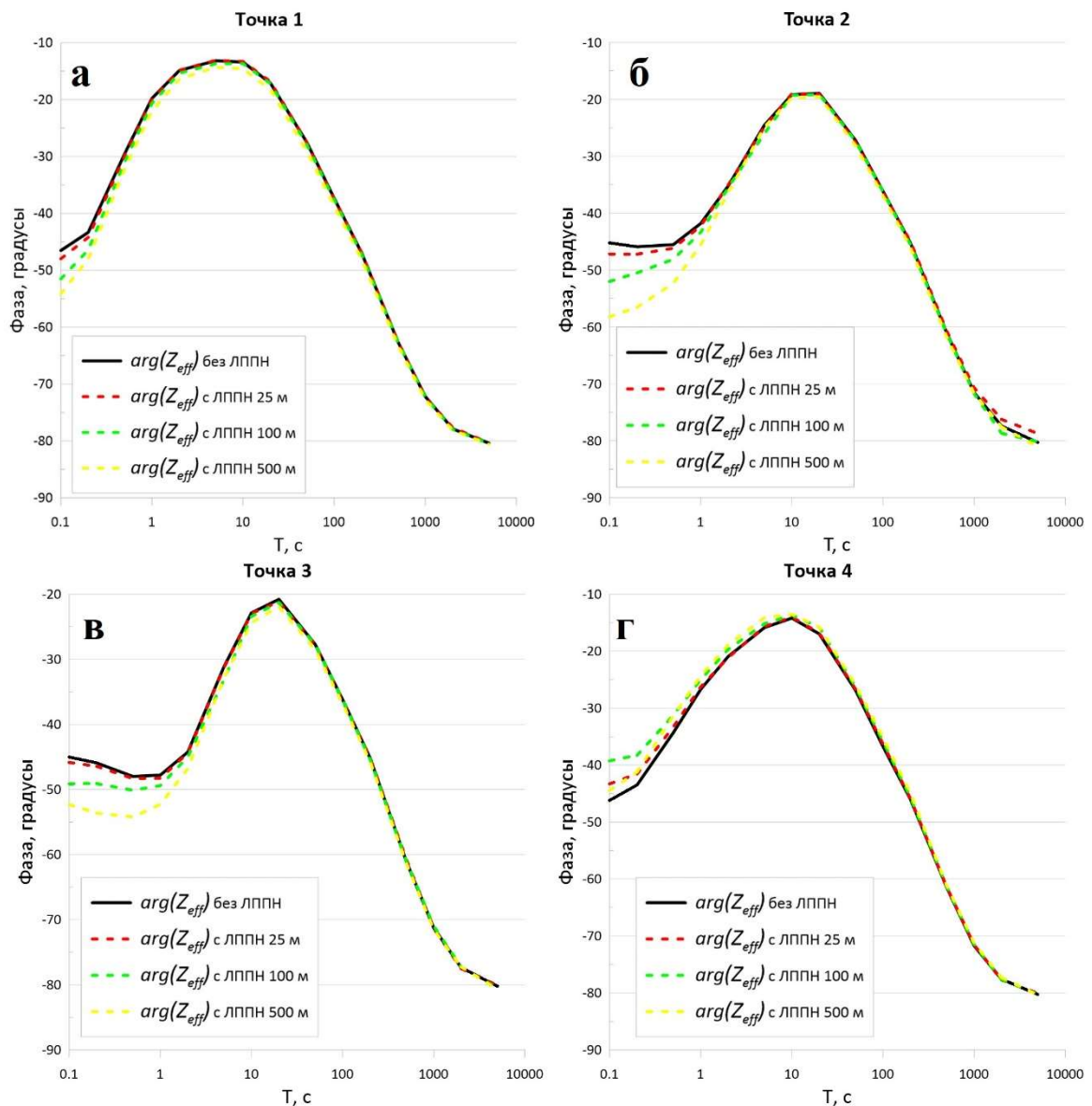


Рисунок 2.12 — Фазовые кривые эффективного тензора импеданса для моделей с ЛППН различных мощностей: а – точка 1, б – точка 2, в – точка 3, г – точка 4.

Увеличение мощности ЛППН на картах на периоде 10 с выражается в возрастании амплитуды аномалий, однако их форма, расположение и ориентация остаются неизменными, что видно по рисунку 2.13.

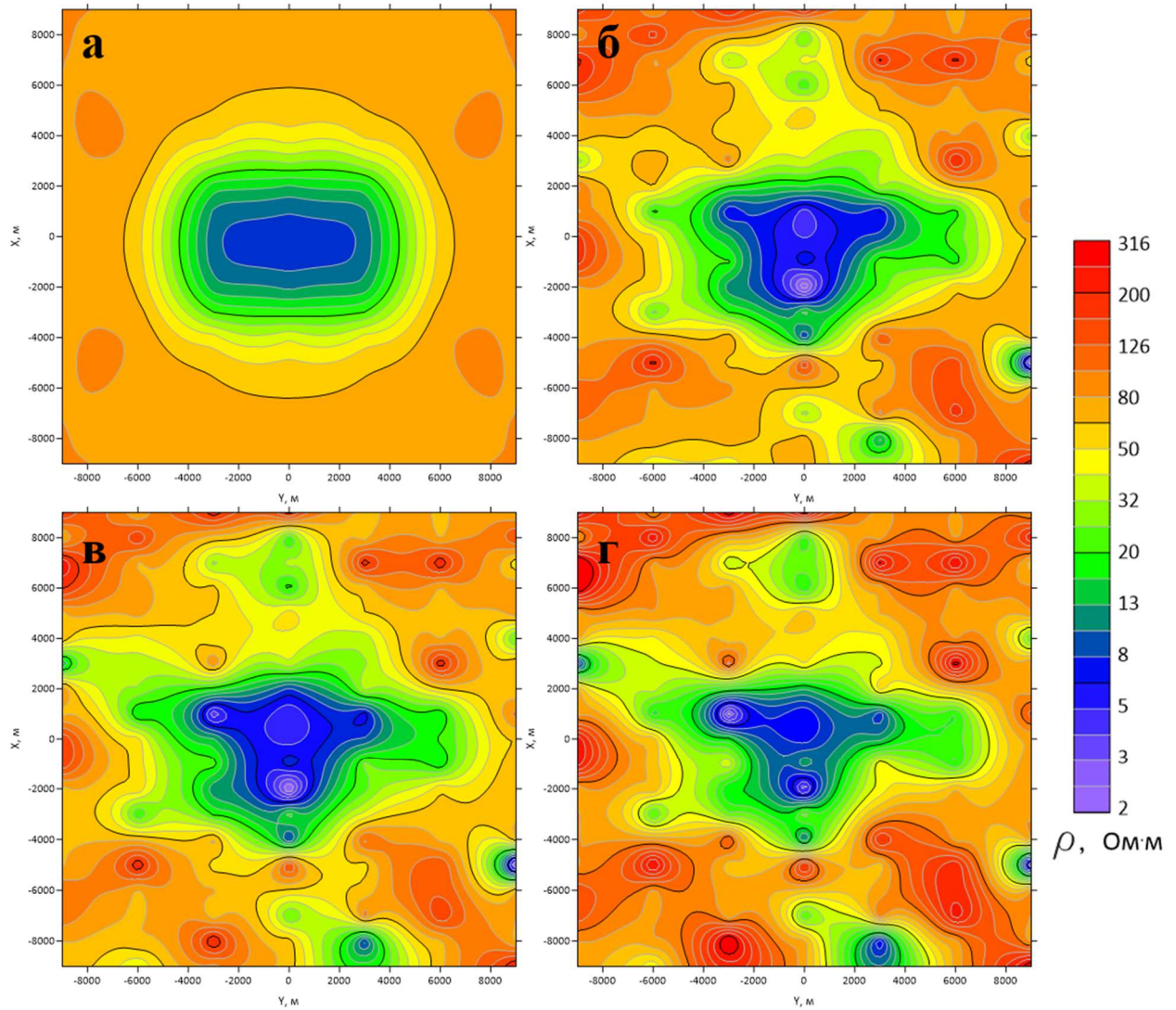


Рисунок 2.13 — Карты эффективного кажущегося сопротивления на периоде 10 с: а – модель с однородным верхним слоем, б – модель с ЛППН мощностью 25 м, в – модель с ЛППН мощностью 100 м, г - модель с ЛППН мощностью 500 м.

2.4. Анализ инвариантных параметров тензора импеданса

В 1D (горизонтально-слоистой) среде тензор импеданса принимает вид:

$$[Z^{1D}] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z^N \\ -Z^N & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

где Z^N – импеданс нормального слоистого разреза. Практически считать среду одномерной можно при малых значениях параметра неоднородности (Berdichevsky, Dmitriev, 1992):

$$N = \left| \sqrt{1 - 4 \frac{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}}{(Z_{xy} - Z_{yx})^2}} \right|. \quad (2.3)$$

В 2D среде, в случае, когда y – ось однородности среды, тензор импеданса выглядит следующим образом

$$[Z^{2D}] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z^\perp \\ -Z^\parallel & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

где $Z^\perp$ - поперечный импеданс, связанный с токами, текущими вкост структур (Н-поляризация поля или ТМ-мода), а $Z^\parallel$ - продольный импеданс, связанный с токами, текущими вдоль структур (Е-поляризация поля или ТЕ-мода). Практически считать среду одно- или двумерной можно при малых значениях параметра асимметрии Свифта (Swift, 1967):

$$skew_S = \left| \frac{Z_{xx} + Z_{yy}}{Z_{xy} - Z_{yx}} \right|. \quad (2.5)$$

В общем случае 2D структуры имеют произвольный по отношению к координатным осям азимут простираения.

На рис. 2.14 приведены карты параметра неоднородности N на периодах 1, 10 и 100 с. На периоде 1 секунда значения этого параметра малы, в случае модели без ЛППН всю площадь исследования можно считать одномерной, при добавлении ЛППН в модель появляется несколько областей с повышенным значением параметра неоднородности. На больших периодах видно, что N принимает большие значения вблизи границ исследуемой глубинной структуры, а ЛППН усложняют картину, приводя к появлению новых аномалий, но местами и ослабляя аномалии от региональной структуры.

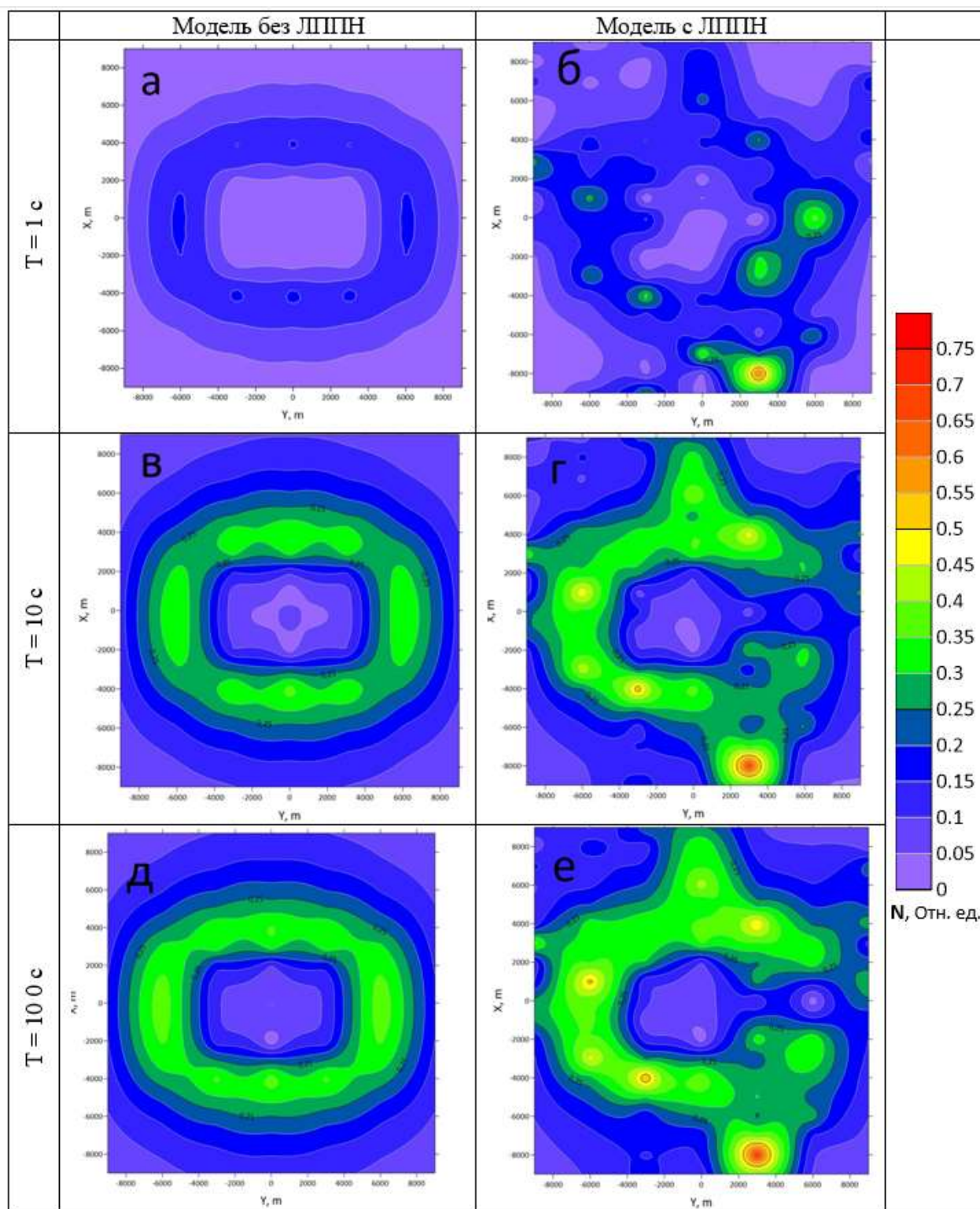


Рисунок 2.14 — Карты параметра неоднородности N на периодах 1 с (а, б), 10 с (в, г) и 100 с (д, е). Слева (а, в, д) – модель без ЛППН, справа (б, г, е) – модель с ЛППН.

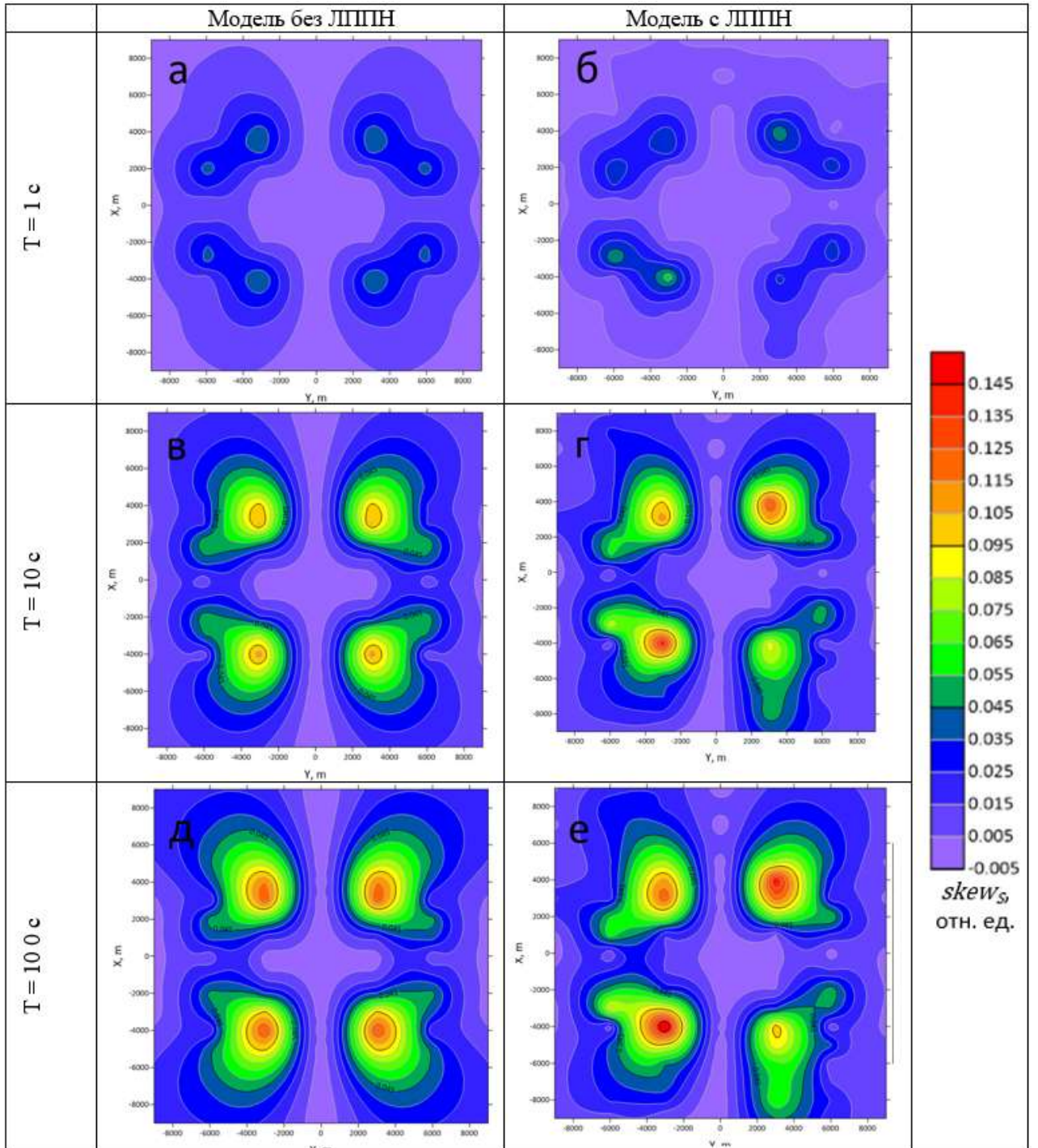


Рисунок 2.15 — Карты параметра асимметрии Свифта $skew_S$ на периодах 1 с (а, б), 10 с (в, г) и 100 с (д, е). Слева (а, в, д) – модель без ЛППН, справа (б, г, е) – модель с ЛППН.

Карты параметра асимметрии Свифта $skew_S$ для периодов 1, 10 и 100 секунд приведены на рисунке 2.15. Также, как и в случае с параметром неоднородности, на периоде 1 секунда значения этого параметра минимальны, а

начиная с периода 10 секунд наблюдаются повышенные значения у углов глубинной структуры. Наличие приповерхностных неоднородностей усложняет картину, особенно это заметно у юго-восточного угла структуры. Однако в сравнении с параметром неоднородности здесь влияние ЛППН не так велико.

2.5. Анализ норм матрицы Визе-Паркинсона, магнитного и теллурического тензора

Матрица Визе-Паркинсона $[W]$ связывает горизонтальные компоненты магнитного поля H_x и H_y с вертикальной компонентой H_z :

$$H_z = W_{zx}H_x + W_{zy}H_y. \quad (2.6)$$

Компоненты матрицы Визе-Паркинсона W_{zx} и W_{zy} определяются по вертикальному магнитному полю и отражают как горизонтальные, так и вертикальные изменения электропроводности (Parkinson, 1959; Wiese, 1962).

На рисунке 2.16 приведены карты норм матрицы Визе-Паркинсона $[W]$ для периодов 1, 10 и 100 секунд. Норма рассчитывается как корень из сумм квадратов всех компонент матриц. В магнитном поле влияние ЛППН должно затухать с понижением частоты. Поскольку матрица Визе-Паркинсона рассчитывается из компонент магнитного поля, то влияние приповерхностных неоднородностей на ней практически не сказывается. Наиболее яркая картина наблюдается на периоде 10 секунд, хотя на всех периодах максимальными значениями отмечены границы исследуемой проводящей впадины.

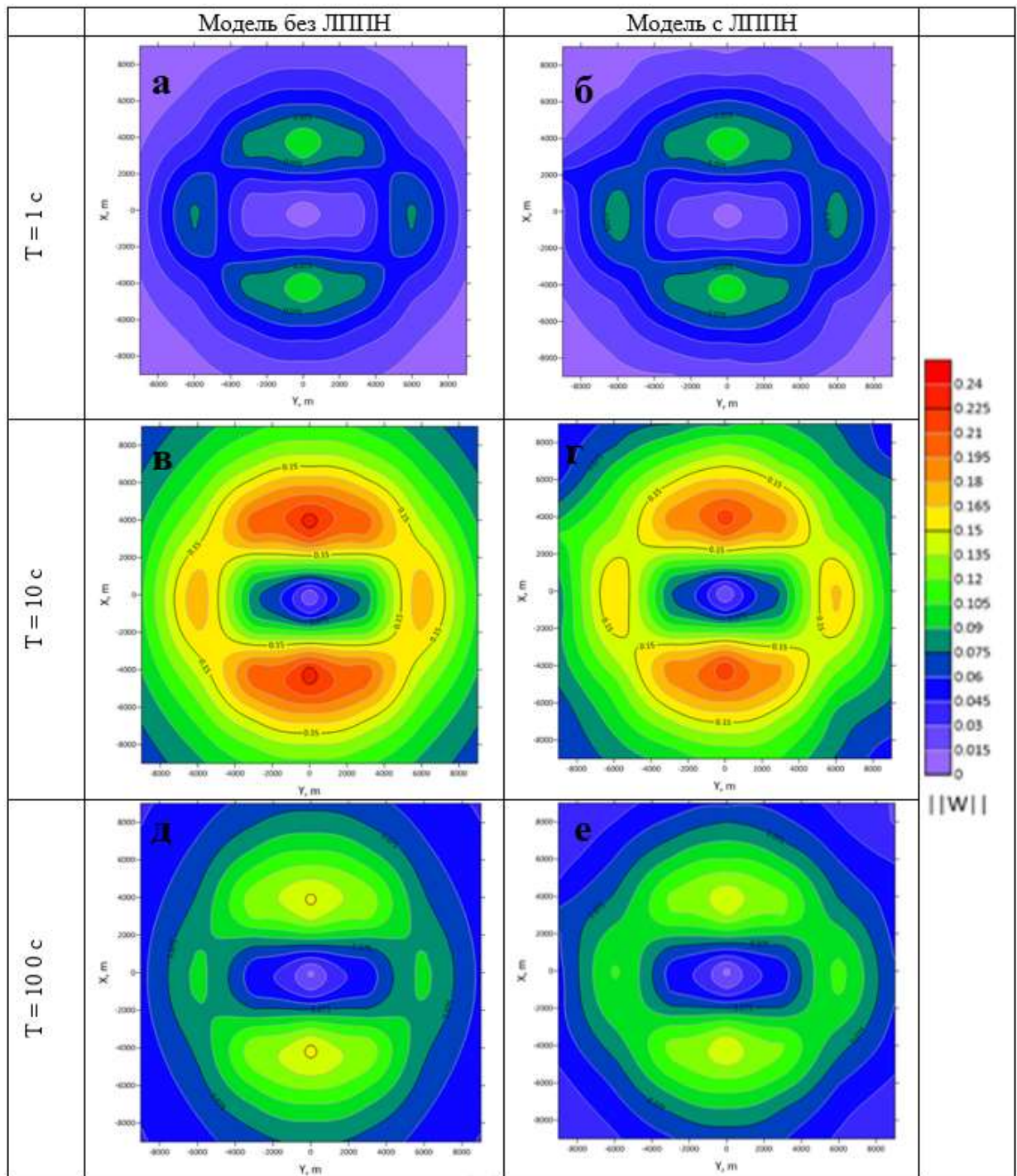


Рисунок 2.16 — Карты норм матриц $||W||$ на периодах: 1 с (а, б), 10 с (в, г) и 100 с (д, е). Слева (а, в, д) – модель без ЛППН, справа (б, г, е) – модель с ЛППН.

Далее будут рассмотрены карты нормы горизонтального магнитного тензора $||M||$. Эта передаточная функция связывает компоненты горизонтального

магнитного поля в двух точках – в точке непосредственного наблюдения и в базовой точке (Varentsov, Sokolova, 2003):

$$H_x = M_{xx}H_x^B + M_{xy}H_y^B; \quad (2.7)$$

$$H_y = M_{yx}H_x^B + M_{yy}H_y^B, \quad (2.8)$$

где H_x^B и H_y^B – компоненты горизонтального магнитного поля, наблюдаемые в базовой точке. В данной работе базовая точка располагается за пределами карты с ЛППН, изображенной на рисунке 2.2, в области с однородным верхним слоем.

Горизонтальный магнитный тензор обладает следующими свойствами: во-первых, он свободен от влияния нежелательных гальванических искажений. Во-вторых, его можно надежно определить в широком диапазоне периодов. В-третьих, его можно использовать на участках над центрами проводящих аномалий, где оценки типпера матрицы Визе-Паркинсона малы по амплитуде и, следовательно, нестабильны (Varentsov, 2005).

На рисунке 2.17 представлены карты нормы горизонтального магнитного тензора $\|M\|$. Как и в случае с нормами матрицы Визе-Паркинсона, приповерхностные неоднородности едва ли оказывают влияние на значения этого параметра. Лишь на периоде в 1 с наблюдается аномалия для модели с ЛППН на юге карты. С понижением частоты для параметров $\|I\|$ и $\|M\|$ влияние приповерхностных неоднородностей сводится на нет. Стоит также отметить, что, на карте $\|I\|$ максимумом отмечены границы глубинной неоднородности, а на карте $\|M\|$ максимум располагается над ее центром. Наиболее яркая картина наблюдается также на периоде 10 с. Оба этих параметра позволяют уверенно выделить глубинную неоднородность даже при наличии множества ЛППН в приповерхностном слое.

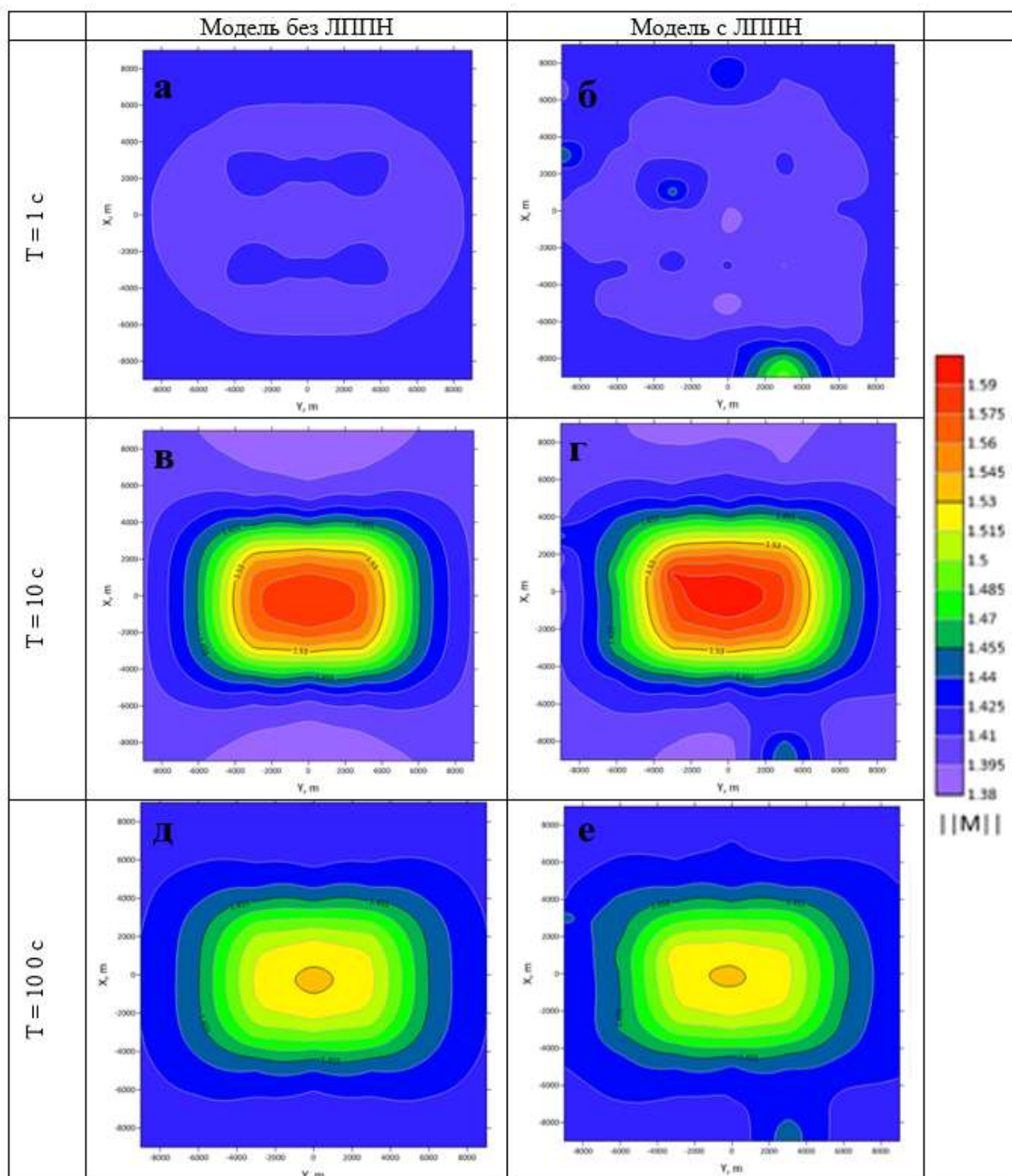


Рисунок 2.17 —. Карты норм матриц $||M||$ на периодах: 1 с (а, б), 10 с (в, г) и 100 с (д, е). Слева (а, в, д) – модель без ЛППН, справа (б, г, е) – модель с ЛППН.

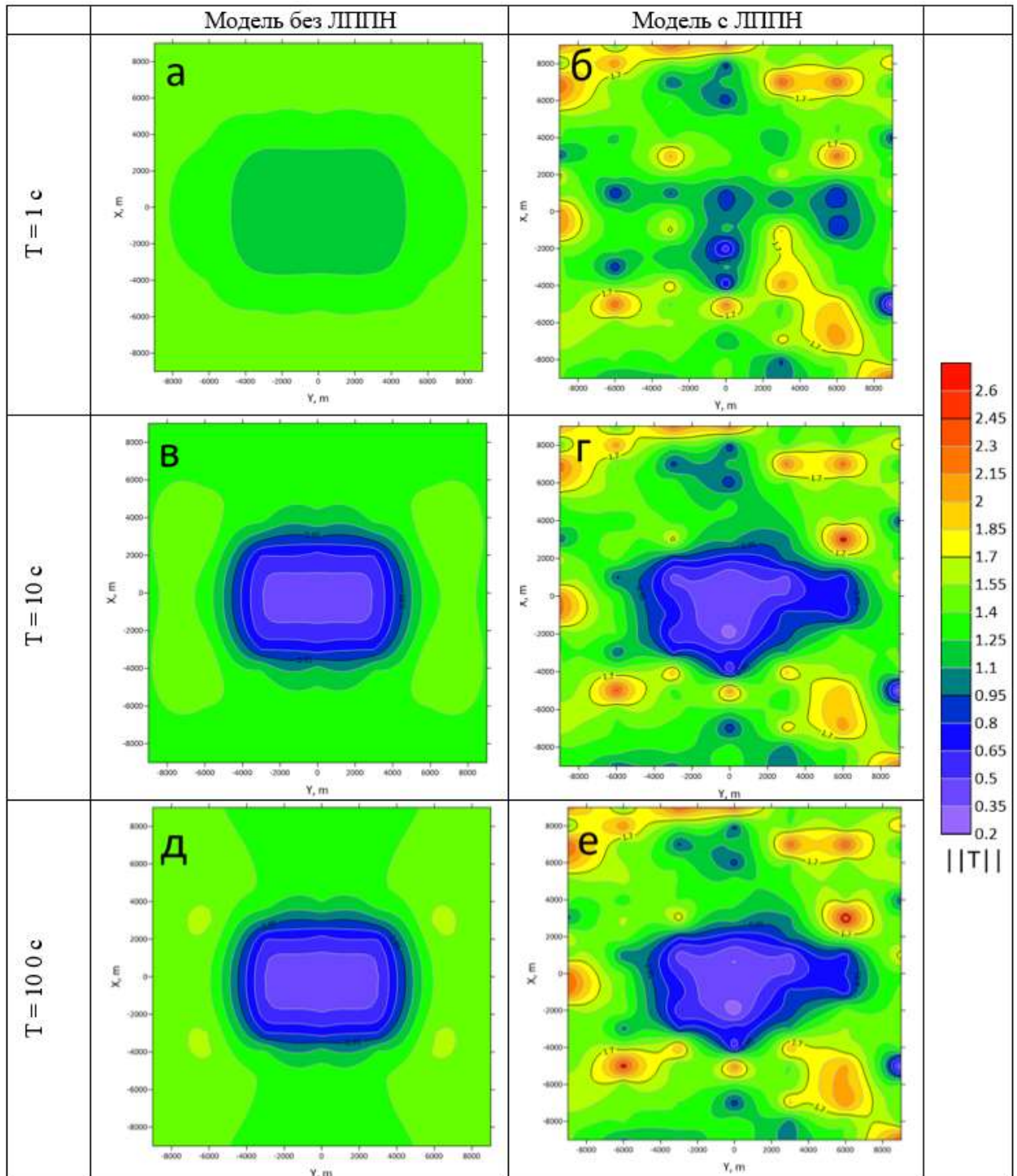


Рисунок 2.18 — Карты норм матриц $||T||$ на периодах: 1 с (а, б), 10 с (в, г) и 100 с (д, е). Слева (а, в, д) – модель без ЛППН, справа (б, г, е) – модель с ЛППН.

Наконец, заключительным инвариантным параметром, рассмотренным в этой главе, будет тензор теллурический. В электрическом поле влияние ЛППН наиболее сильно и не уменьшается с понижением частоты (рисунок 2.18),

поэтому на карте $\|T\|$ хорошо видно проявление ЛППН, в этом отношении данные карты похожи на рассмотренные выше карты кажущегося сопротивления.

2.6. Выводы

В данной главе были представлены две геоэлектрические модели с одинаковой глубинной структурой, но отличающиеся отсутствием и наличием приповерхностного неоднородного слоя. Приповерхностные неоднородности вызывают статические сдвиги кривых эффективного кажущегося сопротивления, при этом, если точка наблюдений попадает на высокоомный объект, то наблюдаемое значение завышается, а при попадании на проводящий — занижается (если точка находится рядом с неоднородностью, то наоборот), тогда как фазовые кривые остаются практически неискаженными. Увеличение мощности ЛППН усиливает амплитуду аномалий, не меняя их пространственного распределения. Магнитные передаточные функции, такие как норма матрицы Визе-Паркинсона и горизонтального магнитного тензора, оказались устойчивы к влиянию ЛППН и эффективно выявляют глубинную структуру, в то время как теллурический тензор и эффективный тензор импеданса сильно искажены влиянием приповерхностных неоднородностей.

ГЛАВА 3. ЛОКАЛЬНО-РЕГИОНАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ТЕНЗОРА ИМПЕДАНСА³

3.1. Определение главных направлений

Главные направления тензора $[Z]$ определяют азимуты вдоль и вкрест простирания структур, что имеет важное значение при 2D интерпретации. В осесимметричных средах главные направления отвечают радиальному и азимутальному направлениям. Для определения главных направлений может применяться метод ортогонализации Эггерса (Eggers, 1982), который, однако, неустойчив к влиянию ЛППН. Основным достоинством методов локально-региональной декомпозиции $[Z]$ является их способность определять главные направления, связанные именно с региональными (глубинными) структурами.

На рисунке 3.1 крестиками показаны главные направления, определенные методами Эггерса PD_E (вверху) и Бара PD_B (внизу) на периоде 10 с. Слева приведены результаты для модели с однородным верхним слоем, а справа – с ЛППН. В качестве фона на рисунке показаны значения параметров асимметрии Свифта $skew_S$ (вверху) и Бара $skew_B$ (внизу). Видно, что добавление в модель ЛППН влияет на главные направления по Эггерсу и значения $skew_S$, в то время как главные направления по Бару и значения $skew_B$, при этом почти не меняются.

³ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Суконкин М.А., Пушкарев П.Ю. Использование синтетических магнитотеллурических данных для оценки эффективности методов, основанных на локально-региональном разложении тензора импеданса // Вестник Московского университета. Сер. 4: Геология. — 2024. — Т. 63, — № 6. — С. 185-196. EDN: [FKGNJL](#) (2,5 п.л., вклад автора 65%), Импакт-фактор 0,288 (РИНЦ).

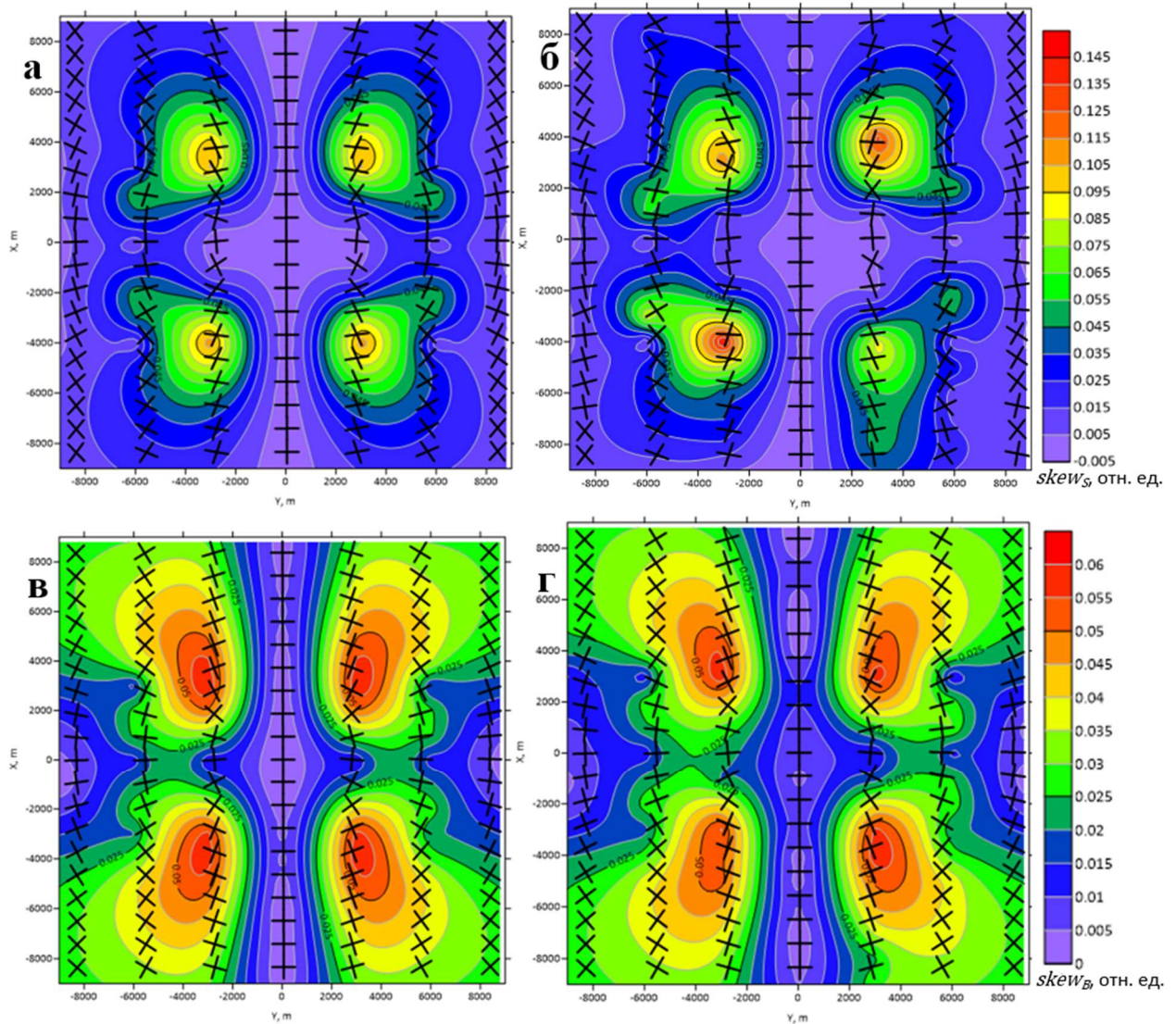


Рисунок 3.1 — Карты главных направлений (показаны крестиками), определенных методами Эггерса (а и б) PD_E и Бара PD_B (в и г) на фоне значений параметров асимметрии (показаны цветом) Свифта $skew_S$ (а и б) и Бара $skew_B$ (в и г). Слева (а и в) — результаты для модели без ЛППН, справа (б и г) — для модели с ЛППН. Период 10 с.

Для наглядности на рисунке 3.2 еще раз показаны главные направления, определенные этими двумя методами, и наложенные друг на друга для двух вариантов модели (с однородным и неоднородным верхним слоем). Направления PD_E во многих точках существенно изменились при появлении ЛППН, а метод Бара демонстрирует устойчивость к их влиянию.

Как видно из рисунка 3.1, значения параметра асимметрии Бара $skew_B$ повсеместно малы, что свидетельствует о применимости локально-региональной декомпозиции. Однако, как было отмечено выше, метод Бара будет работать устойчиво лишь при существенном значении параметра Δ , который равен разности фаз импедансов, отвечающих главным региональным направлениям. Карта абсолютных значений Δ для периода 10 с приведена на рис. 3.3а. Видно, что они превышают 12-13 градусов (т.е. характерную погрешность наблюдений) вблизи границ глубинной неоднородности и малы в центре модели и на удаленных от нее углах планшета. Однако, как было продемонстрировано на рис. 3.1 и 3.2, и здесь для двух наборов данных (полученных при отсутствии и наличии ЛППН) результаты получились устойчиво.

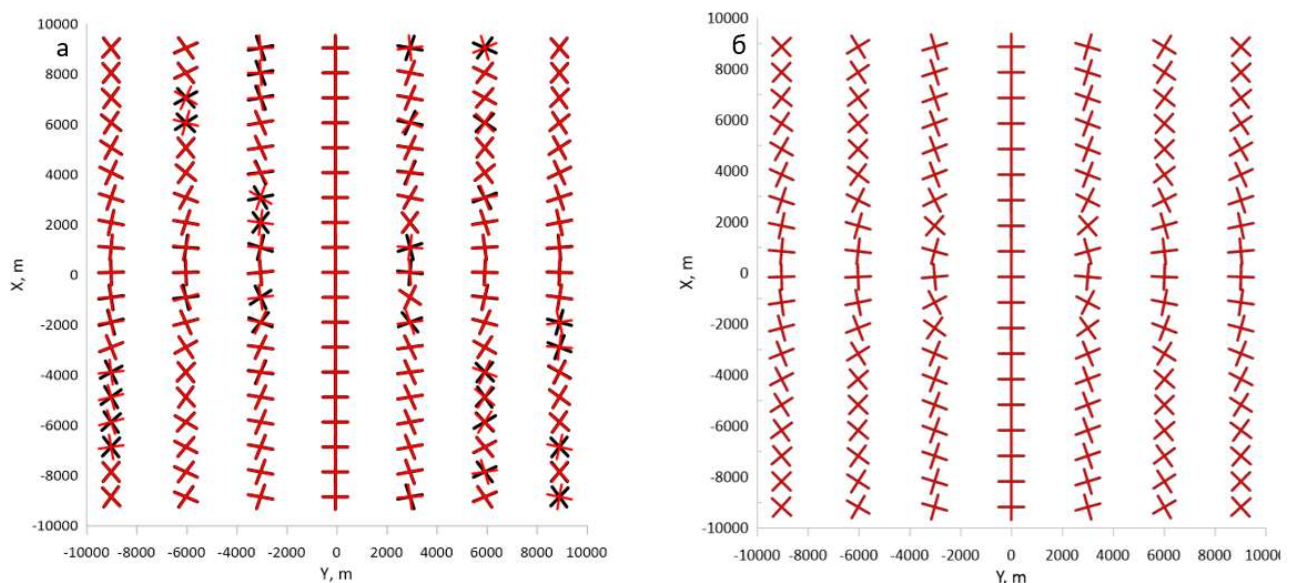


Рисунок 3.2 — Главные направления тензора импеданса, определенные методами Эггерса PD_E (а) и Бара PD_B (б), карты на периоде 10 с. Черные крестики — для модели без ЛППН, красные — с ЛППН.

На рис. 3.3б продемонстрирована карта параметра асимметрии β для периода 10 с. Его распределение напоминает параметр $skew_B$, максимальные значения достигаются у углов исследуемой глубинной структуры и составляют около 3 градусов.

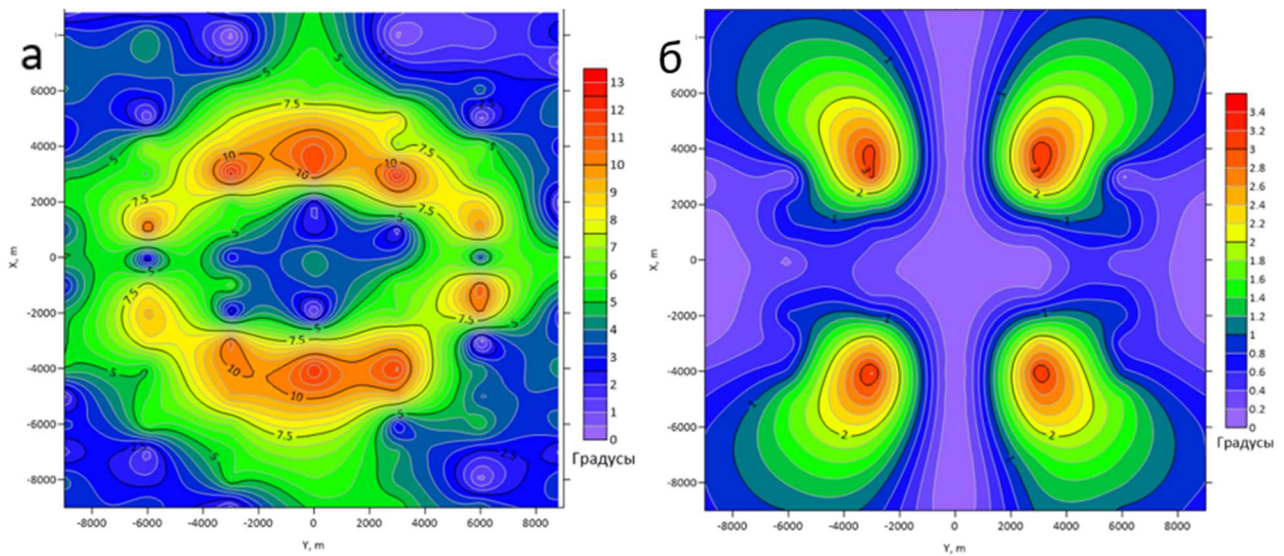


Рисунок 3.3 — Карты параметров Δ (а) и β (б) для периода 10 с.

3.2. Анализ параметров асимметрии

Рассмотрим изменения параметров $skew_S$, $skew_B$, Δ и β с периодом (рис. 3.4). Графики построены для точек МТЗ, положение которых показано на рисунке 2.2. Точка 1 располагается в области с низким значением разности фаз Δ , максимальное значение которой достигает лишь 4 градусов на периоде около 5 с. В точке 2 этот параметр больше, достигает 8 градусов в промежутке периодов 1 – 10 с. Точка 3 располагается в области с максимальными значениями разности фаз, значение которой достигает 13 градусов для модели с ЛППН. В точке 4 разность фаз средняя, максимум 9 градусов. Стоит отметить, что для всех четырех точек разность фаз максимальна в промежутке периодов 1 – 10 с. Параметр β в точке 1 достигает максимального отклонения от 0 в -1 градус в том же промежутке периодов. В точках 2 и 4 этот параметр практически равен нулю, а в точке 3 достигает трех градусов. Важно, что для всех точек этот параметр определяется устойчиво вне зависимости от влияния ЛППН. Поскольку параметр асимметрии β отображает трехмерную неоднородность среды, то он максимален у углов глубинной неоднородности и на средних периодах. Значения параметров $skew_S$ и $skew_B$ небольшие во всех рассмотренных случаях,

максимальные значения наблюдаются на все том же промежутке периодов 1 – 10 секунд. В точке 3 наблюдается значительное расхождение параметра асимметрии Свифта для разных моделей, значения этого параметра завышаются при попадании на высокоомную неоднородность. Параметр асимметрии Бара для двух вариантов модели отличается несущественно.

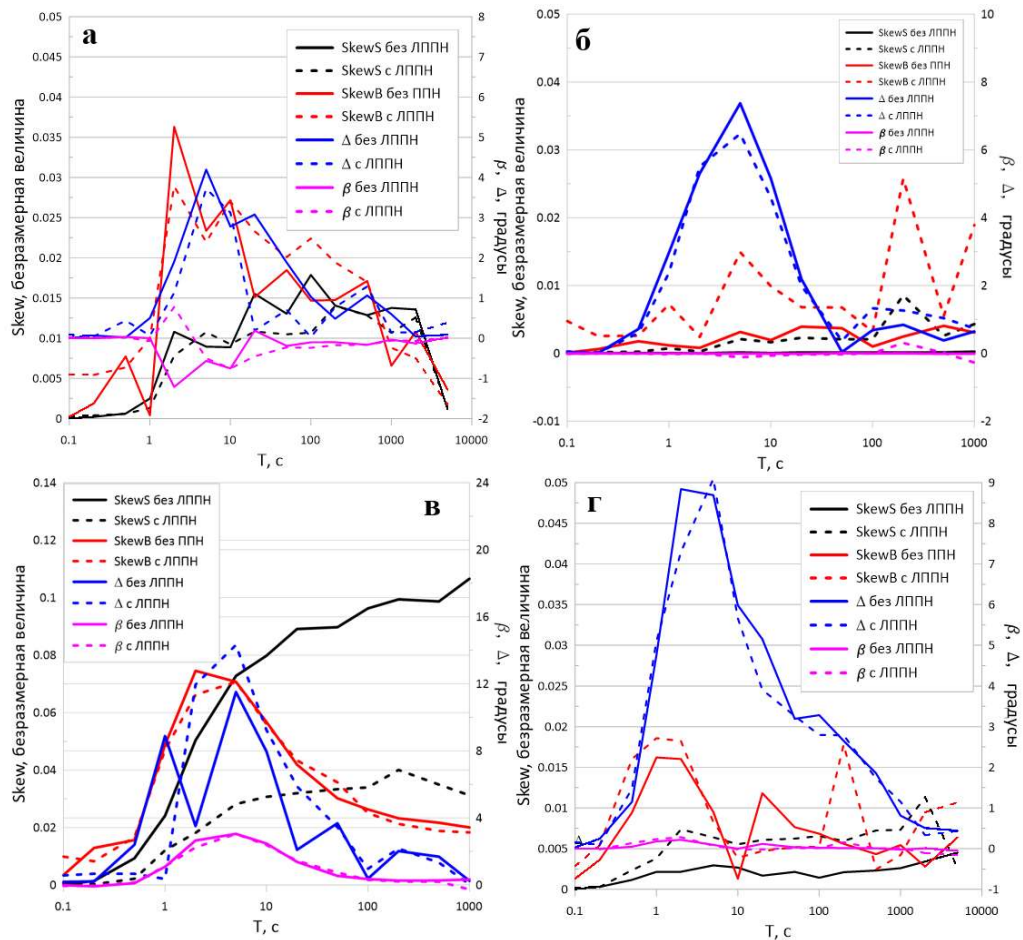


Рисунок 3.4 — Параметры асимметрии $skewS$ и $skewB$, а также параметры Δ и β в зависимости от периода: а – в точке 1; б – в точке 2; в – в точке 3; г – в точке 4 (см. рис. 2.2).

Главные направления (азимутальные углы), определенные методами Эггерса, Бара и фазового тензора, в зависимости от периода приведены на рисунке 3.5. На удалении от глубинной структуры (точка 1) главное направление составляет порядка 45 градусов, то есть близко к азимутальному. Вблизи

исследуемой глубинной неоднородности, напротив, оно близко к 0 градусов (а ортогональное – к 90), что отвечает ориентации ее границ. У угла глубинной неоднородности значения азимутов, определенные по всем трем методам плавно уменьшаются с ростом периода. Значения, полученные методами Бара и фазового тензора, близки друг к другу и почти не зависят от наличия ЛППН. Метод Эггерса неустойчив к влиянию ЛППН, что отчетливо видно на правом рисунке (3.5г) по расхождению результатов для моделей с однородным верхним слоем и с ЛППН. Отметим, что до периода 1 с азимут определяется неустойчиво, это связано с тем, что на таких малых периодах модель проявляется как одномерная. Аналогичная закономерность видна и на больших периодах.

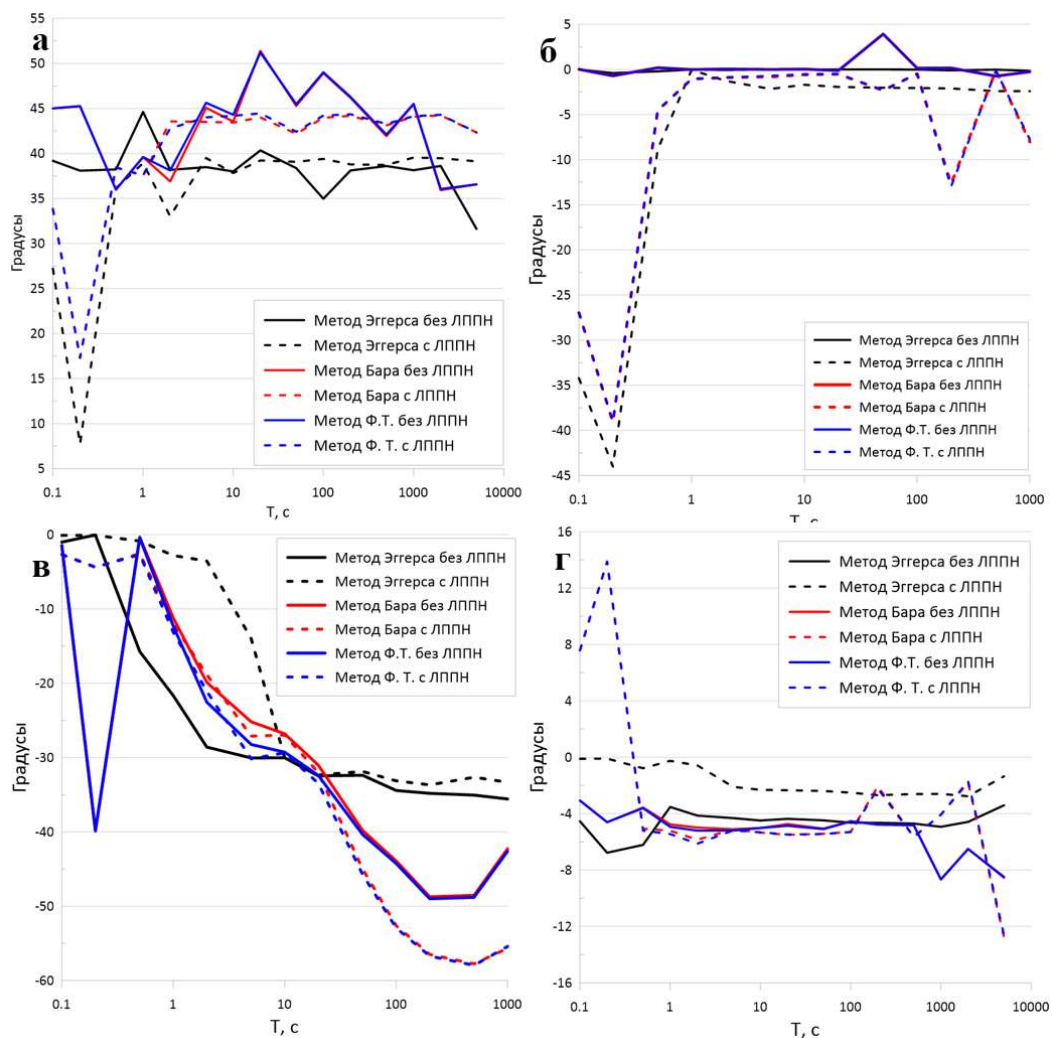


Рисунок 3.5 — Главные направления, определенные методами Эггерса, Бара и фазового тензора: а – в точке 1; б – в точке 2; в – в точке 3; г – в точке 4 (см. рис. 2.2).

3.3. Полярные диаграммы и эллипсы

Одним из удобных способов получения информации о размерности среды и простирании структур является построение полярных диаграмм различных компонент МТ данных (Бердичевский и Дмитриев, 2009). Поскольку компоненты тензора импеданса $[Z]$ зависят от ориентации осей x и y , то можно перейти к новой системе координат с помощью матрицы поворота $[R(\alpha)]$:

$$[Z(\alpha)] = [R(\alpha)][Z][R(\alpha)]^{-1}, \quad (3.1)$$

где

$$[R(\alpha)] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

Расписав это выражением по компонентам матрицы можно получить выражения каждой из компонент тензора импеданса:

$$Z_{xx}(\alpha) = Z_{xx} \cos^2 \alpha + Z_{yy} \sin^2 \alpha + (Z_{xy} + Z_{yx}) \sin \alpha \cos \alpha; \quad (3.3)$$

$$Z_{xy}(\alpha) = Z_{xy} \cos^2 \alpha - Z_{yx} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha; \quad (3.4)$$

Далее меняя значение α от 0 до 360° и беря от полученного значения модуль или фазу, можно построить полярные диаграммы интересующих компонент (Пушкарев, 2022).

На рисунке 3.6 продемонстрированы полярные диаграммы в точке МТЗ 1, на северо-западе карты над большой изометричной высокоомной неоднородностью (см. рис. 2.2). Для модели без ЛППН на всех периодах диаграммы модуля главной компоненты $|Z_{xy}|$ близка к окружности, а дополнительная компонента $|Z_{xx}|$ сжимается в точку, что свидетельствует об одномерности среды. При добавлении в модель приповерхностных неоднородностей наблюдается существенное увеличение размеров диаграммы и ее вытягивание. Дополнительная компонента же в данном случае представляет собой четырехлистник. Оба этих фактора свидетельствуют о двухмерности среды.

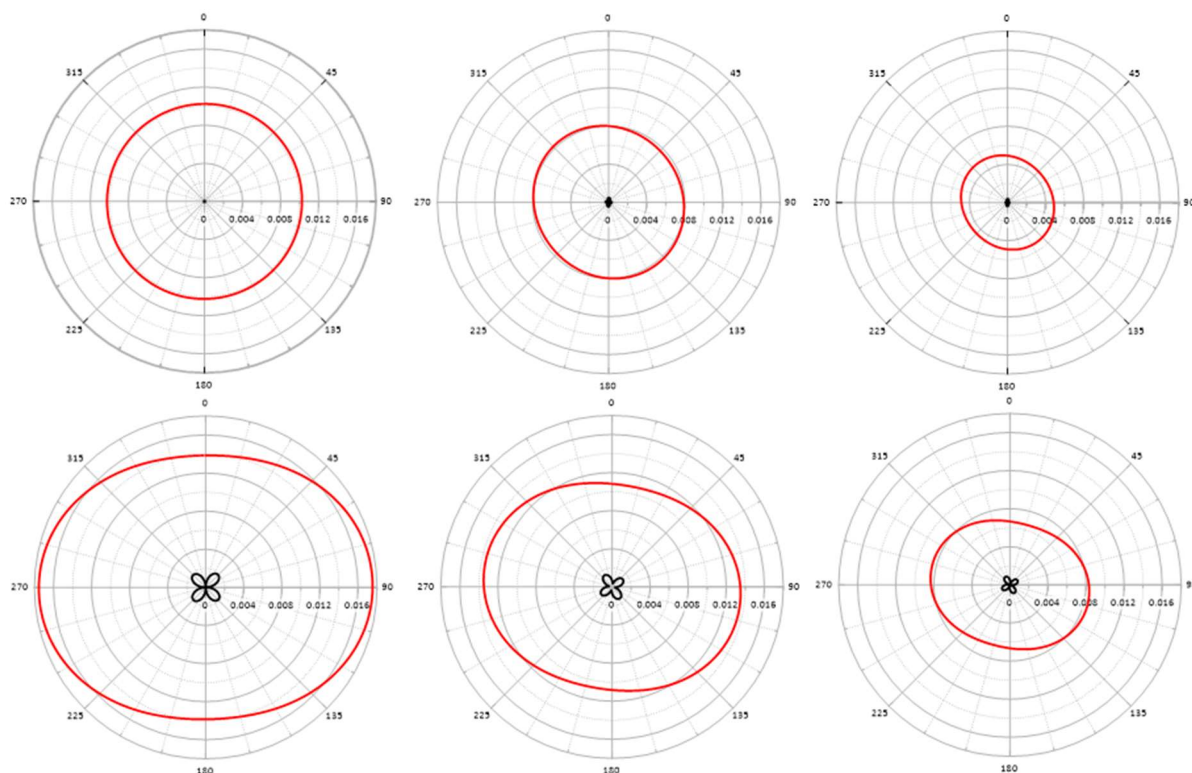


Рисунок 3.6 — Полярные диаграммы модулей компонент тензора импеданса в точке 1 на периодах 1, 10 и 100 с (слева направо) для двух моделей, сверху – без ЛППН, снизу - с ЛППН. Красный цвет – компонента $|Z_{xy}|$, черный – $|Z_{xx}|$.

На рисунке 3.7 представлены диаграммы модулей главной и дополнительной компонент тензора импеданса в точке 2 на центральном профиле. На периоде 1 с, так же, как и в предыдущей точке, диаграмма главной компоненты $|Z_{xy}|$ представляет собой окружность, а диаграмма дополнительной компоненты $|Z_{xx}|$ сжимается в точку, что характерно для одномерной среды. На более длинных периодах диаграммы принимают вид, характерный для 2D сред, основная компонента вытягивается в овал, а дополнительная компонента трансформируется в правильный четырехлистник. Поскольку рассматриваемая точка МТЗ (№ 2) в модели с ЛППН попадает на изометричную ЛППН с повышенным УЭС, диаграммы для этого варианта модели отличаются увеличенными размерами, изменений формы в данном случае не отмечается.

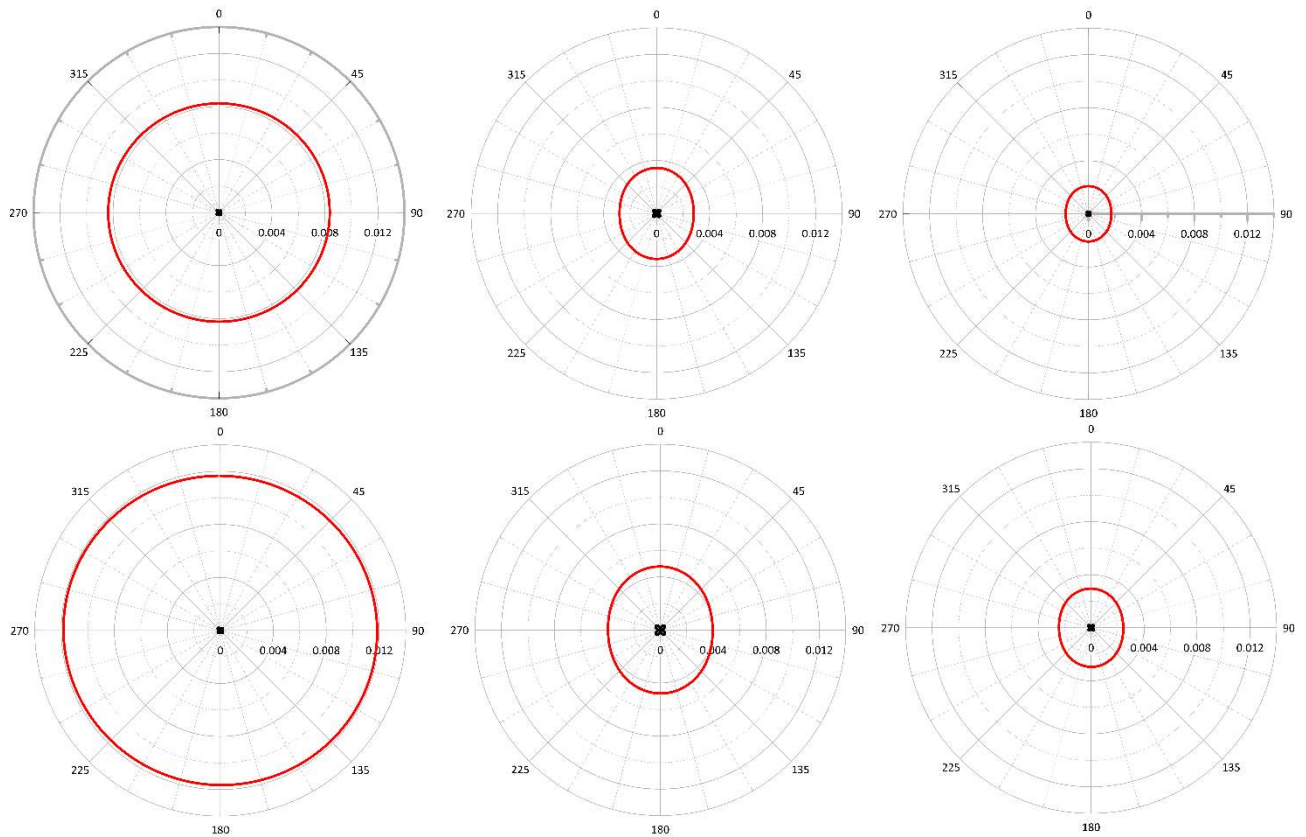


Рисунок 3.7 — Полярные диаграммы модулей компонент тензора импеданса в точке 2 на периодах 1, 10 и 100 с (слева направо) для двух моделей, сверху – без ЛППН, снизу - с ЛППН. Красный цвет – компонента $|Z_{xy}|$, черный – $|Z_{xx}|$.

Амплитудные полярные диаграммы в точке МТЗ № 3 (у угла глубинной структуры, см. рис. 2.2), расположенной в области повышенных значений $skew_B$, ведут себя иначе (рис. 3.8). Точка попадает на вытянутую меридионально ЛППН. На периоде 1 с полярные диаграммы для варианта модели с ЛППН характерны для двумерной среды и отражают влияние этой ЛППН. На больших периодах добавляется влияние глубинной неоднородности и наблюдается суперпозиция приповерхностного и глубинного эффектов.

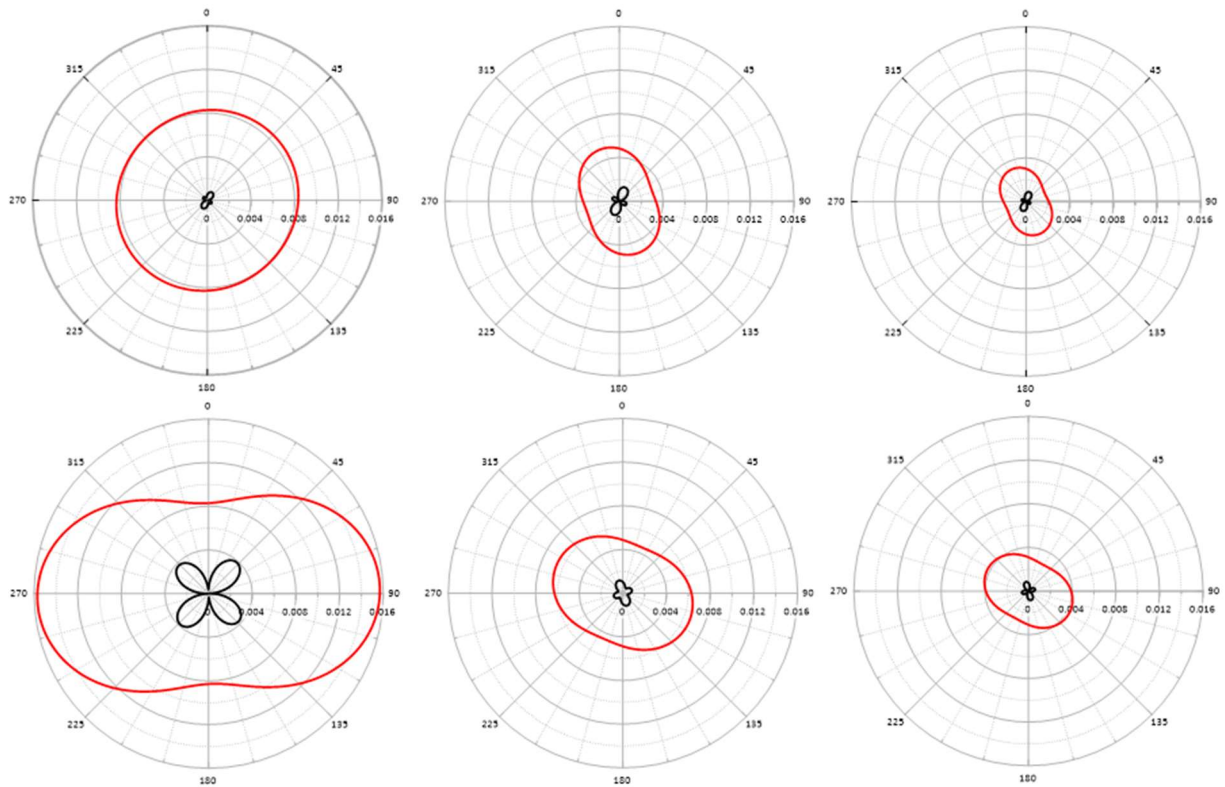


Рисунок 3.8 — Полярные диаграммы модулей компонент тензора импеданса в точке 3 на периодах 1, 10 и 100 с (слева направо) для двух моделей, сверху — без ЛППН, снизу - с ЛППН. Красный цвет — компонента $|Z_{xy}|$, черный — $|Z_{xx}|$.

На рисунке 3.9 изображены полярные диаграммы для точки МТЗ 4, которая попадает на вытянутую проводящую неоднородность. Здесь на периоде 10 секунд отчетливо наблюдается расхождение в ориентировке диаграмм главной компоненты. В случае модели без ЛППН диаграмма вытягивается по направлению простирания исследуемой проводящей впадины, а при наличии неоднородности, перпендикулярной главной структуре, наблюдается также и поворот полярной диаграммы на 90 градусов.

Таким образом, наличие приповерхностных неоднородностей, особенно линейных, приводит к существенному изменению как размеров амплитудных диаграмм, так и их направления. В общем случае главные компоненты тензора импеданса вытягиваются по направлению простирания структуры, а по дополнительным компонентам можно судить о размерности среды.

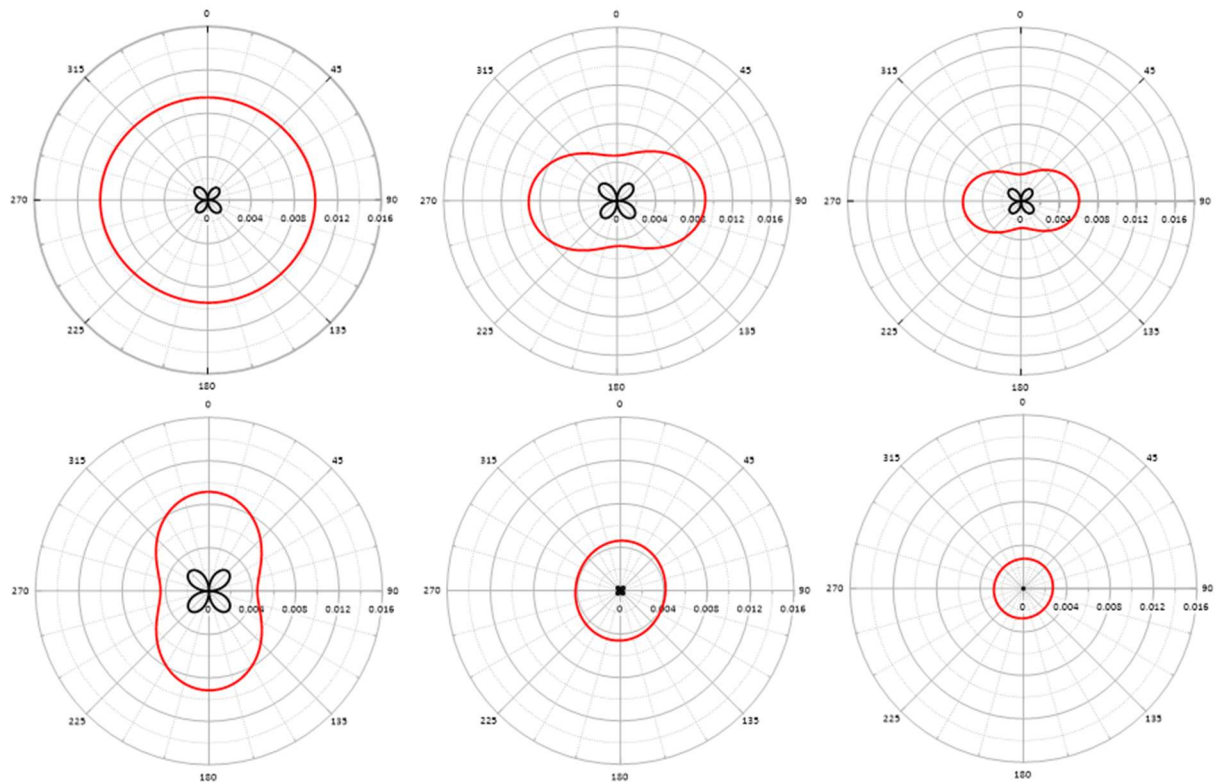


Рисунок 3.9 — Полярные диаграммы модулей компонент тензора импеданса в точке 4 на периодах 1, 10 и 100 с (слева направо) для двух моделей, сверху – без ЛППН, снизу - с ЛППН. Красный цвет – компонента $|Z_{xy}|$, черный – $|Z_{xx}|$.

Фазы компонент тензора импеданса менее подвержены влиянию ЛППН, поэтому полярные диаграммы фазы основной компоненты $\arg(Z_{xy})$ для вариантов модели с однородным и неоднородным верхним слоем практически совпадают. На рис. 3.10 приведены диаграммы $\arg(Z_{xy})$ сразу для всех рассматриваемых точек МТЗ. На коротких и длинных периодах диаграммы свидетельствуют об одномерном характере среды, а на промежуточном периоде (10 с) вытягиваются под влиянием глубинной неоднородности. В точках над центром проводящей впадины диаграмма вытягивается вдоль ее границы, а у углов поворачивается. Таким образом, полярные диаграммы фаз огибают главную структуру, показывая контур ее границы. Полярные диаграммы фазы в общем случае ортогональны амплитудным диаграммам главной компоненты, если, конечно, последние не осложнены влиянием ЛППН.

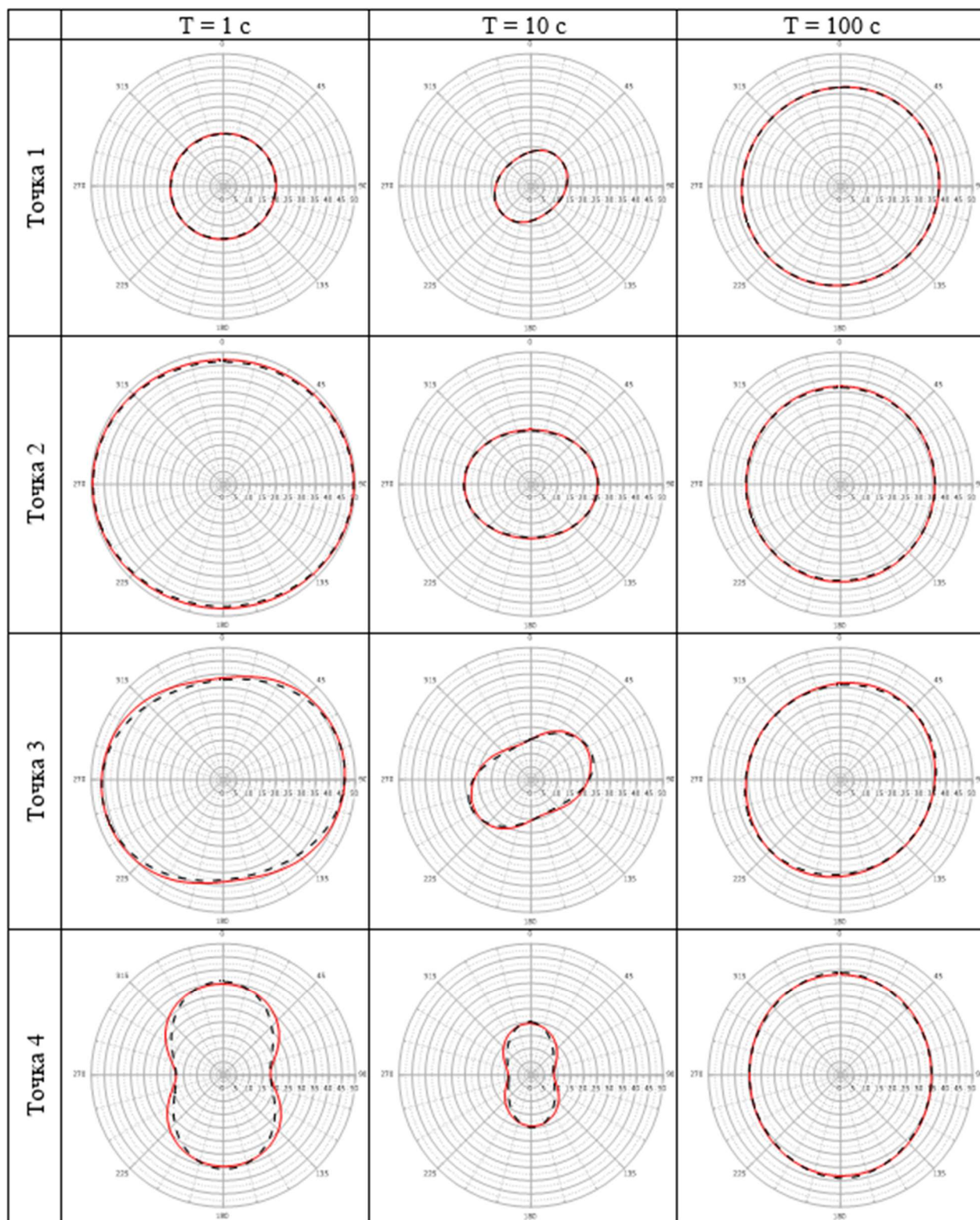


Рисунок 3.10 — Полярные диаграммы фазы основной компоненты тензора импеданса $\arg(Z_{xy})$ на периодах 1, 10 и 100 с (слева направо) в точках, отмеченных на рисунке 2, черный пунктир – модель без ЛППН, красный цвет – с ЛППН.

Полярные диаграммы фазового тензора можно построить схожим образом, что и импедансные. Для этого используются адаптированные под эту задачу формулы 3.3 и 3.4:

$$\Phi_{xx}(\alpha) = \Phi_{xx} \cos^2 \alpha + \Phi_{yy} \sin^2 \alpha + (\Phi_{xy} + \Phi_{yx}) \sin \alpha \cos \alpha; \quad (3.5)$$

$$\Phi_{xy}(\alpha) = \Phi_{xy} \cos^2 \alpha - \Phi_{yx} \sin^2 \alpha - (\Phi_{xx} - \Phi_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha; \quad (3.6)$$

Также, помимо полярных диаграмм фазового тензора, имеет смысл строить и эллипсы фазового тензора. Определяется он по четырем независимым параметрам, которые свободны от влияния приповерхностных неоднородностей, которые характеризуют региональный фон (Caldwell et al., 2004; Booker, 2014). Ориентация эллипса в пространстве контролируется параметром $\alpha - \beta$. А полуоси эллипса фазового тензора φ_1 и φ_2 определяются по главным значениям фазового тензора:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\|\Phi\|^2 + 2 |\det[\Phi]|} + \sqrt{\|\Phi\|^2 - 2 |\det[\Phi]|} \right\}, \quad (3.7)$$

$$\varphi_2 = -\arctg \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\|\Phi\|^2 + 2 |\det[\Phi]|} - \sqrt{\|\Phi\|^2 - 2 |\det[\Phi]|} \right\}. \quad (3.8)$$

На рисунке 3.11 для тех же точек МТЗ приведены графические изображения фазового тензора. Здесь показаны полярные диаграммы основной и дополнительной компонент Φ_{xx} и Φ_{xy} для моделей с однородным верхним слоем и множеством ЛППН, а также эллипсы фазового тензора. Видно, что полярные диаграммы обеих компонент фазового тензора для двух моделей абсолютно идентичны, что говорит об отсутствии влияния ЛППН на компоненты $[\Phi]$. Также на этом же рисунке показаны главные направления, определенные методом Бара (азимутальные углы α_R и $\alpha_R + 90^\circ$) и методом фазового тензора (азимутальные углы α_1 и $\alpha_1 + 90^\circ$). Поскольку они отличаются на угол β (характеризующий трехмерные эффекты), который для исследуемой модели во всех точках МТЗ не превышает 2-3 градуса, главные направления, определенные этими двумя методами, практически совпадают.

Как и в случае импедансных фазовых диаграмм, наиболее ярко неоднородность среды проявляется в фазовом тензоре на средних периодах (10 с). В точке МТЗ № 2 (у центра северной границы глубинной неоднородности) диаграммы и эллипс показывают меридиональное и широтное главные направления, такая же ситуация наблюдается у точки МТЗ №4, у восточной границы проводящей впадины. В точке МТЗ № 3 (у угла глубинной неоднородности) эти направления поворачиваются. Схожим образом ведут себя полярные диаграммы фазового тензора у северо-западного угла карты. Таким образом, фазовые диаграммы главной компоненты тензора импеданса и графические представления главной компоненты фазового тензора несут одну и ту же информацию. Также, как и в случае с импедансными полярными диаграммами, главная компонента Φ_{xx} представляет собой окружность в 1D среде, овал в случае 2D и приплюснутый в талии боб в трехмерном случае. Дополнительная компонента Φ_{xy} сжимается в точку в одномерной среде, в двухмерной имеет вид правильного четырехлистника, а в 3D среде правильность этого четырехлистника нарушается. Эллипс фазового тензора ведет себя схожим образом с главной компонентой Φ_{xx} , разве что в трехмерном случае не принимает форму сплюснутого по бокам овала, а лишь становится более вытянутым. Стоит заметить, что главные направления по Бару отвечают большой и малой осям диаграммы основной компоненты фазового тензора и минимумам его дополнительной компоненты. А главные направления по фазовому тензору, по определению, отвечают большой и малой осям эллипса.

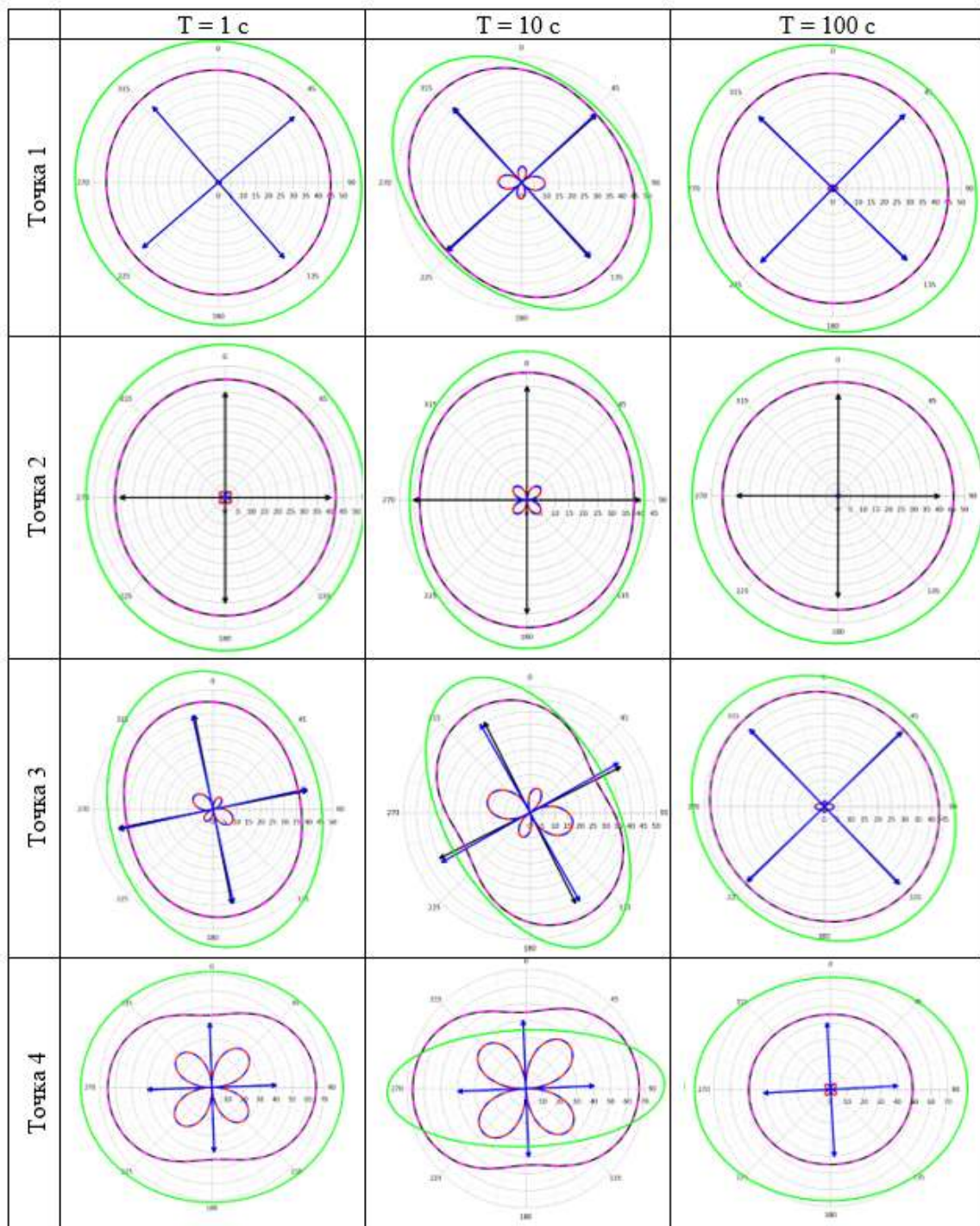


Рисунок 3.11 — Полярные диаграммы фазового тензора на периодах 1, 10 и 100 с (слева направо) в точках, отмеченных на рисунке 2. Черная и красная линии — основная и дополнительная компоненты для модели с ЛППН, фиолетовый и синий пунктир — они же для модели без ЛППН. Здесь же зеленым цветом показаны эллипсы фазового тензора. Черные стрелки — главные направления структуры, определенные по методу Бара, синие — главные направления по методу фазового тензора (с учетом поправки за асимметрию среды).

3.4. Выводы

В третьей главе исследования были рассмотрены несколько методов разделения локальных и региональных магнитотеллурических эффектов: устойчивые к влиянию локальных приповерхностных неоднородностей методы Бара и фазового тензора. Также применен один из классических методов определения главных направлений тензора импеданса – метод ортогонализации Эггерса, при использовании которого, при появлении ЛППН в модели, получаемые оценки этих направлений существенно искажаются.

Основная информация, которую извлекают методы локально-региональной декомпозиции из искаженных влиянием ЛППН данных, это главные направления (азимутальные углы), связанные с региональными структурами. В двумерной среде они совпадают с направлениями вдоль и вкрест простирания структур, а в осесимметричной, к которой близка исследуемая в диссертации модель, с радиальным и азимутальным направлениями.

Методы декомпозиции, как и следовало ожидать, дают одни и те же результаты для обоих вариантов модели. При этом методы Бара и фазового тензора дали очень близкие друг к другу результаты (главные направления) на средних периодах (на которых наиболее существенны значения параметра Δ , то есть заметно сказывается горизонтальная неоднородность среды). Небольшие различия наблюдаются лишь в точках у углов исследуемой глубинной неоднородности – в областях с наибольшими значениями параметров асимметрии.

Более полную информацию о размерности среды и простирании структур дают полярные диаграммы. Главная и дополнительная компоненты $|Z_{xy}|$ и $|Z_{xx}|$ подвержены влиянию приповерхностных неоднородностей, изометричные аномалии приводят к изменению размеров диаграмм, так же как это было с кривыми кажущегося сопротивления, а вытянутые ЛППН, помимо влияния на размер, также приводят к существенному изменению ориентации диаграммы. На

диаграммы фазы главной компоненты, также как и на фазовые кривые, приповерхностные неоднородности оказывают слабое влияние, поэтому они позволяют уверенно определять главные направления региональной структуры. На диаграммы фазового тензора ЛППН не оказывают вообще никакого влияния, а поведение главной компоненты Φ_{xx} схоже с поведением фазы главной компоненты тензора импеданса – ее ориентировка совпадает с азимутом простирания. По ориентировке эллипса фазового тензора можно судить о простирании структуры, а по степени его сжатости – о размерности среды. В 1D среде эллипс превращается в окружность, а при нарушении одномерности начинает вытягиваться.

ГЛАВА 4. ЛОКАЛЬНО-РЕГИОНАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ТЕНЗОРА⁴

4.1. О методе теллурических токов

Метод теллурических токов (МТТ), использующий измерения электрического поля в двух точках наблюдения, появился раньше метода МТЗ. Его идея была высказана Конрадом Шлюмберже в 1930-е годы и развивалась его последователями в западной Европе и СССР (Дахнов, 1937). В послевоенные годы С.М. Шейнманом и М.Н. Бердичевским была проведена более системная разработка МТТ, и уже в 1950-е годы метод получил широкое применение (Бердичевский, 1960). На том техническом уровне измерения были реализованы в узком диапазоне периодов, по отношению компонент поля в двух точках определялись скалярные параметры, основным результатом интерпретации были карты суммарной продольной проводимости осадочного чехла.

Линейные соотношения между векторами, образованными горизонтальными компонентами поля, с использованием тензора импеданса $[Z]$ и теллурического тензора $[T]$, были предложены в работе (Бердичевский, 1964). Они могут быть записаны в виде:

$$\vec{E}_\tau = [Z]\vec{H}_\tau, \quad \vec{E}_\tau = [T]\vec{E}_\tau^0,$$

где $\vec{E}_\tau$ и $\vec{H}_\tau$ – горизонтальное электрическое и магнитное поле в рядовой точке, $\vec{E}_\tau^0$ – электрическое поле в базовой точке. Базовая точка в данном исследовании находилась вне области распространения ЛППН, показанной на рисунке 2.2. Последнее соотношение может быть записано с использованием компонент

⁴ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Суконкин М.А., Пушкарев П.Ю. Локально-региональное разложение теллурического тензора // Физика Земли. — 2025. — № 3. — С. 54-69. EDN: [FFAISM](#) (2,2 п.л, вклад автора 60%), Импакт-фактор 1,176. (РИНЦ).

электрического поля и теллурического тензора в декартовой системе координат в виде (Электроразведка..., 1989):

$$E_x = T_{xx}E_x^0 + T_{xy}E_y^0, \quad (4.1)$$

$$E_y = T_{yx}E_x^0 + T_{yy}E_y^0. \quad (4.2)$$

Тензор $[T]$ редко используется при интерпретации данных МТЗ. Однако, современные схемы наблюдений позволяют получать синхронные записи электрического поля в двух точках, а некоторые программы для обработки записей поля дают возможность его оценивать и использовать для отбраковки зашумленных данных (Garcia, Jones, 2005; Епишкин, 2016).

В статье (Bakker et al., 2015) рассматривается переход от магнитотеллурических тензоров, в том числе $[T]$, к соответствующим им фазовым тензорам. Этот подход позволяет избавиться от влияния локальных приповерхностных неоднородностей и будет подробно рассмотрен ниже в представленном диссертационном исследовании.

Среди других работ, посвященных применению $[T]$, следует отметить еще две. В статье (Зорин и др., 2016) теллурический тензор предлагается использовать для выявления аномалий вызванной поляризации (метод МТ ВП). В работе (Мороз и Рылов, 2018) представлены результаты мониторинга $[T]$ на Камчатке в связи с изучением сейсмичности.

4.2. Теллурический тензор в средах различной размерности

Основными компонентами $[T]$ являются T_{xx} и T_{yy} , а T_{xy} и T_{yx} – дополнительными. Полезным инвариантом, аналогичным широко используемому эффективному импедансу Z_{eff} , является корень из определителя теллурического тензора T_{ef} :

$$T_{eff} = \sqrt{T_{xx} \cdot T_{yy} - T_{xy} \cdot T_{yx}}. \quad (4.3)$$

В 1D (горизонтально-слоистой) среде теллурический тензор принимает вид:

$$[T^{1D}] = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Поскольку разрез под рядовой и под базовой точками совпадает, тензор неинформативен. В 1D среде T_{eff} равен 1, по его отличиям от единицы можно судить о степени горизонтальной неоднородности среды.

В 2D среде, в случае, когда y – ось однородности среды, теллурический тензор:

$$[T^{2D}] = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{\perp} & 0 \\ 0 & T^{\parallel} \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

где $T^{\perp}$ - компонента, связанная с токами, текущими вкrest структур, а $T^{\parallel}$ - компонента, связанная с токами, текущими вдоль структур. Практически считать среду двухмерной можно при малых значениях теллурического параметра асимметрии Свифта:

$$skew_S^T = \left| \frac{T_{xy} - T_{yx}}{T_{xx} + T_{yy}} \right|. \quad (4.6)$$

В 2D среде T_{eff} равен среднегеометрическому между поперечной и продольной компонентами.

4.3. Локально-региональное разложение теллурического тензора $[T]$

Разделение тензора $[Z]$ на множители, связанные с региональной и локальной составляющими, было предложено в работе (Zhang et al., 1987). Аналогичным образом его можно применить к тензору $[T]$.

Пусть $[T^S]$, $\overrightarrow{E_t^S}$, $\overrightarrow{E_t^{0S}}$ – теллурический тензор и горизонтальные электрические поля в рядовой и базовой точках, отвечающие суперпозиции региональных и локальных структур, $[T^R]$, $\overrightarrow{E_t^R}$, $\overrightarrow{E_t^{0R}}$ – их региональные составляющие, а $[e]$ и $[e^0]$ – матрицы локальных электрических искажений в рядовой и базовой точках. Тогда в этих точках: $\overrightarrow{E_t^S} = [e]\overrightarrow{E_t^R}$, $\overrightarrow{E_t^{0S}} = [e^0]\overrightarrow{E_t^{0R}}$.

Используя теллурический тензор и его региональную составляющую, запишем:

$$\overrightarrow{E_t^S} = [e]\overrightarrow{E_t^R} = [e][T^R]\overrightarrow{E_t^{0R}} = [e][T^R][e^0]^{-1}\overrightarrow{E_t^{0S}} = [T^S]\overrightarrow{E_t^{0S}}, \quad (4.7)$$

где

$$[T^S] = [e][T^R][e^0]^{-1}. \quad (4.8)$$

Если предположить, что частота достаточно низкая, а базовая точка выбрана в области без ЛППН, то матрица $[e]$ будет вещественная, а электрическими искажениями в базовой точке $[e^0]$ можно пренебречь:

$$[T^S] = [e][T^R]. \quad (4.9)$$

Причем матрица $[e]$ здесь получается та же самая, что и при декомпозиции тензора $[Z]$. Задача состоит в том, чтобы выделить региональную составляющую $[T^R]$.

В качестве критерия применимости модели, допускающей последнее разложение, но применительно к тензору $[Z]$, в работе (Bahr, 1988) была предложена близость к нулю параметра, который позже был назван параметром асимметрии Бара. Можно ввести аналогичный параметр Бара для теллурического тензора:

$$skew_B^T = \frac{\sqrt{|Im(TxyTyu^* + TxxTyx^*)|}}{|Txx + Tyu|}, \quad (4.10)$$

где звездочка означает комплексно-сопряженную величину.

В рамках такой модели существует целый ряд методов разделения локальных и региональных эффектов, хорошо разработанных применительно к тензору импеданса: метод Бара, метод Грума-Бэйли и др., они были подробно разобраны в первой главе диссертации. В данном исследовании рассмотрен наиболее универсальный и получивший широкое применение метод фазового тензора, который применительно к $[Z]$ был предложен в работе (Caldwell et al., 2004) и был подробно исследован в предыдущей главе.

4.4. Метод теллурического фазового тензора $[\Phi^T]$

Также, как и в главе 3, расчет фазового тензора производится с использованием формулы декомпозиции тензора, в данном случае,

теллурического: $[T^S] = [e][T^R]$, которая расписывается отдельно для вещественных и мнимых частей:

$$[ReT^S] = [e][ReT^R], \quad [ImT^S] = [e][ImT^R].$$

Теллурический вещественный фазовый тензор определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} [\Phi^T] &= [ImT^S][ReT^S]^{-1} = [e][ImT^R][e]^{-1}[ReT^R]^{-1} = [ImT^R][ReT^R]^{-1} = \\ &= \begin{bmatrix} \Phi_{xx}^T & \Phi_{xy}^T \\ \Phi_{yx}^T & \Phi_{yy}^T \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Отсюда можно выписать зависимость каждой из компонент теллурического фазового тензора от компонент регионального теллурического тензора:

$$\Phi_{xx}^T = \frac{ReT_{yy}^R ImT_{xx}^R - ReT_{xy}^R ImT_{yx}^R}{ReT_{xx}^R ReT_{yy}^R - ReT_{xy}^R ReT_{yx}^R}, \quad (4.12)$$

$$\Phi_{xy}^T = \frac{ReT_{yy}^R ImT_{xy}^R - ReT_{xy}^R ImT_{yy}^R}{ReT_{xx}^R ReT_{yy}^R - ReT_{xy}^R ReT_{yx}^R}, \quad (4.13)$$

$$\Phi_{yx}^T = \frac{ReT_{xx}^R ImT_{yx}^R - ReT_{yx}^R ImT_{xx}^R}{ReT_{xx}^R ReT_{yy}^R - ReT_{xy}^R ReT_{yx}^R}, \quad (4.14)$$

$$\Phi_{yy}^T = \frac{ReT_{xx}^R ImT_{yy}^R - ReT_{yx}^R ImT_{xy}^R}{ReT_{xx}^R ReT_{yy}^R - ReT_{xy}^R ReT_{yx}^R}. \quad (4.15)$$

В одномерной среде все компоненты теллурического тензора – вещественные числа, соответственно, теллурический фазовый тензор приобретает вид:

$$[\Phi^{T \ 1D}] = \begin{bmatrix} \Phi_{xx}^T & \Phi_{xy}^T \\ \Phi_{yx}^T & \Phi_{yy}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

В двумерной среде, если y – ось однородности среды:

$$[\Phi^{T \ 2D}] = \begin{bmatrix} \Phi_{xx}^T & \Phi_{xy}^T \\ \Phi_{yx}^T & \Phi_{yy}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{tg} \arg T^\perp & 0 \\ 0 & \operatorname{tg} \arg T^\parallel \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

В общем случае азимут простирания региональных двумерных структур можно определить (с точностью до 90°) по формуле:

$$\alpha^T = \frac{1}{2} \arctg \frac{\Phi_{xy}^T + \Phi_{yx}^T}{\Phi_{xx}^T - \Phi_{yy}^T}. \quad (4.18)$$

Также в методе фазового тензора вводится инвариантный параметр β^T , который характеризует региональную асимметрию среды:

$$\beta^T = \frac{1}{2} \arctg \frac{\Phi_{xy}^T - \Phi_{yx}^T}{\Phi_{xx}^T + \Phi_{yy}^T}. \quad (4.19)$$

Параметр β^T является аналогом $skew_B^T$, его величина тем больше, чем сильнее региональные трехмерные эффекты. С его помощью можно определить главные направления фазового тензора:

$$\alpha_1^T = \alpha^T - \beta^T, \quad \alpha_2^T = \alpha_1^T + 90^\circ.$$

Стоит отметить, что в двумерной среде $\beta^T = 0$ и главные направления $[\Phi^T]$ совпадают с направлениями вдоль и вкост структур. Похожая ситуация наблюдается в осесимметричных средах, здесь главные направления фазового тензора совпадают с радиальным и азимутальным.

4.5. Кривые компонент тензоров $[T]$ и $[\Phi^T]$

На рисунках 4.1 – 4.4 представлены кривые модулей и фаз главных и побочных компонент теллурического тензора в четырех точках МТЗ, отмеченных на рисунке 2.2. В случае модели с однородным верхним слоем, кривые модулей главных компонент для всех точек начинаются с единицы, а в правой части выходят на пониженный уровень, если точка находится над исследуемой проводящей впадиной (точки МТЗ 2 и 3), связано это с влиянием структуры как проводящей неоднородности. В противном случае (точки 1 и 4) кривые имеют вид практически прямой линии.

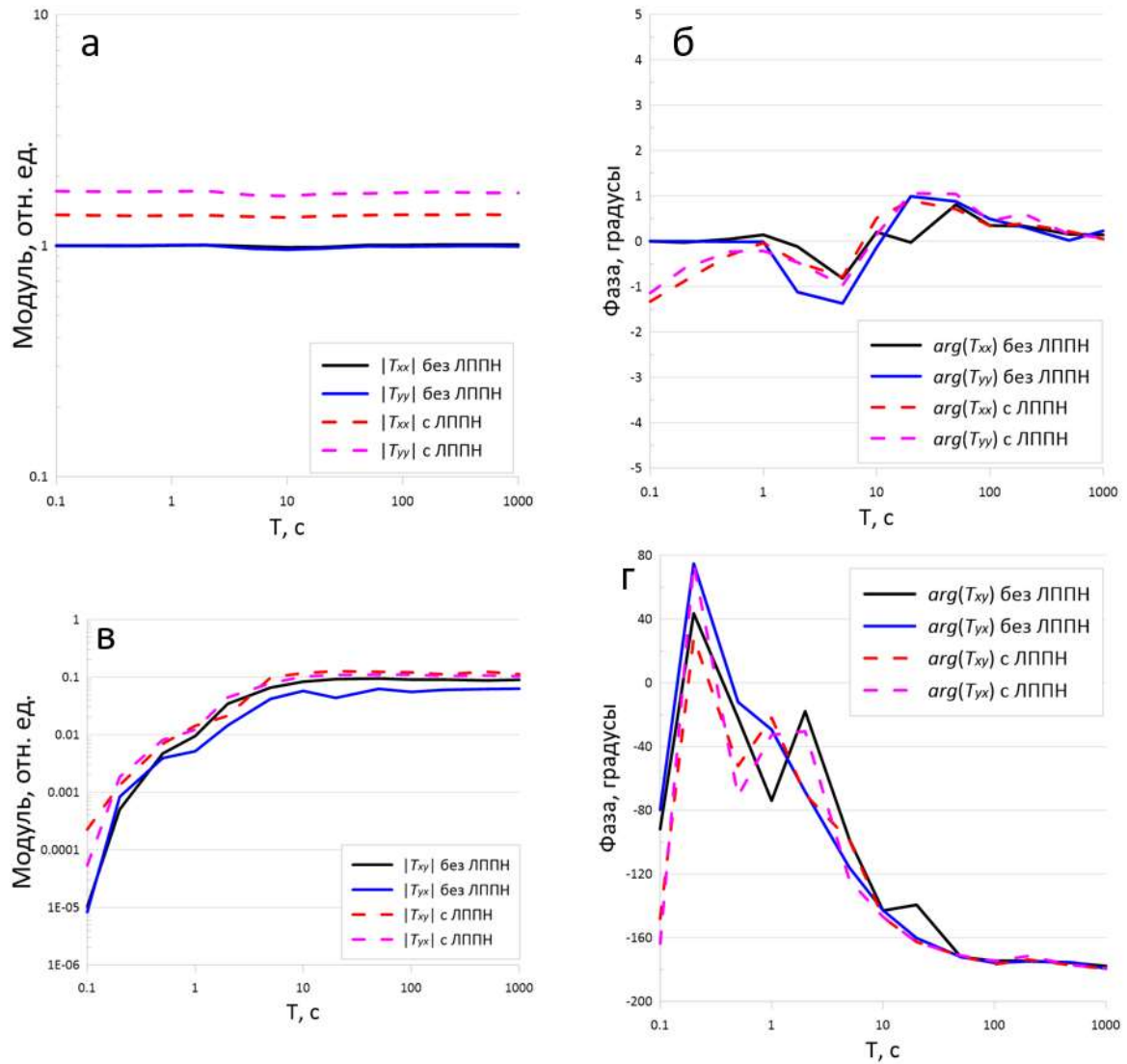


Рисунок 4.1 — Кривые модулей компонент и их фаз теллурического тензора в точке 1 для обеих моделей: а – модули главных компонент $|T_{xx}|$ и $|T_{yy}|$, б – фазы главных компонент $arg(T_{xx})$ и $arg(T_{yy})$, в – модули дополнительных компонент $|T_{xy}|$ и $|T_{yx}|$, г – фазы дополнительных компонент $arg(T_{xy})$ и $arg(T_{yx})$.

Под влиянием ЛППН происходит статический сдвиг амплитудных кривых. Отметим, что над изометричными высокоомными ЛППН (точки 1 и 2) кривые по обоим компонентам смещаются вверх примерно одинаково. А над вытянутыми (квази-двухмерной) ЛППН, в точках 3 и 4, смещение происходит только для одной кривой (квази-двухмерной к ЛППН).

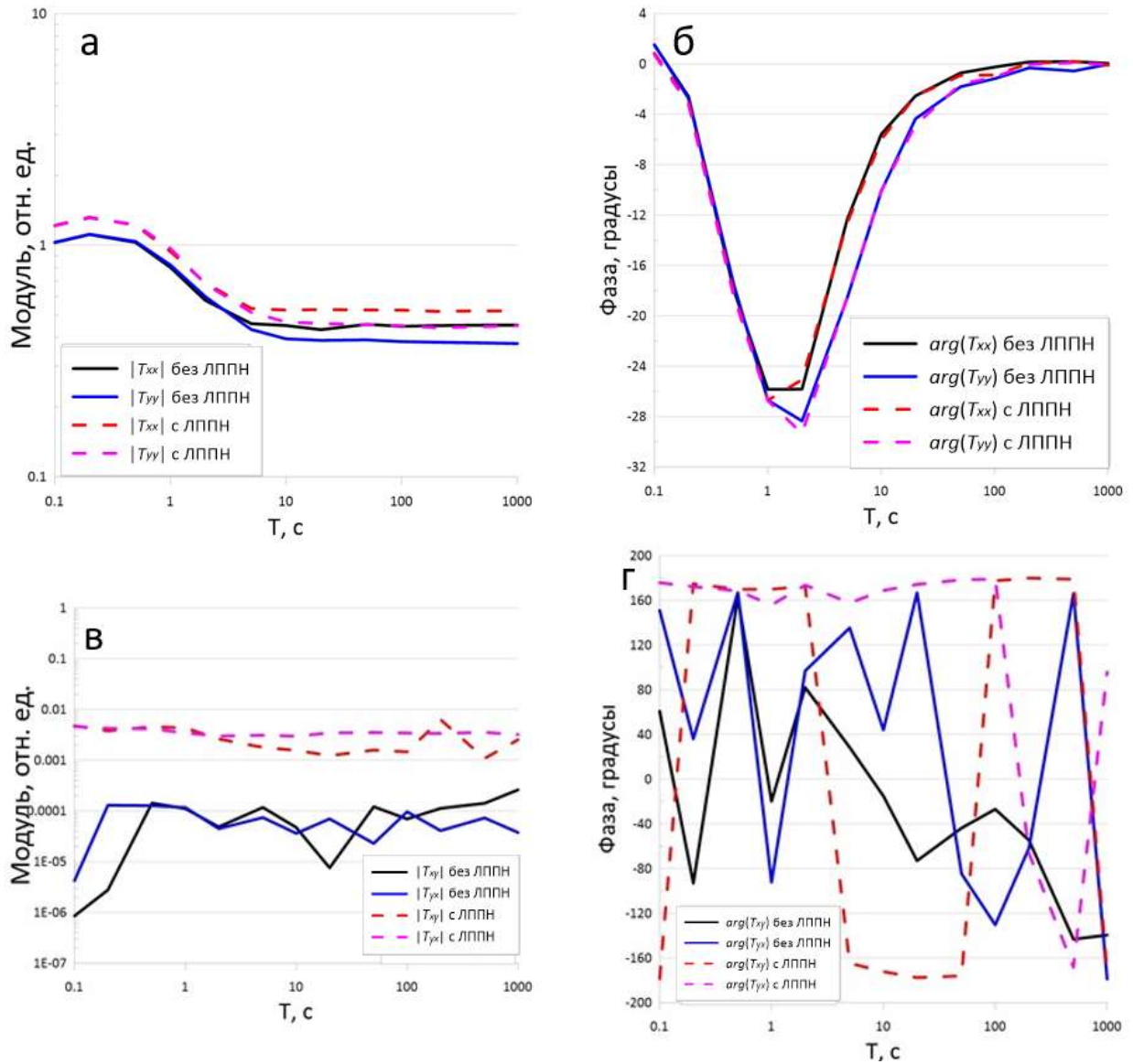


Рисунок 4.2 — Кривые модулей компонент и их фаз теллурического тензора в точке 2 для обеих моделей: а – модули главных компонент $|T_{xx}|$ и $|T_{yy}|$, б – фазы главных компонент $\arg(T_{xx})$ и $\arg(T_{yy})$, в – модули дополнительных компонент $|T_{xy}|$ и $|T_{yx}|$, г – фазы дополнительных компонент $\arg(T_{xy})$ и $\arg(T_{yx})$.

Также, как и в случае с кривыми эффективного кажущегося сопротивления, приведенными в главе 3, при попадании на высокоомную неоднородность происходит статическое смещение по уровню вверх, как в точке 3. При наличии проводящей неоднородности, как в точке 4, происходит смещение по уровню вниз. Фазовые кривые, как и в случае с тензором импеданса, описанном в главе 2, слабо подвержены влиянию приповерхностных неоднородностей, это хорошо

видно на всех графиках фаз главных компонент. В точке 1 присутствует небольшое расхождение, однако это связано с погрешностями, так как в этой точке в целом наблюдаются небольшие значения $\arg(T_{xx})$ и $\arg(T_{yy})$.

Кривые модулей и фаз дополнительных компонент теллурического тензора ($|T_{xy}|$ и $|T_{yx}|$) в тех же точках МТЗ ведут себя несколько иначе. В точке 2 в варианте модели с однородным верхним слоем дополнительные компоненты очень малы, примерно в 10^5 раз меньше основных, и рассчитываются крайне неустойчиво. В варианте модели с ЛППН значения модулей больше (но все равно менее 1 % от основных компонент) и вычисляются устойчивее, в частности, фаза определяется как примерно 180 (или -180) градусов. В точке остальных точек модули компонент малы на коротких периодах, но на больших под влиянием глубинной структуры возрастают, составляя чуть более 10 % от основных компонент. Видно, что влияние ЛППН на дополнительных компонентах проявляется примерно так же, как и на главных. В частности, в третьей точке модуль одной дополнительной компоненты ($|T_{xy}|$) почти не меняется, а второй ($|T_{yx}|$) – смещается по уровню вверх. Аналогичная ситуация наблюдается и в четвертой точке, находящейся над проводящей изометричной аномалией. Здесь также модуль дополнительной компоненты ($|T_{xy}|$) едва ли меняется, а модуль компоненты ($|T_{yx}|$) статически смещается по уровню, но уже вниз.

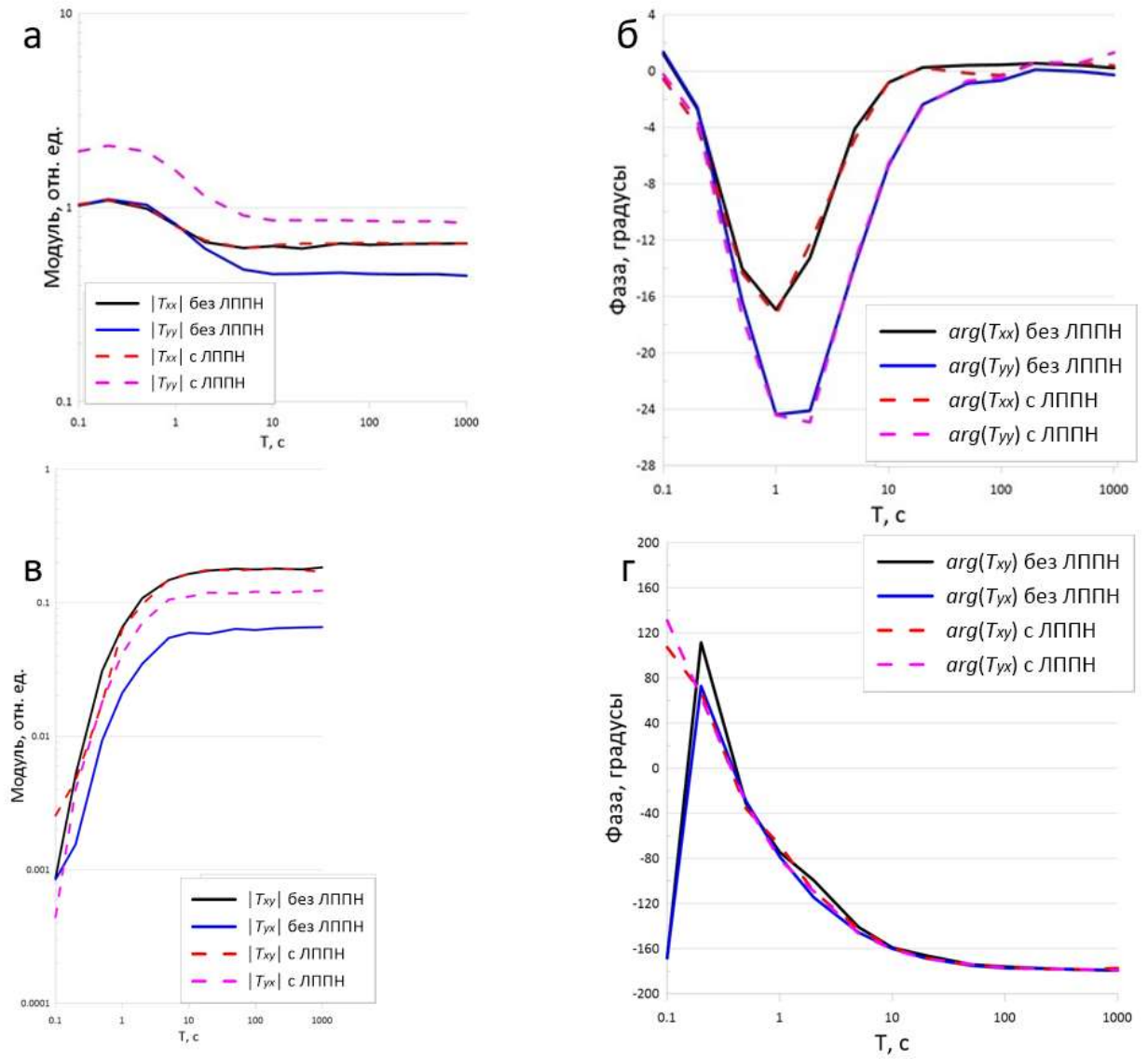


Рисунок 4.3 — Кривые модулей компонент и их фаз теллурического тензора в точке 3 для обеих моделей: а – модули главных компонент $|T_{xx}|$ и $|T_{yy}|$, б – фазы главных компонент $arg(T_{xx})$ и $arg(T_{yy})$, в – модули дополнительных компонент $|T_{xy}|$ и $|T_{yx}|$, г – фазы дополнительных компонент $arg(T_{xy})$ и $arg(T_{yx})$.

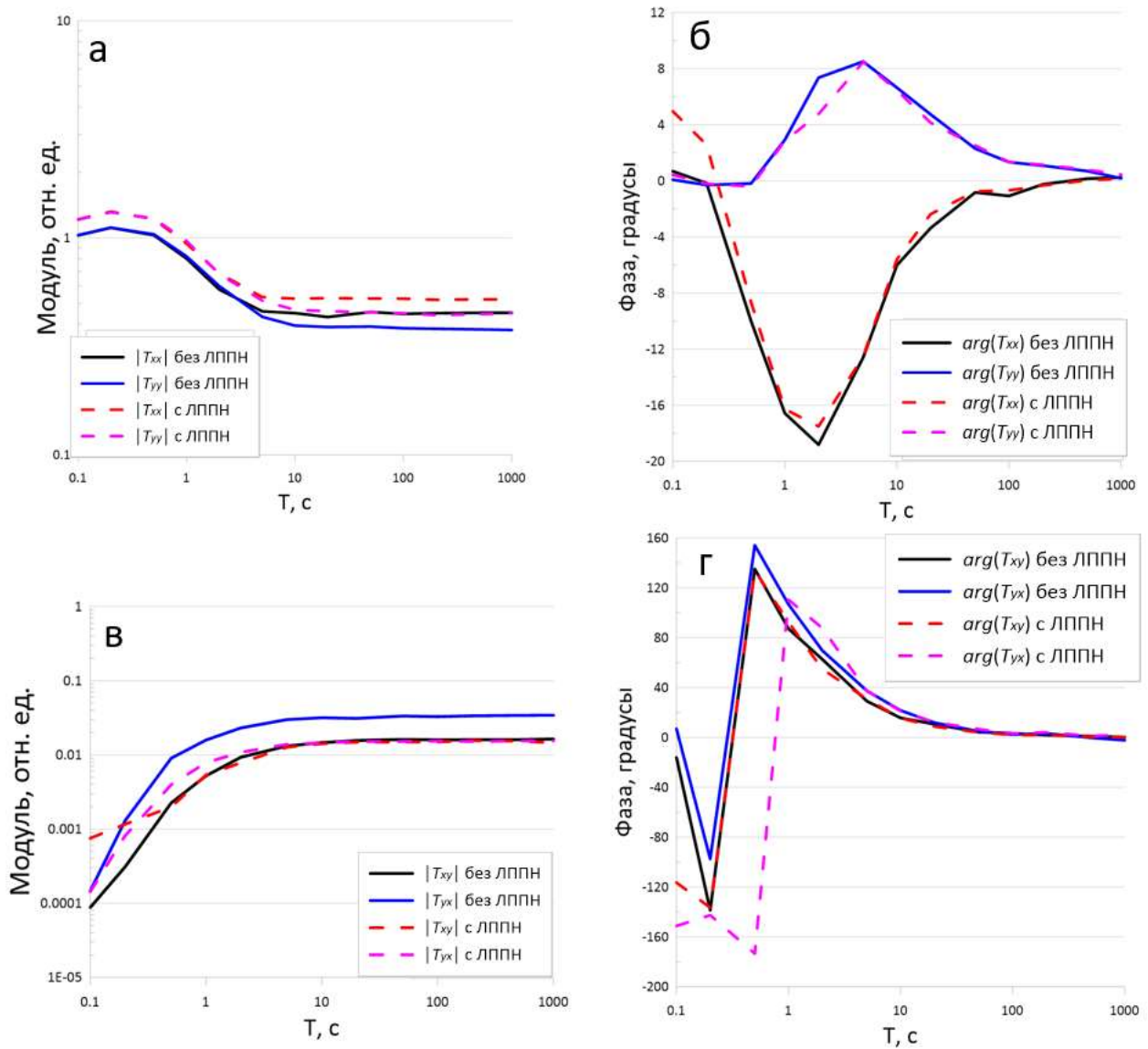


Рисунок 4.4 — Кривые модулей компонент и их фаз теллурического тензора в точке 3 для обеих моделей: а – модули главных компонент $|T_{xx}|$ и $|T_{yy}|$, б – фазы главных компонент $arg(T_{xx})$ и $arg(T_{yy})$, в – модули дополнительных компонент $|T_{xy}|$ и $|T_{yx}|$, г – фазы дополнительных компонент $arg(T_{xy})$ и $arg(T_{yx})$.

На рисунке 4.5 приведены кривые компонент фазового тензора в тех же точках МТЗ (см. рис. 2.2). Поскольку для вариантов модели с и без приповерхностных неоднородностей они практически идентичны, то приведены результаты только для модели с неоднородным верхним слоем. В точке 1 (рис. 27а) компоненты теллурического фазового тензора, как и компоненты $[T]$, малы, наблюдается небольшая отрицательная аномалия в промежутке периодов 1 – 10

с, такая небольшая амплитуда кривых свидетельствует об одномерности среды в этой области.

В точке 2 (рис. 4.4б) в основных компонентах (Φ_{xx}^T и Φ_{yy}^T) наблюдается яркая (порядка 30 градусов) аномалия, в то время как дополнительные компоненты (Φ_{xy}^T и Φ_{yx}^T) почти нулевые. Эта картина характерна для двухмерной ситуации при ориентации осей вдоль и вкрест структур, в данном случае она возникает в точке у центра протяженной границы глубинной неоднородности.

В точке 3 (рис 4.4в), которая находится вблизи угла глубинной неоднородности, ситуация существенно трехмерная, и все компоненты сопоставимы по величине, особенно на периодах порядка 10 с. Это совпадает с данными карт параметров асимметрии Бара и Свифта, а также с результатами анализа полярных диаграмм, приведенных в главе 2.

В точке 4 (рис. 4.4г) наблюдается схожая со второй точкой ситуация. Опять дополнительные компоненты Φ_{xy}^T и Φ_{yx}^T практически равны нулю, а в графиках главных компонент Φ_{xx}^T и Φ_{yy}^T наблюдаются яркие аномалии, вплоть до 20 градусов. Однако в этой точке, в отличие от предыдущей, аномалии для разных компонент обладают разными знаками.

Таким образом, кривые теллурического тензора ведут себя схожим образом с кривыми кажущегося сопротивления. Фазы не подвержены влиянию приповерхностных неоднородностей, все присутствующие расхождения связаны с неустойчивостью их определения. Модули главных компонент, также как и кривые эффективного сопротивления, смещаются по уровню в зависимости от типа неоднородности, на которую попала точка наблюдения. К тому же, при попадании на вытянутую неоднородность, происходит смещение только по квази-двухмерной к ЛППН кривой, вторая компонента остается неизменной. Схожим образом ведут себя компоненты фазового тензора, только в этом случае влияние оказывают не ЛППН, к которым он устойчив, а сама глубинная структура.

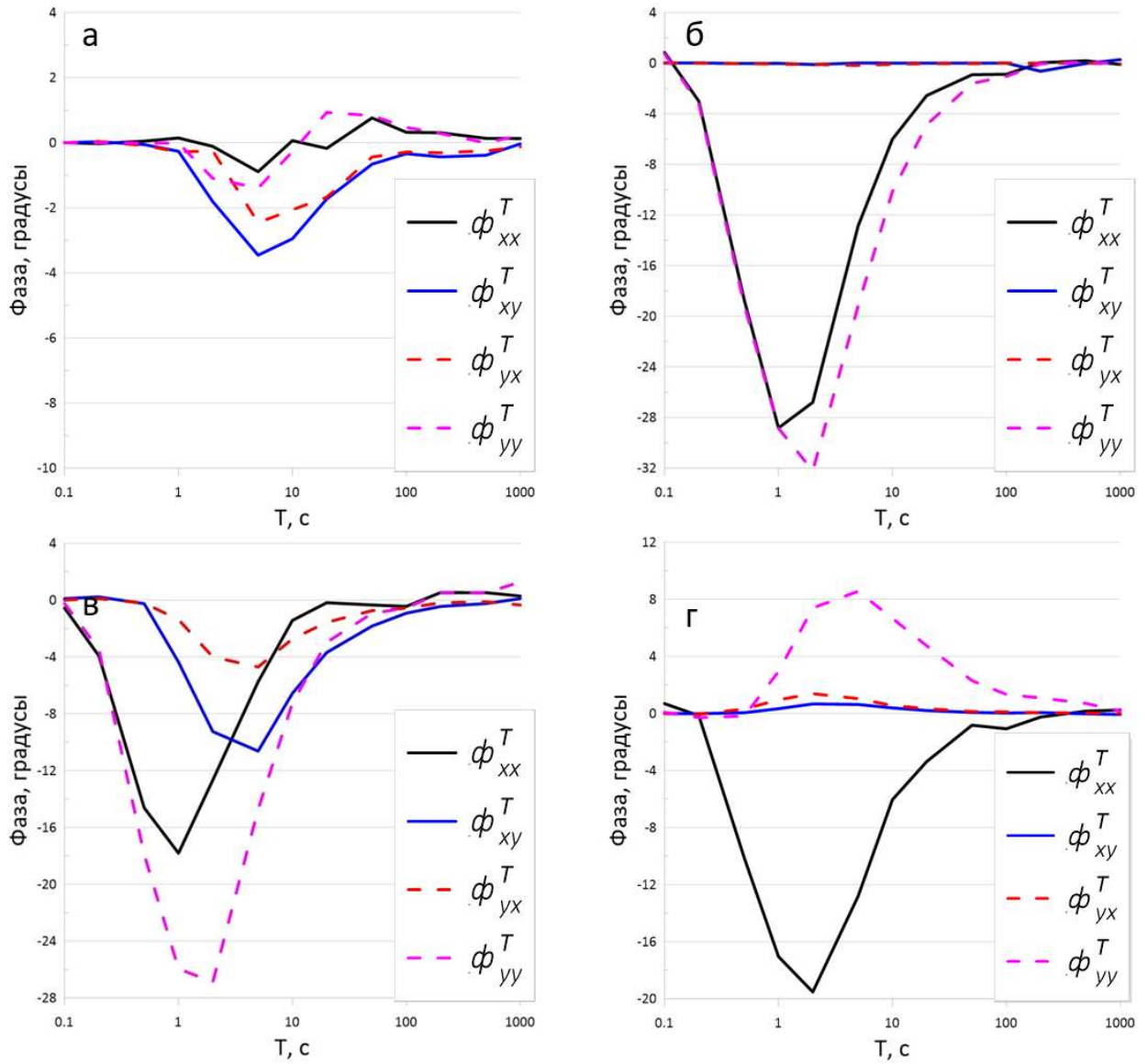


Рисунок 4.5 — Кривые компонент фазового тензора: а – точка 1, б – точка 2, в – точка 3, г – точка 4. Расположение точек см. на рис. 2.2.

4.6. Карты инвариантных параметров

Далее будет рассмотрен ряд введенных выше инвариантов: T_{eff} , $skew_S^T$, $skew_B^T$, α^T , β^T . Как было показано на картах в главе 2, а также на представленных выше в этой главе кривых компонент теллурического тензора, на периоде 10 с значения модулей компонент уже выходят на правую асимптоту, сформированную влиянием глубинной проводящей впадины, а фазы компонент еще меняются и отличаются друг от друга. На более длинных периодах фазы

основных компонент выходят на 0 градусов, что характерно для одномерной среды (действительно, на глубинах свыше 3 км исследуемая модель одномерная), и теллурический тензор в этом случае становится неинформативен. Поэтому карты здесь так же, как и во второй главе представлены только для периода 10 с.

На рисунке 4.6 изображены карты модуля эффективной компоненты T_{eff} . Они схожи с картами нормы теллурического тензора, изображенными на рисунке 11 в первой главе. Для варианта модели с однородным верхним слоем карта имеет простую структуру: значение 1 над фоновым разрезом и минимум над проводящей глубинной структурой. При добавлении в модель ЛППН картина осложняется, появляются максимумы над высокоомными и минимумы над проводящими ЛППН. Их влияние сохраняется в таком же виде и на других периодах, как также было показано во второй главе.

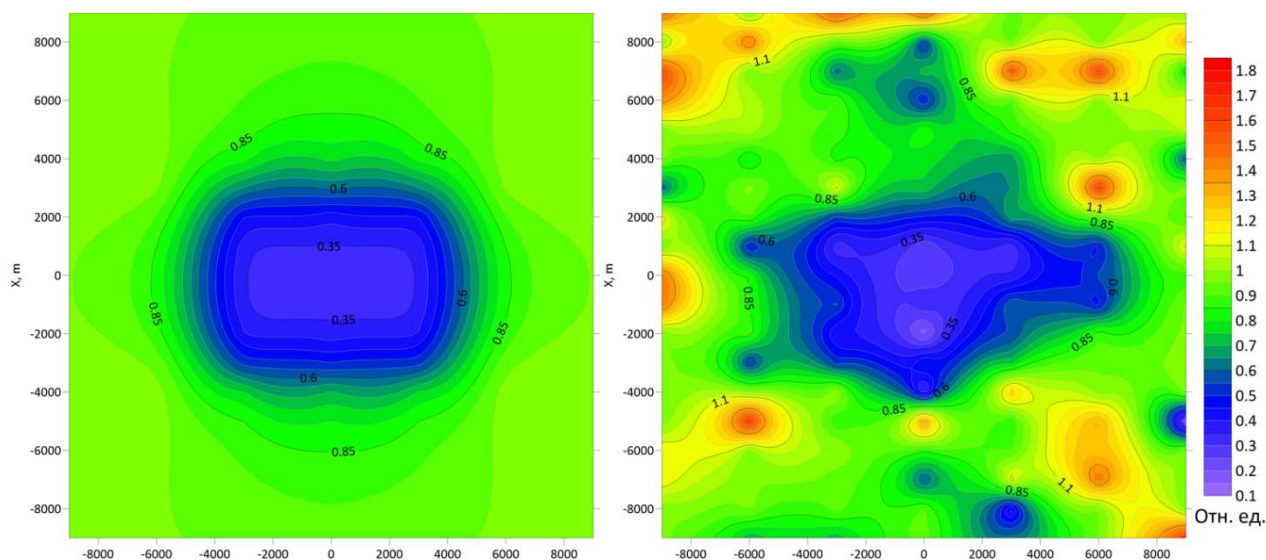


Рисунок 4.6 — Карты модуля эффективной компоненты T_{eff} , период 10 с. (а) — модель без ЛППН, (б) — с ЛППН.

На рисунке 4.7 приведены карты фазы эффективной компоненты T_{eff} . Поскольку, как уже было отмечено, ЛППН не оказывают влияния на фазовые кривые, то и карты для вариантов модели с однородным и неоднородным

верхним слоем практически идентичны. В этом случае наблюдается фоновое значение около 0 градусов и минимум над глубинной неоднородностью.

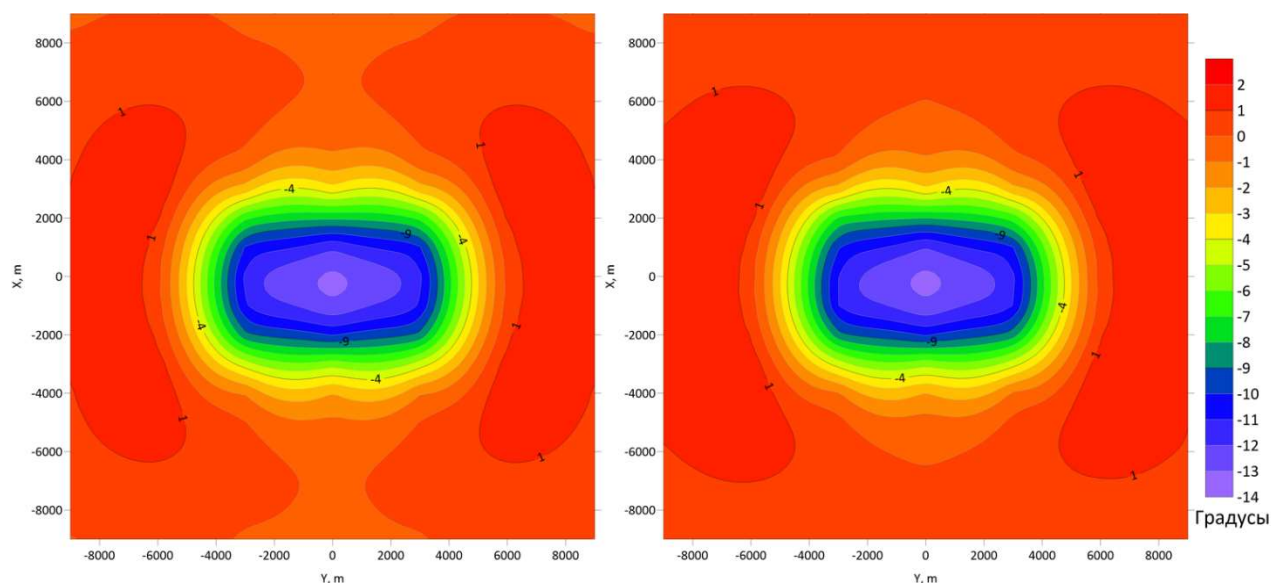


Рисунок 4.7 — Карты фазы эффективной компоненты T_{eff} , период 10 с. (а) — модель без ЛППН, (б) — с ЛППН.

На рисунке 4.8 представлены карты параметра асимметрии Свифта $skew_S^T$. Напомним, его большие значения связаны с трехмерными эффектами, причем этот параметр не различает ЛППН и глубинные неоднородности. В представленном исследовании значения достигают существенных величин (порядка 0.2) только вблизи углов исследуемой глубинной структуры. Наличие ЛППН несколько искажает картину, увеличивая или, наоборот, уменьшая значения в точках МТЗ с ЛППН. Карты этого параметра схожи с картами параметров асимметрии Свифта, определенному по тензору импеданса $[Z]$, что было показано в первой главе.

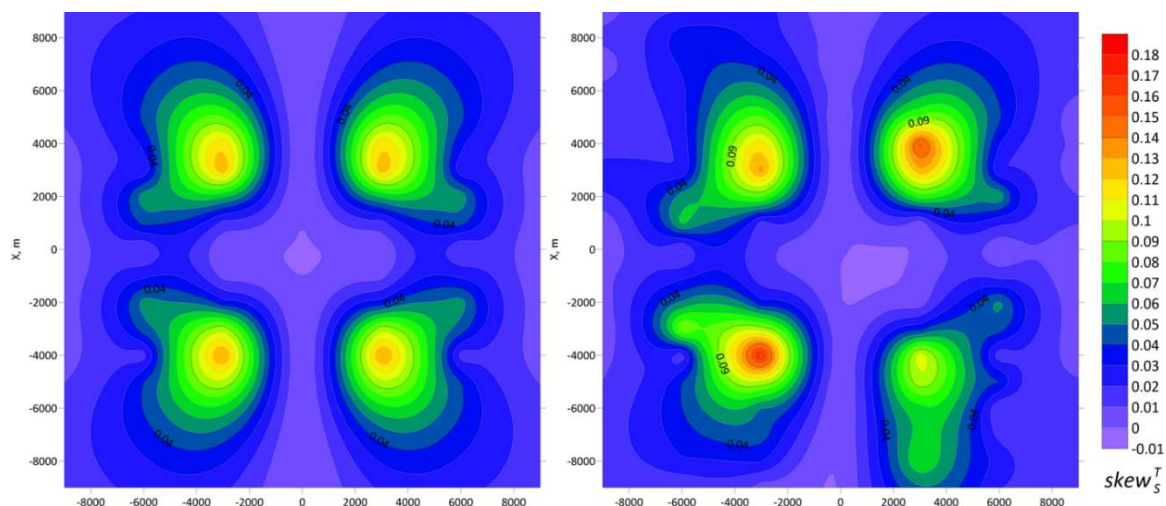


Рисунок 4.8 — Карты параметра асимметрии Свифта $skew_S^T$, период 10 с. (а) – модель без ЛППН, (б) – с ЛППН.

На рисунке 4.9 показаны карты параметра асимметрии Бара $skew_B^T$. Этот параметр также выделяет области с существенными трехмерными эффектами, но имеющими глубинную природу (значения свободны от влияния ЛППН). Величины $skew_B^T$ невелики, в пределах 0.08, и также максимальны вблизи углов глубинной неоднородности. Карты для вариантов модели с однородным и неоднородным верхним слоем ожидаемым образом почти не отличаются друг от друга.

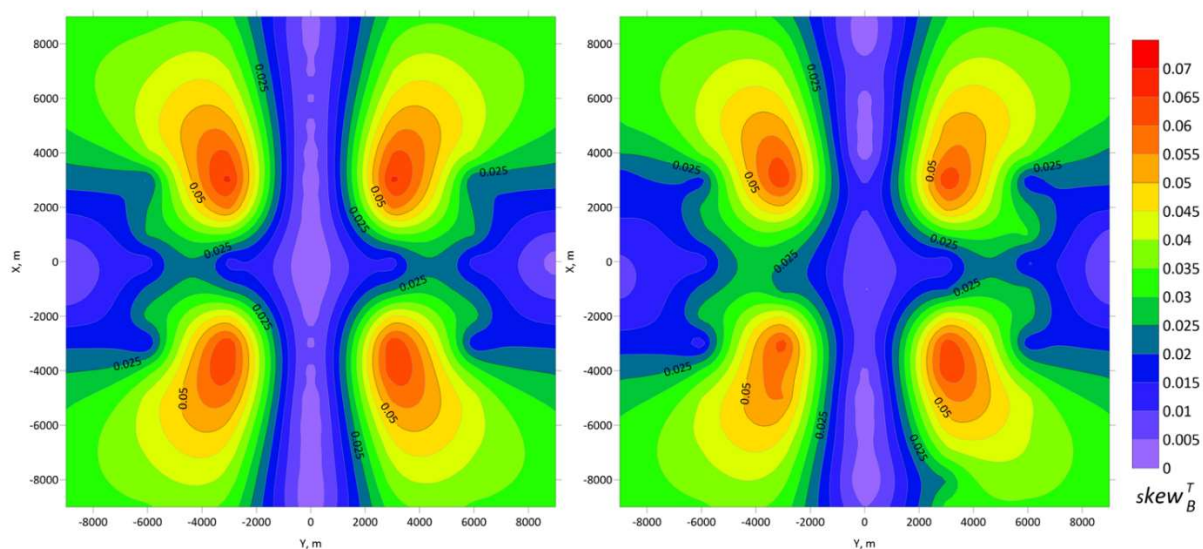


Рисунок 4.9 — Карты параметра асимметрии Бара $skew_B^T$, период 10 с. (а) – модель без ЛППН, (б) - с ЛППН.

На рис. 4.10 показаны инварианты фазового тензора – введенные выше параметры α^T и β^T . Параметр α^T в двухмерной среде имеет физический смысл азимутального угла вдоль или вкrest простираия структур. Соответственно, эти направления показаны крестиками. Как видно из рисунка, они ориентированы вдоль и вкrest границ глубинной неоднородности на центральных меридиональном и широтном профилях. По углам планшета, вокруг исследуемой структуры, они имеют по отношению к ней преимущественно радиальное и азимутальное направления. Параметр β^T по своему смыслу является параметром асимметрии (аналогом $skew_B^T$), хотя измеряется в градусах, поэтому его значения взяты по модулю и показаны изолиниями. Видно, что карты $|\beta^T|$ и $skew_B^T$, действительно, похожи.

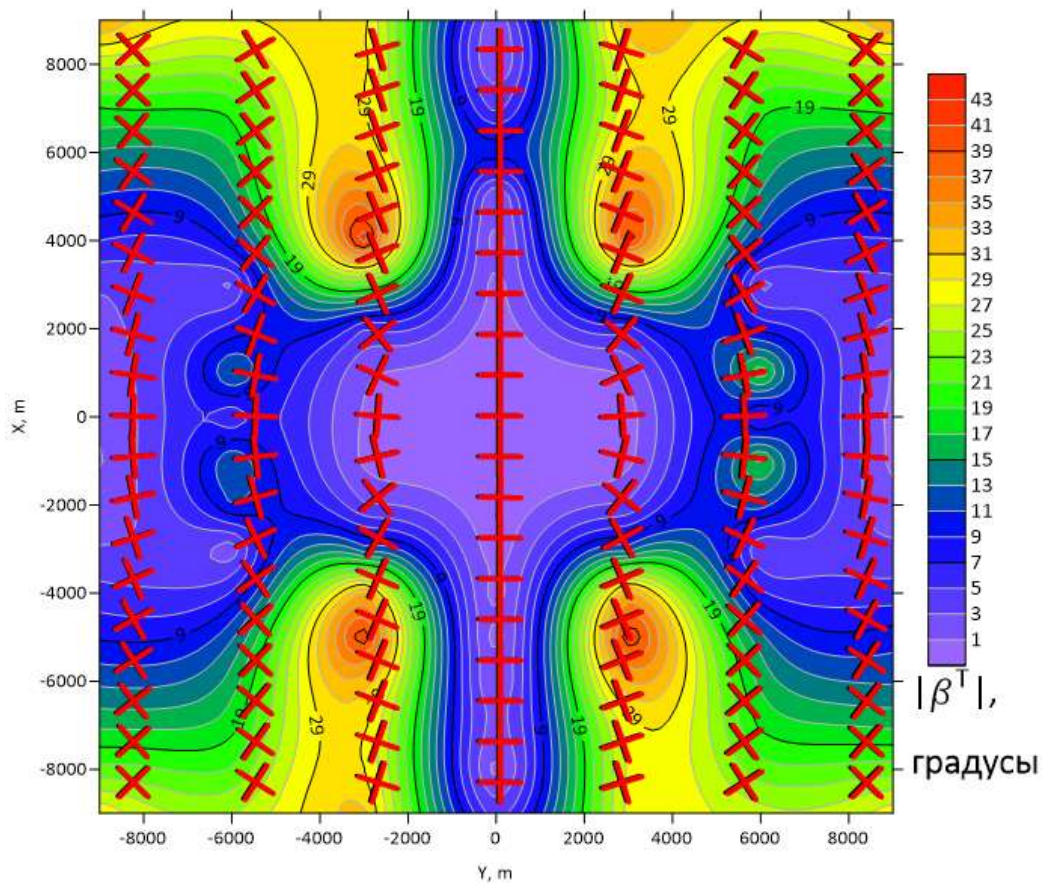


Рисунок 4.10 — Карта азимутального угла α^T (показан крестиком вместе с $\alpha^T + 90^\circ$) на фоне значений модуля параметра $|\beta^T|$, период 10 с. Черный цвет соответствует модели с однородным верхним слоем, красный — модели с ЛППН.

4.7. Анализ полярных диаграмм

Более информативно отражают размерность среды и направление простирания структур полярные диаграммы, показывающие как меняются компоненты тензоров при вращении системы координат на 360^0 (с шагом 1^0). Полярные диаграммы компонент теллурического образа строятся по тем же формулам (3.3, 3.4), что и полярные диаграммы компонент тензора импеданса в главе 3.

В этом разделе будут представлены диаграммы только для двух периодов 1 и 10 с, поскольку полярные диаграммы модулей компонент теллурического тензора на периодах 10 и 100 секунд не отличаются друг от друга, а диаграммы фазы на высоких периодах сильно затухают и не несут никакой полезной информации.

На рисунке 4.11 приведены полярные диаграммы модулей главной и побочной компоненты $|T_{xx}|$ и $|T_{xy}|$ в точке №1 (расположение точек см. на рисунке 2.2) у северо-западного угла карты. Для модели без приповерхностных неоднородностей на периоде 1 с диаграммы демонстрируют характерную для 1D среды ситуацию – главная компонента принимает вид окружности, а дополнительная – точки. При переходе к более низкой частоте проявляется двухмерность – дополнительная компонента проявляется как четырехлистник, а главная вытягивается в овал. В случае модели с ЛППН эта точка попадает на крупную изометричную высокоомную неоднородность, которая приводит в первую очередь к увеличению размеров диаграмм обеих компонент. В этом случае и на периоде 1 с и на периоде 10 с наблюдается двухмерность среды. Также наличие ЛППН влияет и на ориентировку диаграммы, но не так сильно, как это делают вытянутые неоднородности.

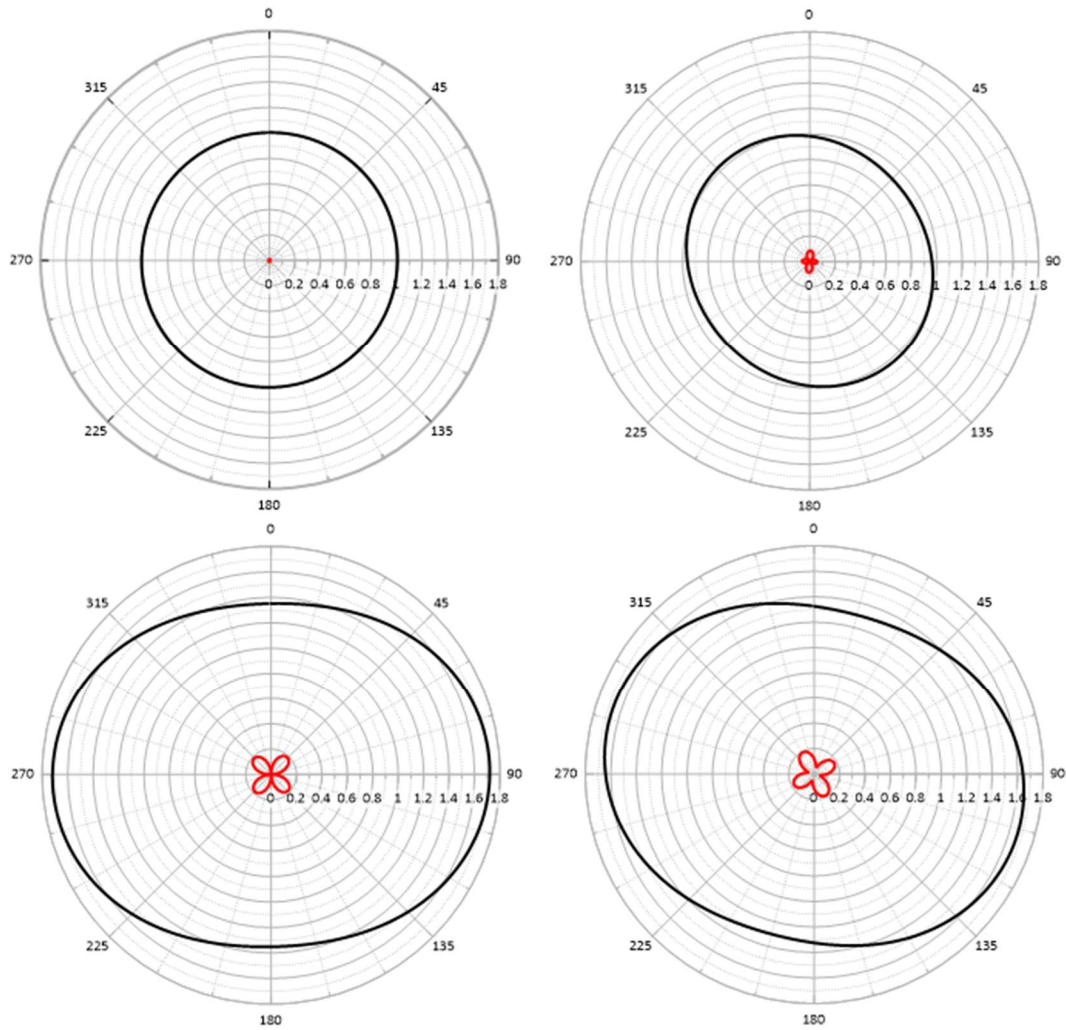


Рисунок 4.11 — Полярные диаграммы модулей компонент $[T]$ в точке 1 на периодах 1 и 10 с (слева направо) для вариантов модели без ЛППН (вверху) и с ЛППН (внизу). Черный цвет — компонента $|T_{xx}|$, красный — $|T_{xy}|$.

На рис. 4.12 показаны полярные диаграммы модулей компонент теллурического тензора $|T_{xx}|$ и $|T_{xy}|$ на периодах 1 и 10 с в точке МТЗ №2. Вверху представлены диаграммы для варианта геоэлектрической модели с однородным верхним слоем, внизу — с ЛППН. Видно, что они немного отличаются размером: наличие изометричной высокоомной ЛППН приводит к увеличению всех значений, также, как это было в предыдущей точке. На периоде 1 с диаграмма основной компоненты $|T_{xx}|$ представляет собой круг, а диаграмма дополнительной компоненты $|T_{xy}|$ очень мала, что говорит о близости разреза к горизонтально-однородному. На периоде 10 с диаграмма $|T_{xx}|$ вытягивается в

меридиональном направлении, а диаграмма $|T_{xy}|$ представляет собой четырехлистник, что характерно для двумерных сред. Отметим, что на более длинных периодах картина практически не меняется, что характерно для гальванических эффектов (в данном случае от глубинной неоднородности), не меняющихся с понижением частоты.

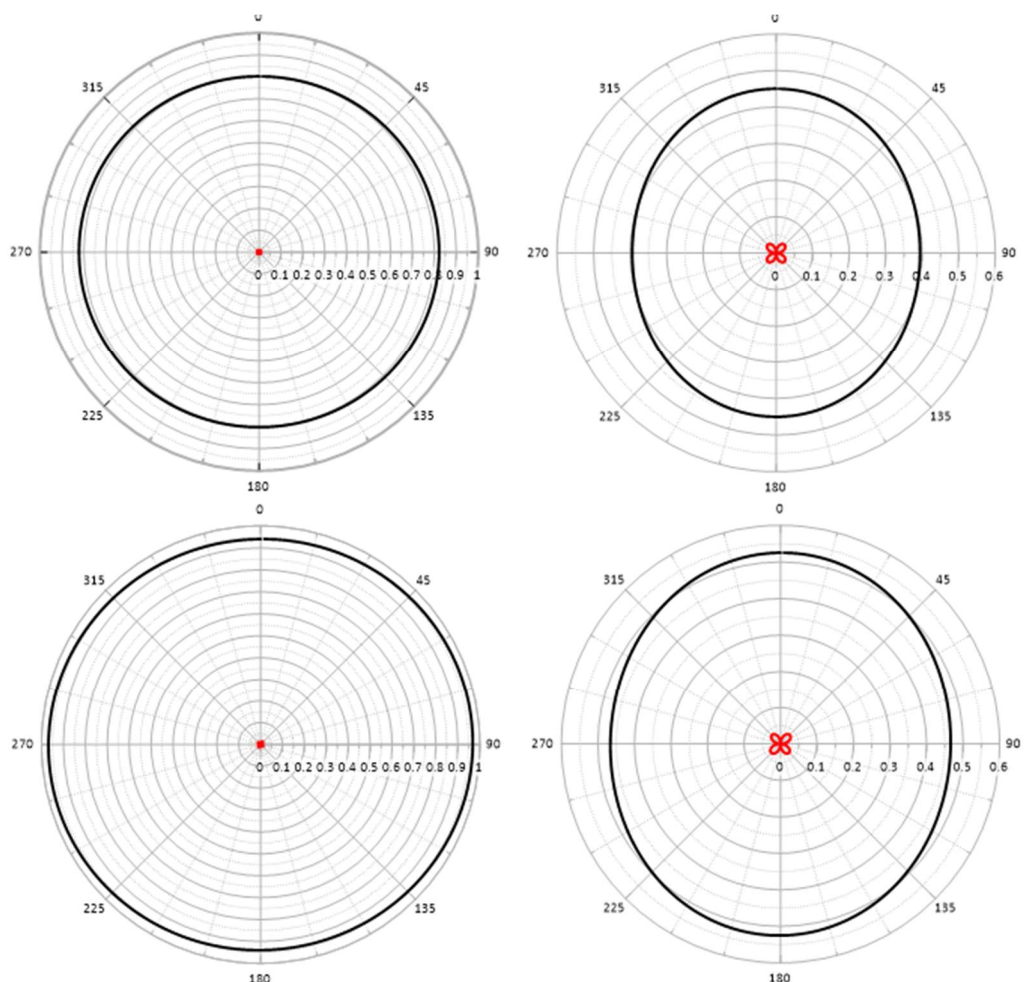


Рисунок 4.12 — Полярные диаграммы модулей компонент $[T]$ в точке 2 на периодах 1 и 10 с (слева направо) для вариантов модели без ЛППН (вверху) и с ЛППН (внизу). Черный цвет — компонента $|T_{xx}|$, красный — $|T_{xy}|$.

В точке МТЗ № 3 (рис. 4.13) диаграммы ведут себя более разнообразно. При отсутствии ЛППН на коротком периоде (1 с) они характерны для 1D среды, а на более длинных периодах (10 с и более) диаграмма $|T_{xx}|$ вытягивается на северо-северо-запад, а диаграмма $|T_{xy}|$ состоит из 4-х лепестков, но разного

размера. При добавлении ЛППН, вытянутой в меридиональном направлении, диаграмма $|T_{xx}|$ на коротком периоде вытягивается по широте, а на более длинных периодах ее ориентация формируется под влиянием как локальной, так и региональной структур (ЛППН и проводящей впадины). Диаграмма $|T_{xy}|$, состоящая из 4-х одинаковых лепестков на периоде 1 с, также на больших периодах принимает более сложную форму.

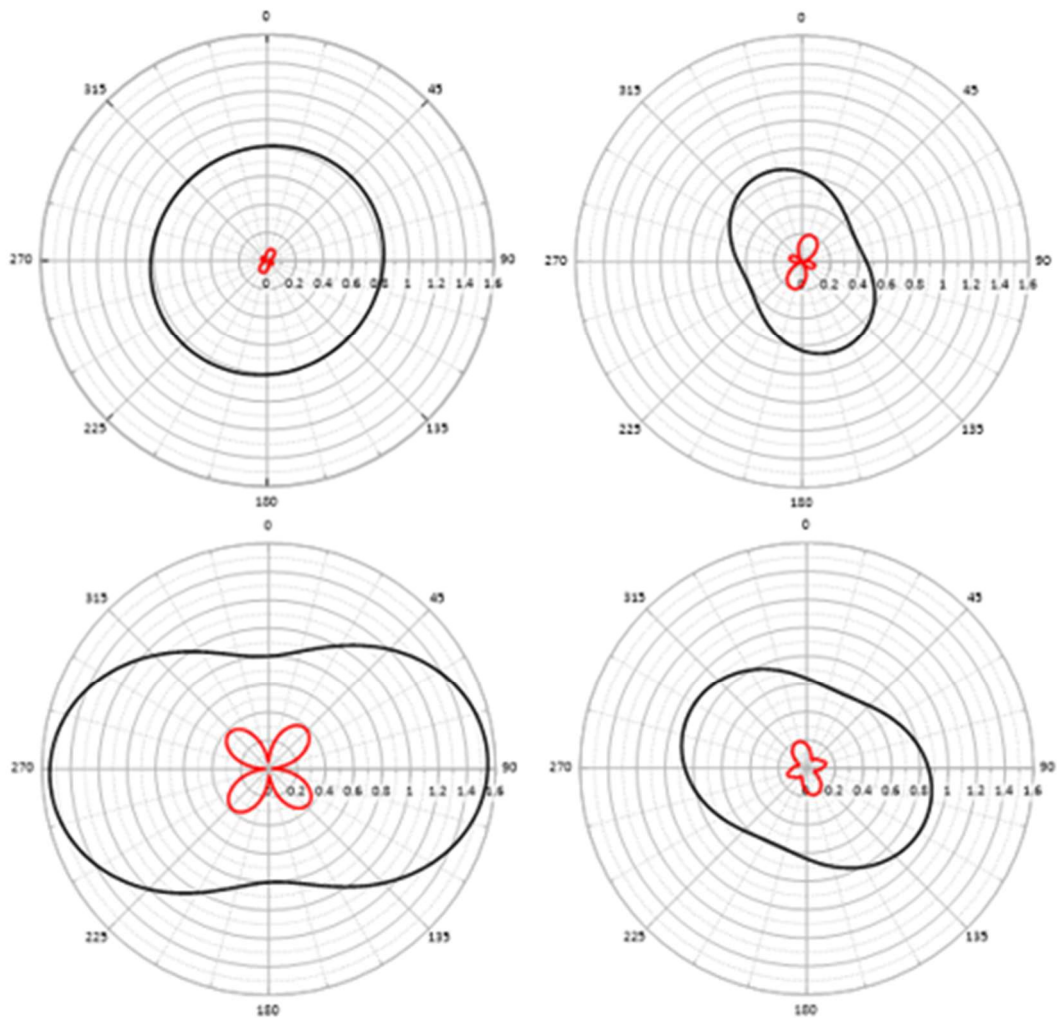


Рисунок 4.13 — Полярные диаграммы модулей компонент $[T]$ в точке 3 на периодах 1 и 10 с (слева направо) для вариантов модели без ЛППН (вверху) и с ЛППН (внизу). Черный цвет — компонента $|T_{xx}|$, красный — $|T_{xy}|$.

Полярные диаграммы в точке МТЗ №4, попадающей на проводящую вытянутую приповерхностную неоднородность, изображены на рисунке 4.14. Для обоих случаев на периоде 1 с наблюдается картина, характерная одномерной

среде, а на периоде 10 с – двухмерной. Влияние ЛППН проявляется в виде уменьшения значений обеих компонент, а также в резком изменении ориентировки диаграммы главной компоненты на периоде 10 с. Если для модели с однородным верхним слоем диаграммы ориентировались в сторону глубинной впадины, то при добавлении неоднородностей диаграмма поворачивается на 90 градусов и теперь ее ориентировка совпадает с простираем ЛППН. Похожая ситуация наблюдалась с диаграммами модулей компонент тензора импеденса в третьей главе (см. рис.3.9)

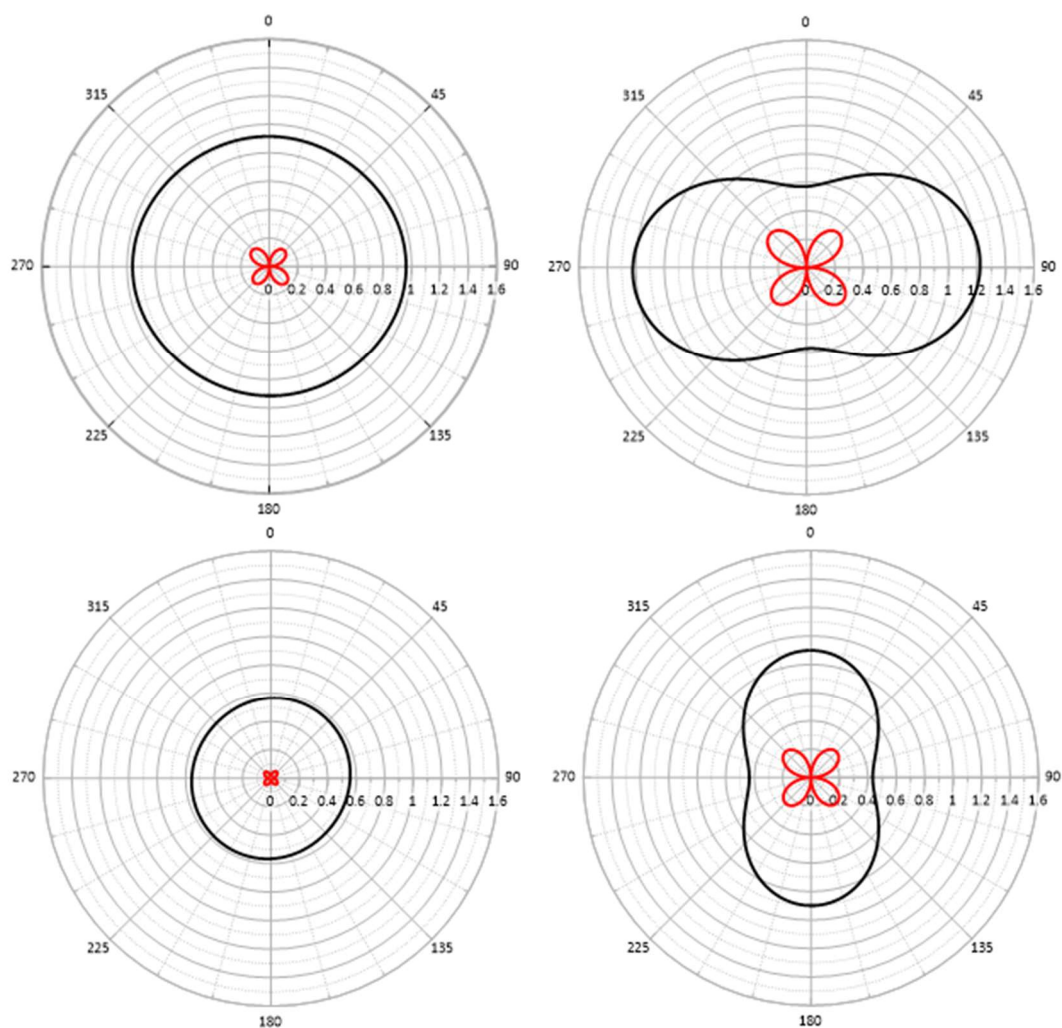


Рисунок 4.14 — Полярные диаграммы модулей компонент $[T]$ в точке 4 на периодах 1 и 10 с (слева направо) для вариантов модели без ЛППН (вверху) и с ЛППН (внизу). Черный цвет – компонента $|T_{xx}|$, красный – $|T_{xy}|$.

Полярные диаграммы фазы основной компоненты теллурического тензора $\arg(T_{xx})$ приведены на рис. 4.15. В точке 1, как это было видно на фазовых кривых на рисунке 4.1, диаграммы фазы малы, зато в трех остальных точках фазовые диаграммы главной компоненты ведут себя схожим образом с диаграммами $\arg(Z_{xy})$ из третьей главы. Ожидаемо, диаграммы для вариантов модели с однородным верхним слоем и с ЛППН слабо отличаются. Ориентация фазовых диаграмм соответствует ориентации амплитудных диаграмм $|T_{xx}|$ для случая отсутствия ЛППН, два вида диаграмм вытягиваются либо в одном и том же, либо в ортогональных направлениях. В общем случае, диаграммы выстраиваются параллельно границам глубинной неоднородности, поворачиваясь вблизи ее углов.

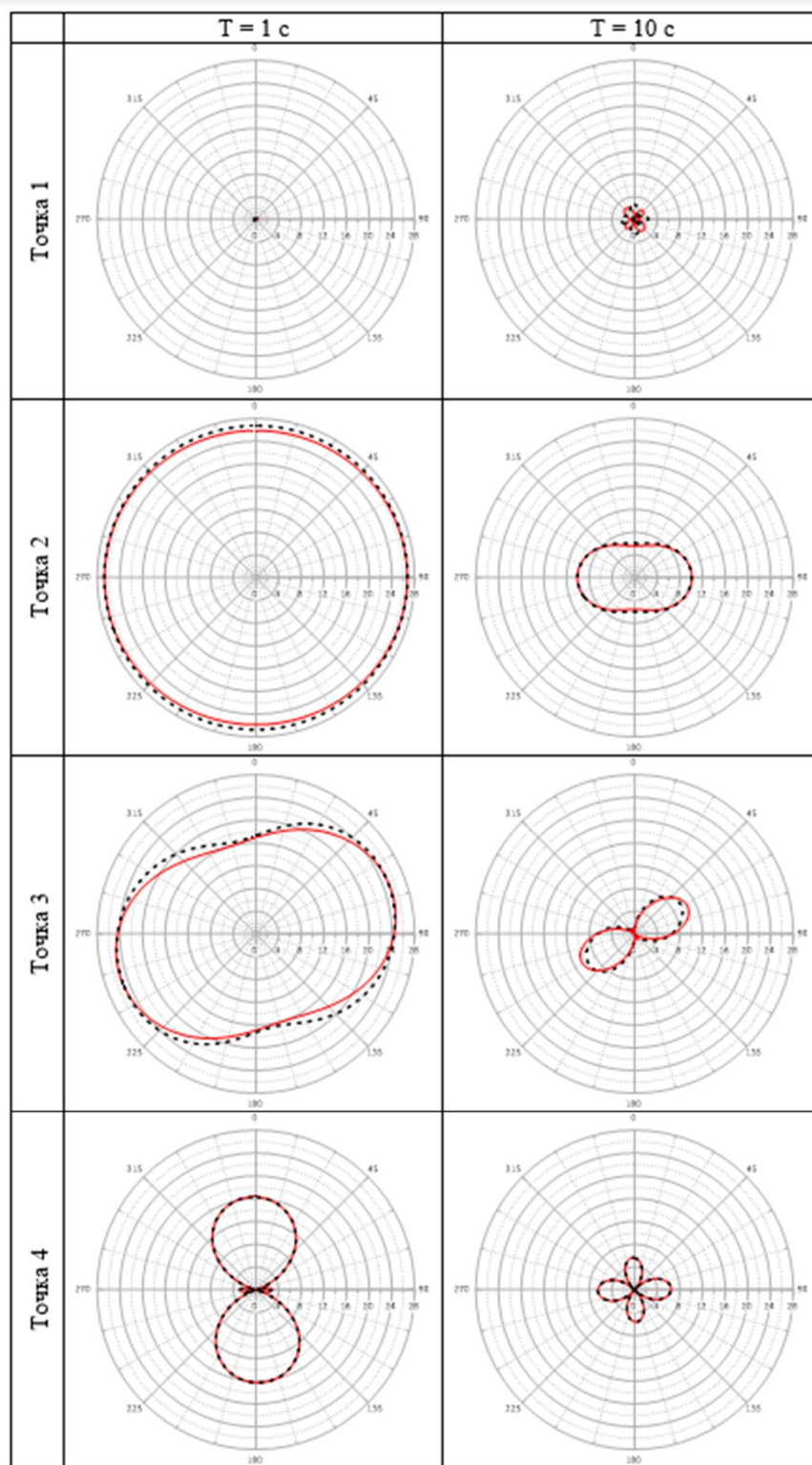


Рисунок 4.15 — Полярные диаграммы фазы основной компоненты $\arg(T_{xx})$ на периодах 1 и 10 с в точках, отмеченных на рисунке 2.2. Черный пунктир — модель без ЛППН, красный цвет — с ЛППН.

Полярные диаграммы фазового теллурического тензора строились тем же образом, что и диаграммы фазового тензора импеданса в главе 3, для этого использовались адаптированные для этого формулы 3.5 и 3.6.

На рис. 4.16 для тех же точек МТЗ приведены полярные диаграммы основной и дополнительной компонент фазового тензора Φ_{xx}^T и Φ_{xy}^T . Диаграммы основной компоненты очень похожи на только что рассмотренные диаграммы фазы основной компоненты теллурического тензора. Они не зависят от наличия ЛППН, вытягиваются в тех же направлениях и имеют примерно такую же форму. Диаграммы дополнительной компоненты подчеркивают двухмерность эффектов в точке 2 и 4, а в точке МТЗ №3 их трехмерный характер, где возникают лепестки, различающиеся по размеру. Также на этом же рисунке показаны направления α^T (для всех точек МТЗ они были также показаны на рис. 4.10) и $\alpha_1^T = \alpha^T - \beta^T$. В точке 2 ситуация двухмерная, угол β^T очень мал и направления с его учетом и без него практически совпадают. В точке 3 значения β^T более существенные, особенно на периоде 10 с, и связанные с региональной структурой. Направления α^T и $\alpha^T - \beta^T$ существенно отличаются, а в точке 4 эти направления еще больше и совпадают с ориентацией лепестков дополнительной компоненты фазового теллурического тензора.

Таким образом, фазовые диаграммы компонент теллурического тензора $[T]$ слабо подвержены влиянию ЛППН, а компоненты построенного по нему фазового тензора $[\Phi^T]$ вовсе свободны от влияния ЛППН и позволяют оценить размерность региональной среды и направления простираения вытянутых региональных структур.

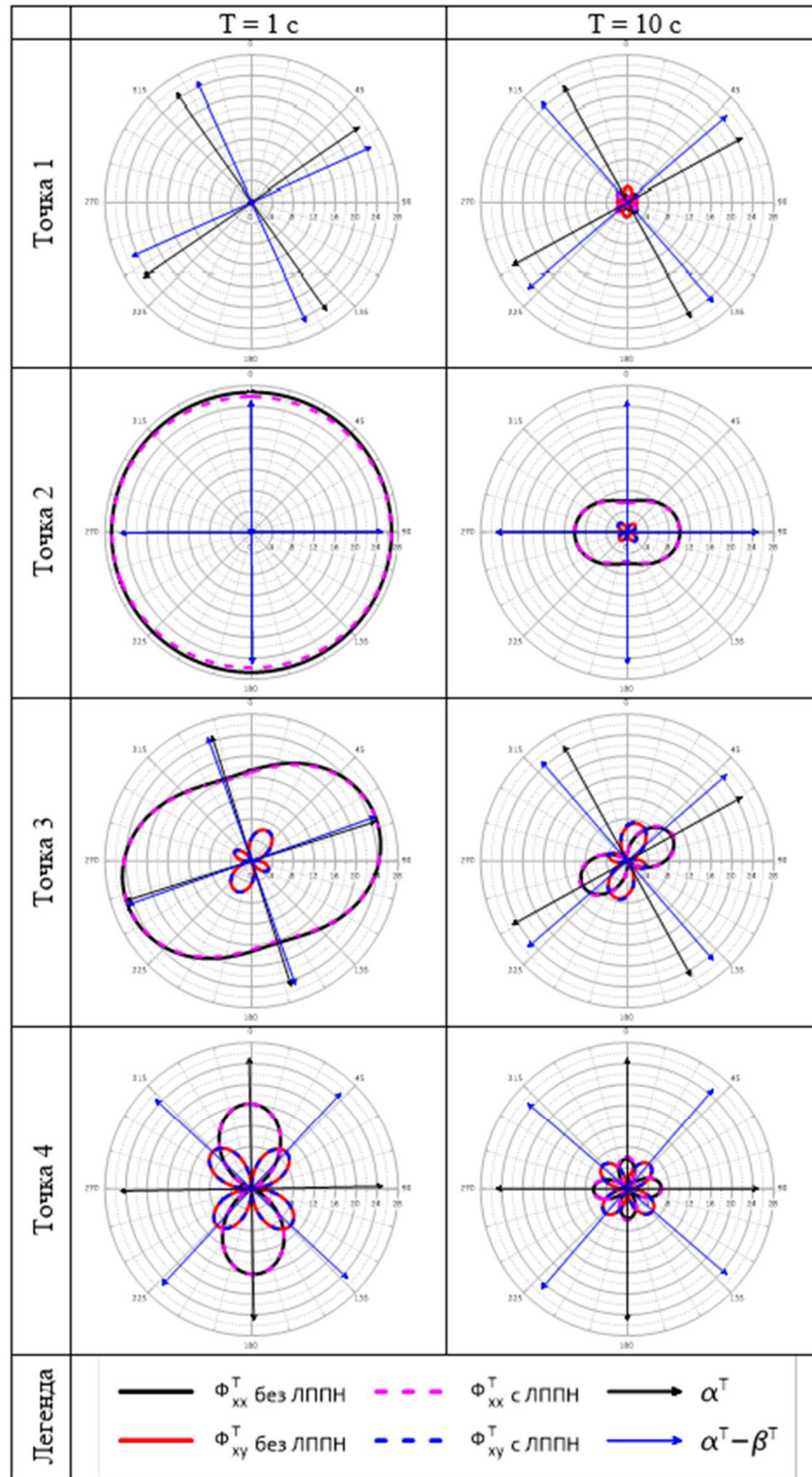


Рисунок 4.16 — Полярные диаграммы теллурического фазового тензора на периодах 1 и 10 с (слева направо) в точках 1-4 (сверху вниз). Черная и красная линии — основная и дополнительная компоненты для модели с ЛППН, фиолетовый и синий пунктир — они же для модели без ЛППН. Черными и синими стрелками показаны (с точностью до 90°) направления α^T и $\alpha^T - \beta^T$.

4.8. Выводы

Карты модуля и фазы эффективной компоненты T_{eff} позволяют локализовать глубинную неоднородность, также демонстрируя (в случае модуля) или практически игнорируя (в случае фазы) ЛППН. Карты параметров асимметрии Свифта и Бара $skew_S^T$ и $skew_B^T$ показывают области развития трехмерных эффектов, как от всех структур (в случае $skew_S^T$), так и только от глубинных (в случае $skew_B^T$).

Особый интерес представляет переход от теллурического тензора $[T]$ к его фазовому тензору $[\Phi^T]$, который, хотя и за счет уменьшения объема информации (4 вещественных компоненты вместо 4-х комплексных), избавлен от влияния ЛППН, сильно искажающих электрическое поле. Карта определяемых по $[\Phi^T]$ направлений α^T характеризует азимуты, связанные с региональной структурой, в частности, вблизи центров границ глубинной неоднородности они направлены вдоль и вкост этих границ, а на удалении от нее, где она проявляется как изометричная структура, ориентированы в радиальном и азимутальном направлениях. Карта значений модуля угла β^T дает дополнительную информацию о зонах, в которых существенны трехмерные эффекты, и направления α^T рассматривать не вполне корректно.

Весьма информативны и полярные диаграммы компонент тензоров $[T]$ и $[\Phi^T]$, построенные аналогично хорошо известным полярным диаграммам компонент $[Z]$. Своей формой и ориентацией они характеризуют размерность среды и простираение глубинных структур. Причем диаграммы модулей основных компонент $[T]$ подвержены влиянию ЛППН, в то время как фазовая диаграмма $arg(T_{xx})$ слабо подвержены влиянию ЛППН, а диаграммы компонент фазового тензора свободны от влияния ЛППН и связаны только с глубинной структурой.

Сравнивая представленные здесь результаты с работой, проделанной в третьей главе, можно сделать вывод, что для использованной в исследовании

геоэлектрической модели информативность $[Z]$ и $[T]$ очень близка. Однако, этот вывод не следует распространять на все случаи, в частности, магнитная составляющая поля весьма информативна при изучении глубинных (коровых и мантийных) проводящих структур.

Таким образом, анализ теллурического тензора $[T]$ и его фазового тензора $[\Phi^T]$ дает достаточно много информации о геоэлектрических структурах, в том числе глубинных, что доказывает **первое защищаемое положение**. Можно рекомендовать их использование наряду с тензором импеданса $[Z]$ и его фазовым тензором $[\Phi]$, а также с матрицей Визе-Паркинсона $[W]$ и горизонтальным магнитным тензором $[M]$, при анализе и инверсии МТ данных, искаженных ЛППН.

ГЛАВА 5. НОРМАЛИЗАЦИЯ КРИВЫХ МТЗ С ПОМОЩЬЮ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ⁵

5.1. Используемые сглаживающие фильтры

В заключительной главе исследования рассматривается нормализация кривых МТЗ путем пространственной низкочастотной (сглаживающей) фильтрации на периоде $T_0 = 10$ с. Этот период был выбран после анализа кривых МТЗ, карт и псевдоразрезов МТ параметров на периодах 1, 10 и 100 с, выполненного во второй главе исследования, и показавшего, что искажающее влияние ЛППН на всех этих периодах одинаково, даже при увеличении мощности неоднородностей. Также были проведены дополнительные исследования с периодом нормализации 1000 с, которые представлены в отдельном разделе текущей главы.

В качестве нормализуемой компоненты данных, которая обозначается буквой f , рассматривается кажущееся сопротивление, модуль компоненты тензора импеданса или модуль компоненты теллурического тензора.

С помощью фильтров, о которых будет рассказано ниже, были получены сглаженные значения компонент МТ поля $f^{\text{сглаж.}}(T_0)$ в каждой точке наблюдения. Далее в тех же точках рассчитывался коэффициент:

$$k(T_0) = f^{\text{сглаж.}}(T_0)/f(T_0), \quad (5.1)$$

где $f(T_0)$ – исходное значение в данной точке МТЗ на периоде T_0 . Затем вся кривая приводится к сглаженному уровню путем умножения на коэффициент k :

$$f^{\text{сглаж.}}(T) = f(T) * k(T_0). \quad (5.2)$$

Пространственный сглаживающий фильтр, применяемый для расчета $f^{\text{сглаж.}}(T_0)$, обычно строится таким образом, что текущая точка зондирования

⁵ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

26. Суконкин М.А., Пушкарёв П.Ю. Нормализация кривых магнитотеллурического зондирования с помощью пространственной низкочастотной фильтрации // Геология и геофизика. — 2025. — Т.66 — № 10. — С. 1376-1390. EDN: TDJATR (3,6 п.л, вклад автора 60%), Импакт-фактор 1,490 (РИНЦ).

имеет при осреднении максимальный вес, а вес соседних точек тем меньше, чем больше расстояние R до них. В диссертации были протестированы две такие весовые характеристики.

Первая представляет собой простую линейную зависимость, при этом вес текущей точки W^R равен 1, далее он линейно убывает до 0 при увеличении R вплоть до значения R_0 (радиус фильтра или радиус скользящего окна):

$$W_{lin}^R = (R_0 - R) / R_0, \quad R \leq R_0;$$

$$W_{lin}^R = 0, \quad R > R_0.$$

На рисунке 5.1 показаны весовые функции фильтров с линейной зависимостью для разных радиусов нормализации (радиусы также отмечены на рисунке 2.2).

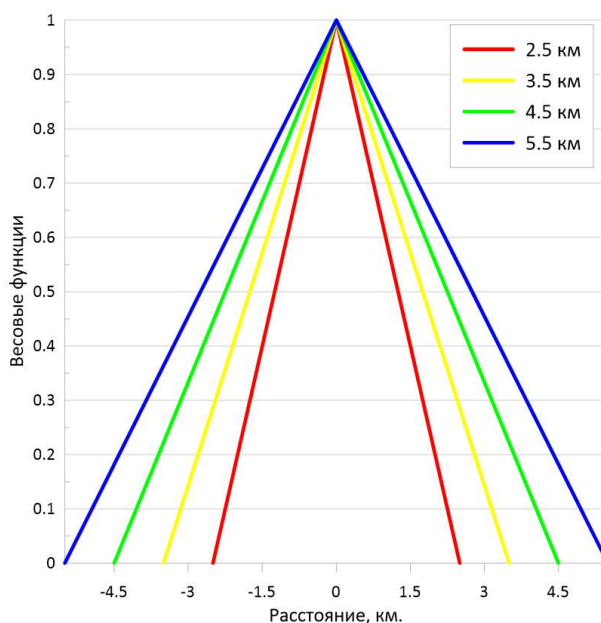


Рисунок 5.1 — Весовые функции фильтров с линейной зависимостью от расстояния для разных значений радиуса скользящего окна.

Вторая весовая функция основана на экспоненциальной зависимости от R :

$$W_{exp}^R = e^{-\left(\frac{|R|}{R_0}\right)^q}. \quad (5.3)$$

Здесь R_0 принято называть полушириной фильтра (Бердичевский и Дмитриев, 2009). Это регулирующий множитель в показателе

экспоненциального фильтра, подбираемый опытным путем и задаваемый соизмеримым с шагом наблюдений или в несколько раз больше в зависимости от размера ЛППН, чье влияние необходимо подавить. При бесконечной полуширине фильтра выполняется осреднение по всем точкам кривой с единичным весом, при нулевой полуширине результат фильтрации совпадает с исходными данными (рис. 5.2).

Параметр крутизны фильтра q меняется в интервале от 1 до 7, с его увеличением окно осреднения приобретает все более резкие границы (в пределе, увеличивая крутизну до бесконечности, получается идеальный фильтр). Оптимальная величина параметра определяется опытным путем, и была выбрана равной 3.

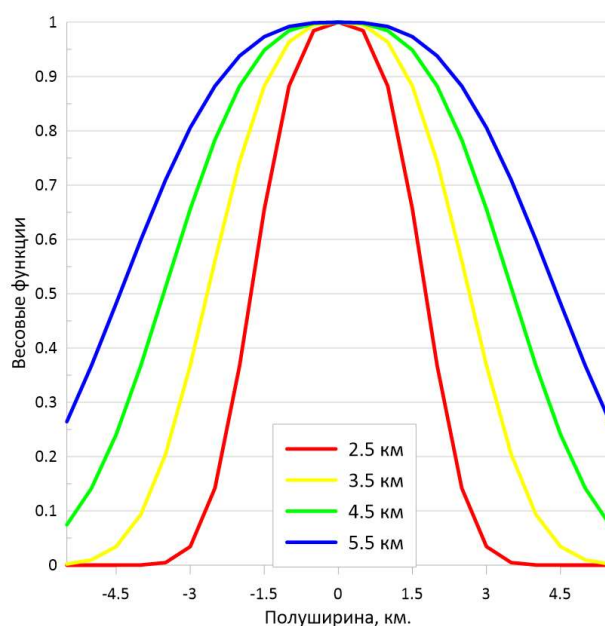


Рисунок 5.2 — Весовые функции экспоненциальных фильтров для разных значений полуширины.

Важно, что при одном и том же значении полуширины фильтра R_0 в случае линейной весовой функции в осреднении будет участвовать меньшее число точек МТЗ, чем в случае экспоненциальной весовой функции, поскольку в первом

случае точки на расстоянии $R > R_0$ отбрасываются, а во втором – учитываются, хотя и с малыми весами.

Помимо весовых характеристик, отражающих удаление точки от центра скользящего окна, можно ввести для каждой точки вес W^A , «штрафующий» за большое отклонение амплитуды кривой МТЗ от уровня соседних кривых. Он будет тем меньше, чем сильнее значение f для данной точки отличается от среднегеометрического значения $f^{\text{средн.}}$, вычисленного в пределах круга, ограниченного радиусом фильтра R_0 , по формуле:

$$f^{\text{средн.}} = \prod_{i=1}^M \sqrt[M]{f(i)}, \quad (5.4)$$

где M – число точек наблюдения, расположенных внутри заданного круга. Вес W^A можно определить как

$$\begin{aligned} W^A &= f^{\text{средн.}} / f \quad \text{при } f \geq f^{\text{средн.}}, \\ W^A &= f / f^{\text{средн.}} \quad \text{при } f < f^{\text{средн.}}. \end{aligned}$$

Наконец, был введен вес W^D , «штрафующий» за искажающее влияние ЛППН, проявляющееся в разной ориентации амплитудных и фазовых полярных диаграмм. В третьей и четвертой главах были построены и подробно проанализированы полярные диаграммы различных компонент МТ данных, и был получен вывод, что амплитудные полярные диаграммы как тензора импеданса, так и теллурического тензора сильно подвержены искажениям от ЛППН, в то время как их фазовые диаграммы слабо подвержены, а диаграммы фазовых тензоров не подвержены влиянию ЛППН вовсе. Таким образом, сравнивая, например, ориентацию диаграмм модуля главной компоненты $|Z_{xy}|$ и главной компоненты фазового тензора Φ_{xx} можно определить степень искажающего влияния ЛППН.

Стоит отметить, что не все неоднородности приводят к изменению ориентировки амплитудных диаграмм, поэтому само по себе совпадение осей диаграмм $|Z_{xy}|$ и Φ_{xx} не является достаточным критерием отсутствия искажения в точке.

Полярная диаграмма имеет две оси, ориентация которых связана с геоэлектрическими структурами. Поскольку без привлечения дополнительной информации невозможно различить, какая из этих осей ориентирована вдоль, а какая – вкрест структур, возможно лишь оценить расхождение двух наиболее близких осей амплитудной и фазовой диаграмм δ , которое может составлять от 0 до 45^0 . Тогда весовую характеристику W^D , отвечающую за различие в ориентировке диаграмм, определим следующим образом:

$$W^D = \frac{45^0 - |\delta|}{45^0}. \quad (5.5)$$

Практически величина δ определялась по азимутам максимальных значений $|Z_{xy}|$ и Φ_{xx} . В принципе, можно делать это и с использованием различных методов определения главных направлений тензора импеданса и фазового тензора.

Таким образом, общий вес в точке МТЗ определялся как произведение веса W^R , определяющего ее удаление от центра окна, веса W^A , ответственного за величину отклонения уровня кривой от среднего уровня в скользящем окне, и веса W^D , характеризующего расхождение осей полярных диаграмм модуля главной компоненты тензора импеданса и главной компоненты фазового тензора:

$$W = W^R \cdot W^A \cdot W^D. \quad (5.6)$$

Определив веса W , для получения искомого сглаженного значения $f^{\text{сглаж.}}(T_0)$ в некоторой точке МТЗ выполнялось осреднение по всем точкам в пределах окна:

$$f^{\text{сглаж.}}(T_0) = \prod_{i=1}^M \sqrt[L]{f(i)^{W_i}}, \quad (5.7)$$

где i – индекс точки, M – число точек в пределах окна, степень корня L – сумма весов:

$$L = \sum_{i=1}^M W_i. \quad (5.8)$$

5.2. Анализ результатов нормализации на примере кривой МТЗ

В рамках анализа возможностей пространственной низкочастотной фильтрации была выполнена площадная нормализация кривых для модели с множеством ЛППН с разными фильтрами. Затем производился расчет отклонения нормализованных данных от данных для модели с однородным верхним слоем по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{f_k - f_k^{\text{норм}}}{f_k} \right)^2}, \quad (5.9)$$

где f_k – значение в k -й точке для модели с однородным верхним слоем, $f_k^{\text{норм}}$ – значение в k -й точке для модели с множеством ЛППН после нормализации, K – общее количество точек, по которым рассчитывалось отклонение. Отклонение данных для моделей с ЛППН от данных для модели с однородным верхним слоем $\sigma_{\text{лппн}}$ рассчитывалось по той же формуле, только вместо нормализованного значения подставлялось исходное.

Для начала следует рассмотреть результаты нормализации на примере кривых эффективного кажущегося сопротивления в одной из точек третьего профиля (обведена фиолетовым кружком на рис. 2.2). На рисунке 5.3 черным цветом обозначена кривая, соответствующая модели с однородным верхним слоем, красным – модели с ЛППН. Поскольку точка МТЗ находится над высокоомной неоднородностью, наблюдается статическое смещение кривой вверх по уровню. Применение нормализации позволяет уменьшить это смещение (кривые зеленого и синего цветов). При использовании фильтра с экспоненциальной зависимостью веса от расстояния наблюдаются немного меньшие отклонения, чем при использовании фильтра с арифметической зависимостью. Нормализация здесь работает лучше при использовании радиуса нормализации 4,5 км.

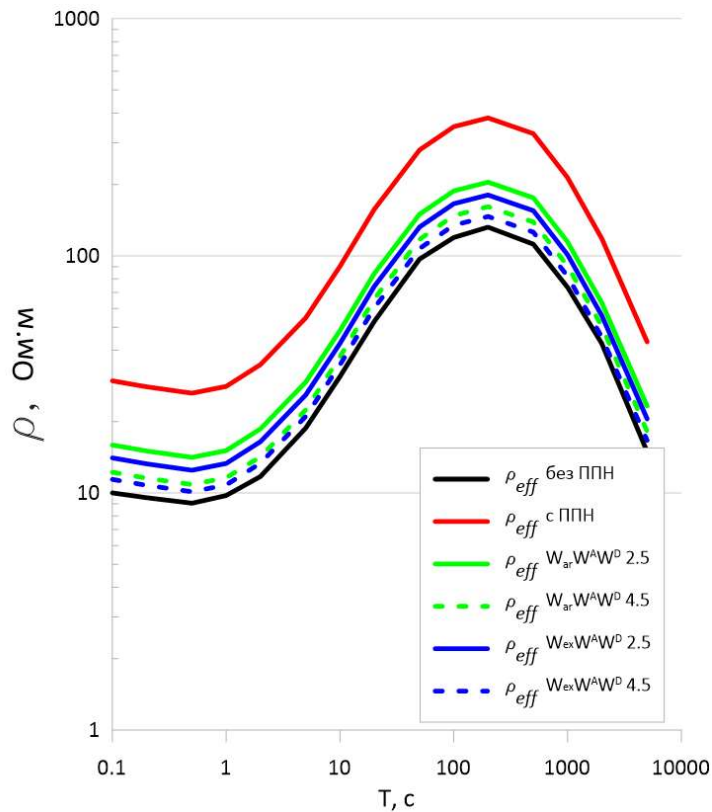


Рисунок 5.3 — Нормализованные кривые эффективного кажущегося сопротивления в точке на профиле 3 (см. рис. 2.2). Черная линия – кривая для модели без ЛППН, красная – с ЛППН. Зеленые и синие кривые отвечают различным фильтрам и радиусам окна (см. легенду).

Отклонения нормализованной кривой от неискаженной, полученные в этой точке при разных вариантах нормализации, представлены в таблице 5.1. Отклонения в данном случае вычислены для данных только в этой точке МТЗ и по всем периодам. В столбцах приведены отклонения для разных радиусов нормализации, от 2,5 км до 5,5 км. Строки таблицы соответствуют фильтрам с разными весовыми характеристиками: W_{lin}^R – вес за удаление точки от центра скользящего окна с линейной зависимостью, W_{exp}^R – соответственно с экспоненциальной зависимостью, W^A – вес за отличие значения от среднего в скользящем окне и W^D – за различие в ориентации амплитудных и фазовых полярных диаграмм в точке.

Таблица 5.1 — Отклонения (σ) кажущегося сопротивления в точке, отмеченной на рис. 2.2 (в %). Отклонение без нормализации $\sigma_{\text{ЛППН}} = 190.29 \%$.

Используемые веса	Радиусы скользящего окна (км)			
	$R_0 = 2.5$	$R_0 = 3.5$	$R_0 = 4.5$	$R_0 = 5.5$
W_{lin}^R	45.61	37.93	33.22	34.53
W_{exp}^R	37.45	34.31	30.23	30.23
$W_{lin}^R W^A$	37.68	33.82	26.14	28.32
$W_{exp}^R W^A$	37.07	26.32	21.01	21.65
$W_{lin}^R W^A W^D$	37.47	30.50	21.43	24.92
$W_{exp}^R W^A W^D$	36.82	23.14	18.76	18.92

Из таблицы видно, что с ростом радиуса нормализации отклонение нормализованной кривой от истинной уменьшается до $R_0 = 4,5$ км, но затем начинает возрастать. Добавление весов, «штрафующих» за отклонение уровня кривой от среднего уровня и за различия в ориентации амплитудных и фазовых полярных диаграмм улучшает результат нормализации.

Важно, что в этом примере в самом лучшем случае отклонение нормализованной кривой от истинной (отвечающей разрезу без ЛППН) составляет примерно 19 %. Это гораздо лучше, чем 190 % без нормализации, но существенно больше типичной погрешности наблюдений. Таким образом, нормализация может существенно подавить искажения от ЛППН, но не исключить их.

5.3. Анализ результатов нормализации вдоль профиля

В этом разделе рассматривается эффективное кажущееся сопротивление вдоль третьего профиля (см. рис. 2.2) на периоде 10 с. Соответствующие значения отклонений (вычисленные по данным на этом профиле и периоде) приведены в таблице 5.2. Наилучший результат здесь наблюдается при использовании самого маленького радиуса $R_0 = 2,5$ км, при больших значениях начинает «заглаживаться» эффект не только от ЛППН, но и от глубинной структуры. Вес W_{exp}^R работает в основном лучше, чем W_{lin}^R . При добавлении весов W^A и W^D ситуация в большинстве случаев улучшается.

Таблица 5.2 — Отклонения (σ) кажущегося сопротивления вдоль профиля 3 (в %), период 10 с. Отклонение без нормализации $\sigma_{\text{лппн}} = 70.53$ %.

Используемые веса	Радиусы скользящего окна (км)			
	$R_0 = 2.5$	$R_0 = 3.5$	$R_0 = 4.5$	$R_0 = 5.5$
W_{lin}^R	37.39	48.96	63.24	77.32
W_{exp}^R	49.24	54.24	60.26	62.28
$W_{lin}^R W^A$	33.89	45.04	59.78	73.34
$W_{exp}^R W^A$	36.13	49.24	57.25	62.59
$W_{lin}^R W^A W^D$	29.67	38.46	54.97	71.11
$W_{exp}^R W^A W^D$	30.11	43.44	50.44	60.33

Ситуацию иллюстрируют графики на рисунке 5.4. Видно, что над фоновым разрезом нормализация работает хорошо, но над исследуемой структурой, размер которого сопоставим с радиусом окна, наблюдается сглаживание исследуемой аномалии и систематическое завышение значений. Этот эффект становится тем сильнее, чем больший радиус нормализации применяется.

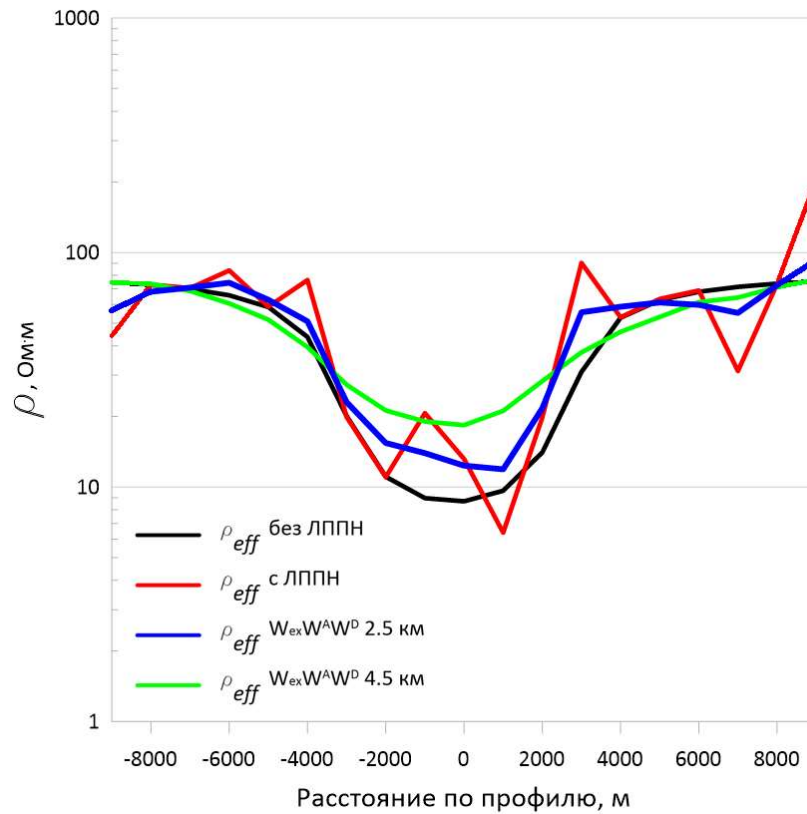


Рисунок 5.4 — Эффективное кажущееся сопротивление вдоль профиля 3 на периоде 10 с. Графики для модели с однородным верхним слоем (черный цвет) и с неоднородным (красный), а также нормализованные с применением всех весов и радиусом окна 2.5 км (синий и зеленый).

Модули главных компонент тензора импеданса $|Z_{xy}|$ и $|Z_{yx}|$ при нормализации ведут себя схожим с кажущимся сопротивлением образом. В таблице 5.3 для компоненты $|Z_{xy}|$ приведены отклонения нормализованных данных от данных для модели с однородным верхним слоем.

Наименьшие отклонения достигаются здесь при использовании радиуса нормализации 3,5 км и при применении всех весовых характеристик, при этом W_{lin}^R дает немного лучший результат. На рисунке 5.5а представлены результаты нормализации компоненты $|Z_{xy}|$ с использованием всех весов и радиусом 3,5 км. Видно, что при нормализации, как и в случае с ρ_{eff} , минимум, наблюдающийся над исследуемой структурой, оказывается заглаженным, а значения завышенными.

Таблица 5.3 — Отклонения (σ) главной компоненты $|Z_{xy}|$ вдоль профиля 3 (в %), период 10 с. Отклонение без нормализации $\sigma_{\text{лпнн}} = 39.67$ %.

Используемые веса	Радиусы скользящего окна (км)			
	$R_0 = 2.5$	$R_0 = 3.5$	$R_0 = 4.5$	$R_0 = 5.5$
W_{lin}^R	26.13	24.55	30.42	34.60
W_{exp}^R	29.75	31.98	33.19	34.25
$W_{lin}^R W^A$	24.22	22.81	28.55	33.57
$W_{exp}^R W^A$	22.58	23.86	30.43	30.89
$W_{lin}^R W^A W^D$	22.05	21.15	28.83	34.54
$W_{exp}^R W^A W^D$	21.64	21.35	22.58	27.34

Аналогичная ситуация наблюдается и при нормализации главных компонент теллурического тензора. В таблице 5.4 представлены отклонения модуля главной компоненты теллурического тензора $|T_{xx}|$ вдоль профиля 3. Наименьшая невязка достигается при использовании всех весов с радиусом нормализации 3,5 км.

Таблица 5.4 — Отклонения (σ) главной компоненты $|T_{xx}|$ вдоль профиля 3 (в %), период 10 с. Отклонение без нормализации $\sigma_{\text{лпнн}} = 39.90$ %.

Используемые веса	Радиусы скользящего окна (км)			
	$R_0 = 2.5$	$R_0 = 3.5$	$R_0 = 4.5$	$R_0 = 5.5$
W_{lin}^R	15.35	13.56	16.73	18.34
W_{exp}^R	18.14	18.62	19.81	19.84
$W_{lin}^R W^A$	14.46	13.27	17.20	19.61
$W_{exp}^R W^A$	16.82	14.41	18.47	18.47
$W_{lin}^R W^A W^D$	19.27	17.27	24.02	29.30
$W_{exp}^R W^A W^D$	12.21	13.83	18.31	20.83

Графики $|T_{xx}|$ ведут себя идентично главной компоненте тензора импеданса и кажущемуся сопротивлению (рисунок 5.4). В центре модели, над глубинной структурой, нормализованные значения завышаются относительно модели с однородным верхним слоем. Представленные примеры показывают, что сглаживается и подавляется не только эффект ЛППН, но и отклик от глубинной структуры. Ближе к краям модели нормализованные данные выходят на уровень значений модели без ЛППН. Следует отметить, что графики для $|Z_{xy}|$ и $|T_{xx}|$ очень похожи, поскольку в основном формируются одной и той же компонентой E_x в точке наблюдения.

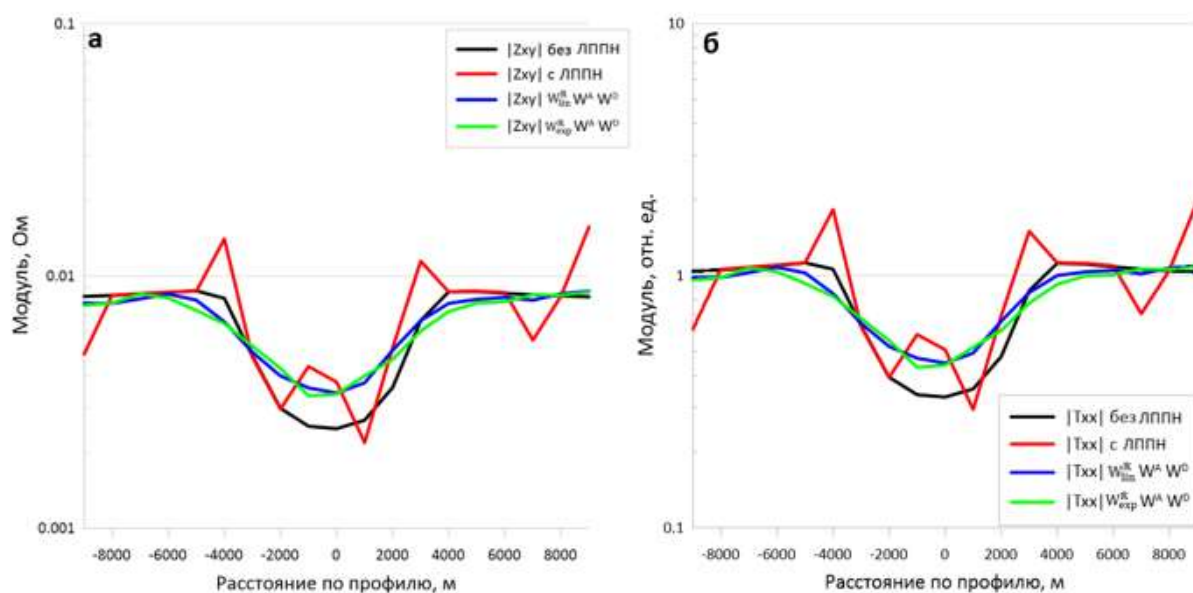


Рисунок 5.5 — Графики модулей главных компонент вдоль профиля 3 (период 10 с, радиус окна 3.5 км): а – компонента тензора импеданса $|Z_{xy}|$, б – теллурического тензора $|T_{xx}|$.

5.4. Анализ результатов нормализации по площади

В данном разделе представлен анализ результатов нормализации по всей карте, включающей 7 профилей. В таблице 5.5 приведены значения отклонений σ нормализованных данных от данных для модели с однородным верхним слоем. Рассмотрены модули всех компонент тензора импеданса $[Z]$ и теллурического

тензора [7], а также эффективные значения. Зеленым цветом выделены наилучшие результаты для каждой компоненты, желтым – относительно хорошие результаты, по два для каждой компоненты, а красным – отклонения данных для модели с ЛППН от данных для модели с однородным верхним слоем.

Кажущееся сопротивление и модули главных компонент тензора импеданса и теллурического тензора ведут себя схожим образом – наименьшие отклонения достигаются при использовании «средних» радиусов – 3.5 и 4.5 км. С дополнительными компонентами наблюдается иная ситуация. Из-за того, что их значения обладают сильной пространственной изменчивостью, использование больших радиусов, включающих точки с соседних профилей, только ухудшает полученные данные (по сравнению с ненормализованными данными).

Следует отметить, что при рассмотрении всей площади используется множество точек МТЗ, расположенных на удалении от краев глубинной структуры, где значения нормализуемых величин меняются плавно и нормализация работает лучше. За счет этого средние по всей площади отклонения получаются меньше, чем для рассмотренного выше профиля 3, который проходит вблизи границы и двух углов глубинной неоднородности.

Таблица 5.5 — Отклонения (σ) различных компонент МТ данных (в %), период 10 с. $\sigma_{\text{ЛППН}}$ – отклонения ненормализованных данных. Желтым цветом выделены небольшие отклонения, зеленым – минимальные.

Компонента Веса	ρ_{eff}	$ Z_{xx} $	$ Z_{xy} $	$ Z_{yx} $	$ Z_{yy} $	$ T_{\text{eff}} $	$ T_{xx} $	$ T_{xy} $	$ T_{yx} $	$ T_{yy} $
$\sigma_{\text{ЛППН}}$	63.07	48.83	37.66	40.08	52.75	35.14	37.76	47.7	50.7	40.08
$W_{\text{exp}}^R W^A 2.5$	34.39	25.11	15.60	6.12	34.43	17.94	15.49	23.24	32.7	24.29
$W_{\text{lin}}^R W^A 2.5$	33.08	35.37	14.77	22.98	48.86	16.28	14.87	23.88	36.3	23.25
$W_{\text{exp}}^R W^A W^D 2.5$	36.74	24.14	18.42	25.57	32.50	19.93	18.35	23.09	31.7	25.70
$W_{\text{lin}}^R W^A W^D 2.5$	28.38	25.44	13.82	20.71	32.64	15.02	13.99	23.08	34.0	20.99
$W_{\text{exp}}^R W^A 3.5$	19.54	54.00	11.35	17.86	68.37	10.67	11.50	53.21	50.3	18.66
$W_{\text{lin}}^R W^A 3.5$	16.99	55.16	10.68	16.00	60.99	10.16	10.88	50.38	53.0	16.64
$W_{\text{exp}}^R W^A W^D 3.5$	18.62	59.97	11.03	16.63	68.33	9.89	10.22	55.12	50.4	17.45
$W_{\text{lin}}^R W^A W^D 3.5$	14.09	54.66	9.48	14.07	69.69	8.88	9.67	59.97	51.8	14.61
$W_{\text{exp}}^R W^A 4.5$	15.29	66.71	14.31	16.56	81.52	10.61	13.35	67.4	69.5	17.92
$W_{\text{lin}}^R W^A 4.5$	14.25	64.02	12.37	15.17	81.91	9.55	12.75	66.7	73.8	16.04
$W_{\text{exp}}^R W^A W^D 4.5$	13.13	65.34	13.90	14.94	89.85	8.24	14.02	60.2	71.9	14.45
$W_{\text{lin}}^R W^A W^D 4.5$	12.13	67.40	11.56	13.50	81.59	8.67	11.92	67.2	73.5	14.28
$W_{\text{exp}}^R W^A 5.5$	17.34	66.34	14.17	16.89	83.73	11.75	14.76	78.2	71.3	19.37
$W_{\text{lin}}^R W^A 5.5$	17.72	96.68	14.09	17.09	82.21	12.19	14.49	71.3	74.1	17.50
$W_{\text{exp}}^R W^A W^D 5.5$	17.23	68.45	14.32	15.54	83.66	12.63	13.67	70.3	76.5	16.54
$W_{\text{lin}}^R W^A W^D 5.5$	16.32	66.63	13.54	15.88	82.19	11.12	13.04	71.2	74.0	16.47

На рисунке 5.6 приведены карты эффективного кажущегося сопротивления на периоде 10 с. Данные для модели с однородным приповерхностным слоем представлены вверху слева (рис. 5.6, а), для модели с ЛППН – рисунок 5.6б, результат нормализации с использованием всех весов и радиуса 2.5 км – рисунок

5.6в, а результат нормализации, обеспечивающий наименьшее отклонение, с использованием всех весов и радиусом 4.5 км – внизу справа (рис. 5.6, г). Видно, что нормализация позволила убрать множество аномалий, вызванных ЛППН как вне исследуемой глубинной структуры, так и над ним, однако прямоугольный минимум над ней в результате нормализации сгладился, что также видно на графиках на рисунке 5.4. Несмотря на то, что отклонение, рассчитанное по всей площади, наименьшее для радиуса 4.5 км, истинные значения сопротивления наглядно проще оценить по результатам, полученным для самого маленького радиуса нормализации.

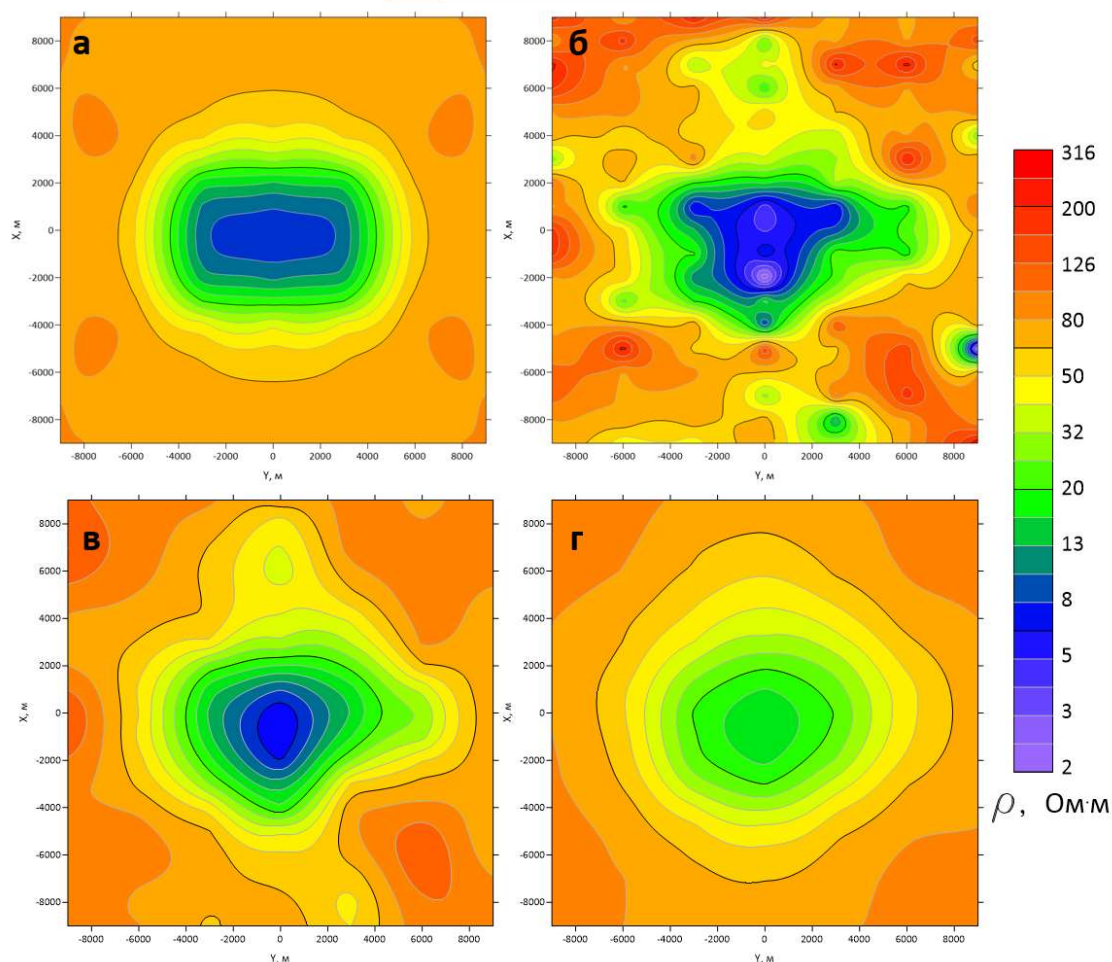


Рисунок 5.6 — Карты эффективного кажущегося сопротивления, а – модель без ЛППН, б – модель с ЛППН, в – результаты нормализации с использованием всех весов и радиусом осреднения 2.5 км., г – результаты нормализации с использованием всех весов и радиусом осреднения 4.5 км. Период 10 с.

Аналогичная ситуация наблюдается при нормализации главных компонент как тензора импеданса, так и теллурического тензора. На рисунке 5.7 приведены результаты нормализации модуля главной компоненты $|Z_{xy}|$, а на рисунке 5.8 – модуля компоненты $|Z_{yx}|$. Большинство аномалий от ЛППН подавляются, но и минимум в центре структуры выделяется не так четко, как на карте для модели с однородным верхним слоем. Также, как и в случае с кажущимся сопротивлением, использование большего радиуса приводит к завышению истинных значений исследуемой структуры.

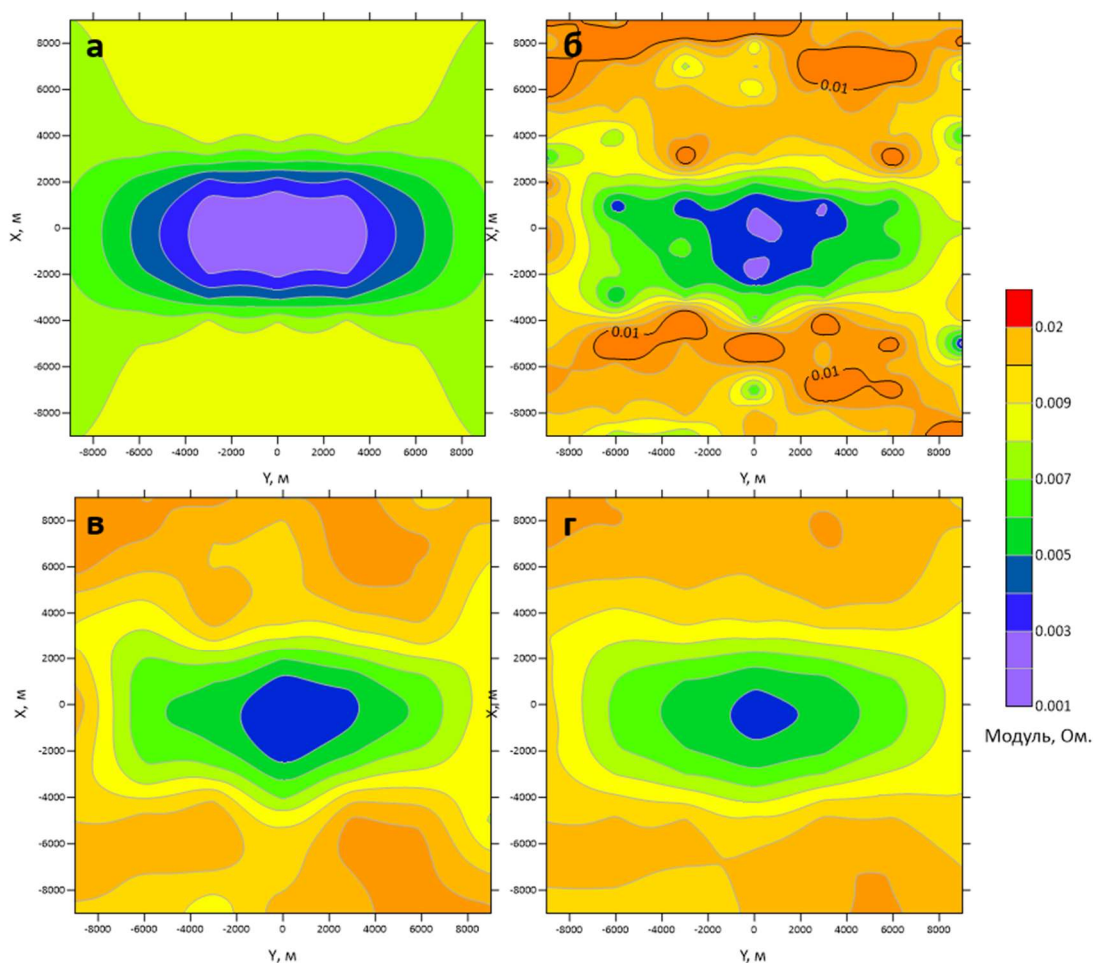


Рисунок 5.7 — Карты модуля главной компоненты тензора импеданса $|Z_{xy}|$, а – модель без ЛППН, б – модель с ЛППН, в – результаты нормализации с использованием всех весов и радиусом осреднения 2.5 км., г – результаты нормализации с использованием всех весов и радиусом осреднения 4.5 км.

Период 10 с.

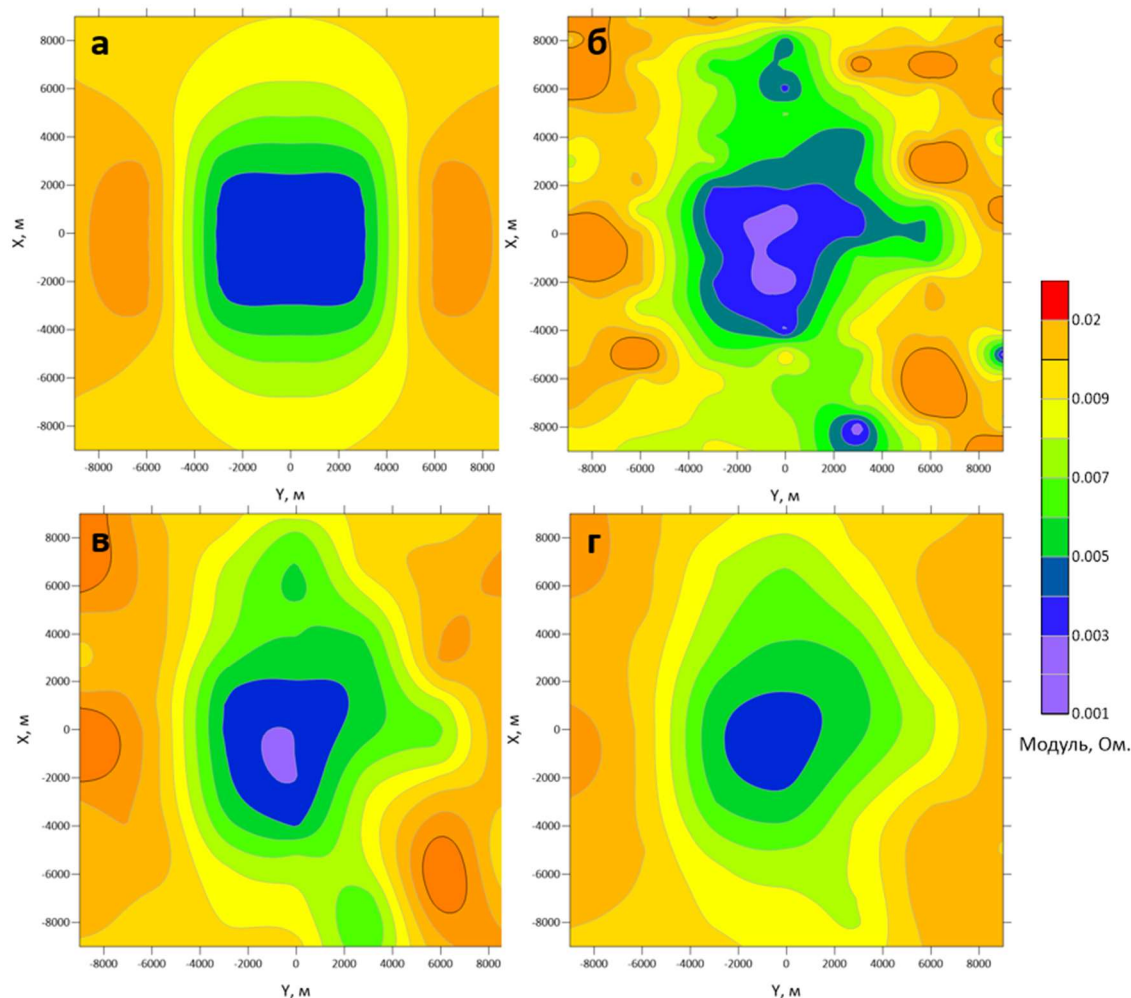


Рисунок 5.8 — Карты модуля главной компоненты тензора импеданса $|Z_{yx}|$, а – модель без ЛППН, б – модель с ЛППН, в – результаты нормализации с использованием всех весов и радиусом осреднения 2.5 км., г – результаты нормализации с использованием всех весов и радиусом осреднения 4.5 км. Период 10 с.

5.5. Нормализация дополнительных компонент тензора импеданса и теллурического тензора

Дополнительные компоненты тензора импеданса ведут себя несколько иначе. Важным отличием дополнительных компонент от основных является то, что они резче меняются в пространстве, достигая больших значений вблизи неоднородностей и быстро убывая при удалении от них. На рисунке 5.9 приведены результаты нормализации дополнительных компонент тензора

импеданса $|Z_{xx}|$ и $|Z_{yy}|$. На графиках видно, что ЛППН оказывают влияние не только на уровень кривой, но и на ее форму примерно до периода в 3 с. Также, поскольку значения модулей дополнительных компонент сильно меняются в заданном окне, то происходит некорректный расчет коэффициента сдвига.

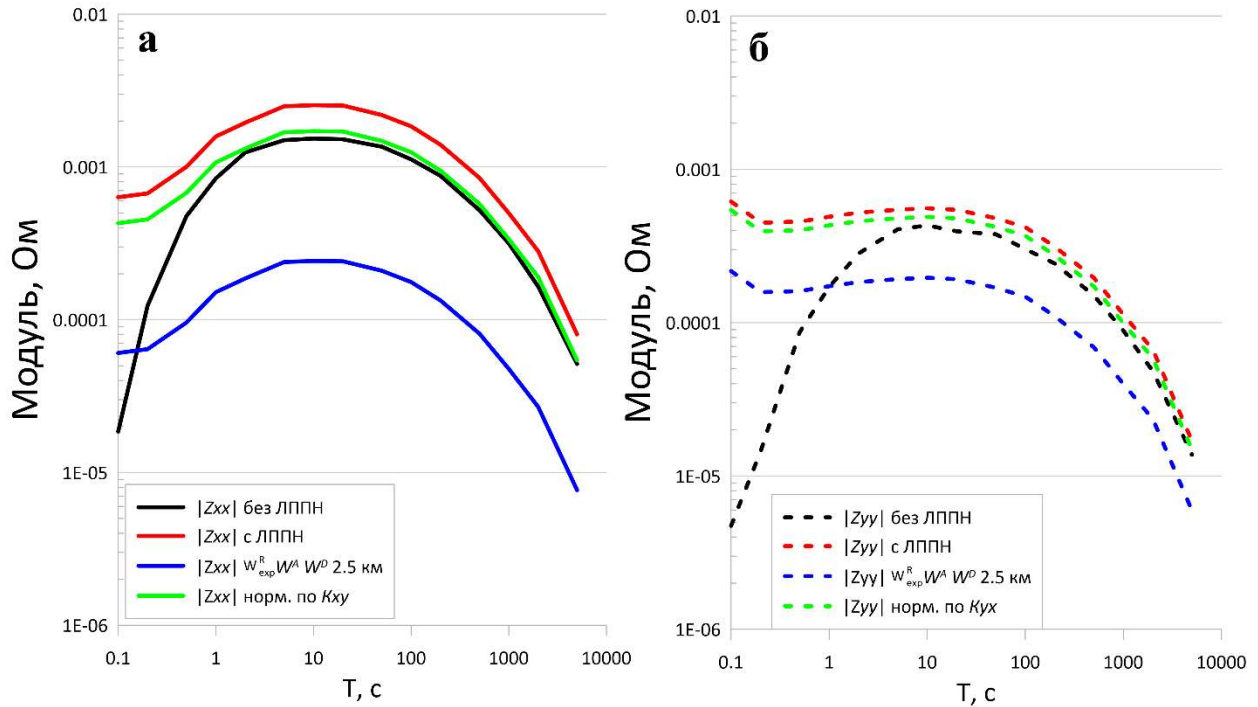


Рисунок 5.9 — Графики модулей дополнительных компонент тензора импеданса в точке на профиле 3 (см. рис. 2.2). а – компонента $|Z_{xx}|$, б – компонента $|Z_{yy}|$.

Однако, вместо коэффициента сдвига, рассчитанного для дополнительных компонент, возможно использование коэффициентов от главных компонент, например, для $|Z_{xx}|$ используется коэффициент K_{xy} , а для $|Z_{yy}|$ – K_{yx} соответственно. Анализ карт коэффициентов сдвига K^{mod} , рассчитываемых как отношение компоненты тензора импеданса для модели с ЛППН к той же компоненте, но для модели с однородным верхним слоем (рисунок 5.10), подтверждает, что эти коэффициенты вполне сопоставимы. Важно также заметить, что значения дополнительных компонент вдоль центрального профиля для модели с однородным верхним слоем близки к нулю, в результате чего расчет коэффициентов на этом участке невозможен, поэтому эти данные не учитывались

при построении карт, а сама область закрашена белым цветом. Результаты нормализации с применением такого метода в точке показаны на рисунке 5.9 зеленым цветом. Видно, что зеленая кривая гораздо ближе к черной кривой (модель с однородным верхним слоем), чем синяя кривая.

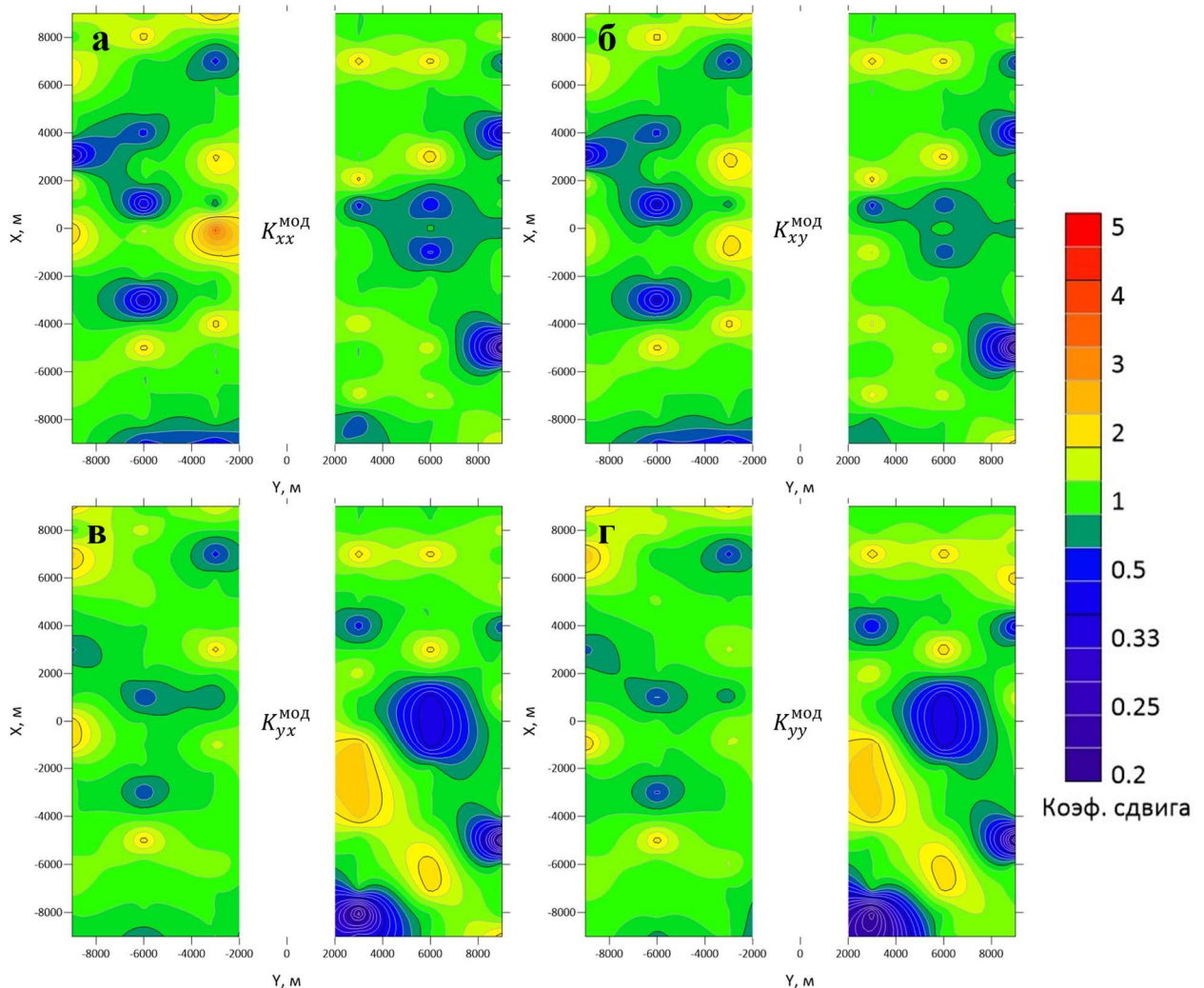


Рисунок 5.10 — Карта коэффициента сдвига кривых компонент тензора импеданса, определенного по данным для двух моделей, период 10 с: а – компонента $|Z_{xx}|$, б – компонента $|Z_{xy}|$, в – компонента $|Z_{yx}|$, г – компонента $|Z_{yy}|$.

Из таблицы 5.6 видно, что при нормализации с фильтром с полушириной 2.5 км отклонения получаются больше, чем отклонение ненормализованных данных от данных для модели без ЛППН. Использование же фильтров с полушириной, при которых в окно осреднения попадают точки с соседних профилей, еще сильнее искажают полученный результат. Это хорошо видно на

рис. 5.11, где зеленая кривая отвечает результату нормализации с полушириной фильтра 4.5 км. Использование же коэффициентов от главных компонент, наоборот, приводит к улучшению результатов нормализации. Отклонение при использовании всех весовых характеристик и радиуса 2.5 км составляет 38.74%.

Таблица 5.6 — Отклонения (σ) дополнительной компоненты $|Z_{xx}|$ вдоль профиля 3 (в %), период 10 с. Отклонение без нормализации $\sigma_{\text{лппп}} = 57.74$ %.

Используемые веса	Радиусы скользящего окна (км)			
	$R_0 = 2.5$	$R_0 = 3.5$	$R_0 = 4.5$	$R_0 = 5.5$
W_{lin}^R	85.18	97.90	99.02	109.57
W_{exp}^R	91.70	100.27	141.46	141.56
$W_{lin}^R W^A$	70.83	95.90	98.62	106.32
$W_{exp}^R W^A$	74.87	98.65	145.20	145.34
$W_{lin}^R W^A W^D$	55.71	93.79	96.82	105.82
$W_{exp}^R W^A W^D$	59.43	96.93	138.76	140.32
$W_{lin}^R W^A W^D$ по K_{xy}	38.74	41.33	49.41	60.63
$W_{exp}^R W^A W^D$ по K_{xy}	41.21	43.21	54.50	68.22

Те же закономерности проявляются и в дополнительных компонентах теллурического тензора. В таблице 5.7 приведены отклонения для компоненты $|T_{xy}|$, а на рисунке 5.11б показаны примеры графиков этой компоненты вдоль профиля. Они очень похожи на графики компоненты $|Z_{xx}|$. Применение коэффициентов от главных компонент в данном случае позволяет снизить отклонение до 35.94 %.

Таблица 5.7 — Отклонения (σ) дополнительной компоненты $|T_{xy}|$ вдоль профиля 3 (в %), период 10 с. Отклонение без нормализации $\sigma_{\text{лппн}} = 54.42$ %.

Используемые веса	Радиусы скользящего окна (км)			
	$R_0 = 2.5$	$R_0 = 3.5$	$R_0 = 4.5$	$R_0 = 5.5$
W_{lin}^R	77.11	93.92	96.70	99.70
W_{exp}^R	79.80	99.65	123.81	123.89
$W_{lin}^R W^A$	71.05	84.28	96.27	106.84
$W_{exp}^R W^A$	72.89	99.42	138.73	139.25
$W_{lin}^R W^A W^D$	50.37	82.34	92.56	103.80
$W_{exp}^R W^A W^D$	57.41	96.11	134.59	134.69
$W_{lin}^R W^A W^D$ по K_{xy}	35.94	40.24	43.53	57.12
$W_{exp}^R W^A W^D$ по K_{xy}	39.42	42.43	46.52	60.59

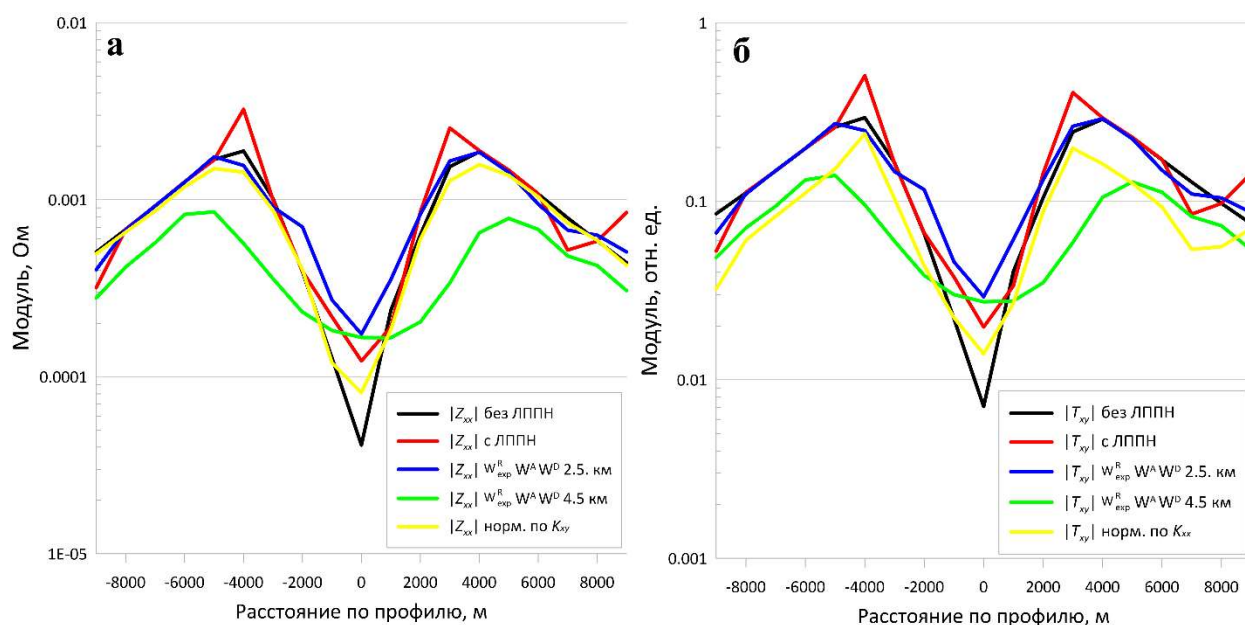


Рисунок 5.11 — Графики модулей дополнительных компонент вдоль профиля 3, период 10 с. а – компонента тензора импеданса $|Z_{xx}|$, б – теллурического тензора $|T_{xy}|$.

На рисунках 5.12 и 5.13 приведены карты модулей дополнительных компонент тензора импеданса $|Z_{xx}|$ и $|Z_{yy}|$. Использование небольшой полуширины 2.5 км, позволяет в целом улучшить качество площадных данных (рис. 5.9, в, 5.10, в), отклонения от исходных данных составляют 24.14% и 32.5% соответственно, подавляются аномалии повышенных значений, наблюдаемые над углами структуры (рис. 5.9, б, 5.10, б) и форма самих областей повышенных значений становится более похожей на исходные данные для модели с однородным верхним слоем. Использование большей полуширины, при которой в окно осреднения попадают точки с соседних профилей, приводит к резкому ухудшению результата нормализации (рис. 5.12г, 5.13г), отклонения возрастают до 64.02% для компоненты $|Z_{xx}|$ и до 81.52% для компоненты $|Z_{yy}|$. Использования нормализации с коэффициентами сдвига K_{xy} и K_{yx} позволили улучшить результат до 16.86% и 24.6% соответственно.

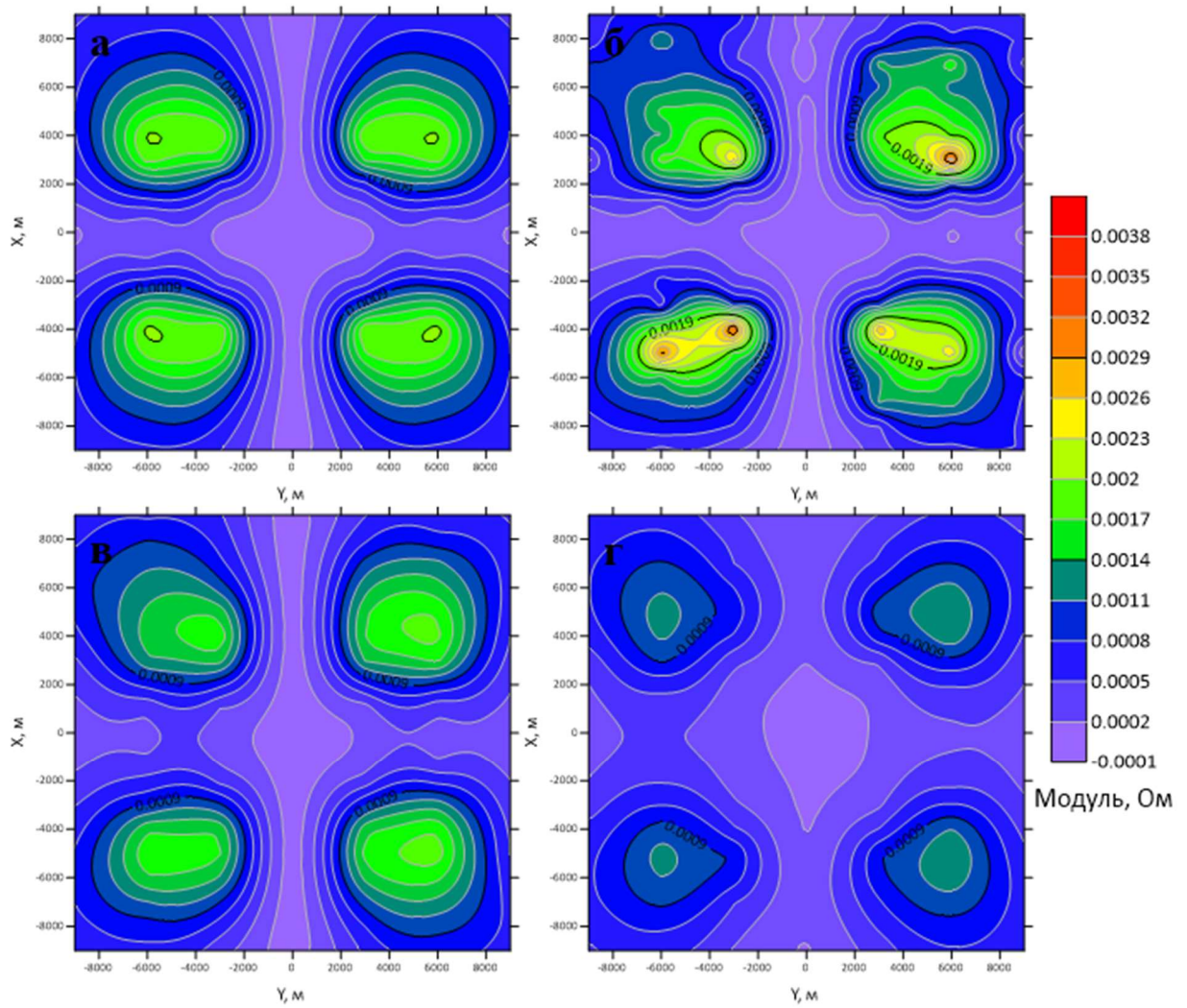


Рисунок 5.12 — Карты модуля дополнительной компоненты тензора импеданса $|Z_{xx}|$, а – модель без ЛППН, б – модель с ЛППН, в – результаты нормализации с полушириной фильтра 2.5 км, г - результаты нормализации с полушириной фильтра 3.5 км. Период 10 с.

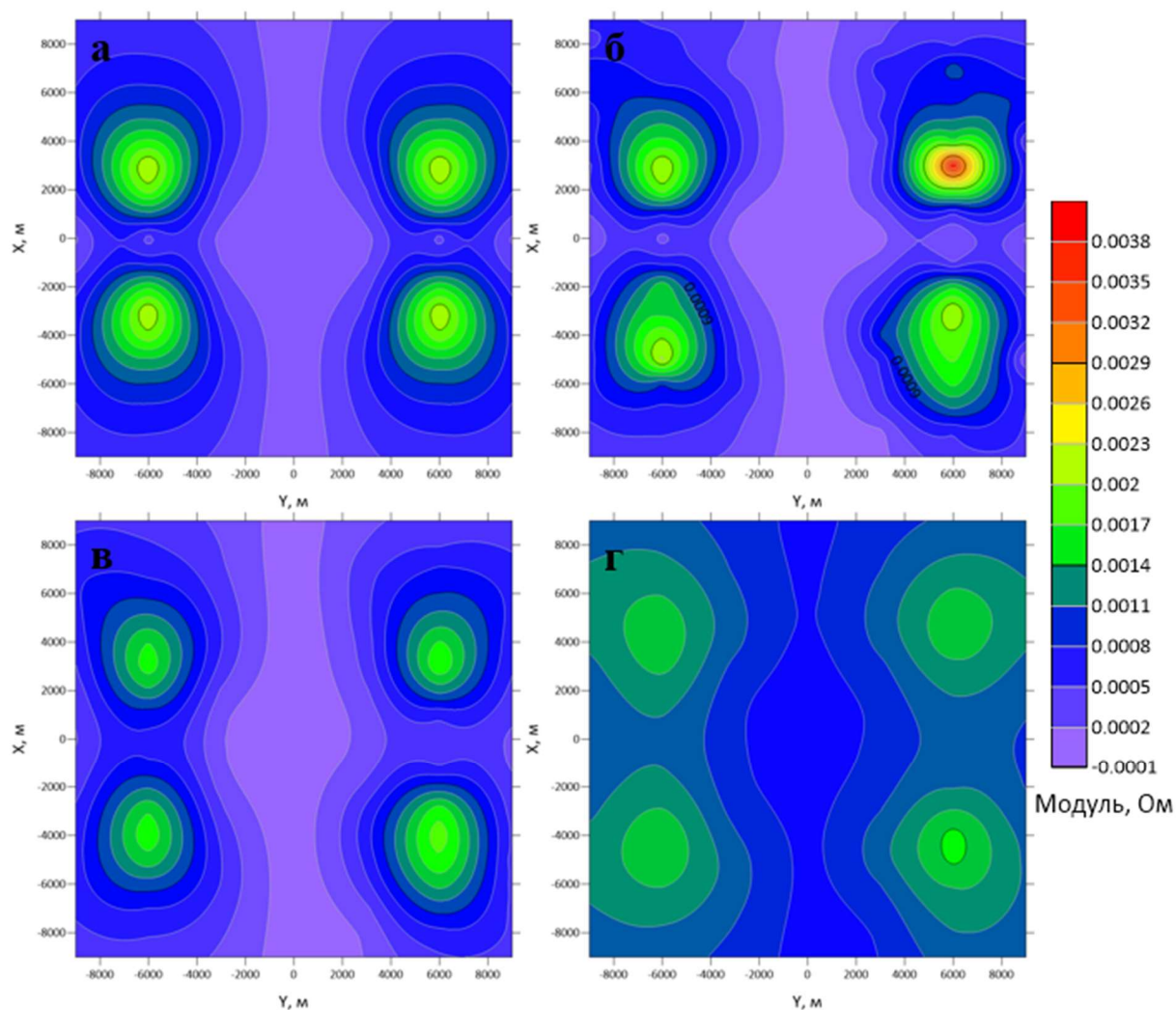


Рисунок 5.13 — Карты модуля дополнительной компоненты тензора импеданса $|Z_{yy}|$, а – модель без ЛППН, б – модель с ЛППН, в – результаты нормализации с полушириной фильтра 2.5 км, г - результаты нормализации с полушириной фильтра 3.5 км. Период 10 с.

5.6. Результаты нормализации данных на периоде 1000с

Помимо нормализации на периоде 10 с были также проведены дополнительные исследования с периодом нормализации 1000 с с целью оценить, влияет ли выбор периода на итоговые результаты и сравнить полученные отклонения. Результаты нормализации эффективного кажущегося сопротивления с радиусом 2.5 км вдоль профиля 3 на периоде 1000 с приведены на рисунке 5.14а. Форма кривых схожа с рисунком 5.4, где представлены

результаты нормализации с периодом 10 с. Такая же ситуация наблюдается и при нормализации модулей главных (рис. 5.14б) и дополнительных (рис. 5.14в) компонент. Стоит отметить, что здесь, также как и на периоде 10 с, нормализация дополнительной компоненты по коэффициенту от главной дает лучшие результаты.

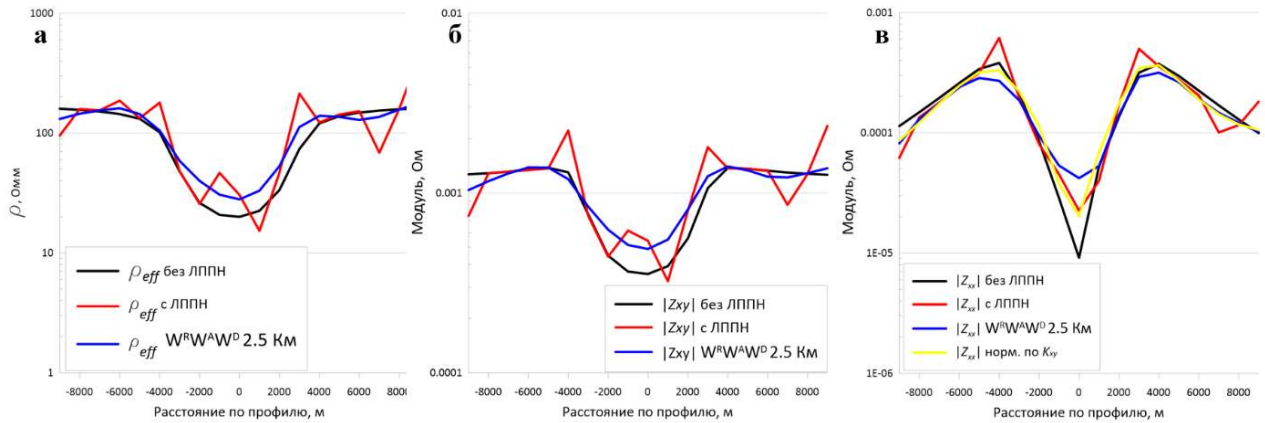


Рисунок 5.14 — Результаты нормализации на периоде 1000 с (период нормализации 1000 с) вдоль профиля 3: а – эффективное кажущееся сопротивление, б – модуль главной компоненты $|Z_{xy}|$, в - модуль дополнительной компоненты $|Z_{xx}|$.

Также было выполнено сравнение результатов площадной нормализации с периодами нормализации 10 и 1000 с, карты строились на периоде 10 с (рис. 5.15). На рисунке 5.15а представлена карта, соответствующая модели с однородным верхним слоем, 5.15б – ненормализованным данным с множеством ЛППН, отклонение для этой модели составляет 63.07%, 5.15в – результат нормализации с периодом нормализации 10 с, радиусом осреднения 2.5 км и с использованием всех весов, отклонение от модели с однородным верхним слоем в данном случае снижается до 28.38%, а рисунок 5.15г соответствует также результатам нормализации с радиусом 2.5 км и с использованием всех весовых характеристик, но с периодом нормализации 1000 с. Отклонение в данном случае достигает 29.71%, что всего на 1.5 процента больше, чем при использовании

периода нормализации 10 с. По полученным результатам можно судить о том, что для используемой модели выбор период нормализации не играет весомой роли.

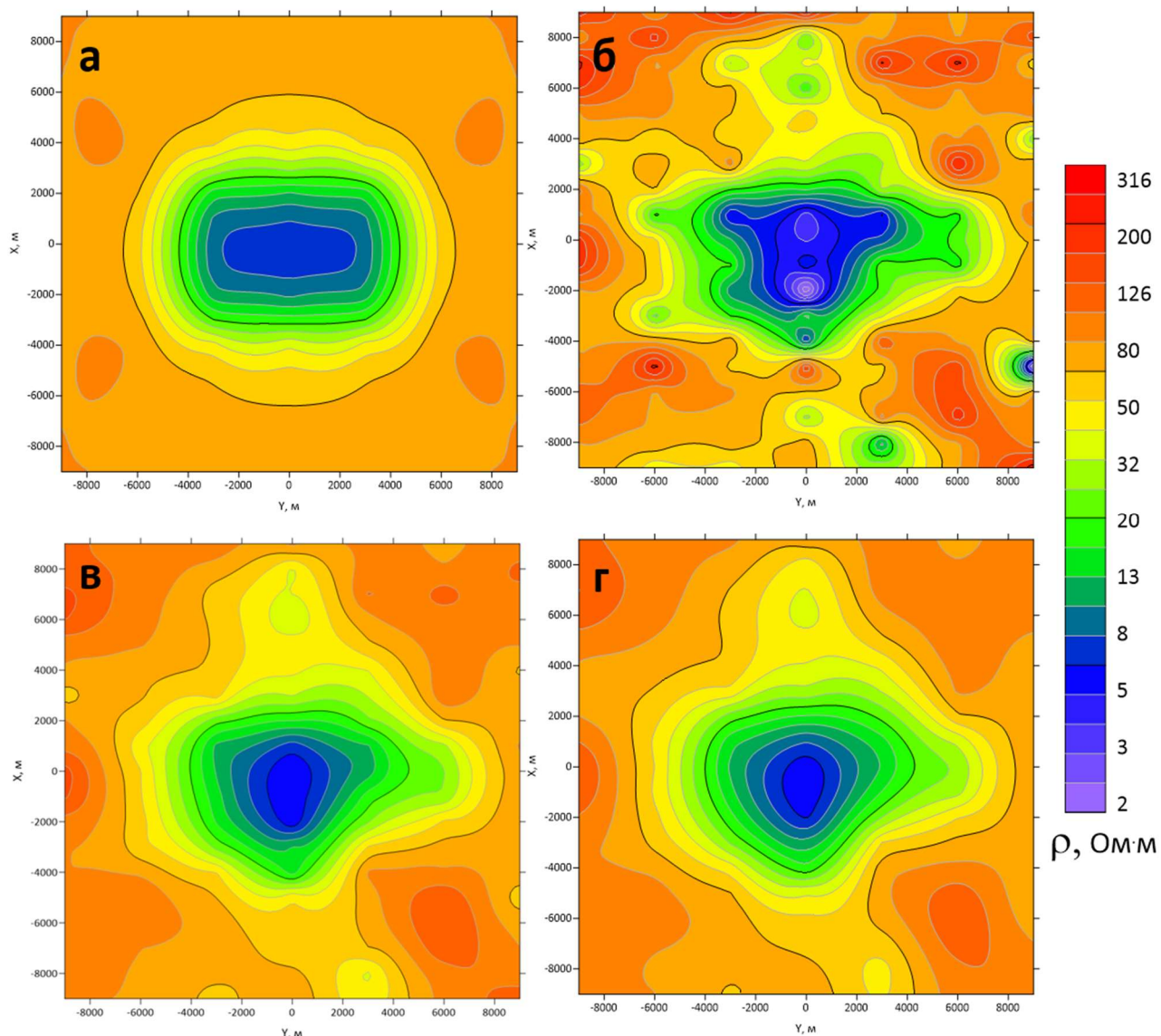


Рисунок 5.15 — Карты эффективного кажущегося сопротивления, а – модель без ЛППН, б – модель с ЛППН, в – результаты нормализации с периодом 10 с при использовании всех весов и радиусом осреднения 2.5 км., г – результаты нормализации с периодом 1000 с и использованием всех весов и радиусом осреднения 2.5 км. Период карт – 10 с.

5.7. Результаты нормализации данных для моделей с ЛППН одного знака

Также, в рамках эксперимента, была проведена нормализация моделей с исключительно высокоомными и исключительно проводящими неоднородностями, описанными в разделе 2.4 второй главы. Для краткости, в работе будут представлены только наилучшие результаты по рассчитанным отклонениям и только для эффективного кажущегося сопротивления. На рисунке 5.16 представлены результаты нормализации вдоль профиля 3. Здесь в отличие от графиков на рисунке 5.4 минимум, соответствующий исследуемой в работе структуре, выделяется гораздо более достоверно, а отклонения, соответствующие нормализованным моделям (σ) сопоставимы с отклонениями, представленным в таблице 5.2.

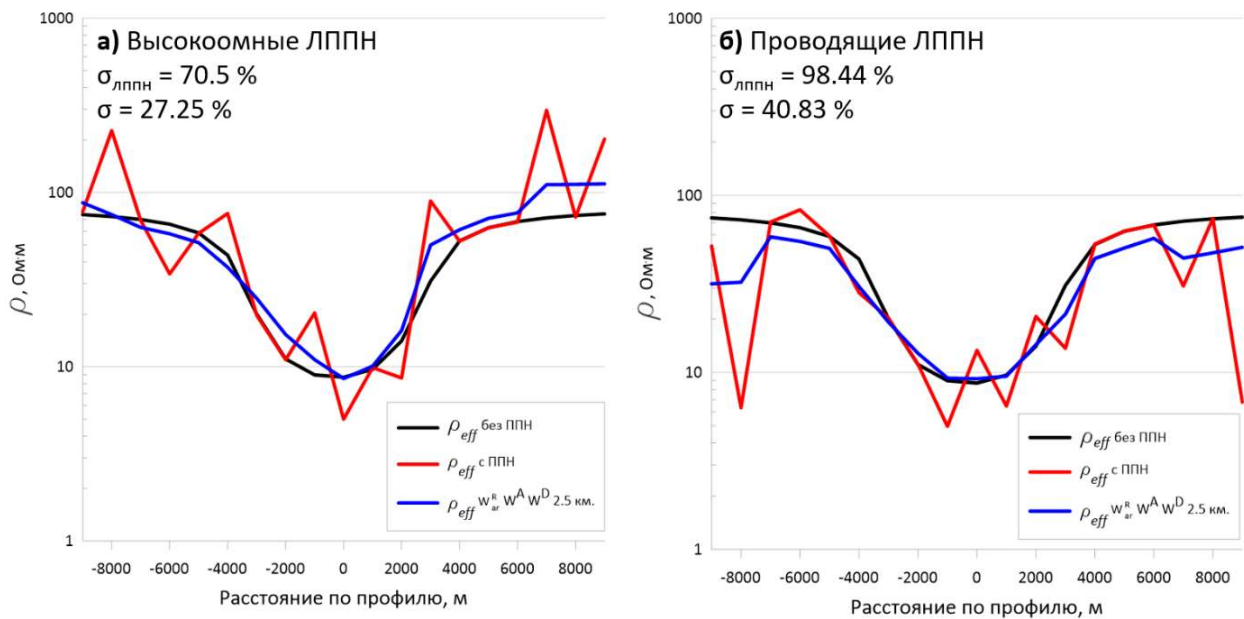


Рисунок 5.16 — Эффективное кажущееся сопротивление вдоль профиля 3 на периоде 10 с. Графики для модели с однородным верхним слоем (черный цвет) и с неоднородным (красный), а также нормализованные с применением всех весов и радиусом окна 2.5 км (синий). а – модель с исключительно высокоомными ЛППН, б – модель с исключительно проводящими ЛППН.

Нормализация площадных данных, продемонстрированная на рисунках 5.17 и 5.18. Для обеих моделей нормализация позволила убрать много искажающих аномалий, однако исходная форма оказалась искаженной, особенно это заметно для модели с исключительно проводящими неоднородностями (рисунок 5.18в).

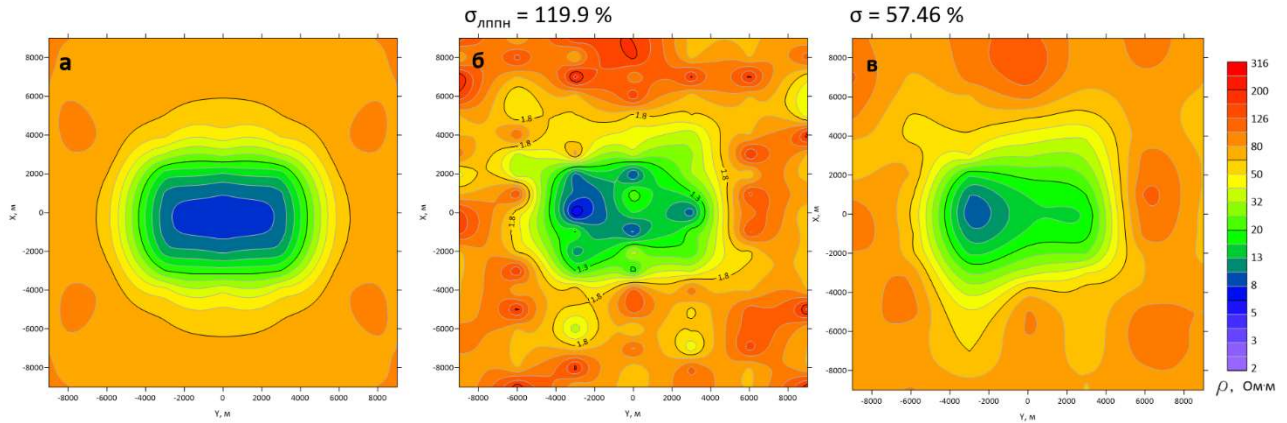


Рисунок 5.17 — Карты эффективного кажущегося сопротивления, а – модель без ЛППН, б – модель с высокоомными ЛППН, в – результаты нормализации с радиусом осреднения 2.5 км. Период 10 с.

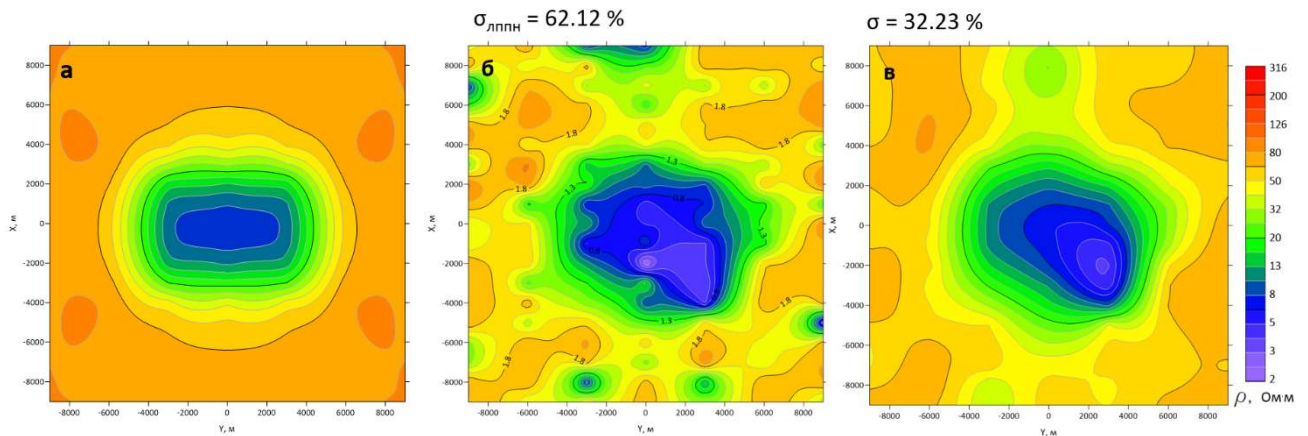


Рисунок 5.18 — Карты эффективного кажущегося сопротивления, а – модель без ЛППН, б – модель с проводящими ЛППН, в – результаты нормализации с радиусом осреднения 2.5 км. Период 10 с.

5.8. Выводы

Нормализация кривых МТЗ, основанная на пространственном сглаживании, позволяет эффективно подавлять случайный шум от ЛППН в главных компонентах $[Z]$ и $[T]$ и в эффективных компонентах Z_{eff} и T_{eff} . Ширина скользящего окна, используемого при пространственном сглаживании, должна быть существенно больше размеров ЛППН, но меньше размеров изучаемых глубинных структур. При слишком большом радиусе осреднения велика вероятность исказить сигнал от исследуемого объекта.

Выбор формы весовой функции в пределах окна (линейный или экспоненциальный спад при удалении от центра окна) неоднозначен и несущественно влияет на результаты. Результат нормализации улучшается за счет введения дополнительного веса за отклонение уровня кривой от среднего в скользящем окне. Также повышает эффективность нормализации использование дополнительного веса, «штрафующего» за различие главных направлений полярных диаграмм модуля основной компоненты тензора импеданса и основной компоненты фазового тензора, что доказывает **второе защищаемое положение** диссертации.

Эффективность нормализации дополнительных компонент тензоров $[Z]$ и $[T]$, ввиду их резкой пространственной изменчивости, гораздо ниже, чем их основных компонент. Для них эффективнее использовать коэффициенты смещения, определённые для их главных компонент, связанных с той же составляющей электрического поля, что отражено в **третьем защищаемом положении** исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования влияния приповерхностных неоднородностей на магнитотеллурические данные было составлено два варианта характерной упрощенной геоэлектрической модели земной коры, содержащую трехмерную проводящую осадочную впадину в высокоомном фундаменте. Один из вариантов включает в себя однородный верхний слой, второй – приповерхностные неоднородности с различными размерами и сопротивлениями. Далее производился анализ влияния добавленных ЛППН на данные МТЗ, а также осуществлялось сравнение эффективности методов подавления влияния искажений от неоднородностей в верхнем слое.

В работе был наглядно продемонстрирован статический сдвиг кривых эффективного кажущегося сопротивления, компонент теллурического тензора, влияние приповерхностных неоднородностей на частотные разрезы, а также на площадные данные. Если некоторые геоэлектрические параметры (кажущееся сопротивление, норма теллурического тензора, параметр неоднородности N , параметр асимметрии Свифта $skew_s$) подвержены сильному влиянию ЛППН, то другие, например, нормы матриц Визе-Паркинсона и горизонтального магнитного тензора, а также параметры асимметрии Бара $skew_B$ и фазового тензора β , свободны от приповерхностных искажений, что можно использовать для анализа данных магнитотеллурики в районах с неоднородной верхней частью разреза, например, в зонах распространения многолетнемерзлых пород и горах.

Также были рассмотрены методы декомпозиции тензора импеданса (метод Бара и фазового тензора), позволяющие разделять локальные и региональные эффекты. Показано, что в условиях применимости этого разложения методы Бара и фазового тензора позволяют уверенно определять главные направления (азимуты), связанные с региональными структурами (с осадочной впадиной) и не искаженные локальными эффектами (приповерхностных неоднородностей).

Помимо главных направлений региональной структуры, эффективным методом определения и азимутов простирания и размерности среды является анализ полярных диаграмм модулей и фаз тензора импеданса, а также компонент фазового тензора. Диаграммы модулей компонент тензора импеданса в общем случае подвержены влиянию ЛППН, которые могут искажать как амплитуду, так и форму диаграмм. Стандартные полярные диаграммы фазы основной компоненты тензора импеданса слабо подвержены влиянию ЛППН, а полярные диаграммы и эллипсы фазового тензора не подвержены такому влиянию вовсе. Они показывают направления, связанные с региональными структурами, и характеризуют степень и характер горизонтальной неоднородности среды.

Перечисленные выше методы уже давно используются в современной магнитотеллурике, однако те же алгоритмы к теллурическому тензору применяются ограниченно. Поэтому в четвертой главе работы было проанализировано влияние приповерхностных неоднородностей на компоненты теллурического тензора, а также к нему был адаптирован метод фазового тензора. В целом, ЛППН на теллурический тензор оказывает такое же влияние, как и на компоненты тензора импеданса. Метод теллурического фазового тензора показал устойчивые результаты как при определении главных направлений региональной структуры, так и при анализе среды посредством полярных диаграмм. Полярные диаграммы модулей компонент теллурического тензора также подвержены серьезному воздействию от приповерхностных неоднородностей, меняются как их размеры, так и ориентировка, особенно это заметно в точках, попадающих на вытянутые неоднородности. Диаграммы фаз теллурического тензора, как и диаграммы фазового теллурического тензора, свободны от влияния приповерхностных неоднородностей, по их ориентировке возможно судить о главных направлениях простирания глубинной структуры, а также о размерности среды и ее асимметричности.

В заключительной, пятой главе диссертационного исследования, рассмотрена нормализация МТ данных с помощью пространственной

низкочастотной фильтрации. Результаты демонстрируют высокую эффективность такого подхода к подавлению искажений от ЛППН, однако требуют внимательного подхода к выбору ширины фильтра. Несмотря на то, что большие радиусы позволяют лучше подавить искажающий эффект неоднородностей во вмещающем разрезе, их использование также существенно искажает сигнал от исследуемой структуры. Было показано, что низкочастотная фильтрация дает схожие результаты при нормализации эффективного кажущегося сопротивления и главных компонент тензора импеданса и теллурического тензора. Однако применение такого подхода к дополнительным компонентам малоэффективно и при использовании больших радиусов может привести к существенному искажению полученного результата. Связанно это с тем, что значения дополнительных компонент тензора импеданса и теллурического тензора сильно меняются от профиля к профилю от точки к точке. Поэтому в исследовании было предложено выполнять нормализацию кривых по дополнительным компонентам $[Z]$ и $[T]$ с использованием коэффициентов нормализации, вычисленных для основных компонент, связанных с той же составляющей электрического поля. Например, для $|Z_{xx}|$ можно использовать коэффициент, определённый для $|Z_{xy}|$, для $|T_{xy}|$ – коэффициент, определённый для $|T_{xx}|$. Такой подход позволяет существенно улучшить результат нормализации дополнительных компонент, особенно при использовании больших радиусов осреднения.

Также в диссертационном исследовании при выполнении пространственной низкочастотной фильтрации применялись дополнительные весовые характеристики – за отличие амплитуды в точке от средней в скользящем окне и за отклонение амплитудной диаграммы от диаграммы фазового тензора. Первый вес позволяет нивелировать влияние точек, попадающих на контрастные по электрическим свойствам неоднородности, а второй присваивает наименьший вес точкам, подверженным влиянию вытянутых неоднородностей, поскольку

именно они оказывают наибольшее влияние на искажение ориентации амплитудных диаграмм.

В рамках написания данной работы автор также принял участие в разработке программного обеспечения для решения, в том числе и тех задач, которые упоминались в работе. Программа GMS предназначена для построения трехмерных геофизических моделей и позволяет автоматически создавать распределение свойств на основе имеющихся карт глубин, значений свойств слоев/блоков и других параметров. С ее помощью осуществлялось добавление в модель приповерхностных неоднородностей.

Во второй программе MTDA реализованы: методы вычисления инвариантов магнитотеллурических матриц, в том числе устойчивых к влиянию приповерхностных неоднородностей; возможность зашумления данных для проведения различных экспериментов; подготовка данных к визуализации в виде кривых зондирования, частотных разрезов, карт на выбранной частоте и полярных диаграмм; сохранение в форматы, используемые другими геофизическими программами. Именно с помощью нее были рассчитаны данные для всех карт, графиков, разрезов и диаграмм, продемонстрированных в этой работе. В настоящий момент поданы заявки на официальную регистрацию этих программ.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы:

В заключение можно определить место методов подавления приповерхностных искажений в общем графе МТ исследований.

Прежде всего, их рационально применять на этапе анализа МТ данных, на котором принято выявлять основные аномалии, оценивать размерность среды и простирание структур, оценивать уровень приповерхностных искажений.

Далее рассмотренные методы целесообразно применять при подготовке данных к инверсии, на последнем этапе. В зависимости от выбранной размерности среды, эта методика может быть следующей.

В 1D случае обычно используется эффективный импеданс, при этом целесообразно выполнить его нормализацию и дальнейшую 1D инверсию.

В 2D случае представляется полезным использовать методы декомпозиции $[Z]$ и $[T]$, например, метод фазового тензора, для определения простирания глубинных структур. Далее можно применить вращение $[Z]$ и $[T]$ для получения квазипродольных и квазипоперечных по отношению к этим структурам характеристик. Затем остаётся провести нормализацию этих характеристик и их 2D инверсию.

В 3D случае можно рекомендовать процедуру нормализации всех компонент $[Z]$ и $[T]$, причем с использованием коэффициентов, определённых для основных компонент, для нормализации соответствующих дополнительных. Далее можно переходить к 3D инверсии.

Некоторые программы 2D и 3D инверсии позволяют использовать фазовый тензор. Представляется полезным проведение такой инверсии и дальнейшее сравнение с результатами инверсии нормализованных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белявский В. В. Геоэлектрическая модель Алтае-Саянского региона (трехмерная инверсия). — Lap Lambert Academic Publishing Beau Bassin, Mauritius, 2020. — 199 с.
2. Бердичевский М.Н. Линейные связи в магнитотеллурическом поле // Прикладная геофизика. — 1964. — Вып. 38. — С. 99-108.
3. Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом теллурических токов. — М.: Гостоптехиздат, 1960. — 238 с.
4. Бердичевский М.Н., Безрук И.А., Сафонов А.С. Магнитотеллурические методы // Электроразведка (справочник геофизика). — М.: Недра, 1989. — С. 261-310.
5. Бердичевский М.Н., Борисова В.П., Голубцова Н.С. Фазовая нормализация кривых МТ зондирования // Физика Земли. — 1995. — № 8. — С. 85-88.
6. Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Дмитриев В.И. Интерпретация глубинных магнитотеллурических зондирований. I. Влияние приповерхностной проводимости // Физика Земли. — 1986. — № 12. — С. 24-38.
7. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. — М.: Научный мир, 2009. — 680 с.
8. Дахнов В.Н. Теллурические токи и пути изучения их с целью проведения разведок полезных ископаемых. — М.-Л.: ОНТИ, 1937. — 320 с.
9. Епишкин Д. В. Развитие методов обработки данных магнитотеллурического зондирования // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2016. — № 4. — С. 40-46.
10. Жамалетдинов А.А., Петрищев М.С. Квазитрехмерная модель электропроводности литосферы Фенноскандинавского щита по результатам экспериментов BEAR и FENICS // Доклады академии наук. — 2015. — Т. 463. — № 3. — С. 337-342.

11. Зингер Б.Ш. Учет статических искажений в магнитотеллурике. Обзор // Физика Земли. — 1992. — № 5. — С. 53-70.
12. Зорин Н.И., Епишкин Д.В., Яковлев А.Г. Магнитотеллурический метод вызванной поляризации // Геофизика. — 2016. — № 2. — С. 89-100.
13. Левков Э.А. Гляциотектоника. — Минск: Наука и техника, 1980. — 280 с.
14. Мороз Ю.Ф., Рылов Е.С. Аномальные изменения параметров теллурического тензора в связи с сейсмичностью на Камчатке // Материалы XXI региональной конференции "Вулканизм и связанные с ним процессы". — Петропавловск-Камчатский, 2018. — С. 122-125.
15. Новожинский К., Пушкарев П.Ю. Анализ эффективности программ для двумерной инверсии магнитотеллурических данных // Физика Земли. — 2001. — № 6. — С. 72-85.
16. Пушкарев П.Ю. Прямые и обратные задачи электромагнитных зондирований земли. // Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2022. — 144 с.
17. Пушкарёв П.Ю., Шустов Н.Л., Силёва Д.С. Магнитотеллурические исследования геотермальных зон Травале (Италия) и Хенгилл (Исландия). // Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения» (секция Геология). — Москва, МГУ, 2007.
18. Пушкарев П.Ю., **Суконкин М.А.**, Попов Д.Д. Свидетельство № 2024690038 о государственной регистрации программы для ЭВМ "GMC". — М.: Роспатент, 2024.
19. Пушкарев П.Ю., **Суконкин М.А.**, Попов Д.Д. Свидетельство № 2024690039 о государственной регистрации программы для ЭВМ "MTDA". — М.: Роспатент, 2024.
20. Рокитянский И.И. Глубинные магнитотеллурические зондирования при наличии искажений от горизонтальных неоднородностей // Геофизический сборник. — 1971. — Вып. 43. — С. 71-78.
21. Рокитянский И.И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. — Киев: Наук. думка, 1975. — 279 с.

22. **Суконкин М.А.,** Пушкарёв П.Ю. Анализ синтетических магнитотеллурических данных, рассчитанных для геоэлектрической модели с приповерхностными неоднородностями // Геофизика. — 2023. — № 6. — С. 65-69. EDN: GVVAUW (1,5 п.л, вклад автора 60%), Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ).
23. **Суконкин М.А.,** Пушкарёв П.Ю. Использование синтетических магнитотеллурических данных для оценки эффективности методов, основанных на локально-региональном разложении тензора импеданса // Вестник Московского университета. Сер. 4: Геология. — 2024. — Т. 63, — № 6. — С. 185-196. EDN: FKGNJL (2,5 п.л, вклад автора 65%), Импакт-фактор 0,288 (РИНЦ).
24. **Суконкин М.А.,** Пушкарёв П.Ю. Эффекты локальных приповерхностных неоднородностей в магнитотеллурических данных и методы их подавления (обзор) // Гелиогеофизические исследования. — 2025 — № 47. — С. 37-51. EDN: DLYVAF (2 п.л, вклад автора 55%), Импакт-фактор 0,370 (РИНЦ).
25. **Суконкин М.А.,** Пушкарёв П.Ю. Локально-региональное разложение теллурического тензора // Физика Земли. — 2025. — № 3. — С. 54-69. EDN: FFAISM (2,2 п.л, вклад автора 60%), Импакт-фактор 1,176. (РИНЦ).
26. **Суконкин М.А.,** Пушкарёв П.Ю. Нормализация кривых магнитотеллурического зондирования с помощью пространственной низкочастотной фильтрации // Геология и геофизика. — 2025. — Т.66 — № 10. — С. 1376-1390. EDN: TDJATR (3,6 п.л, вклад автора 60%), Импакт-фактор 1,490 (РИНЦ).
27. Тихонов А.Н. Об определении электрических характеристик глубоких слоев земной коры // Доклады АН СССР. — 1950. — Т. 73. — № 2. — С. 295-297.
28. Трапезников Ю.А., Андреева Е.В., Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Волыхин А.М., Голубцова Н.С., Рыбин А.К. Магнитотеллурические зондирования в горах Киргизского Тянь-Шаня // Физика Земли. — 1997. — Т. 1. — С. 3-20.

29. Электроразведка: Справочник геофизика / под ред. д.г.-м.н. В.К. Хмелевского и д.т.н. В.М. Бондаренко. Книга первая – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. – 438 с.
30. Andrieux P., Wightman W.E. The so-called static shift corrections in magnetotelluric measurements // 54th Ann. Mtg. Soc. Expl. Geophys. Expanded Abstracts. — 1984. — P. 43-44.
31. Arnason K. The Static Shift Problem in MT Soundings // Proceedings World Geothermal Congress. — Melbourne, 2015. — P. 103-115.
32. Arnason K., Eysteinnsson H., Hersir G.P. Joint 1D inversion of TEM and MT data and 3D inversion of MT data in the Hengill area, SW Iceland // Geothermics. — 2010. — Vol. 39. — № 1. — P. 13-34.
33. Avdeev D.V., Godneva G.S., Zinger B.Sh., Fainberg E.B. Spatial Filtering of Local Magnetotelluric Field Distortions // Izvestiya, Earth Physics. — 1990. — Vol. 26. — № 10. — P. 813-818.
34. Avdeeva A., Moorkamp M., Avdeev D., Jegen M., Miensoopust M. Three-Dimensional inversion of magnetotelluric impedance tensor data and full distortion matrix // Geophys. J. Int. — 2015. — Vol. 202. — № 1. — P. 464-481.
35. Bahr K. Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types // Physics of the Earth and Planetary Interiors. — 1991. — Vol. 66. — № 1. — P. 24-38.
36. Bahr K. Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion // Journal of Geophysics. — 1988. — Vol. 62. — P. 119-127.
37. Bakker J., Kuvshinov A., Samrock F., Geraskin A., Pankratov O. Introducing inter-site phase tensors to suppress galvanic distortion in the telluric method // Earth, Planets and Space. — 2015. — Vol. 67. — P. 160.
38. Beamish D., Travassos J.M. A study of static shift removal from magnetotelluric data // J. Appl. Geophys. — 1992. — Vol. 29. — P. 157-178.

39. Berdichevsky M.N., Vanyan L.L., Dmitriev V.I. Methods used in the USSR to reduce near-surface inhomogeneity effects on deep magnetotelluric sounding // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. — 1989. — Vol. 53. — № 3-4. — P. 194-206.
40. Berdichevsky M.N., Vanyan L.L., Kuznetsov V.A., Levadny V.T., Mandelbaum M.M., Nechaeva G.P., Okulesky B.A., Shilovsky P.P., Shpak I.P. Geoelectrical model of the Baikal region // *Phys. Earth Planet. Inter.* — 1980. — Vol. 22. — P. 1-11.
41. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Distortion of magnetic and electrical fields by near-surface lateral inhomogeneities // *Acta Geodaet., Geophys. et Montanist. Acad. Sci. Hung.* — 1976. — Vol. 11. — № 3-4. — P. 447-483.
42. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Magnetotellurics in the Context of the Theory of Ill-posed Problems // *Investigations in Geophysics*. — 1992. — № 11.
43. Bibby H.M., Caldwell T.G., Brown C. Determinable and non-determinable parameters of galvanic distortion in magnetotellurics // *Geophys. J. Int.* — 2005. — Vol. 163. — P. 915-930.
44. Booker J.R., Favetto A., Pomposiello M.C. Low electrical resistivity associated with plunging of the Nazca flat slab beneath Argentina // *Nature*. — 2004. — Vol. 429. — P. 399-403.
45. Booker R.J. The Magnetotelluric Phase Tensor: A Critical Review // *Surv. Geophys.* — 2014. — Vol. 35. — P. 7-40.
46. Cagniard L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting // *Geophysics*. — 1953. — T. 18. — № 3. — C. 605-635.
47. Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C. Controlled source apparent resistivity tensors and their relationship to the magnetotelluric impedance tensor // *Geophys. J. Int.* — 2002. — Vol. 151. — P. 755-770.
48. Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // *Geophys. J. Int.* — 2004. — Vol. 158. — P. 457-469.
49. Chave A.D., Jones A.G. Electric and magnetic field galvanic distortion decomposition of BC87 data // *J. Geomag. Geoelectr.* — 1997. — Vol. 49. — P. 767-789.

50. Chave A.D., Jones A.G. The magnetotelluric method: Theory and practice. — Cambridge: Cambridge University Press, 2012. — 560 p.
51. Chave A.D., Smith J.T. On electric and magnetic galvanic distortion tensor decompositions // *Journal of Geophysical Research*. — 1994. — Vol. 99. — P. 4669-4682.
52. Counil J.L., Le Mouel J.L., Menvielle M. Associate and conjugate directions concepts in magnetotellurics // *Annales geophysicae. Series B. Terrestrial and planetary physics*. — 1986. — T. 4. — № 2. — C. 115-130.
53. Cumming W., Mackie R. Resistivity imaging of geothermal resources using 1D, 2D and 3D MT inversion and TDEM static shift correction illustrated by a Glass Mountain case history // *Proceedings World Geothermal Congress*. — 2010. — P. 25-29.
54. Dai T., Li Y., Shao G., Lu J. Galvanic distortion decomposition of magnetotelluric impedance tensors in 1-D electrical anisotropic media // *Geophys. J. Int.* — 2025. — Vol. 240. — P. 212-232.
55. Delhaye R., Rath V., Jones A.G., Muller M.R., Reay D. Correcting for static shift of magnetotelluric data with airborne electromagnetic measurements: A case study from Rathlin Basin, Northern Ireland // *Geophysical Journal International*. — 2017. — Vol. 210. — № 3. — P. 1461-1476.
56. Eggers D.E. An eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor // *Geophysics*. — 1982. — Vol. 47. — P. 1204-1214.
57. Garcia X., Jones A. G. Electromagnetic image of the Trans-Hudson orogen THO94 transect // *Canadian Journal of Earth Sciences*. — 2005. — Vol. 42. — № 4. — P. 479-493.
58. Gómez-Treviño E., Hernández F. J. E., Jones J. M. R. Effect of galvanic distortions on the series and parallel magnetotelluric impedances and comparison with other responses // *Geofísica internacional*. — 2013. — T. 52. — № 2. — C. 135-152.

59. Gomez-Trevino E., Romo J.M., Esparza F.J. Quadratic solution for the 2-D magnetotelluric impedance tensor distorted by 3-D electro-galvanic effects // *Geophysical Journal International*. — 2014. — Vol. 198. — № 3. — P. 1795-1804.
60. Groom R.W., Bailey R.C. Analytical investigations of the effects of near surface three dimensional galvanic scatterers on MT tensor decomposition // *Geophysics*. — 1991. — Vol. 56. — P. 496-518.
61. Groom R.W., Bailey R.C. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion // *Journal of Geophysical Research*. — 1989. — Vol. 94. — P. 1913-1925.
62. Heise W., Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C. Three-dimensional modelling of magnetotelluric data from the Rotokawa geothermal field, Taupo Volcanic Zone, New Zealand // *Geophysical Journal International*. — 2008. — P. 464-472.
63. Jifeng Z., Bing F., Leilei S. Recognition and correction of static shift for MT based on wavelets analysis // *Coal Geology & Exploration*. — 2014. — Vol. 42. — № 4. — P. 77-81.
64. Jiracek G.R. Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction // *Surveys in Geophysics*. — 1990. — Vol. 11. — P. 163-203.
65. Jones A.G. Distortion of magnetotelluric data: its identification and removal // *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice*. — Cambridge: Cambridge University Press, 2012. — P. 219-302.
66. Jones A.G. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment // *Geophysics*. — 1988. — Vol. 53. — P. 967-978.
67. Jones A.G., Ledo J., Ferguson I.J., Craven J.A., Unsworth M.J., Chouteau M., Spratt J.E. The electrical resistivity of Canada's lithosphere and correlation with other parameters: contributions from Lithoprobe and other programmes // *Canadian Journal of Earth Sciences*. — 2014. — Vol. 51. — № 6. — P. 573-617.
68. Larsen J.C. Removal of local surface conductivity effects from low frequency mantle response curves // *Acta Geodaetica, Geophysica et Montanistica Hungarica*. — 1977. — Vol. 12. — P. 183-186.

69. Mackie R.L., Madden T.R. Instruction for running 3D MT forward modeling program. — Cambridge: MIT, 1997. — 45 p.
70. McNeice G.W., Jones A.G. Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data // *Geophysics*. — 2001. — Vol. 66. — № 1. — P. 158-173.
71. Meju M.A. Joint inversion of TEM and distorted MT soundings: Some effective practical considerations // *Geophysics*. — 1996. — Vol. 61. — № 1. — P. 56-65.
72. Menvielle M. Effects of Crustal Conductivity Heterogeneities on the Electromagnetic Field // *Surveys in Geophysics*. — 1988. — Vol. 9. — P. 319-348.
73. Minsley B.J., Abraham J.D., Smith B.D., Cannia J.C., Voss C.I., Jorgenson M.T., Ager T.A. Airborne electromagnetic imaging of discontinuous permafrost // *Geophysical Research Letters*. — 2012. — Vol. 39. — № 2.
74. Neukirch M., Garcia X., Galiana S. Appraisal of the Magnetotelluric Galvanic Electric Distortion by Optimisation of the Relation between Amplitude and Phase Tensors // *arXiv preprint arXiv:1704.09020*. — 2017. — 25 p.
75. Neukirch M., Garcia X., Galiana S. Appraisal of the magnetotelluric galvanic electric distortion by optimization of the relation between amplitude and phase tensors // *Geophysics*. — 2020. — Vol. 85. — № 3. — P. 79-98.
76. Parkinson W.D. Direction of rapid geomagnetic fluctuation // *Geophys. J.* — 1959. — Vol. 2. — P. 1-14.
77. Pellerin L., Hohmann G.W. Transient electromagnetic inversion: A remedy for magnetotelluric static shifts // *Geophysics*. — 1990. — Vol. 55. — № 9. — P. 1242-1250.
78. Rahman N., Rosli N., Jia T.Y., Saad R., Rosli F.N., Dan M.F., Anda S.T. Novel approach in static shift correction for magnetotellurics data using 2D electrical resistivity imaging // *Research Square (Preprint)*. — 2022.
79. Rikitake T. Electromagnetic induction within the earth and its relation to the electrical state of the earth's interior // *Bull. Earthq. Res. Inst.* — 1950. — T. 28. — C. 45.

80. Romo J. M., Gómez-Treviño E., Esparza F. J. Series and parallel transformations of the magnetotelluric impedance tensor: theory and applications // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. — 2005. — T. 150. — № 1-3. — C. 63-83.
81. Rung-Arunwan T., Siripunvaraporn W., Utada H. On the Berdichevsky average // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. — 2016. — Vol. 253. — P. 1-4.
82. Rung-Arunwan T., Siripunvaraporn W., Utada H. Use of ssq rotational invariant of magnetotelluric impedances for estimating informative properties for galvanic distortion // *Earth, Planets and Space*. — 2017. — Vol. 69. — P. 1-24.
83. Sasaki Y., Meju M.A. Three-dimensional joint inversion for magnetotelluric resistivity and static shift distributions in complex media // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2006. — Vol. 111. — № B5. — P. 1-15.
84. Semenov V.Yu., Pek J., Ádám A., Jóźwiak W., Ladanivskyy B., Logvinov I.M., Pushkarev P., Vozar J. Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project // *Acta Geophysica*. — 2008. — Vol. 56. — № 4. — P. 957-981.
85. Siripunvaraporn W., Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data // *Geophysics*. — 2000. — Vol. 65. — № 3. — P. 791-803.
86. Sternberg B.K., Washburne J.C., Pellerin L. Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings // *Geophysics*. — 1988. — Vol. 53. — № 11. — P. 1459-1468.
87. Swift C.M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States: Ph.D. Dissertation. — Cambridge: MIT, 1967. — 210 p.
88. Szarka L., Menvielle M. Analysis of rotational invariants of the magnetotelluric impedance tensor // *Geophysical Journal International*. — 1997. — T. 129. — № 1. — C. 133-142.
89. Tang W., Li Y., Oldenburg D.W., Liu J. Removal of galvanic distortion effects in 3D magnetotelluric data by an equivalent source technique // *Geophysics*. — 2018. — Vol. 83. — № 2. — P. 95-110.

90. Unsworth M. Magnetotelluric studies of active continent-continent collisions // *Surv. Geophys.* — 2010. — Vol. 31. — P. 137-161.
91. Ussher G., Harvey C., Johnstone R., Anderson E., Zealand N. Understanding the resistivities observed in geothermal systems // *Proceedings World Geothermal Congress.* — 2000. — P. 1915-1920.
92. Varentsov I.M., Sokolova E.Yu., Martanus E.R., Nalivaiko K.V. System of electromagnetic field transfer operators for the BEAR array of simultaneous soundings: Methods and results // *Izv., Phys. Solid Earth.* — 2003. — № 2. — P. 118-148.
93. Varentsov Iv M., Sokolova E.Yu. The Magnetic Control Approach for the Reliable Estimation of Transfer Functions in the EMTESZ-Pomerania Project // *Publ. Inst. Geoph., Pol. Acad. Sci, Ser. C.* — 2005. — P. 68-79.
94. Wiese H. Geomagnetischetiefentellurik Teil II: Die streichrichtung der untergrundstrukturen des elektrischen Widerstandes, erschlossen aus geomagnetischen Variationen // *Geofis. Pura Appl.* — 1962. — Vol. 52. — № 1. — P. 83-103.
95. Zeng J., Chen X., Wang P., Liu Z., Cai J. Reevaluating the necessity of static shift correction in magnetotelluric inversion // *Frontiers in Earth Science.* — 2025. — T.13.
96. Zhang P., Pedersen L.B., Maresthal M., Chouteau M. Channeling contribution to tipper vectors: a magnetic equivalent to electrical distortion // *Geophys. J. Int.* — 1993. — Vol. 113. — P. 693-700.
97. Zhang P., Roberts R.G., Pedersen L.B. Magnetotelluric strike rules // *Geophysics.* — 1987. — Vol. 52. — P. 267-278.
98. Zhou H., Guo R., Li M., Yang F., Xu S., Chen M., Wang Y., Tao D., Hu Z., Cui X. An intelligent MT data inversion method with seismic attribute enhancement // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* — 2023. — Vol. 61. — P. 1-14.