

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ им. В. А. ТРАПЕЗНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Мойланен Евгений Викторович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ И
ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ В КОМБИНИРОВАННЫХ
АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ СИСТЕМАХ**

1.6.9. Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Каршаков Евгений Владимирович

Москва – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Список используемых сокращений.....	5
Список используемых обозначений.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1. Классификация аэроэлектроразведочных систем.....	21
1.1. Виды аэроэлектроразведочных систем.....	21
1.1.1. Временные системы.....	25
1.1.2. Частотные системы.....	26
1.1.3. Комбинированные системы.....	27
1.2. Особенности комбинированного аэроэлектроразведочного комплекса ЭКВАТОР.....	29
1.2.1. Принципы работы аэроэлектроразведочного комплекса ЭКВАТОР.....	29
1.2.2. Структура регистрируемых данных.....	33
1.3. Выводы по Главе 1.....	40
ГЛАВА 2. Методы и алгоритмы первичной обработки измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы.....	41
2.1. Математическая модель измерений.....	42
2.2. Модель инструментальных погрешностей.....	46
2.3. Методы компенсации наведенного поля.....	48
2.4. Метод разделения первичного и вторичного полей.....	54
2.5. Алгоритм обработки первичных измерений.....	60
2.6. Выводы по Главе 2.....	61
ГЛАВА 3. Алгоритмы интерпретации данных комбинированных аэроэлектроразведочных систем.....	63
3.1. Алгоритмы решения одномерной прямой задачи аэроэлектроразведки.....	67
3.2. Алгоритмы решения одномерной обратной задачи аэроэлектроразведки....	70
3.2.1. Постановка стохастической задачи оценивания.....	71
3.2.2. Алгоритм итерационного обобщенного фильтра Калмана.....	74

3.3. Алгоритмы расчета кажущихся сопротивлений для комбинированных аэроэлектроразведочных систем.....	77
3.3.1. Алгоритмы вычисления кажущихся сопротивлений во временной области.....	77
3.3.2. Алгоритмы вычисления кажущихся сопротивлений в частотной области.....	80
3.4. Алгоритмы решения одномерной обратной задачи для комбинированных аэроэлектроразведочных систем.....	83
3.4.1. Одномерная инверсия с подбором мощности слоев.....	84
3.4.2. Одномерная инверсия с фиксированными мощностями слоев.....	87
3.5. Исследование алгоритмов решения одномерной обратной задачи для комбинированных аэроэлектроразведочных систем.....	89
3.5.1. Модель однородного полупространства.....	89
3.5.2. Модель двухслойной среды.....	90
3.5.3. Модель четырехслойной среды.....	92
3.6. Выводы по Главе 3.....	94
ГЛАВА 4. Интерпретация практических данных комбинированной аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР.....	96
4.1. Подходы к интерпретации данных аэроэлектроразведки.....	96
4.1.1. Районирование по кажущимся сопротивлениям.....	96
4.1.2. Выделение локальных объектов внутри однородных областей.....	98
4.1.3. 1D инверсия с начальным приближением — однородное полупространство.....	99
4.2. Результаты применения комплекса ЭКВАТОР для решения рудных задач	101
4.2.1. Результаты работ по поиску золоторудных месторождений на Камчатке (2021 г.).....	101
4.2.2. Результаты работ по поиску кимберлитов в условиях Ангольского щита (2013 г.), на зимнем берегу Белого моря (2010 г.).....	108
4.3. Результаты применения комплекса ЭКВАТОР для решения	

гидрогеологических задач.....	115
4.3.1. Результаты работ по поиску воды в условиях многолетнемерзлых пород (в Республике Саха — Якутия в 2014–2015 гг.).....	115
4.3.2. Результаты работ по анализу гидрогеологии в присутствии соленой морской воды в Хорватии (2021 г.).....	119
4.4. Выводы по Главе 4.....	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	132
Список иллюстраций.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ П.1. Справки о внедрении результатов работы.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ П.2. Техническое описание съемочного комплекса.....	160
П.2.1. Аппаратурное обеспечение.....	160
П.2.2. Аэроэлектроразведочная система комплекса ЭКВАТОР.....	162
П.2.3. Аэронавигационное оборудование.....	164
П.2.4. Бортовая вычислительная система регистрации аэрогеофизической информации и управления процессом выполнения полетного задания NAVDAT.....	166
П.2.5. Авиационное обеспечение работ.....	168
П.2.6. Наземное оборудование.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ П.3. Методика съемки.....	171
П.3.1. Развертывание аэрогеофизического комплекса.....	171
П.3.2. Выполнение рядовой съемки.....	174
П.3.3. Контроль качества аэросъемочных работ.....	175

Список используемых сокращений

АЦП — аналого-цифровой преобразователь;

АЧХ — амплитудно-частотная характеристика;

ГНСС — глобальная навигационная спутниковая система;

ДИП — дипольное индуктивное профилирование;

ЛА — летательный аппарат;

МНК — метод наименьших квадратов;

ММК — метод Монте-Карло;

МПП — метод переходных процессов;

СКО — среднеквадратичное отклонение;

УЭС — удельное электрическое сопротивление;

ФК — фильтр Калмана;

FD — frequency domain, *англ.*, частотная область;

LCI — Laterally Constrained Inversion, *англ.*, инверсия с продольными ограничениями;

ppm — parts per million, *англ.*, миллионные доли;

SVD — Singular Value Decomposition, *англ.*, декомпозиция по сингулярным числам;

TD — time domain, *англ.*, временная область;

VCI — Vertically Constrained Inversion, *англ.*, инверсия с вертикальными ограничениями.

Список используемых обозначений

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots \\ A_{21} & A_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots \\ b_{21} & b_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} — матрицы;$$

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots \\ 0 & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} — единичная матрица (диагональная матрица с единицами на диагонали);$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \end{pmatrix} — векторы-столбцы, $|\mathbf{A}| = A$, $|\mathbf{b}| = b$;$$

$\mathbf{A}^T, \mathbf{b}^T$ — соответствующие транспонированные матрица и векторы (векторы-строки), T — символ транспонирования;

$\mathbf{a}^T \mathbf{b} = a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots$ — скалярное произведение векторов $\mathbf{a}, \mathbf{b}$;

$$\mathbf{a} \mathbf{b}^T = \begin{pmatrix} a_1 b_1 & a_1 b_2 & \cdots \\ a_2 b_1 & a_2 b_2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} — диадное произведение векторов $\mathbf{a}, \mathbf{b}$;$$

$\mathbb{R}^n$ — множество действительных чисел размерности n , без индекса размерность 1;

$\mathbb{C}^n$ — множество комплексных чисел размерности n , без индекса размерность 1;

$\mathbf{B}$ — вектор индукции магнитного поля;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость среды и магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума);

σ, ρ — удельная электропроводность и удельное электрическое сопротивление среды, $\sigma = 1/\rho$;

$E[\cdot]$ — оператор математического ожидания;

$\text{Re} \cdot$ — действительная часть комплексного числа, матрицы или вектора;

$\text{Im } \cdot$ — мнимая часть комплексного числа, матрицы или вектора;

δ_{ij} — символ Кронекера, $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы

Актуальность работы обусловлена непрерывным развитием методов аэроэлектроразведки, которую можно отнести к наиболее динамично развивающейся области в аэрогеофизике. За первые декады XXI века появилось несколько новых аэроэлектроразведочных систем, которые в настоящее время уверенно заняли свою нишу на рынке съемочных услуг и применяются по всему миру. Непрерывный рост качества, детальности, информативности измерений приводит к тому, что постоянно требуется переоценивать соответствие используемых методов обработки измерений и интерпретации получаемым данным.

Появление комбинированных аэроэлектроразведочных систем стало одним из таких вызовов. Хотя формально информативность одних и тех же данных, представленных во временной и в частотной области, одинакова, полученная оценка распределения удельных электрических сопротивлений может оказаться существенно разной в силу нелинейности обратной задачи.

Еще один аспект связан с тем, что аэроэлектроразведочные системы находят все новые и новые области применения. Разработанные изначально для поиска массивных рудных тел, как правило, проводящих сульфидов, сейчас аэроэлектроразведочные системы активно применяются и в других задачах, таких как поиск кимберлитов или картирование грунтовых вод.

Все перечисленное делает актуальными разработки новых методов и алгоритмов обработки измерений и интерпретации данных в комбинированных аэроэлектроразведочных системах.

Степень разработанности темы диссертационного исследования. В

конце XX — начале XXI века сложилось представление о классификации аэроэлектроразведочных систем на основе принципа обработки: анализ данных выполнялся либо в частотной области, либо во временной [Fountain, 1998].

Частотные аэроэлектроразведочные системы (Frequency domain airborne electromagnetics, FD AEM) измеряют *гармонические составляющие компонент вектора индукции переменного магнитного поля искусственного контролируемого источника*, установленного на борту носителя и излучающего поле на определенных частотах. При геофизических исследованиях особенно интересно выяснить, как именно себя ведет электромагнитное поле на низких частотах. Обычно в таких системах используются индукционные датчики, которые измеряют одну или несколько компонент вектора индукции переменного магнитного поля и представляют собой соответствующее число катушек индуктивности. В качестве источников переменного магнитного поля используются чаще всего магнитные дипольные излучатели, представляющие собой многовитковую воздушную катушку (петлю) [Fountain, 1998]. В отечественной практике такие системы назывались ДИП-А (дипольное индуктивное профилирование в аэроварианте) [Инструкция, 1984].

Системы, использующие метод переходных процессов (МПП), измеряют *компоненты вектора индукции переменного магнитного поля контролируемого источника в различные моменты времени после включения/выключения возбуждения* с целью анализа переходной характеристики. Соответственно, их относят к временным аэроэлектроразведочным системам (Time domain airborne electromagnetics, TD AEM) [Fountain, 1998; Legault, 2015]. В отечественной практике такие системы назывались АМПП (аэрометод переходных процессов) [Инструкция, 1984].

Стоит отметить, что аппаратура может рассматриваться и как частотная, если сигналы МПП регистрируются непрерывно [Волковицкий, 2022]. В случае аэроэлектромагнитных систем, когда ЛА движется с достаточно большой скоростью, отклик не может измеряться сколь угодно долго. Сигнал возбуждения

в таких системах периодический и, кроме того, симметричный, т. е. с последовательно чередующимися противоположными импульсами. Как следствие, работа таких систем эквивалентна работе систем с регистрируемыми гармоническими сигналами на дискретном наборе частот $\omega_0, 3\omega_0, 5\omega_0, \dots$, где ω_0 — базовая частота возбуждения, то есть частота повторения импульсов одной полярности, однако высокочастотные гармоники в спектре импульсного сигнала быстро затухают. Таким образом, в дополнение к каналам во временной области могут быть вычислены сигналы в частотной области на наиболее представительных гармониках спектра возбуждаемого сигнала.

Основная решаемая при обработке электромагнитных данных задача — выделение поля отклика от земной поверхности на фоне следующих показателей:

- 1) переменной составляющей магнитного поля Земли;
- 2) влияния изменения углов ориентации приемных рамок по отношению к магнитному полю Земли и к полю передатчика;
- 3) поля, наведенного в проводящих и магнитных частях ЛА;
- 4) изменений первичного поля — поля источника в точке расположения приемника.

Первая проблема для систем с контролируемым источником решается обычно за счет повышения дипольного момента источника. В современных системах этот показатель может достигать 2 млн $\text{A} \cdot \text{m}^2$ [Killeen, 2011].

Для решения второй проблемы используются различные механизмы амортизации приемных рамок, которые направлены на смещение спектра механических возмущений в низкочастотную область и уменьшение их влияния в области рабочих частот системы.

Один из методов решения третьей задачи, — использование буксируемых передатчиков и приемников на достаточном удалении от ЛА. Однако у ряда систем источник бывает расположен непосредственно на борту ЛА. В таком случае фюзеляж становится частью источника поля. Поэтому проблема учета поля ЛА в некотором смысле сводится к проблеме определения параметров первичного

поля.

Для определения первичного поля и его изменений во времени в случае контролируемого источника необходимы разные подходы. Важно не только измерить ток в петле источника поля - передатчика, но также учесть изменение геометрических параметров и влияние неконтролируемых токов в проводящих частях конструкции передатчика, в том числе в фюзеляже ЛА. Один из возможных подходов заключается в создании максимально жесткой конструкции передатчик-приемник, считая их геометрические и электромагнитные свойства неизменными. Тогда, выполнив калибровку на большой высоте, в отсутствие отклика можно «запомнить» первичное поле и вычитать его из измеренного сигнала, чтобы выделить сигнал отклика. Обеспечение жесткости представляет собой серьезную проблему, поэтому иногда применяется альтернативный подход — нежесткая система, в которой нужно знать первичный сигнал.

Среди таких систем можно выделить, в частности, отечественные аэроэлектроразведочные системы ДИП-А [Ершов и др., 1976] и АМПП [Каменецкий и др., 1972]. В них передатчик размещался на борту летательного аппарата, а приемник буксировался на гибком тросе. Влияние ЛА в них компенсировалось физически благодаря дополнительным источникам, установленным на борту и излучающим поле на рабочих частотах.

В процессе анализа современных тенденций в развитии бортовых электромагнитных систем [Macnae, 2007; Fountain, 2008; Sorensen et al., 2013; Smith, 2014; Legault, 2015; Auken et al., 2017; Sorensen, 2018; Whitford and Fitzpatrick, 2023] можно прийти к выводу, что основным инструментом являются системы МПП, которые в подавляющем большинстве никак не учитывают отклики, поступающие прямо во время импульса возбуждения. Это зачастую позволяет игнорировать вопрос о поле токов, наведенных в фюзеляже и в других элементах конструкции. Частотные системы, как правило, применяются в жестком варианте конструкции, когда все искажения от наведенного поля считаются постоянными, оцениваются в процессе калибровки и в дальнейшем вычитаются.

При этом отмечается недостаток АМПП систем, заключающийся в недостаточной детальности при анализе самой верхней части разреза — это первые 10-20 метров [Hodges, 2013].

Для изучения верхней части разреза одновременно с традиционными АМПП на данный момент предложены два решения. В первом случае наряду с длинным и мощным основным импульсом добавляется короткий малоамплитудный дополнительный импульс (SkyTEM, MultiPulse). Во втором используются усложнение формы сигнала с сохранением достаточно низкой базовой частоты (ЭКВАТОР, Tempest). Смешанная форма первичного сигнала и непрерывные измерения позволяют эффективно обрабатывать данные как во временной, так и в частотной области [Volkovitsky and Karshakov, 2013]. Необходимость непрерывной регистрации данных накладывает жесткие требования на динамический диапазон приемника. Для его обеспечения такие системы делаются с достаточно большим разносом приемника и передатчика (от 40 метров). Другая проблема — необходимость бороться с полем паразитных токов в конструкции системы.

Вариант алгоритмической компенсации такого наведенного поля, который позволяет выделить вторичное поле на фоне изменяющегося первичного, был предложен А.К. Волковицким и А.Н. Дроботенко. В этом варианте используются дополнительные источники, которые излучают сигналы собственных фиксированных частот, не влияющих на поле основной петли. Измерения этих сигналов используются и для определения геометрических параметров системы передатчик-приемник, и для моделирования поля носителя [Волковицкий, 2022].

Отдельно стоит вопрос об определении координат приемника для электромагнитных систем. Проблема заключается в том, что размещение антенны спутниковой навигационной системы (СНС) в непосредственной близости от приемника электромагнитной системы может привести к появлению серьезных помех. Есть только одна система, в которой применяется СНС для позиционирования приемника [Mule and Lockwood, 2013]. До недавних пор методики обработки данных не учитывали изменений в координатах приемника

[Green and Lane, 2003].

Повышение уровня чувствительности аппаратуры вызвало необходимость решать данную проблему. Этим во многом определяется современный путь развития электромагнитных систем — большая популярность систем жесткой конструкции. Альтернатива же фиксированной геометрии — это определение координат приемника по показаниям самой электромагнитной системы, т. е. по измерениям поля передатчика. Идея была предложена Ричардом Смитом [Smith, 2001b] и получила развитие в работе А.К. Волковицкого [Волковицкий, 2012].

В основе метода математического описания сигналов аэроэлектроразведочных систем лежит представление измеряемого сигнала как суперпозиции различных составляющих, каждая из которых описывается той или иной математической моделью [Вовенко и др., 2015; Каршаков, 2018]. Если модель полностью известна, то предлагается просто вычитать эту составляющую из измерений. Если известна структура модели, но не известны ее параметры, то вектор параметров модели надо оценивать по данным измерений, учитывая все известные навигационные данные. Если же модель полностью неизвестна — соответствующую составляющую можно задать как случайный процесс с известными или неизвестными характеристиками, учитывая потенциальность исследуемого физического поля.

После выделения вторичного поля на фоне помех и первичного поля можно переходить к решению обратной задачи — к оценке распределения электрических свойств среды. Обратная задача электроразведки относится к классу некорректно поставленных по Адамару [Адамар, 1978] и требует регуляризации для обеспечения единственности и устойчивости решения. Кроме того, далеко не все параметры используемой математической модели заранее известны, по этой причине эти параметры следует идентифицировать.

Методы решения обратных задач геофизики, основанные на детерминированном подходе, представлены, например, в книге М.С. Жданова [Zhdanov, 2002]. Принципы стохастического подхода к их решению содержатся в

работе А. Тарантолы [Tarantola, 2005]. В статье О.Г. Эрнста и др. [Ernst et al., 2014] изложена одна из основных идей, заключающаяся в том, что классические методы решения обратных задач, строящиеся на алгоритме Гаусса-Ньютона и регуляризации Тихонова, могут быть рассмотрены в рамках Калмановского подхода. Теория решения линейных задач оценивания с использованием методов Калмановской фильтрации и сглаживания изложена, например, в книгах [Александров и др., 2005] и [Simon, 2006]. Базовый вариант итерационного обобщенного фильтра Калмана для решения нелинейных задач описан в работах [Navlik and Straka, 2015, Simon, 2006].

В 2010 году, т. е. с появлением системы ЭКВАТОР, в Лаборатории динамических информационно-управляющих систем им. Б.Н. Петрова Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук начались исследования по созданию нового математического и программного обеспечения для решения задач аэроэлектроразведки в комбинированном варианте [Волковицкий, 2012; Волковицкий и др., 2013б; Волковицкий и др., 2013в; Феликс и др., 2014; Тхоренко и др., 2015; Павлов, Волковицкий, 2015; Каршаков, 2018; Karshakov, 2020; Волковицкий, 2022]. Диссертация представляет собой продолжение этих работ.

Объект диссертационного исследования: комбинированная аэроэлектроразведочная система.

Предмет диссертационного исследования: методы и алгоритмы обработки измерений и интерпретации данных в комбинированных аэроэлектроразведочных системах.

Целью диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов обработки измерений и интерпретации данных в комбинированных аэроэлектроразведочных системах, объединяющих преимущества частотного и временного подхода и обеспечивающих максимальную эффективность как в верхней части разреза, так и на глубине.

Для достижения поставленной **цели** необходимо было решить следующие

задачи:

- 1) рассмотреть существующие подходы и методы построения и обработки измерений для аэроэлектроразведочных систем;
- 2) разработать методы и алгоритмы первичной обработки измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы;
- 3) разработать алгоритмы интерпретации данных комбинированной аэроэлектроразведочной системы, включающие алгоритмы вычисления кажущихся сопротивлений для временных и частотных каналов и алгоритмы решения одномерной обратной задачи;
- 4) показать преимущества предложенного подхода при обработке и интерпретации данных комбинированной аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР.

Методы исследований. В работе применяются методы линейной алгебры, теории вероятности и случайных процессов, теории функций комплексных переменных, теории дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных, теории электромагнитного поля, теории геофизических методов, теории оптимального линейного и нелинейного оценивания.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- 1) разработаны новые методы и алгоритмы обработки первичных измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы, обеспечивающие выделение поля отклика на фоне первичного поля и компенсацию наведенных помех до уровня инструментальных погрешностей приемника;
- 2) разработаны алгоритмы решения обратной задачи при помощи итерационного обобщенного фильтра Калмана для модели горизонтально-слоистой среды; данные алгоритмы применимы при обработке данных только в частотной, только во временной или одновременно в частотной и временной областях и позволяют вычислять как распределение удельных электрических сопротивлений, так и кажущиеся сопротивления для отдельных каналов, исключая возможную неоднозначность их определения;

- 3) на основе анализа стохастических мер оцениваемости при обработке данных комбинированной системы показано преимущество использования комбинированной инверсии над инверсией отдельно в частотной или временной области.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке методов и алгоритмов обработки и интерпретации данных комбинированных аэроэлектроразведочных систем. Внедрение калмановского подхода позволяет обеспечить регуляризацию для решения обратной задачи при минимальных требованиях к априорным данным, а анализ ковариационной матрицы ошибок и стохастических мер оцениваемости дает теоретическую оценку глубинности исследований.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные методы и алгоритмы легли в основу программного комплекса для обработки и интерпретации данных аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР. За 15 лет их применение показало высокую эффективность при решении десятков рудных и гидрогеологических задач. Так, при работах на Камчатке (2021 г.) данные электроразведки позволили дифференцировать породы по свойствам электропроводности в широком диапазоне. Применение именно комбинированной инверсии данных системы ЭКВАТОР наилучшим образом позволяет решить задачи поиска как проводников, с которыми могут быть связаны алунитовые руды, так и изоляторов, к которым относится кварцевое ядро.

В результате проведенных заверочных буровых работ на восемнадцати рекомендованных аномальных объектах, выделенных после анализа карт кажущихся сопротивлений во временной области по результатам съемки 2013 года на Ангольском кристаллическом щите, на шестнадцати аномалиях был вскрыт кимберлит, один — алмазоносный.

В условиях Зимнебережного алмазоносного района (съемка 2010 г.) система ЭКВАТОР фиксирует кимберлитовые тела по электрическим характеристикам только при выполнении качественной одномерной комбинированной инверсии. На

разрезах через трубки им. В.П. Гриба, Волчью и Майскую проводник (70–100 Ом·м на фоне 140–260 Ом·м), связанный с кимберлитовым телом, имеет вид вертикальной неоднородности и по геометрии схож с имеющейся геологической моделью.

При решении гидрогеологических задач в зонах распространения многолетнемерзлых пород Якутии в 2014-15 гг. при интерпретации разрезов удалось детектировать границы распространения надмерзлотных, внутримерзлотных и подмерзлотных подземных вод. В условиях населенных территорий в дельте реки Неретва в Хорватии (2021 г.) для инверсии главным образом использовались данные частотной области, так как данные во временной области более подвержены влиянию промышленных помех. Измерения проводились в прибрежной зоне в условиях высокопроводящего геоэлектрического разреза. Учет скорости перемещения приемника в поле передатчика позволил существенно повысить соотношение сигнал-шум на низких частотах и поздних временах, что позволило повысить глубинность исследования. Результаты инверсии согласуются с результатами бурения.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы использованы в ООО «Геотехнологии», АК «Алроса», ЗАО «Гидэк», Норильском филиале Института им. А.П. Карпинского, что подтверждается актами о внедрении результатов диссертационной работы.

Защищаемые положения.

- 1) Разработанные методы и алгоритмы коррекции данных комбинированных аэроэлектроразведочных систем обеспечивают повышение результирующей точности измерений вторичного поля на уровне 1–10 миллионных долей измеряемого сигнала;
- 2) Разработанные алгоритмы решения стохастической задачи оценивания параметров горизонтально-слоистой среды при помощи итерационного обобщенного фильтра Калмана позволяют комбинировать параметры отклика во временной и в частотной области и уменьшить степень

неоднозначности решения обратной задачи;

- 3) Разработанные методы коррекции данных аэроэлектроразведочных систем и алгоритмы решения обратной задачи с оценкой степени достоверности при помощи стохастических мер оцениваемости параметров модели среды обеспечивают эффективность использования комбинированного вектора измерений при решении рудных и гидрогеологических задач.

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата и результатами математического моделирования, подтверждается при обработке, анализе и сопоставлении результатов обработки и интерпретации данных комбинированной аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР с данными наземных и скважинных измерений.

Апробация результатов работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на различных всероссийских и международных конференциях: 6–8-я Международная конференция по электроразведке (ЮАР, Мангала, 2013 г.; Дания, Коллинг, 2018 г.; Австралия, Фитцрой Айленд, 2023 г.); 24-й Европейский съезд по инженерной геофизике и геофизике окружающей среды, конференция (Порту, 2018); 16-я SAGA Биенале конференция и выставка (Дурбан, ЮАР, 2019); 4-я, 6-я, 7-я, 8-я Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли (Москва, 2009 г., Новосибирск, 2013 г., Иркутск, 2015 г., Москва, 2020 г.); XI, XIV–XVI Научно-практическая конференция «Инженерная и рудная геофизика» (Геленджик, 2015, Казахстан, Алматы, 2018, Геленджик, 2019, Пермь 2020); сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (Пермь, 2018 г.), 1-я, 3-я, 4-я Международная геолого-геофизическая конференция и выставка Гоевразия (Москва, 2018, 2020, 2021), 10-я, 12-я Международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» (Москва, 2017, 2019), 15-я, 16-я Всероссийская

школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (Воронеж, 2018, Тамбов 2019).

В сборниках материалов всероссийских и международных конференций опубликовано 33 статьи.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 45 статьях в рецензируемых научных журналах, из них 9 в изданиях, рекомендованных Ученым советом МГУ для защиты по специальности.

Во **введении** изложены обоснование актуальности работы, степень разработанности темы диссертационной работы, теоретическая и практическая значимость исследования. Формулируются цель и задачи, описана структура, основные положения работы и краткое содержание диссертации.

Глава 1 работы посвящена общему анализу существующих аэроэлектроразведочных систем, принципов их работы, методов, лежащих в основе их функционирования, их преимуществ и недостатков.

В **Главе 2** рассмотрены основные этапы, методы и алгоритмы обработки измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы на примере системы ЭКВАТОР. Главную сложность среди решаемых задач составляет значительная амплитуда первичного поля, обычно многократно превышающая амплитуду поля отклика, а также сильная зависимость первичного поля от изменений геометрических параметров измерительной установки.

Глава 3 описывает основные подходы к использованию данных комбинированной аэроэлектроразведочной системы для решения обратных задач, т. е. задач, при которых необходимо определить параметры источника поля по измерениям компонент поля.

В **Главе 4** приводятся результаты применения комбинированной аэроэлектроразведочной системы и обработки данных с использованием методов и алгоритмов, разработанных в настоящей работе.

В Приложения вынесены акты о внедрении, техническое описание съемочно-

го комплекса, методика аэрогеофизической съемки.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность:

- Евгению Владимировичу Каршакову, Павлу Юрьевичу Пушкареву, Борису Викторовичу Павлову, Андрею Кирилловичу Волковицкому за постановку задачи, помощь при изучении рассматриваемого вопроса и постоянное внимание к работе;
- П.А. Игнатову, В.М. Керцману, М.В. Корбакову, Ю.Г. Подмогову, А.С. Потанину, С.А. Краюшкину, В.В. Лесняку, П.В. Кирплюку, Д.В. Макарову за ценные советы и замечания;
- компаниям «АЛРОСА», «Аэрогеофизика», «САТОСА», «Геотехнологии», «Голдстрим», «ГИДЕК», «Лукойл», «Ngali Holdings», «Нордголд», «НРК», «Полюс» за предоставленные данные геофизических съемок;
- коллективам компании «Геотехнологии», лаборатории 1 ИПУ РАН, кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ, Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М.Федоровского за сотрудничество и поддержку в работе;
- коллективам компаний «Хайленд Голд», «Нордголд», Норильского филиала института им. А.П. Карпинского, «НРК Голд» за практические советы и рекомендации.

ГЛАВА 1. Классификация аэроэлектроразведочных систем¹

1.1. Виды аэроэлектроразведочных систем

Первая аэроэлектроразведочная система была разработана в середине прошлого столетия. С тех пор было создано огромное количество таких систем, которые устанавливаются на фюзеляже или на внешней подвеске летательного аппарата [Fountain, 1998; Sorensen et al., 2013; Kaufman et al, 2014; Smith, 2014; Legault, 2015; Sorensen, 2018].

Системы делятся на активные, которые включают в себя передатчик и приемник, и пассивные, включающие только приемник (Рис. 1.1). Все аэроэлектроразведочные системы независимо от их типа измеряют переменную составляющую электромагнитного поля. Наиболее распространенными приемниками являются индукционные датчики, измеряющие компоненты вектора переменного электромагнитного поля.

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:

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Новая вертолетная аэроэлектроразведочная система «Экватор» для аэрометода переходных процессов // Записки Горного института. – 2011. – Т. 194. – с. 154-157. (0,25 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 6,451 (РИНЦ). EDN: ROVVXD;

Мойланен Е.В. Современные методы аэроэлектроразведки // Физика Земли. – 2022. – № 5. – с.171-180. (0,63 п.л.). Импакт-фактор 1,176. EDN: KWESLR;

Moilanen J. Modern methods of airborne electromagnetic survey // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2022. – Vol. 68, No. 5. – p. 755–764. (0,63 п.л.). Импакт-фактор 0,343 (SJR). EDN: NXHGFY.

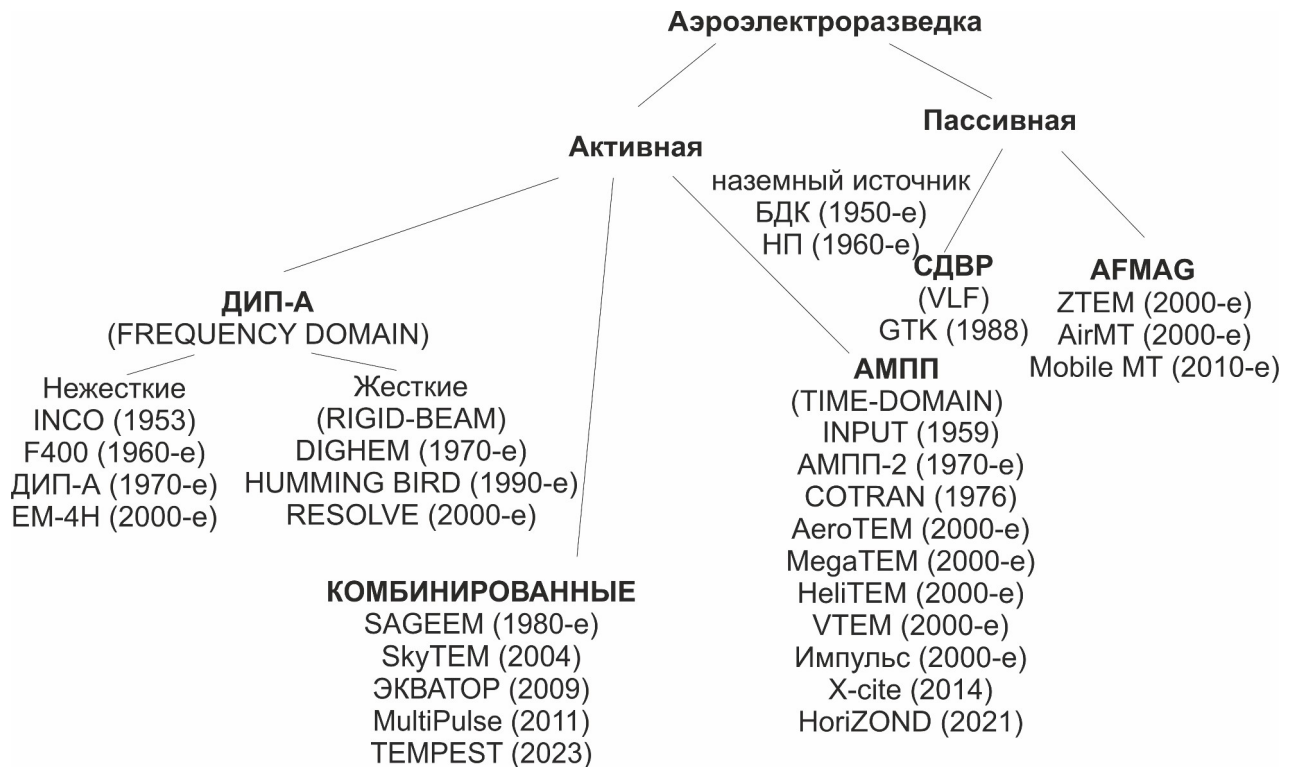


Рисунок 1.1. Классификация основных типов аэроэлектроразведочных систем

Один из недостатков, с которым приходится бороться при применении индукционных датчиков, — это возникновение паразитного сигнала из-за его собственных колебаний в магнитном поле Земли. Поискам методов борьбы с этим явлением посвящены многие исследования. В результате за последнее десятилетие уровень шумов измерителя значительно снизился (Рис. 1.2) [Gisselø and Nyboe, 2018].

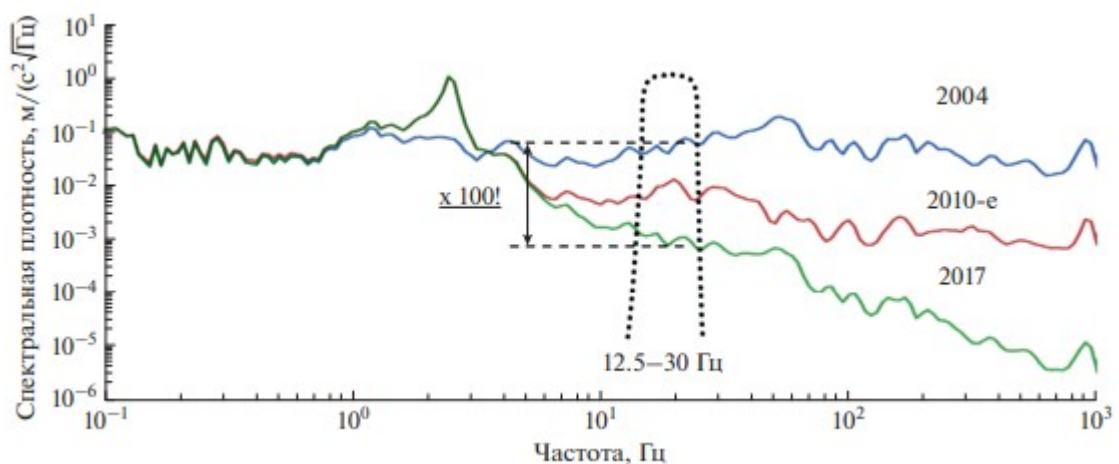


Рисунок 1.2. Спектральная плотность измерений шумов текущего и предыдущих поколений приемников (на примере SkyTEM)

Пассивные аэроэлектроразведочные системы измеряют гармонические

составляющие компонент вектора индукции переменного магнитного поля Земли и иногда компоненты вектора переменного электрического поля [Седельников, 2006]. Источниками электромагнитного поля могут быть как природные явления: близкие или удаленные грозы, возмущения в ионосфере, вызванные солнечным излучением, и т. п., так и техногенные — поле низкочастотных радиопередатчиков, используемых для связи с морскими судами, в том числе подводными, на больших расстояниях [Palacky and West, 2008] (СДВР — сверхдлинноволновые радиостанции).

Пассивные системы с естественными источниками происхождения (AFMAG – audio frequency magnetics) работают на достаточно низких частотах и имеют наибольшую глубинность исследований (Рис. 1.3) [Lo and Kuzmin, 2008; Prikhodko et al, 2020]. Метод появился в результате попытки реализации аэроварианта аудиоманнитотеллурического метода. Между активной и пассивной аэроэлектроразведкой находятся системы, источники возбуждения для которых специально располагаются на земле: аэроэлектроразведка методом длинного кабеля (БДК), методом незаземленной петли (НП) и методом заряда [Человечков и др., 2012].



Рисунок 1.3. Пассивная система MobileMT

В активной аэроэлектроразведке для формирования зондирующего поля обычно используют либо непрерывный гармонический, либо импульсный метод возбуждения. В первом случае сигнал представляет собой суперпозицию нескольких синусоидальных колебаний с фиксированными частотами, а во втором — регулярную последовательность импульсов с паузой между ними. Таким образом, принципы интерпретации сигналов, а вместе с ними и сами системы делятся на метод дипольного индукционного профилирования в аэроварианте, в англоязычной терминологии Frequency-Domain (FD) — частотные системы и метод переходных процессов в аэроварианте, Time-Domain (TD) — временные системы (Рис. 1.4).



*Рисунок 1.4. Частотная и временная вертолетные системы
слева — частотная система с жестким креплением передатчика относительно приемника
Texas Gulf Sulphur, 1964 г.; справа — система, реализующая метод переходных процессов
АМПП-2, 1972 г.*

1.1.1. Временные системы

В рамках классической модели систем Time-Domain сигнал отклика следует за спадающим фронтом зондирующего импульса. Приемник непосредственно измеряет переходную характеристику геоэлектрического разреза без воздействия влияния первичного поля. Отклики от объектов различной проводимости разделяются по скорости спада напряжения на клеммах-выводах приемных рамок. Кажущаяся простота интерпретации для систем Time-Domain и предопределила их популярность.

Мощные временные системы успешно обнаруживают хорошие проводники в относительном изоляторе на больших глубинах даже в присутствии проводящего перекрывающего слоя [Kaufman, 1989]. Верхняя часть разреза (ВЧР), до 50 м, в таком случае остается слабоизученной (Рис. 1.5, [Chen et al, 2014]). Видно, что в зонах индустриальных помех временная область сильно подвержена их влиянию. Кроме того, временные системы обладают малым разрешением для удельных сопротивлений свыше 1000 Ом · м [Hodges, 2013].

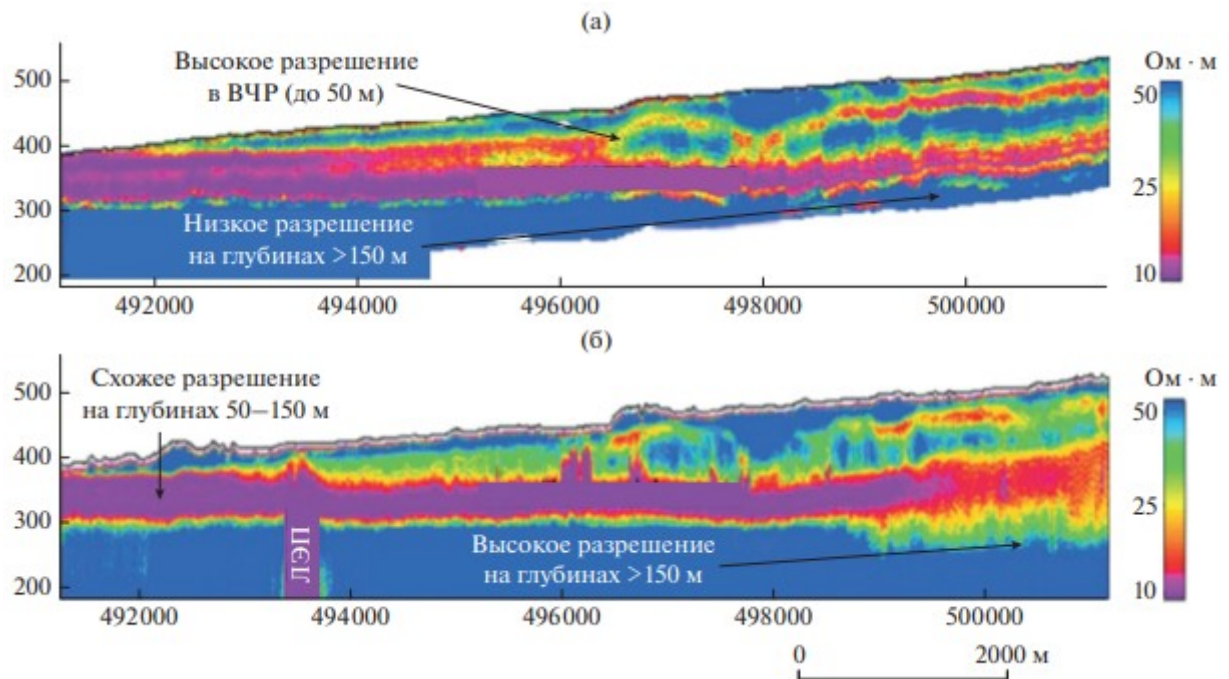


Рисунок 1.5. Геоэлектрические разрезы, построенные по 1D инверсии частотных (а) и временных (б) данных

1.1.2. Частотные системы

Частотные системы позволяют измерять удельные сопротивления в заметно более широком диапазоне, чем данные Time-Domain [Hodges, 2013] (Рис. 1.6), благодаря расширению частотного диапазона в сигнале возбуждения в область высоких частот. Это позволяет выявить неоднородности в высокоомных областях и в приповерхностных слоях. В результате при поисках слабопроводящих объектов эффективнее оказываются менее мощные, но более высокочастотные Frequency-Domain системы.

Из-за ограниченного частотного диапазона у электроники приемника любой современной аэроэлектроразведочной системы спектр реально измеренного сигнала представлен дискретным набором гармоник базовой частоты возбуждения даже для Time-Domain систем. Определив классическим способом Frequency-

Domain амплитуды и фазы соответствующих гармоник и применив к полученному набору обратное преобразование Фурье, получаем тот самый измеренный сигнал со всеми его искажениями. Авторы работы [Becker et al, 1990] указывали на возможность такой частотной обработки и интерпретации, когда оценивали преимущества системы COTRAN.



Рисунок 1.6. Частотная система с нежестким креплением передатчика относительно приемника ЕМ-4Н во время съемки

В устройстве системы были применены новаторские для того времени решения. Двухкомпонентный (XZ) приемник фиксировал сигнал отклика не только во время паузы, но и во время действия возбуждающего импульса. И при импульсном возбуждении сигналы регистрировались в частотной области.

1.1.3. Комбинированные системы

Для изучения верхней части разреза одновременно с традиционным TD на данный момент предложены два решения: наряду с длинным и мощным основным импульсом добавляется короткий малоамплитудный дополнительный

импульс (SkyTEM, MultiPulse) (Рис. 1.7, Рис. 1.8); или другой вариант — усложнение формы сигнала с сохранением достаточно низкой базовой частоты (ЭКВАТОР, Tempest) (Рис. 1.8, Рис. 1.9). Смешанная форма первичного сигнала, который изображен на Рис. 1.8, и непрерывные измерения позволили эффективно обрабатывать данные в частотной области [Volkovitsky and Karshakov, 2013]. Спектры представлены на Рис. 1.9.



Рисунок 1.7. Комбинированная система SkyTEM

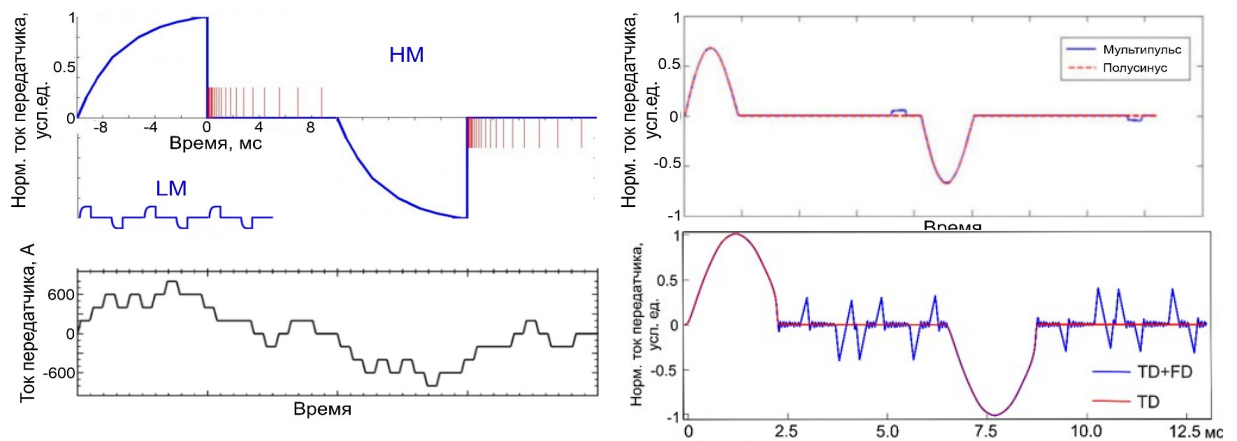


Рисунок 1.8. Форма тока аэроэлектроразведочных систем SkyTEM — последовательное включение мощного (HM) и высокочастотного (LM) сигналов (слева сверху); MultiPulse — дополнительный импульс в конце основного времени спада (справа сверху); Tempest — многоступенчатое переключение (слева внизу); ЭКВАТОР — дополнительные высокочастотные импульсы (справа внизу).

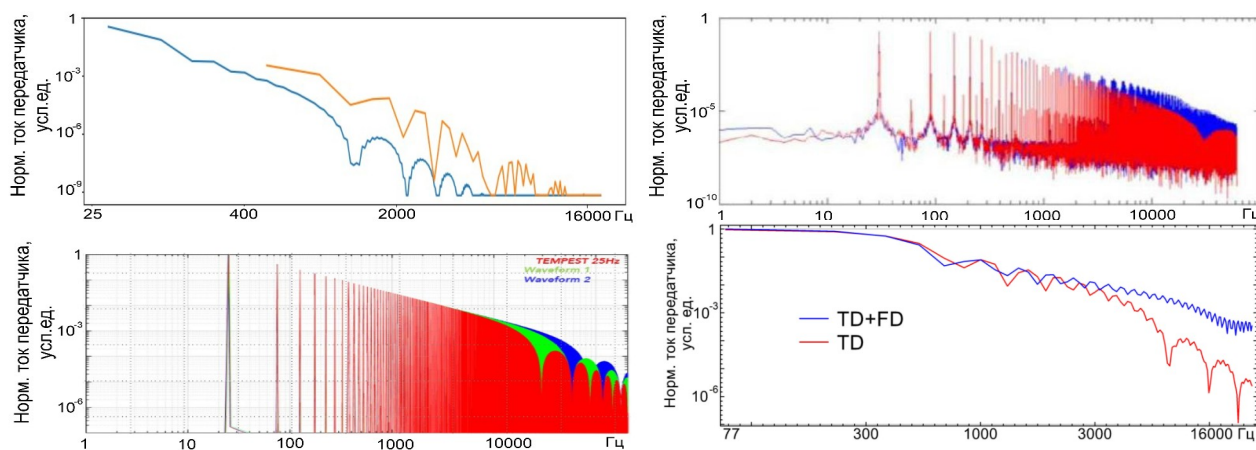


Рисунок 1.9. Спектры сигналов аэроэлектроразведочных систем SkyTEM — НМ (голубой) и LM (оранжевый) (слева сверху); MultiPulse — без доп. импульса (красный) и с ним (синий) (справа сверху); Tempest — без доп. переключений (красный) и с ними (зеленый, синий) (слева внизу); ЭКВАТОР — без доп. импульсов (TD) и с ними (TD + FD) (справа внизу).

1.2. Особенности комбинированного аэроэлектроразведочного комплекса ЭКВАТОР

1.2.1. Принципы работы аэроэлектроразведочного комплекса ЭКВАТОР

Комплекс предназначен для эксплуатации на внешней подвеске вертолета и по принципу измерения параметров геоэлектрического разреза является одновременно реализацией метода переходных процессов [Каменецкий и др., 1978] и метода многочастотного дипольного индуктивного профилирования в аэроварианте [Светов, 1973; Якубовский, 1963]. На внешней подвеске летательного аппарата буксируется низкочастотный передатчик, антенной которого является воздушный петлевой магнитный диполь, возбуждающий в пространстве переменное магнитное поле. Чувствительный индукционный

приемник буксируется в гондоле, прикрепленной в середине трос-кабеля, длина троса-кабеля составляет примерно 70 м (Рис. 1.10).

Возбуждение токов в излучающем петлевом диполе осуществляется с помощью генератора, работающего в импульсном режиме на базовой частоте 77 Гц (Рис. 1.11). После выключения тока основного импульса осуществляется дополнительное высокочастотное возбуждение, которое позволяет повысить соотношение сигнал-шум на высоких частотах при интерпретации в частотной области (вплоть до 15 кГц), однако может быть исключено при свертке полученной частотной характеристики с соответствующей формой первичного сигнала, не содержащей высокочастотного возбуждения, при интерпретации во временной области. Идея подобного подхода к возбуждению перекликается с идеями псевдошумового возбуждения [Светов и др., 2012; Великин, Великин, 2015].

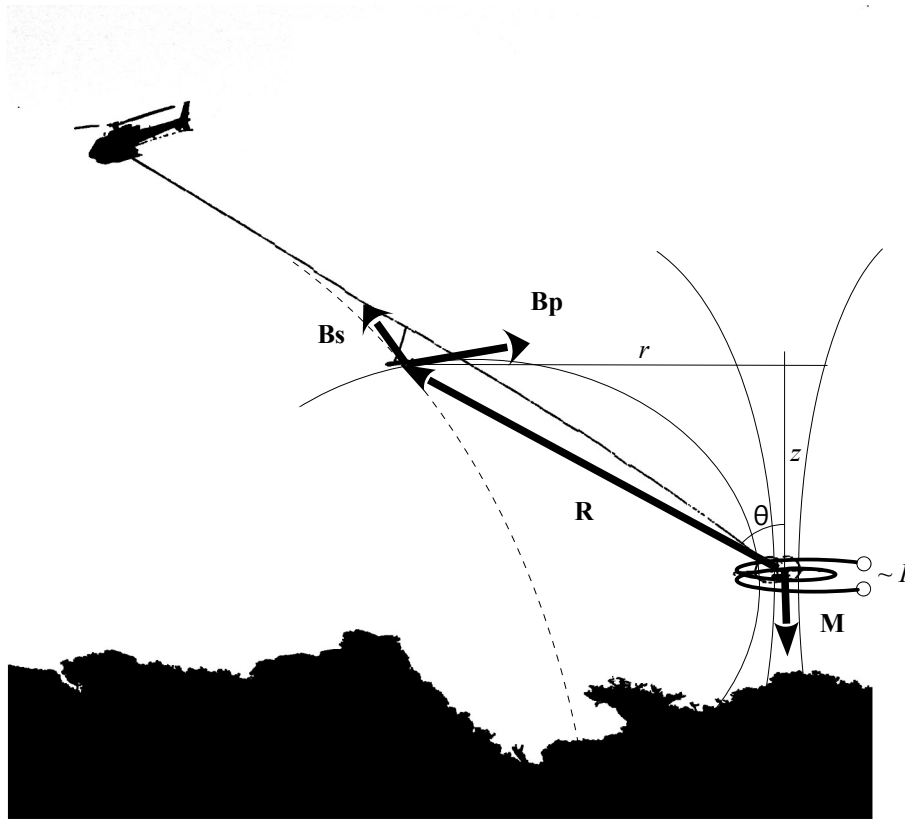


Рисунок 1.10. Аэроэлектроразведочная система ЭКВАТОР

I — ток в петле передатчика, $\mathbf{M}$ — вектор дипольного момента передатчика, $\mathbf{B}_p$ — вектор индукции поля передатчика в точке измерения (первичное поле), $\mathbf{B}_s$ — вектор индукции вторичного поля в точке измерения (поле отклика), $\mathbf{R}$ — радиус-вектор передатчик-приемник, z , r — вертикальное и горизонтальное смещение приемника относительно передатчика, θ — угол между вектором дипольного момента и радиус-вектором передатчик-приемник

Для обеспечения возможности компенсации наведенного в элементах конструкции поля [Karshakov et al., 2023] и для решения задачи электромагнитного позиционирования [Павлов и др., 2010; Третьякова, 2023] передающая система оснащена двумя дополнительными диполями, каждый из которых представлен воздушной катушкой, расположенной не в горизонтальной плоскости. Обеспечивается совмещение эффективных центров всех трех передающих диполей в одной пространственной точке ($\mathbf{M}_1$, $\mathbf{M}_2$, $\mathbf{M}_3$ на Рис. 1.12). Гармонический ток в дополнительных диполях также возбуждается электронными узлами блока передатчика. Значения частот дополнительной возбуждающей дипольной системы выбраны так, чтобы они приходились на четные гармоники базовой частоты, отсутствующие в сигнале основного диполя: 617 и 926 Гц.

Соответственно спектры основного и дополнительных сигналов не пересекаются и разделяются в постобработке [Павлов и др., 2010; Волковицкий, 2022].

Приемник электроразведочной системы, устанавливаемый в буксируемой гондоле, состоит из трехкомпонентного индукционного датчика и блока электроники. В центральной части корпуса гондолы может быть установлена антенна приемника спутниковой навигационной системы.

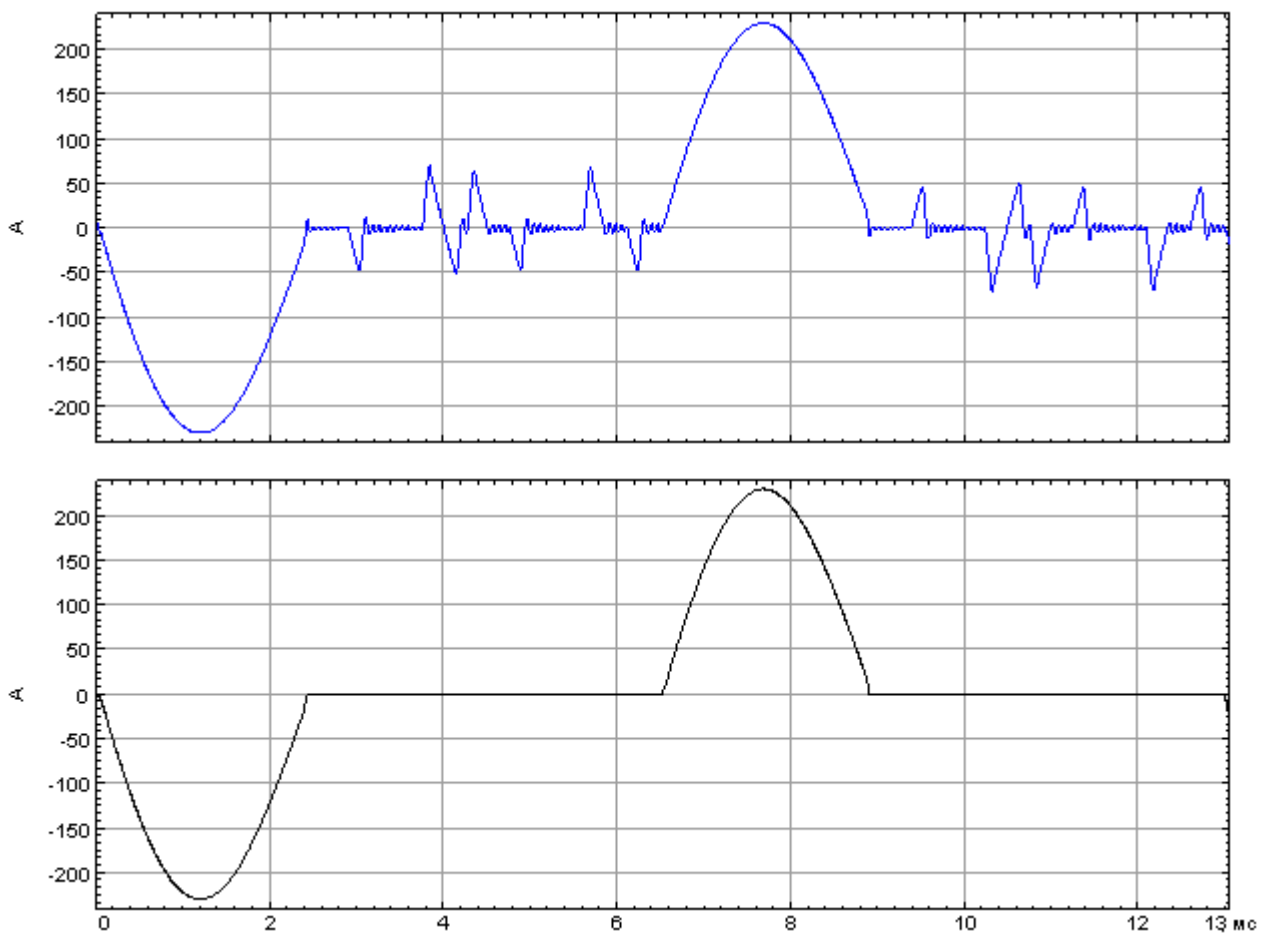


Рисунок 1.11. Ток в петле передатчика комплекса ЭКВАТОР и форма импульса, с которой выполняется свертка для получения сигналов отклика во временной области
вверху — ток, внизу — форма для свертки во временную область

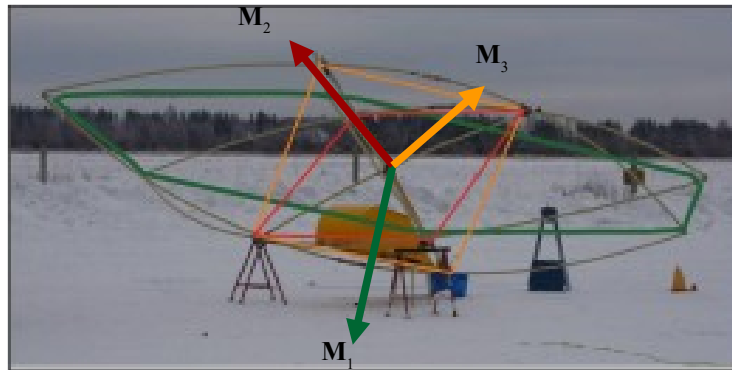


Рисунок 1.12. Диполи системы ЭКВАТОР

1.2.2. Структура регистрируемых данных

Камеральная обработка геофизической информации, получаемой в ходе аэросъемки с применением комплекса ЭКВАТОР, подразделяется на два типа по характеру применяемых процедур — регулярную обработку и завершающую. Регулярная обработка информации осуществляется для фрагмента полученных данных непосредственно по окончании каждого вылета, тогда как завершающая — для всей полученной геофизической информации на всю площадь работ.

Регулярная обработка

Общая структура процедур регулярной обработки аэроэлектроразведочных и аэромагнитных данных представлена на Рис. 1.13.

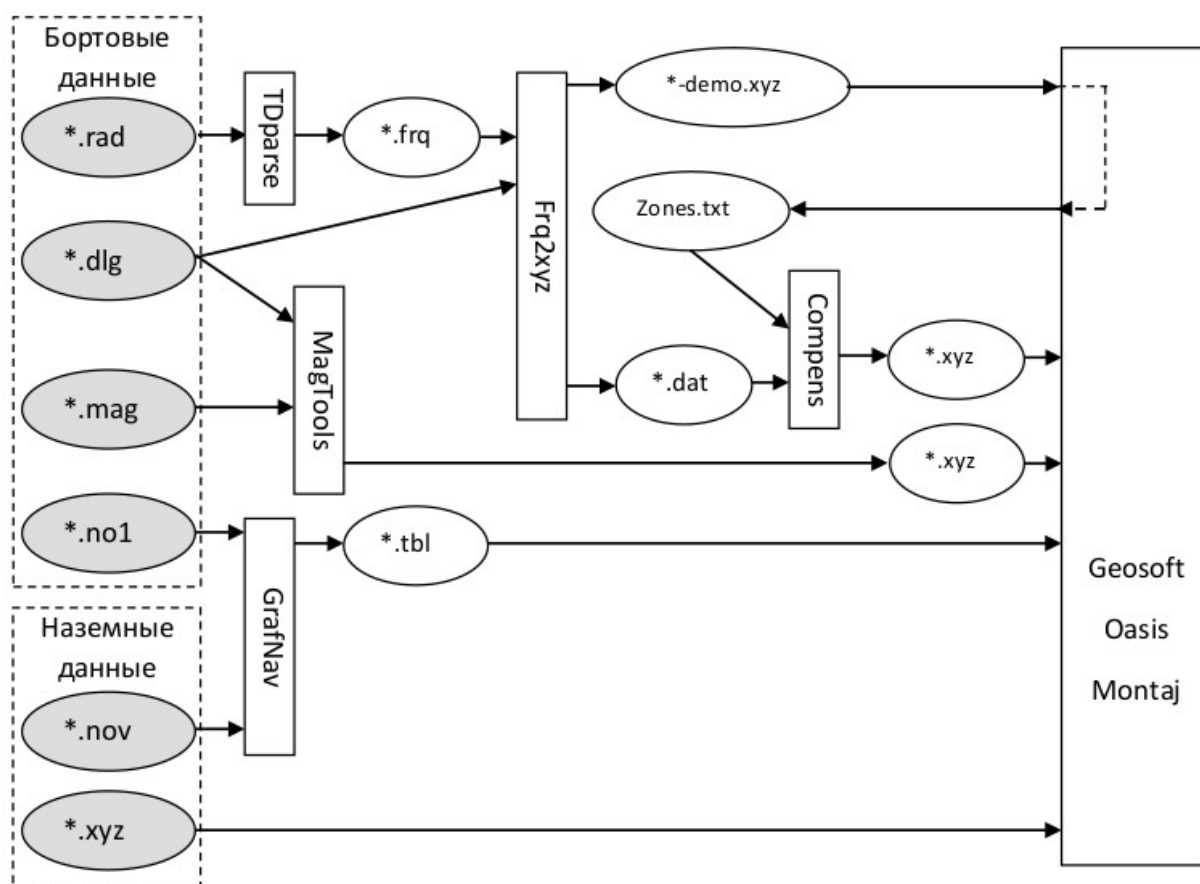


Рисунок 1.13. Структура программно-алгоритмического комплекса для регулярной камеральной обработки комбинированной аэроэлектроразведки ЭКВАТОР

Вся информация, регистрируемая как бортовыми, так и наземными системами комплекса ЭКВАТОР, записывается полностью, причем в записи сохраняется структура всех информационных потоков. Этот принцип обеспечивает возможность полномасштабного контроля данных в пост-процессинге. В то же время информация, передаваемая геофизику, должна быть соответствующим образом структурирована в форматы обрабатывающих программ. В качестве таковых выступает пакет программ Oasis Montaj компании Geosoft Inc.

«Распаковка» данных

Первым этапом регулярной обработки является «распаковка» данных, преобразование всей полученной информации к форматам, воспринимаемым программами последующей обработки. К этому же классу процедур относятся и

операции, которые хотя и производятся геофизиком после распаковки, однако не могут быть отнесены к процессу интерпретации.

Обработка навигационной информации

Общая структура навигационных параметров, регистрируемых аппаратурой комплекса ЭКВАТОР приведена в табл.1.1.

Таблица 1.1

Структура навигационной информации

№	Информационное содержание	Ед. изм.
1	GPS-дата	ДД/ММ/ГГГГ
2	GPS-время	ЧЧ:ММ:СС.С
3	Широта (WGS 84) навигационного приемника I	град.
4	Долгота (WGS 84) навигационного приемника I	град.
5	Высота (WGS 84) навигационного приемника I	м
6	Широта (WGS 84) навигационного приемника II	град.
7	Долгота (WGS 84) навигационного приемника II	град.
8	Высота (WGS 84) навигационного приемника II	м
9	Широта (WGS 84) навигационного приемника III	град.
10	Долгота (WGS 84) навигационного приемника III	град.
11	Высота (WGS 84) навигационного приемника III	м

Полученная в ходе съемки навигационная (позиционная) информация подвергается дополнительной обработке с целью повышения точности определения пространственного положения только для тех элементов комплекса, для которых эта информация является существенной.

Информация, получаемая навигационным приемником III, определяет

абсолютное положение платформы передатчика электроразведочной системы в ходе съемки, является значимой при построении карт и разрезов по электроразведке.

Информация, получаемая навигационным приемником II, определяет абсолютное положение датчика магнитометра в ходе съемки, является значимой при построении карт магнитного поля.

Информация, получаемая навигационным приемником I, определяет абсолютное положение блоков гамма-спектрометров в ходе съемки, является значимой при построении карт по гамма-спектрометрии.

Дифференциальная коррекция данных спутниковой навигационной системы позволяет существенно уточнить абсолютное положение подвижного объекта за счет дополнительной обработки данных, полученных от другого, неподвижного приемника, расположенного в непосредственной близости от района работ.

Для выполнения дифференциальной коррекции в технологии ЭКВАТОР используется хорошо себя зарекомендовавшая программа GrafNav, разработанная компанией Waypoint. На вход этой программы подаются два файла с навигационными данными. В результате совместной обработки записанного на борту файла навигационного приемника II (*.nol) и записанного на базовой станции файла (*.nov) программа GrafNav создает файл уточненного позиционного решения в формате (*.tbl), который далее обрабатывается средствами программного комплекса Oasis Montaj. В базе данных этой программы будут созданы колонки, соответствующие «сырому» навигационному решению и уточненному (дифференциальному).

Информация о показаниях радиовысотомера, равно как и информация об относительном пространственном и угловом положении приемника и передатчика, содержится в бортовых файлах (*.rad), относящихся к работе электроразведочной системы.

Обработка аэроэлектроразведочной информации

Данные, получаемые аэроэлектроразведочной системой ЭКВАТОР,

записываются бортовой вычислительной системой как файлы (*.rad). Бинарная структура этих файлов с предельной детальностью и быстродействием описывает работу всей электроразведочной системы, включая систему относительного электромагнитного позиционирования.

Данные, записанные в файлах (*.rad), подвергаются с помощью программы TDparse чисто техническим автоматическим процедурам фильтрации и коррекции с учетом изменений внутренних параметров системы. На выходе программа создает файл (*.frq), который далее обрабатывается программой Frq2xyz совместно с бортовым файлом (*.dlg), содержащим информацию о прохождении отдельных съемочных маршрутов и метки системной синхронизации. На выходе создаются два файла — (*.demo.xyz) и (*.dat).

Файл (*.demo.xyz) является вспомогательным. Он загружается в программу Oasis Montaj и позволяет правильно выбрать интервалы номеров измерительных отсчетов, относящиеся к выполнению в полете процедур калибровки (на схеме этот процесс показан пунктиром). В результате создается параметрический файл (Zones.txt), являющийся управляющим для программы Compens, завершающей обработку аэроэлектроразведочной информации и создающей необходимые колонки в структуре базы данных программы Oasis Montaj. Структура этой информации описана в табл. 1.2. В качестве единиц измерения аэроэлектроразведочной информации традиционно используются ppm — миллионные доли первичного поля. Со временем первичное поле может меняться, поэтому удобно работать с сигналами, в которых данное изменение учтено.

Таблица 1.2

Структура данных аэроэлектроразведки

№	Формат данных	Информационное содержание	Ед. изм.
1	1 значение	GPS-время	чч:мм:сс.с
2	14 значений	Горизонтальная (X) составляющая $dB(t)/dt$	ppm
3	14 значений	Вертикальная (Z) составляющая $dB(t)/dt$	ppm
4	14 значений	Горизонтальная (X) составляющая $B(t)$	ppm
5	14 значений	Вертикальная (Z) составляющая $B(t)$	ppm
6	34 значения	Горизонтальная (X) составляющая $Re(B(f))$	ppm/100
7	34 значения	Вертикальная (Z) составляющая $Re(B(f))$	ppm/100
8	34 значения	Горизонтальная (X) составляющая $Im(B(f))$	ppm/100
9	34 значения	Вертикальная (Z) составляющая $Im(B(f))$	ppm/100

По результатам измерений и первичной обработки формируются два массива числовых выходных данных в форме временного и частотного накоплений. Результатом накопления для временных каналов являются данные суммирования значений измеряемых сигналов в границах временных окон, заданных в соответствии с табл. 1.3, для частотных — комплексные значения амплитуд после синхронного детектирования измеряемого сигнала на частотах, набор которых представлен в табл. 1.4. Более подробно методика съемки отражена в Приложении (ПРИЛОЖЕНИЕ П.3. Методика съемки).

Таблица 1.3

Распределение каналов
временного накопления

№	Границы интервалов накопления (мксек)	
	ранняя	поздняя
0	5	10
1	10	15
2	15	25
3	25	35
4	35	60
5	60	95
6	95	150
7	150	245
8	245	395
9	395	640
10	640	1035
11	1035	1680
12	1680	2725
13	2725	4420

Таблица 1.4

Значения частот частотного
накопления

№	Частота (Гц)
0	77.16
1	231.48
2	385.80
3	540.12
4	694.44
5	848.77
6	1003.09
7	1157.41
8	1311.73
9	1466.05
10	1620.37
11	1774.69
12	1929.01
13	2083.33
14	2314.81
15	2623.46
16	2932.10
17	3240.74
18	3549.38
19	3858.02
20	4475.31
21	4861.11
22	5324.07
23	5787.04
24	6327.16
25	6867.28
26	7793.21
27	8487.65

№	Частота (Гц)
28	9567.90
29	10648.10
30	11136.80
31	11844.10
32	13379.60
33	14561.30

1.3. Выводы по Главе 1

В данной главе приведен обзор современных аэроэлектроразведочных систем. Предложена новая классификация таких систем, выделяющая среди систем с контролируемым мобильным источником помимо частотных и временных еще и комбинированные системы. Дано описание структуры одной из существующих комбинированных систем — аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР.

Результаты данной главы опубликованы в работах [Волковицкий и др., 2011б; Мойланен, 2021; Мойланен, 2022].

ГЛАВА 2. Методы и алгоритмы первичной обработки измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы²

В этой главе будут рассмотрены основные этапы, методы и алгоритмы обработки измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы на примере системы ЭКВАТОР. Решаются задачи, связанные с компенсацией влияния поля токов, наведенных в элементах конструкции системы, различных погрешностей приемника, связанные с определением взаимного расположения источника и приемника поля, с выделением вторичного поля на фоне первичного.

Главную сложность среди решаемых задач составляет значительная амплитуда первичного поля, обычно многократно превышающая амплитуду поля отклика, а также сильная зависимость первичного поля от изменений геометрических параметров измерительной установки. Это влияние получило специальное название — «геометрический шум». Для преодоления влияния геометрического шума традиционными являются следующие способы:

- неполное извлечение геофизически значимой информации, наблюдение только той части в сигналах отклика, которая, с одной стороны, зависит от свойств геоэлектрического разреза, а с другой — не зависит от величины и

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:

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Высокоразрешающая аэроэлектроразведка в масштабе 1:5000 // Записки Горного института. – 2013. – Т. 200. – с. 19-22. (0,25 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 6,451 (РИНЦ). EDN: QLIKDV;

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Использование синфазной компоненты отклика для низкочастотной аэроэлектроразведки системы ЕМ-4Н // Записки Горного института. – 2011. – Т. 194. – с. 150-153. (0,25 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 6,451 (РИНЦ). EDN: ROVVWT;

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Новая вертолетная аэроэлектроразведочная система «Экватор» для аэрометода переходных процессов // Записки Горного института. – 2011. – Т. 194. – с. 154-157. (0,25 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 6,451 (РИНЦ). EDN: ROVVXD;

Каршаков Е.В., Волковицкий А.К., **Мойланен Е.В.** Аэроэлектроразведочные измерительные комплексы // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 4. – с. 60-64. (0,31 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 0,298 (РИНЦ). EDN: DLSLXO;

Karshakov E.V., Podmogov Y.G., **Moilanen J.**, Kertsman V.M., Combined Frequency Domain and Time Domain Airborne Data for Environmental and Engineering Challenges // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2017. – Vol. 22, № 1. – p. 1–11. (0,69 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор 0,234 (SJR). EDN: YVMURZ.

направления первичного поля в точке измерения: например, только поле спада для временных систем или только отношение полуосей эллипса поляризации для частотных систем;

- механическая стабилизация измерительной установки с тем расчетом, чтобы ни расстояние, ни углы взаимной ориентации приемника и передатчика в процессе работы установки не изменялись: приемник и передатчик объединяются единой механической несущей конструкцией, и их взаимное положение считается неизменным, в этом предположении расчетное значение первичного поля может быть вычтено из результатов измерений;
- определение значений набора геометрических параметров измерительной установки методами углового и пространственного позиционирования, вычисление на их основе значений вектора первичного поля в точке измерения и внесение в результаты измерений соответствующих поправок.

Отметим, что для большинства аэроэлектроразведочных систем первичное поле в результатах измерений многократно превышает поле отклика, поэтому последний метод требует очень высокой точности определения геометрических параметров.

2.1. Математическая модель измерений

Для описания первичного поля в системе ЭКВАТОР традиционно используется модель точечного диполя. При этом физически источник поля представляет собой петлю с током, имеющим форму периодического сигнала, показанного на Рис. 1.11. С учетом сказанного ток в петле можно представить в виде

$$I(t) = \operatorname{Re} \sum_{l=0}^{\infty} I_{2l+1} e^{(2l+1)i\omega_0 t}. \quad (2.1)$$

Здесь $I_{2l+1} \in \mathbb{C}$ — комплексные компоненты спектра сигнала, ω_0 — базовая частота тока в петле, i — мнимая единица.

Видно, что в (2.1) вошли только нечетные гармоники, так как сигнал возбуждения симметричен и четными составляющими спектра можно пренебречь [Маснае, Kratzer, 2023]. В дальнейшем перенумеруем гармоники следующим образом: $k = 2l+1$, $\omega_k = (2l+1)\omega_0$, по умолчанию считая, что используются только нечетные гармоники.

$$I(t) = \operatorname{Re} \sum_{k=0}^{\infty} I_k e^{i\omega_k t}. \quad (2.2)$$

Сразу следует отметить тот факт, что ни при измерении тока, ни при измерении поля невозможно получить оценки на частотах больших, чем частота Найквиста, которая определяется частотой дискретизации данных. Поэтому (2.2) можно переписать в виде

$$I(t) = \operatorname{Re} \sum_{k=0}^K I_k e^{i\omega_k t}, \quad (2.3)$$

где K соответствует порядковому номеру максимальной измеряемой частоты.

Согласно принятой модели, вектор дипольного магнитного момента источника можно также выразить аналогично (2.3):

$$\mathbf{M}(t) = S N \mathbf{n} \operatorname{Re} \sum_{k=0}^K I_k e^{i\omega_k t}, \quad (2.4)$$

где S — площадь петли, N — количество витков провода в ней, $\mathbf{n}$ — вектор нормали к поверхности, охватываемой петлей передатчика.

Если положить $\mathbf{M}_k = S N \mathbf{n} I_k$, то

$$\mathbf{M}(t) = \operatorname{Re} \sum_{k=0}^K \mathbf{M}_k e^{i\omega_k t} = \sum_{k=0}^K \mathbf{M}_k^{\operatorname{Re}} \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (2.5)$$

где φ_k задает начальную фазу возбуждения гармоники ω_k , $\mathbf{M}_k^{\operatorname{Re}}$ задает амплитуду

действительной части вектора момента на соответствующей частоте.

Измеряемое трехкомпонентным приемником поле можно также выразить через гармоники спектра возбуждающего поля:

$$\mathbf{B}(t) = \sum_{k=0}^K [\mathbf{B}_k^{\text{Re}}(t) \cos(\omega_k t + \varphi_k) + \mathbf{B}_k^{\text{Im}}(t) \sin(\omega_k t + \varphi_k)], \quad (2.6)$$

где $\mathbf{B}_k^{\text{Re}}(t)$, $\mathbf{B}_k^{\text{Im}}(t)$ действительнзначные векторы, соответствующие синфазной сигналу возбуждения (2.5) составляющей поля (Re) и его квадратурной части (Im). Если предполагать, что поле источника не меняется, то данные вектора меняются со временем только при изменении взаимного расположения источника и приемника. Постоянная времени таких изменений гораздо больше, чем период возбуждения.

Выражение (2.6) можно записать в комплексной форме (зависимость амплитуды от времени будем опускать):

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(t) &= \text{Re} \sum_{k=0}^K \mathbf{B}_k e^{-i(\omega_k t + \varphi_k)}, \quad \mathbf{B}_k = \mathbf{B}_k^{\text{Re}} + i \mathbf{B}_k^{\text{Im}}, \\ \mathbf{B}_k &\in \mathbb{C}^3, \quad \mathbf{B}, \mathbf{B}_k^{\text{Re}}, \mathbf{B}_k^{\text{Im}} \in \mathbb{R}^3. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Поскольку диапазон частот системы ЭКВАТОР (см. табл. 1.4) соответствует условиям для квазистационарного приближения [Жданов, 1986, Дмитриев, 2012], векторы $\mathbf{B}_k^{\text{Re}}$, $\mathbf{B}_k^{\text{Im}}$ для разных k можно рассматривать по отдельности как медленно меняющиеся стационарные поля. Таким образом, далее можно рассматривать отдельные гармоники с частотой ω , начальной фазой φ и дипольным моментом $\mathbf{M}$, опуская индекс.

Также, без ограничения общности, можно положить $\varphi = 0$. Действительно, при различных амплитудах и фазах гармоник тока возбуждения I_k можно выполнить нормировку соответствующего измеренного сигнала:

$$\mathbf{b}_k = \frac{\mathbf{B}_k}{I_k}, \quad (2.8)$$

После такой нормировки на каждой частоте получено значение индукции поля, отвечающее току 1 А с начальной фазой 0.

Согласно модели, предложенной в работе [Вовенко и др., 2015], измеренное на борту летательного аппарата поле $\mathbf{B}_{mes}$ складывается из первичной составляющей $\mathbf{B}_p$, описывающей поле источника, вторичной составляющей $\mathbf{B}_s$, описывающей поле отклика, вариационной составляющей $\mathbf{B}_v$, характеризующей внешнее по отношению к бортовому комплексу поле, и наведенной составляющей $\mathbf{B}_c$, обусловленной полем носителя. Модель также содержит слагаемое, отвечающее за инструментальную погрешность $\Delta \mathbf{B}$.

$$\mathbf{B}_{mes} = \mathbf{B}_p + \mathbf{B}_s + \mathbf{B}_v + \mathbf{B}_c + \Delta \mathbf{B}. \quad (2.9)$$

Характерные значения соответствующих величин $B_* = |\mathbf{B}_*|$ приведены в таблице 2.1. Здесь для столбца «Инструментальная погрешность» приведены два значения. Исходное, а также, в скобках, окончательное, получаемое после применения алгоритмов, описанных в следующем разделе.

Следует отметить, что приведены значения для низких частот. Поскольку спектр сигнала возбуждения убывает с ростом частоты (Рис. 1.9) на 1–2 порядка к самым высоким частотам, соотношение сигнал-шум уменьшается на более высоких частотах.

Таблица 2.1

Характерные значения компонент модели измерений по отношению к нормальной составляющей для системы ЭКВАТОР

Компоненты первичного поля B_p , нТл	Вторичное поле B_s/B_p	Естественные вариации B_v/B_p	Наведенное поле B_c/B_p	Инструментальная погрешность $\Delta B/B_p$
10^2	$10^{-6} - 10^{-3}$	10^{-7}	10^{-3}	$10^{-3} (10^{-6})$

С учетом уровня приведенных в скобках таблице 2.1 инструментальных

погрешностей очевидно, что основная задача после применения аппаратурной коррекции — исключить наведенное поле, а потом разделить первичную и вторичную составляющую поля, выделив тем самым поле отклика для дальнейшей интерпретации. Первичная составляющая традиционно представляется как поле диполя. Компенсация вариационной составляющей не требуется, уровень вариаций в рабочем диапазоне частот не превышает уровня инструментальных погрешностей [Spies and Frischknecht, 2008].

2.2. Модель инструментальных погрешностей

Приемные рамки аэроэлектроразведочной системы представляют собой трехкомпонентный индукционный датчик. Оси чувствительности этого датчика реализованы в виде пары катушек с ферритовым сердечником, расположенных на сторонах куба таким образом, чтобы центр измерения отдельных компонент попадал в центр куба в случае однородного поля (Рис. 2.1).

Каждый индукционный датчик, применяемый в системах ЭКВАТОР, при изготовлении проходит стендовые испытания, в процессе которых выявляются погрешности масштабного коэффициента, неортогональность осей чувствительности, взаимное влияние катушек датчика друг на друга. Кроме того, периодически осуществляется калибровка датчика на мере магнитной индукции. В результате показано, что индукционные датчики имеют погрешность масштабного коэффициента и углы перекося осей чувствительности не более 1%. Стабильность указанных значений подтверждена на уровне 10^{-4} для масштабного коэффициента и 10^{-3} для углов перекося. Данная оценка соответствует той точности, которую обеспечивает магнитная испытательная станция.



Рисунок 2.1. Приемник системы ЭКВАТОР

Введем следующую модель инструментальных погрешностей:

$$\Delta \mathbf{B} = \mathbf{A} \mathbf{B}_{mes} + \delta \mathbf{B}, \quad (2.10)$$

где $\mathbf{A}$ — комплексная матрица 3×3 , описывающая различные геометрические, амплитудные и фазовые искажения приемника, а $\delta \mathbf{B}$ — случайный комплексный вектор 3×1 , описывающий шумовую составляющую измерений. В силу того, что компоненты матрицы $\mathbf{A}$ малы (порядка 10^{-3}), линейная модель (2.10) описывает погрешность с точностью порядка 10^{-6} .

Введение комплексной матрицы в (2.10) позволяет не только учесть разницу масштабных коэффициентов по осям и их взаимные влияния и геометрические перекосы, но и ввести возможные фазовые искажения при измерении отдельных компонент поля. Подбор коэффициентов данной матрицы можно осуществить в процессе калибровки на достаточно большой высоте, где допустимо пренебречь откликом от Земли. При этом необходимо учесть два аспекта.

1. Помимо внутренних искажений, описываемых матрицей $\mathbf{A}$, имеются внешние искажения — наведенное поле, описываемые слагаемым $\mathbf{B}_c$ в модели (2.9). Таким образом коррекцию обеих составляющих нужно выполнять совместно.
2. В процессе работы системы коэффициенты матрицы $\mathbf{A}$ могут изменяться, например из-за прогрева аппаратуры. Данное изменение требуется контролировать.

Об учете наведенного поля пойдет речь в следующем разделе. Для обеспечения же стабильности измерительных характеристик в системе ЭКВАТОР введено эталонное воздействие на частотах, близких к рабочим частотам спектра возбуждения, которое обеспечивает контроль амплитудно-фазовых характеристик как при измерении вектора поля $\mathbf{B}_{mes}$, так и при измерении тока I в петле передатчика [Volkovitsky, Karshakov, 2023].

Поскольку петля при прогреве меняет свои характеристики, при выполнении съемки перед вылетом система работает на Земле в течение 10-15 минут до запуска двигателя вертолета.

После применения алгоритмов стабилизации измерительных характеристик можно получить нормированное значение поля в соответствии с (2.8), не зависящее от изменений тока, которое и будет служить для дальнейшей интерпретации как во временной, так и в частотной области:

$$b_{ki} = \frac{B_{mes\ ki}}{I_{mes\ k}}. \quad (2.11)$$

2.3. Методы компенсации наведенного поля

Система ЭКВАТОР обладает изменяемой геометрией с разнесенными передатчиком и приемником. В подобных системах при увеличении расстояния между передатчиком и приемником одновременно уменьшается амплитуда первичного поля в точке расположения приемника и тем самым увеличивается величина поля отклика по отношению к нему. Такой эффект позволяет несколько сократить требуемый динамический диапазон приемника. Однако влияние наведенных в проводящих частях несущей конструкции токов также зависит от актуального относительного положения приемника.

В основе используемой в системе ЭКВАТОР модели наведенного поля, описанной в работах [Волковицкий, 2012, Karshakov et al., 2023], лежат следующие идеи.

1. Наведенное поле является постоянным в системе координат, связанной с передатчиком.
2. Наведенное поле может быть описано как поле точечного диполя.
3. Расположение данного диполя является близким к расположению диполя, описывающего поле передатчика.

Для работы алгоритмов компенсации в системе ЭКВАТОР введены два дополнительных диполя (Рис. 1.12), каждый из которых излучает синусоидальное поле на своей частоте, являющейся четной гармоникой базовой частоты: $8\omega_0$ и $12\omega_0$. Это позволяет полностью разделить на приемнике сигналы трех разных диполей: основного $\mathbf{M}_k$ и дополнительных $\mathbf{M}_1^c$ и $\mathbf{M}_2^c$. При этом центры дополнительных диполей по возможности совмещаются с центром основного диполя.

При сделанных выше предположениях вектор момента диполя, описывающего наведенное поле, $\mathbf{M}_c$, может быть представлен как линейная комбинация, при условии что вектора диполей представляют собой линейно независимую тройку:

$$\mathbf{M}_{ck} = c_{0k} \mathbf{M}_k + c_{1k} \mathbf{M}_1^c + c_{2k} \mathbf{M}_2^c. \quad (2.12)$$

В этом выражении c_{0k} , c_{1k} , c_{2k} — действительные константы. Поскольку на каждой частоте спектра может быть свой наведенный вектор, эти коэффициенты разные для разных частот.

Поле каждого диполя в (2.12) может быть представлено через линейный оператор [Павлов и др., 2010]:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu \mu_0}{4\pi R^3} (3 \mathbf{e}_R \mathbf{e}_R^T - \mathbf{I}) \mathbf{M}, \quad (2.13)$$

где $\mathbf{e}_R$ — единичный вектор, направленный вдоль вектора $\mathbf{R}$, направленного от

передатчика к приемнику, $\mathbf{I}$ — единичная матрица 3×3 . Выражение $\mathbf{e}_R \mathbf{e}_R^T$ соответствует матрице диадного произведения [Гантмахер, 1966], т. е. матрице, составленной из попарных произведений компонент $e_{Ri} \cdot e_{Rj}$.

Поскольку, согласно предположению, вектор $\mathbf{R}$ одинаков для всех диполей в выражении (2.12), применяя линейный оператор (2.13) к левой и правой части (2.12), можно получить [Karshakov et al., 2023]:

$$\mathbf{B}_{ck} = c_{0k} \mathbf{B}_k + c_{1k} \mathbf{B}_1^c + c_{2k} \mathbf{B}_2^c. \quad (2.14)$$

Теперь, возвращаясь к модели инструментальных погрешностей (2.10), можно ввести следующую модель (опуская номер гармоники):

$$\mathbf{B}_c + \Delta \mathbf{B} = \mathbf{C}_0 \mathbf{B}_{mes} + \mathbf{C}_1 \mathbf{B}_1^c + \mathbf{C}_2 \mathbf{B}_2^c + \delta \mathbf{B}, \quad (2.15)$$

где $\mathbf{C}_0$, $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$ — комплексные матрицы 3×3 , полученные произведением матриц $\mathbf{A}$ в выражении (2.10) для каждого вектора каждой частоты на соответствующий коэффициент c^* в выражении (2.14).

Коэффициенты модели (2.15) подбираются в процессе калибровки. Суть идеи компенсации влияния наведенного поля и инструментальных погрешностей приемника заключается в том, чтобы на достаточно большой высоте (600–700 м), где аномальной составляющей поля можно пренебречь, выполнить эволюции и определить коэффициенты $\mathbf{C}_0$, $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$, считая их постоянными, а далее вводить поправки в измерения поля уже на высоте съемки.

Алгоритм подбора с анализом наблюдаемости параметров модели подробно описан в работе [Каршаков, 2018]. Главный нюанс заключается в том, что при подборе постулируется, что для вектора поля после компенсации

$$\mathbf{B}' = \mathbf{B}_{mes} - \mathbf{B}_c - \Delta \mathbf{B} \quad (2.16)$$

мнимая (квадратурная) часть должна как можно меньше отличаться от 0, а действительная (синфазная) часть должна быть максимально близкой на всех частотах. В качестве вектора первичного поля, отличие от которого

минимизируется при подборе МНК, выбирается синфазная составляющая измеренного вектора на частоте ω_0 , поскольку по опыту на этой частоте величина наведенного поля минимальна. Важно отметить, что описанный подход работает только в случае трехкомпонентного приемника.

Пример работы процедуры компенсации на большой высоте для данных системы ЭКВАТОР в частотной и во временной области приведен на Рис. 2.2 и 2.3. Примечательным является тот факт, что во временной области после выключения тока первичное поле отсутствует, однако наведенное поле на ранних каналах (5–50 мкс) весьма заметно. А при значительных эволюциях возмущены сигналы и на более поздних каналах (правая часть Рис. 2.3). Сигналы приведены в миллионных долях первичного поля (ppm).

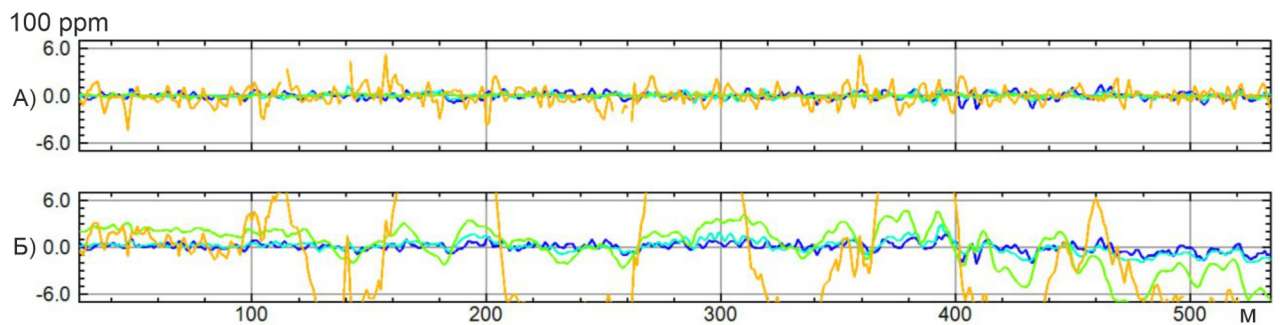


Рисунок 2.2. Компенсация в частотной области

квадратурная компонента после компенсации для системы ЭКВАТОР А — после компенсации с учетом измерений параметров двух дополнительных диполей; Б — поле до компенсации, $100 \cdot \text{ppm}$

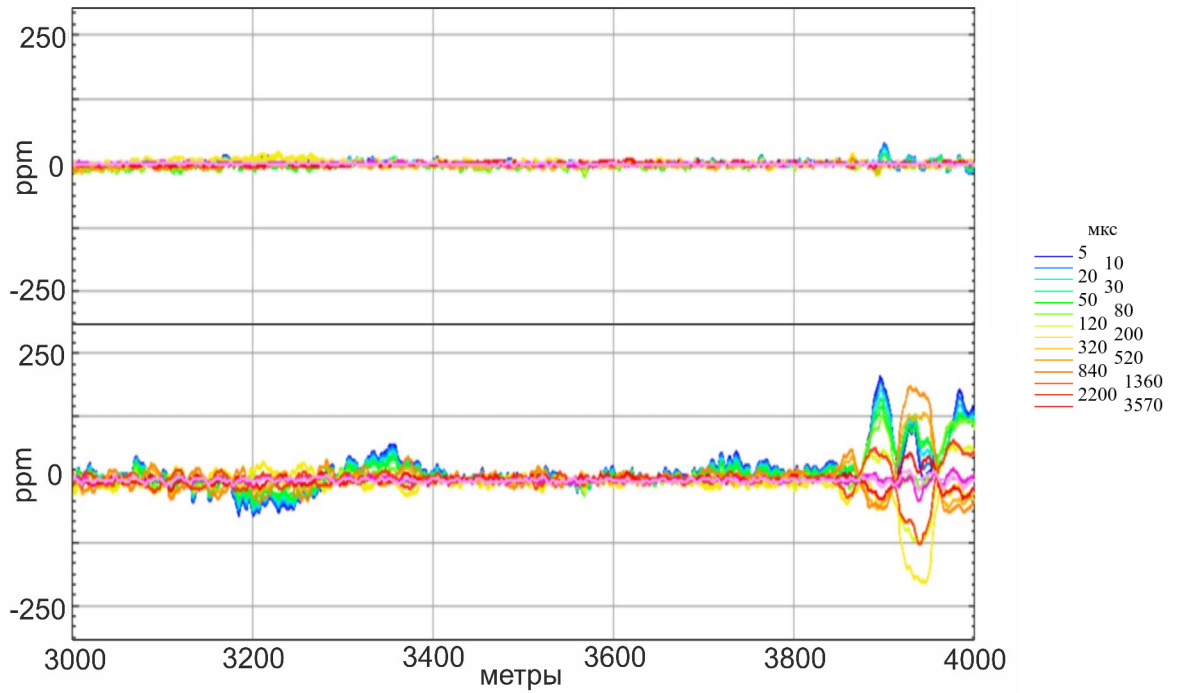


Рисунок 2.3. Компенсация во временной области

вверху: параметры поля спада после компенсации, внизу: до компенсации, ppm

Еще один аспект, который не учтен в модели (2.14), но при этом может оказывать заметное влияние на качество данных, — влияние колебания приемных рамок в поле передатчика. Поскольку применяется индукционный датчик, изменение амплитуды сигнала на определенной частоте вдоль оси чувствительности также приводит к появлению сигнала данной частоты [Karshakov, 2023].

Действительно, поскольку в закон Фарадея входит производная магнитного потока, сигнал на приемных рамках пропорционален

$$\frac{d \mathbf{B}(t, \omega_k)}{dt} = i \omega_k \mathbf{B}_k^0(t) \cdot e^{i \omega_k t} + \left\{ \frac{d \mathbf{B}_k^0(t)}{dt} \cdot e^{i \omega_k t} \right\}, \quad (2.17)$$

при этом второе слагаемое в правой части, как правило, не учитывается. Однако после перехода к значению поля (после деления на $i \omega_k$) динамическая составляющая наведенного поля может быть выражена

$$\mathbf{B}_{ck}^d = -\frac{i}{\omega_k} \cdot \frac{d\mathbf{B}_k^0(t)}{dt}. \quad (2.18)$$

Очевидно, что поправка (2.18) быстро убывает с ростом k , однако было показано [Karshakov, 2023], что для системы ЭКВАТОР при $k = 0,1$ она может составлять величину порядка $10^{-5} - 10^{-4}$, т. е. однозначно требует учета. На рисунке 2.4 показаны вертикальные компоненты отклика для частотной области (вверху), скорости спада (в центре) и спада (снизу) во временной области до (слева) и после (справа) компенсации влияния колебаний приемных рамок в поле передатчика. Влияние наиболее заметно на двух низких частотах, в ранних каналах скорости спада и во всех каналах поля В.

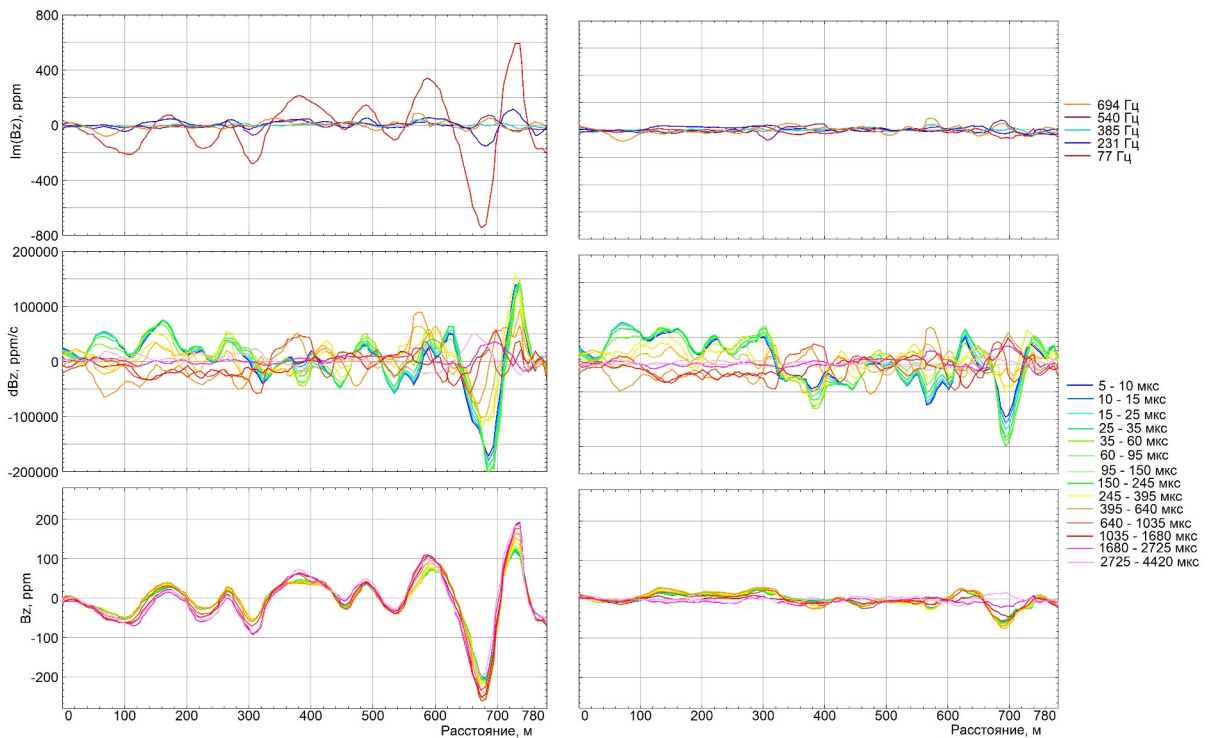


Рисунок 2.4. Компенсация колебаний приемника. Исходные (слева) и скомпенсированные (справа) данные вертикальной компоненты отклика для частотной области (вверху), скорости спада (в центре) и спада (снизу)

Таким образом, с учетом (2.15), (2.16), окончательный алгоритм введения поправок выглядит следующим образом:

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{B}_{mes k} - \mathbf{C}_{0k} \mathbf{B}_{mes k} - \mathbf{C}_{1k} \mathbf{B}_1^c - \mathbf{C}_{2k} \mathbf{B}_2^c + \frac{i}{\omega_k} \cdot \frac{d \mathbf{B}_{mes k}}{dt}, \quad (2.19)$$

где производная поля может быть заменена на его приращение за единицу времени.

Соотношение (2.19) можно переписать для нормированного значения поля (2.11), которое не зависит от изменения частотной характеристики измерительного канала и от изменения тока в петле передатчика:

$$\mathbf{b}_k = \mathbf{b}_{mes k} - \mathbf{C}_{0k} \mathbf{b}_{mes k} - \mathbf{C}_{1k} \mathbf{b}_1^c - \mathbf{C}_{2k} \mathbf{b}_2^c + \frac{i}{\omega_k} \cdot \frac{d \mathbf{b}_{mes k}}{dt}. \quad (2.20)$$

2.4. Метод разделения первичного и вторичного полей

После введения поправок на инструментальные погрешности и наведенное поле системы, при анализе данных во временной области не возникает вопрос, как отделить поле отклика от первичного поля: достаточно ограничиться рассмотрением поля спада после выключения тока в петле, как это делается в традиционных МПП системах [Каменецкий и др., 1972].

Чтобы получить поле спада, можно выполнить свертку полученных после коррекции сигналов в частотной области (2.20). После нормировки набор векторов $\{\mathbf{b}_k\}$ представляет собой спектр суммы первичного и вторичного поля, при этом первичное поле представляет собой поле δ -импульса: все его гармоники одинаковы по амплитуде и имеют фазу 0. Единственное, что отличает данный сигнал от поля δ -импульса, это неодинаковое соотношение сигнал-шум на разных частотах. На Рис. 1.9 видно, что амплитуда различных гармоник разная и после умножения на коэффициент сигнала определенной частоты на этот же коэффициент умножается и шум.

Чтобы не произошло усиления шумов малых гармоник, важно, чтобы при свертке во временную область сигналов $\{\mathbf{b}_k\}$ спектр импульса первичного поля S^{TD} (TD на Рис. 1.9) не имел гармоник, превосходящих гармоники исходного спектра S^{TDFD} (TD + FD на Рис. 1.9). Выполняя обратное преобразование Фурье сигнала $S^{TD} \cdot \{\mathbf{b}_k\}$, можно получить форму спада во временной области:

$$\mathbf{b} = \text{Re} \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^K S^{TD}(\omega_k) \cdot \mathbf{b}_k \cdot e^{-i\omega_k t}. \quad (2.21)$$

Для получения $d\mathbf{b}/dt$ достаточно сделать то же самое с набором $S^{TD} \cdot \{i\omega_k \mathbf{b}_k\}$

$$\frac{d\mathbf{b}}{dt} = \text{Re} \frac{i}{2\pi} \sum_{k=0}^K \omega_k S^{TD}(\omega_k) \cdot \mathbf{b}_k \cdot e^{-i\omega_k t}. \quad (2.22)$$

Теперь возможно осуществить накопление во временных окнах:

$$\mathbf{b}_i = \frac{\sum_{j=j_{i-1}}^{j_i} \mathbf{b}_j}{j_i - j_{i-1}}, \quad \frac{d\mathbf{b}_i}{dt} = \frac{\sum_{j=j_{i-1}}^{j_i} \frac{d\mathbf{b}_j}{dt}}{j_i - j_{i-1}}. \quad (2.23)$$

Здесь i — порядковый номер временного окна, j_j, j_{i-1} — его границы в отсчетах АЦП (Таблица 1.3).

Выделение отклика во время действия импульса сложнее. Чтобы определить первичное поле с точностью хотя бы 10 ppm, необходимо с такой точностью определить взаимное расположение приемника и передатчика. Для расстояния 40 м, которое задано конструкцией системы ЭКВАТОР, требования к взаимному позиционированию с точностью 0,4 мм кажутся невыполнимыми. Система электромагнитного позиционирования, применяющая измерения поля для определения координат [Павлов и др., 2010, Волковицкий, 2012], сама не в состоянии отделить первичное поле от вторичного, поэтому ее точность будет также ограничена.

Для определения поля отклика авторами [Palacky and West, 2008] вводится понятие синфазной и квадратурной составляющих отклика, которые теоретически

можно выделить в системах с нежесткой геометрией (Рис. 2.5). Конечно, квадратурную составляющую сигнала во временной области можно использовать для дальнейшей интерпретации. Однако это выходит за рамки данных исследований.

Если говорить о частотной области, выражение (2.20) содержит мнимую (квадратурную) и действительную (синфазную) составляющие. По определению квадратурная компонента содержится только в поле отклика и может интерпретироваться непосредственно:

$$\mathbf{b}_k^q = \text{Im } \mathbf{b}_k. \quad (2.24)$$

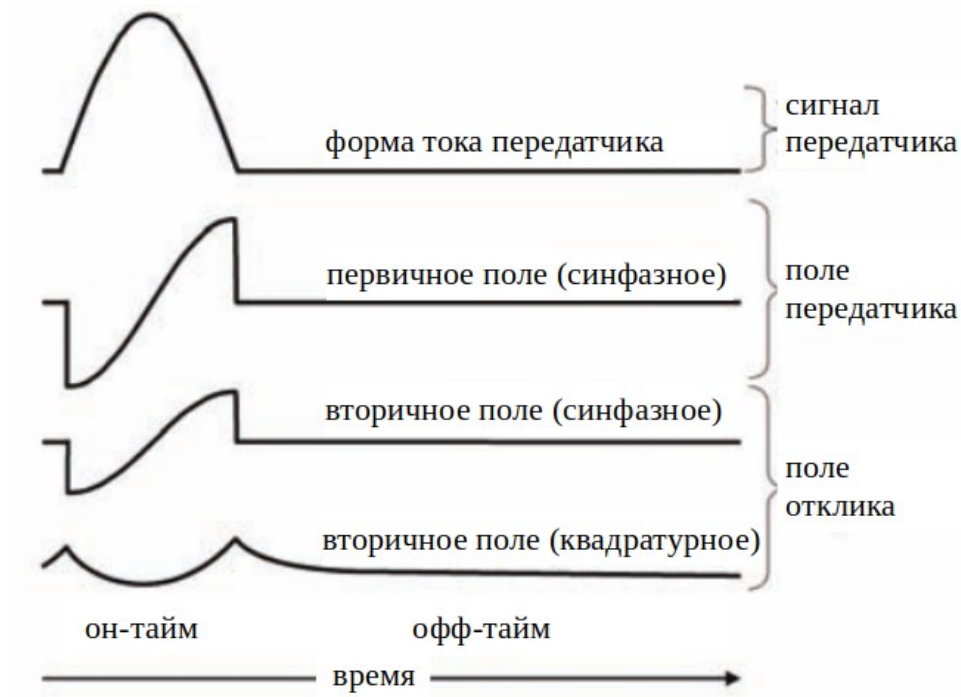


Рисунок 2.5. Синфазный и квадратурный отклик МПП-систем (db/dt) [Hefford et al., 2006]

Синфазная составляющая содержит сумму первичного и вторичного поля. В силу построения (2.20) первичное поле на всех частотах спектра одинаково с точностью до составляющих шума $\delta \mathbf{b}$ и малых второго порядка. Появление отклика приводит к тому, что синфазные составляющие векторов на разных частотах начинают друг от друга отличаться. Именно эти приращения синфазных векторов от частоты к частоте можно использовать, как компоненты отклика:

$$\mathbf{b}_{kj}^i = \text{Re}(\mathbf{b}_k - \mathbf{b}_j), \quad k \neq j \quad (2.25)$$

Нетрудно показать, что квадратурный отклик во временной области взаимно однозначно связан с приведенными наборами $\{\mathbf{b}_k^q\}$, $\{\mathbf{b}_{kj}^i\}$ для частотной области.

Действительно, согласно определению [Palacky and West, 2008], синфазное поле — это просто добавка умноженного на некоторый коэффициент K поля передатчика во временной области, которая очевидно имеет спектр KS^{TD} в частотной области. По этой причине после преобразования в частотную область и деления на S^{TD} мнимые компоненты не появятся $\{\mathbf{b}_k^q\} = 0$, а действительные будут умножены на один и тот же коэффициент $(1 + K)$, следовательно разница между ними сохраниться: $\{\mathbf{b}_{kj}^i\} = 0$.

Соответственно, отличные от нуля $\{\mathbf{b}_k^q\}$ и $\{\mathbf{b}_{kj}^i\}$ могут дать вклад только в квадратурную компоненту временного представления сигнала. Если бы они давали вклад в синфазную, этот вклад можно было бы выразить спектром вида KS^{TD} , для которого $\{\mathbf{b}_k^q\} = 0$ и $\{\mathbf{b}_{kj}^i\} = 0$.

Рассуждения для $d\mathbf{b}/dt$ аналогичны.

Тем не менее существуют способы определения полного отклика с ограниченной точностью: резистивный и индуктивный предел [Волковицкий, 2022].

Как известно, в зоне малого параметра $\sigma\omega$, т.е. при малых удельных электропроводностях σ , квадратурная компонента зависит линейно от частоты, а синфазная — квадратично, если σ фиксирована [Жданов, 1986]. Таким образом, если есть основания полагать, что удельные сопротивления высокие, синфазную компоненту отклика можно вычислить, зная разницу синфазных компонент на двух низких частотах ω_0 и $\omega_1 = 3\omega_0$ по формуле:

$$\text{Re } \mathbf{b}_0^i = \frac{\text{Re } \mathbf{b}_{10}^i}{8}, \quad \text{Re } \mathbf{b}_k^i = \text{Re } \mathbf{b}_0^i + \mathbf{b}_{k0}^i. \quad (2.26)$$

До тех пор, пока

$$(\operatorname{Re} \mathbf{b}_0^i)^2 \lesssim \|E[\delta \mathbf{b}_0 \delta \mathbf{b}_0^T]\|_2, \quad (2.27)$$

т. е. вычисленное значение синфазной компоненты отклика на низкой частоте сопоставимо с уровнем шумов измерений на этой частоте (E — знак математического ожидания, $\|\mathbf{A}\|_2$ — 2-норма матрицы $\mathbf{A}$), результат вычислений (2.26) будет давать точность определения синфазной компоненты отклика сопоставимую с точностью измерений.

Второй вариант — индуктивный предел, может применяться только в зонах с очень высокой удельной электропроводностью. Тогда синфазная составляющая сигнала на самой высокой значимой частоте, для системы ЭКВАТОР это $\omega_K \sim 200\omega_0 \sim 15$ кГц, достигает асимптотического значения. При условии известных геометрии передатчик-приемник и расположении системы относительно Земли можно вычислить значение индуктивного предела как поле отраженного диполя.

Введем систему координат, связанную с Землей: пусть ось z направлена вверх по нормали к поверхности, ось x — вдоль направления полета, ось y дополняет до правой ортогональной тройки. Начало координат — под передатчиком (Рис. 2.6). Пусть заданы $\mathbf{R}$ — вектор взаимного расположения передатчика и приемника, $\mathbf{m} = (m_1, m_2, m_3)^T$ — вектор дипольного момента передатчика, поделенного на ток в петле передатчика $\mathbf{m} = \mathbf{M}/I$, h — высота передатчика над поверхностью Земли. Тогда координаты передатчика — это вектор $\mathbf{r} = (0, 0, h)^T$, координаты отраженного передатчика — $\mathbf{r}' = (0, 0, -h)^T$, дипольный момент отраженного диполя — $\mathbf{m}' = (m_1, m_2, -m_3)^T$.

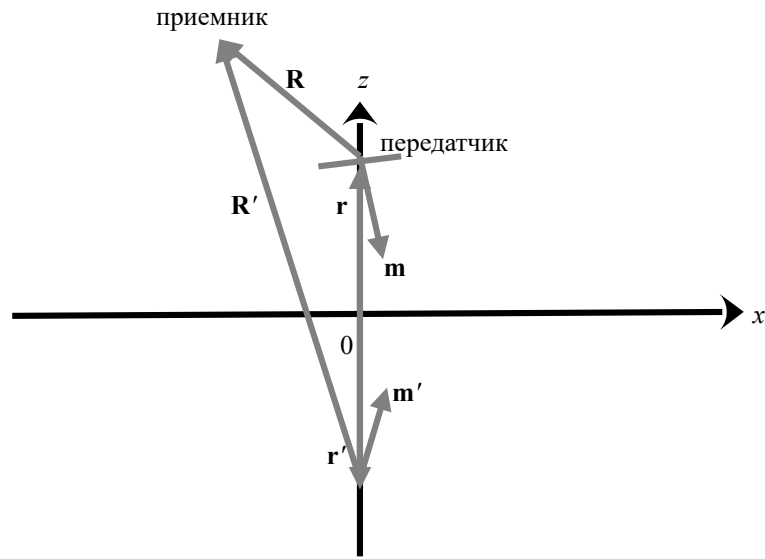


Рисунок 2.6. Отраженный диполь

Заменяя в выражении (2.13) $\mathbf{R}$ на $\mathbf{R}' = \mathbf{R} + \mathbf{r} - \mathbf{r}' = \mathbf{R} + 2\mathbf{r}$, а $\mathbf{M}$ на $\mathbf{m}'$, можно получить поле отраженного диполя:

$$\text{Re } \mathbf{b}_K^i = \frac{\mu \mu_0}{4\pi R'^3} (3\mathbf{e}'_R \mathbf{e}'_R{}^T - \mathbf{I}) \mathbf{m}'. \quad (2.28)$$

где $R' = |\mathbf{R}'|$, $\mathbf{e}'_R = \mathbf{R}'/|\mathbf{R}'|$. Тогда для остальных частот

$$\text{Re } \mathbf{b}_k^i = \text{Re } \mathbf{b}_K^i + \mathbf{b}_{kK}^i. \quad (2.29)$$

До тех пор пока для некоторой значимой высокой частоты с номером $L \neq K$

$$(\text{Re } \mathbf{b}_{KL}^i)^2 \lesssim \|E[\delta \mathbf{b}_K \delta \mathbf{b}_K^T]\|_2, \quad (2.30)$$

т. е. разность синфазных компонент на высоких частотах K и L сопоставима с уровнем шумов измерений на этих частотах, результат вычислений (2.28), (2.29) будет давать точность определения синфазной компоненты отклика сопоставимую с точностью измерений.

Конечно, для работы с индуктивным пределом нужно много дополнительной информации, в отличие от резистивного предела. Высота h измеряется радиовысотомером с точностью порядка 1% (при высоте 50 м точность около 0,5 м). Если предположить, что поверхность Земли горизонтальна (или ее наклон известен), то вектор $\mathbf{R}$ может быть определен по показаниям ГНСС приемников,

установленных в гондоле и на платформе передатчика, с точностью порядка 1 см. Направление дипольного момента может быть измерено при помощи инерциального измерительного блока с точностью несколько угловых минут. Если таких средств не предусмотрено, можно предполагать горизонтальность петли, которая по опыту эксплуатации выдерживается на уровне единиц градуса. Таким образом, пара $\mathbf{R}'$, $\mathbf{m}'$, может быть определена с точностью $10^{-2} - 10^{-3}$.

Границы применимости описанных подходов можно оценить из Рис. 2.7. Видно, что для высокоомной части при низкой частоте системы ЭКВАТОР $\omega_0 = 484,8$ рад/с ($f_0 = 77$ Гц), предельное значение применимости резистивного предела σ порядка 0.3 См/м. Для высокой частоты $\omega_k = 96\,500$ рад/с ($f_k = 15$ кГц) предельное значение применимости индуктивного предела σ порядка 3 См/м.

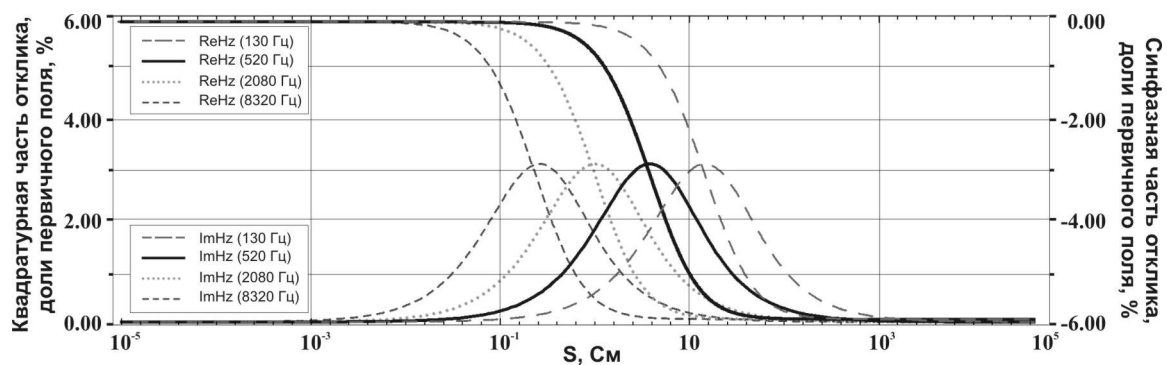


Рисунок 2.7. Отклики для однородного полупространства

Графики зависимости синфазной (ReHz) и квадратурной (ImHz) компонент отклика на указанной частоте от продольной проводимости для модели S-плоскости.

Стоит отметить, что после получения полного отклика в частотной области применение (2.21), (2.22) не к полному полю, а к полю отклика позволит получить полный отклик во временной области.

2.5. Алгоритм обработки первичных измерений

Процедура обработки данных системы ЭКВАТОР представлена на Рис. 1.13. Последовательно выполняется запуск следующих программ.

TDparse Эта программа выполняет свертки и преобразование Фурье для всех сигналов, измеренных как в приемнике (x , y , z компоненты), так и в передатчике (токи основной и двух дополнительных петель). Свертки дают требуемые сигналы: $\mathbf{B}_{mes}$, I , I_1^c , I_2^c . Результат — полные спектры измеренных сигналов в приемнике и токов в петлях передатчика.

Frq2xyz Следующий этап — коррекция сигналов с учетом изменения частотных характеристик и нормировка по измерениям токов в петлях передатчика по формулам (2.11). Результат — нормированные значения спектров измеренных сигналов для основного и дополнительных диполей. Дополнительно эта программа обеспечивает привязку данных электроразведки к данным всем навигационных систем комплекса.

Compens Завершающий этап — учет наведенного поля и динамики приемника согласно модели (2.20). Для этого предварительно задаются границы зон калибровки, т. е. зон полета в отсутствие отклика от Земли. Если таких зон несколько, подобранные параметры линейно интерполируются от одной зоны к другой. Также формируются массивы поля отклика в частотной (2.24), (2.25) и во временной (2.21), (2.22), (2.23) области.

Полученные на последнем этапе сигналы во временной и частотной области для горизонтальной (суммарно по двум горизонтальным осям) и вертикальной компонент могут обрабатываться пакетом Oasis Montaj или аналогичным.

2.6. Выводы по Главе 2

В данной главе было приведено описание всех методов и алгоритмов, предлагаемых для обработки данных комбинированной аэроэлектроразведочной системы. Приведена модель измерений, и показано, что основными составляющими модели, требующими компенсации, являются инструментальные погрешности и наведенное поле. Описаны методы и алгоритм такой компенсации.

Описаны составляющие сигналов, отвечающие полю отклика во временной и в частотной области. Предложены методы и алгоритмы выделения отклика на фоне первичного поля. Показана эквивалентность двух форм представления откликов — временной и частотной.

Дано описание способов выделения полного отклика в частотной области с дальнейшим пересчетом во временную область. Показаны границы их применимости.

На базе разработанных и описанных методов и алгоритмов предложена процедура обработки первичных измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы. Описана ее реализация для системы ЭКВАТОР.

Результаты данной главы опубликованы в работах [Волковицкий и др., 2009; Волковицкий и др., 2011a; Волковицкий и др., 2011b; Волковицкий и др., 2013; Гаракоев и Мойланен, 2018; Каршаков и др., 2020; Каршаков и Мойланен, 2013; Мойланен и Волковицкий, 2013; Тхоренко и др., 2019; Karshakov and Moilanen, 2019; Karshakov and Moilanen, 2020; Karshakov et al., 2017; Moilanen et al., 2013; Moilanen et al., 2019; Volkovitsky et al., 2012; Vovenko et al., 2013].

ГЛАВА 3. Алгоритмы интерпретации данных комбинированных аэроэлектроразведочных систем³

В данной главе описываются основные подходы к использованию данных комбинированной аэроэлектроразведочной системы для решения обратных задач, т. е. задач, при которых необходимо определить параметры источника поля по измерениям компонент поля. Такого рода задачи относятся к классу некорректно поставленных по Адамару [Адамар, 1978] и требуют регуляризации для обеспечения единственности и устойчивости решения.

Основоположниками теории решения некорректных задач являются А.Н. Тихонов [Тихонов, 1943], В.К. Иванов [Иванов, 1962], М.М. Лаврентьев [Лаврентьев, 1956]. Основная идея заключается в ограничении класса возможных решений: нужно сначала выбрать множество, в котором оно ищется. Обычно множество выбирают компактным, чтобы была возможность обосновать сходимость алгоритмов. Основные способы — использовать априорную информацию того или иного рода либо применить функционал, обеспечивающий устойчивость решения. Вероятностный подход изложен в работах Яновской Т.Б. и Пороховой Л.Н. [Яновская и Порохова, 2004].

Среди детерминированных методов наиболее распространен вариационный метод регуляризации, связанный с выбором стабилизирующего функционала

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:

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Высокоразрешающая аэроэлектроразведка в масштабе 1:5000 // Записки Горного института. – 2013. – Т. 200. – с. 19-22. (0,25 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 6,451 (РИНЦ). EDN: QLIKDV;

Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Совместная интерпретация аэроэлектроразведочных данных во временной и в частотной областях // Инженерные изыскания. – 2018. – Т. 12, № 7-8. – с. 76-83. (0,5 п.л., авторский вклад 50%). Импакт-фактор 0,088 (РИНЦ). EDN: YTOGGD.

Karshakov E.V., Podmogov Y.G., **Moilanen J.**, Kertsman V.M., Combined Frequency Domain and Time Domain Airborne Data for Environmental and Engineering Challenges // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2017. – Vol. 22, № 1. – p. 1–11. (0,69 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор 0,234 (SJR). EDN: YVMURZ.

Тихонова [Тихонов и др., 1990], как правило, в виде квадрата нормы аргумента. Алгоритм поиска решения часто строится на основе одной из модификаций метода Гаусса-Ньютона [Zhdanov, 2002]. Ключевым фактором при выборе является скорость сходимости. Оценка скорости сходимости для некорректных задач представляет отдельный интерес [Немировский, Поляк, 1984].

Стохастический подход начал формироваться такими учеными, как Л.А. Халфин [Халфин, 1958], J.N. Franklin [Franklin, 1970], А.Г. Тархов, а также их последователями: А.А. Никитин [Тархов и др., 1982], В.И. Дмитриев [Дмитриев и др., 1990], R. Forsberg [Forsberg, 1984], A. Tarantola [Tarantola, 2005]. В основе данного подхода лежит тот факт, что процесс измерения значений параметров поля всегда сопровождается случайными помехами того или иного рода. Таким образом, измеренный сигнал является реализацией некоего случайного процесса.

С алгоритмической точки зрения стохастический подход является способом регуляризации задачи [Каршаков, 2018]. Искомые параметры являются случайными величинами и описываются функцией плотности апостериорной вероятности, учитывающей погрешности измерений и всю имеющуюся априорную информацию. В качестве оценки выбираются значения параметров, обеспечивающие максимум правдоподобия [Степанов, 2003, Александров и др., 2005].

Наиболее традиционным методом решения задач по оцениванию в линейных задачах или при слабо выраженных нелинейностях является обобщенный метод наименьших квадратов, а для нелинейных задач применяются различные модификации метода Монте-Карло (ММК). При разделении полного вектора измерений на подвекторы меньшей размерности можно использовать дискретный фильтр Калмана (ФК) [Tarantola, 2005].

В статье О.Г. Эрнста и др. [Ernst et al., 2014] изложена идея, согласно которой классические методы решения обратных задач, строящиеся на алгоритме Гаусса-

Ньютона и регуляризации Тихонова, могут быть описаны в рамках калмановского подхода. Теория решения линейных задач оценивания методами калмановской фильтрации и сглаживания изложена, например, в [Александров и др., 2005] и [Simon, 2006]. В книге Д. Саймона, кроме того, описаны способы применения ФК в нелинейных задачах, а также некоторые варианты комбинирования ФК и ММК. Наконец, базовый вариант итерационного обобщенного ФК для решения нелинейных задач описан в статье [Navlik and Straka, 2015].

Существуют способы применения достаточно сложных калмановских алгоритмов в различных некорректно поставленных задачах, например связанных с изучением океана [Park and Kaneko, 2000], [Mitchell et al., 2002], [Kerpenne and Rienecker, 2003]. Говоря об аэрогеофизических методах, следует упомянуть, что фильтр Калмана стал стандартным инструментом для обработки данных авиационной гравиметрии [Olson, 2010].

Вариант применения итерационного обобщенного ФК для решения обратных задач аэроэлектроразведки описаны в работах [Karshakov, 2020], [Каршаков, 2018]. В данной работе также используется калмановский подход. При этом надо понимать, что он в некотором смысле обобщает известные общепринятые алгоритмы инверсии [Karshakov, 2020]. Но прежде чем перейти к методам и алгоритмам решения обратной задачи, следует обратить внимание на следующий аспект.

Учитывая некорректность обратной задачи и большой объем данных аэрогеофизической съемки — десятки и сотни тысяч точек измерения, — построение трехмерной модели распределения удельных электрических сопротивлений непосредственно из данных аэросъемки представляется задачей чрезвычайно трудоемкой. Как правило, первые оценки данных происходят по значениям кажущихся сопротивлений — удельных сопротивлений эквивалентного однородного полупространства для отдельных каналов в частотной и/или временной области.

Следующий шаг — решение одномерной обратной задачи, т. е. для модели горизонтально-слоистой Земли. Даже для такого простого случая обработка данных может занимать существенно больше времени, чем сама съемка. Стоит отметить, что для решения одномерной задачи не обязательно рассматривать все компоненты отклика. Для установки с соосным расположением передатчика горизонтальная компонента отклика для такой модели отсутствует, поэтому надо ориентироваться только на вертикальную компоненту. Для той геометрии установки, которая применяется в комплексе ЭКВАТОР, вполне можно ограничиться либо только горизонтальной, либо только вертикальной составляющей отклика. Но стоит иметь в виду, что при малых скоростях полета вертолета передатчик оказывается практически под приемником, поэтому горизонтальную составляющую использовать нецелесообразно. Дополнительно стоит отметить, что переменная составляющая естественного поля Земли преимущественно горизонтальна [Palacky and West, 2008], поэтому вертикальная составляющая в меньшей степени подвержена помехам. Однако хотя для решения обратной задачи применяется только одна компонента, полный учет наведенной составляющей поля был бы невозможен без применения трехкомпонентного приемника.

Лишь на заключительном этапе обработки данных аэроэлектроразведочной съемки для отдельных перспективных участков возможно выполнение трехмерного моделирования, однако это выходит за рамки данной работы.

Таким образом, далее будут рассмотрены варианты определения кажущегося сопротивления и решения одномерной обратной задачи в частотной и во временной области. А также возможности одномерной инверсии данных комбинированной системы. В основе всех алгоритмов инверсии лежат алгоритмы решения одномерной прямой задачи.

3.1. Алгоритмы решения одномерной прямой задачи аэроэлектроразведки

Для получения аналитического выражения компонент поля отклика в точке расположения приемных рамок будем пользоваться подходом, изложенным в книгах М.С. Жданова [Жданов, 1986], [Zhdanov, 2002]. Рассмотрим для начала систему с частотным возбуждением поля:

$$M = SI e^{i\omega t}. \quad (3.1)$$

Здесь M — амплитуда дипольного магнитного момента передатчика, диполь считается вертикальным, S — эффективная площадь петли (площадь, умноженная на количество витков), I — амплитуда тока в петле, ω — его частота. В воздухе переменное магнитное поле $\mathbf{B}$, его скалярный потенциал U и соответствующий двумерный пространственный спектр u — все представимы суммой внешней (с индексом e , external) и внутренней (с индексом i , internal) компонент:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}^e + \mathbf{B}^i, \quad U = U^e + U^i, \quad u = u^e + u^i \quad (3.2)$$

При этом внешнее поле есть поле вертикального магнитного диполя с моментом M , спектр потенциала которого может быть выражен следующим образом:

$$u^e(z) = \frac{\mu_0 M}{2} e^{-n_0(h_i - z)}, \quad n_0 = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}, \quad (3.3)$$

где k_x, k_y — пространственные частоты двумерного преобразования Фурье, h_i — высота передатчика над поверхностью Земли (плоская модель), z — вертикальная координата, отсчитанная от поверхности Земли.

Воспользуемся горизонтально-слоистой моделью разреза, модель которого представляется двумя массивами: $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N\}$ — удельные электропроводности слоев в См/м; $\{d_1, d_2, \dots, d_N = \infty\}$ — мощности соответствующих слоев в метрах. В рамках такой модели отношение спектров внешней и внутренней частей

потенциала поля при $z = 0$ (на поверхности) однозначно определяется спектральным магнитным импедансом разреза Z^* или приведенным спектральным импедансом R^* :

$$R^* = \text{th} \left\{ n_1 d_1 + \text{arch} \left[\frac{n_1}{n_2} \text{th} \left(n_2 d_2 + \dots \text{arch} \frac{n_{N-1}}{n_N} \right) \dots \right] \right\}, \quad Z^* = - \left(\frac{i \omega \mu_0}{n_1} \right) R^*, \quad (3.4)$$

$$n_j = \sqrt{n_0^2 - i \omega \mu_0 \sigma_j}, \quad \text{Re } n_j > 0.$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума. Связь импеданса и спектра потенциала можно записать в таком виде:

$$u|_{z=0} = u^e|_{z=0} + u^i|_{z=0} = u_0^e + u_0^i = 2 \frac{n_1 u_0^e}{n_1 + n_0 R^*}, \quad (3.5)$$

откуда

$$u_0^i = u_0^e \frac{n_1 - n_0 R^*}{n_1 + n_0 R^*}. \quad (3.6)$$

Также при $z > 0$ верно следующее представление:

$$u^i(n_0, z) = u_+^i e^{-n_0 z} + u_-^i e^{n_0 z}. \quad (3.7)$$

Для обеспечения условий затухания на бесконечности ($z \rightarrow \infty$) необходимо положить $u_-^i = 0$. Тогда

$$u^i(n_0, z) = u_0^e e^{-n_0 z} \frac{n_1 - n_0 R^*}{n_1 + n_0 R^*} = \frac{\mu_0 M e^{-n_0(z+h_i)}}{2} \cdot \frac{n_1 - n_0 R^*}{n_1 + n_0 R^*}. \quad (3.8)$$

Теперь можно получить потенциал внутренней компоненты поля, или поля отклика, выполняя обратное преобразование Фурье:

$$U^i(r, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} u^i(n_0, z) e^{-ik_x x + ik_y y} dk_x dk_y = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} u^i(n_0, z) J_0(n_0 r) n_0 dn_0, \quad (3.9)$$

где J_0 — функция Бесселя первого рода 0-го порядка, r — горизонтальное смещение от оси диполя. Функции Бесселя в общем виде могут быть записаны следующим образом:

$$J_m(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(m+k+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+m}, \quad |\arg x| < \pi. \quad (3.10)$$

Учитывая свойства $\Gamma(n)$ — гамма-функции целого аргумента, — это выражение можно переписать так:

$$J_m(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! (m+k)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+m}, \quad (3.11)$$

$\arg x \equiv 0$. Соответствующие компоненты поля получаются дифференцированием потенциала:

$$\begin{aligned} B_r^i(r, z) &= -\frac{\partial U^i(r, z)}{\partial r} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} u^i(n_0, z) J_1(n_0 r) n_0^2 dn_0, \\ B_z^i(r, z) &= -\frac{\partial U^i(r, z)}{\partial z} = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} u^i(n_0, z) J_0(n_0 r) n_0^2 dn_0, \end{aligned} \quad (3.12)$$

где J_1 — функция Бесселя первого рода 1-го порядка.

Соотношения (3.12) в совокупности с (3.11), (3.8), (3.4) — составляют основу решения одномерной прямой задачи в частотной области. Для формирования отклика во временной области при известном спектре импульса первичного поля S^{TD} достаточно выполнить преобразование Фурье (2.21).

В простом частном случае, когда модель среды — однородное

полупространство, т. е. $R^* = 1$, можно, пользуясь формулами (3.12), (3.11), (3.8), получить формулу для вычисления отклика как функции удельной электропроводности полупространства:

$$\begin{aligned} B_r^i(r, z) &= \frac{\mu_0 M}{4\pi} \int_0^\infty \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} J_1(n_0 r) e^{-n_0(z+h_i)} n_0^2 dn_0, \\ B_z^i(r, z) &= -\frac{\mu_0 M}{4\pi} \int_0^\infty \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} J_0(n_0 r) e^{-n_0(z+h_i)} n_0^2 dn_0, \\ n_1 &= \sqrt{n_0^2 - i\mu_0(\sigma\omega)}, \quad \operatorname{Re} n_1 > 0. \end{aligned} \quad (3.13)$$

где σ — удельная электропроводность полупространства.

3.2. Алгоритмы решения одномерной обратной задачи аэроэлектроразведки

Можно утверждать, что для обработки данных аэроэлектроразведки существует вполне сложившийся набор методов [Chang-Chun et al., 2015]. Отдельного упоминания заслуживают работы профессора Джима Макнэй, реализованные в программе EM Flow [Macnae et al., 1998], и решения Олденбурга, реализованные в ПО EM1DFM и EM1DTM [Farquharson et al., 2003; Farquharson and Oldenburg, 2004]. Conductivity Depth Image (CDI) трансформанты с использованием передаточных функций реализованы в [Sengpiel, 1988]. По настоящему оригинальны работы по мультипараметрической инверсии аэроэлектроразведочных данных в присутствии эффекта ИВП [Viezzoli et al., 2016; Kaminski and Viezzoli, 2017; Fiandaca et al., 2020].

Среди сложившихся методов можно выделить три основных, применяемых при решении одномерной обратной задачи: инверсия с вертикальными ограничениями (VCI — Vertically Constrained Inversion), инверсия с продольными ограничениями (LCI — Laterally Constrained Inversion), декомпозиция по сингулярным числам (SVD — Singular Value Decomposition) [Guillemoteau et al.,

2011]]. Все эти способы по разному борются с шумами измерений, однако у всех в основе лежит принцип минимизации следующего квадратичного функционала:

$$Q = \sum_{j=1}^N [F_j^{obs} - F_j^{cal}(\mathbf{m})]^2, \quad (3.14)$$

где N — количество каналов электроразведочной системы, данные которых используются в обработке, F^{obs} и F^{cal} — результат измерения и результат решения прямой задачи для модели с параметрами среды, заданными вектором $\mathbf{m} = (\rho_1, h_1, \rho_2, h_2, \dots)$, в котором $\rho_j = 1/\sigma_j$ — удельное электрическое сопротивление, а h_j — мощность соответствующего однородного слоя.

Подавляющее большинство современных аэроэлектроразведочных систем использует вертикальный магнитный диполь для генерации сигнала возбуждения, а в обработке использует вертикальную компоненту отклика [Smith, 2014]. Соответственно, функция F в формуле (3.14) может быть рассчитана как вертикальная компонента отклика для определенной частоты ω по формуле (3.12) с учетом импеданса (3.4). Указанных выше соотношений достаточно, чтобы решить прямую задачу в одномерном случае и получить функцию F для частотных аэроэлектроразведочных систем. Действительная часть (3.12) дает синфазную компоненту отклика, а мнимая часть — квадратурную.

Для получения модели отклика во временной области достаточно свернуть частотную характеристику моделируемой среды, компоненты которой рассчитываются при единичной амплитуде дипольного момента, с известным спектром первичного поля по формуле (2.21).

3.2.1. Постановка стохастической задачи оценивания

Чтобы обеспечить минимизацию функционала (3.14), можно сформулировать

следующую стохастическую задачу оценивания. Пусть для каждого момента времени t_j измерения аэроэлектроразведочной системы задает вектор $\mathbf{z}_j$ размерности N . При этом пусть модель среды для данной точки описывается вектором параметров $\mathbf{x}_j$ размерности K , а параметры поля определяются на основе решения прямой задачи вектор-функцией $\mathbf{h}_j(\mathbf{x}_j)$, размерность которой соответствует размерности вектора измерений N . Алгоритм оценивания строится на предположении, что вектор измерений удовлетворяет следующей модели:

$$\mathbf{z}_j = \mathbf{h}_j(\mathbf{x}_j) + \mathbf{r}_j, \quad E[\mathbf{r}_j] = 0, \quad E[\mathbf{r}_j \mathbf{r}_k^T] = \mathbf{R}_j \delta_{jk}, \quad (3.15)$$

где $\mathbf{r}_j$ — вектор помех измерений, который моделируется гауссовским белым шумом с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей $\mathbf{R}_j$, $E[\cdot]$ обозначает математическое ожидание, δ_{jk} — символ Кронекера: $\delta_{jk} = 1$ при $j = k$ и $\delta_{jk} = 0$ в остальных случаях.

Модель поведения вектора параметров среды в зависимости от времени задается следующим образом:

$$\mathbf{x}_{j+1} = \mathbf{f}_j(\mathbf{x}_j) + \mathbf{q}_j, \quad E[\mathbf{q}_j] = 0, \quad E[\mathbf{q}_j \mathbf{q}_k^T] = \mathbf{Q}_j \delta_{jk}, \quad (3.16)$$

где $\mathbf{q}_j$ — вектор случайной составляющей, который моделируется гауссовским белым шумом с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей $\mathbf{Q}_j$. По сути данный вектор позволяет задавать степень коррелированности параметров в последовательных точках измерения. При этом зависимость (3.16) можно рассматривать как пространственную, т. е. задавать матрицу $\mathbf{Q}_j$ и вектор $\mathbf{f}_j$, исходя из пройденного расстояния за интервал времени с учетом известной скорости [Karshakov and Kharichkin, 2008].

Задача 1. Пусть вектор состояния $\mathbf{x}$ удовлетворяет системе уравнений (3.16). По набору измерений (3.15), требуется определить такие значения вектора $\tilde{\mathbf{x}}_j$, что их отклонения от истинных значений $\mathbf{x}_j$ минимальны в соответствующие моменты времени j .

Для решения задачи 1 следует задать начальную оценку вектора параметров

$\tilde{\mathbf{x}}_0^-$, которая никак не учитывает измерений, а отражает лишь априорную информацию о среде. Для этого вектора из эмпирических соображений вводится априорное значение ковариационной матрицы ошибки оценки $\mathbf{P}_0^-$:

$$\tilde{\mathbf{x}}_0^- = E[\tilde{\mathbf{x}}_0], \quad \mathbf{P}_0^- = E[\tilde{\mathbf{x}}_0 \tilde{\mathbf{x}}_0^T]. \quad (3.17)$$

В такой постановке Задача 1 может быть решена при помощи алгоритма фильтра Калмана. Но прежде чем перейти к его описанию, необходимо сделать несколько замечаний, касающихся входящих в модель параметров — матриц $\mathbf{R}$, $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{P}_0^-$.

Матрицу $\mathbf{R}$ в задаче аэроэлектроразведки можно задать с учетом результатов калибровочного полета на большой высоте. Как правило, электроразведочные системы поднимают на достаточно большую высоту (700 м), на которой откликами от земной поверхности можно пренебречь. Статистические характеристики сигналов полностью задают матрицу $\mathbf{R}$ (3.15). Наиболее простой способ — задать ее диагональной, таким образом, чтобы на диагонали стояли дисперсии сигналов, полученные при калибровке в соответствующем канале измерений.

Матрица $\mathbf{Q}$ (3.16) по сути описывает допустимую моделью степень изменения параметров модели от одной точки измерений к другой — на диагонали стоят дисперсии приращений соответствующих параметров. Ясно, что чем больше расстояние между соседними точками, тем больше должна быть изменчивость модели. Поэтому логично задать степень изменения на метр $\mathbf{Q}^1$, и в дальнейшем брать $\mathbf{Q}_j = \nu_j^2 \mathbf{Q}^1$, где ν_j — модуль текущей скорости авиационного носителя. При этом сама модель может быть тривиальной: $\mathbf{f}_j(\mathbf{x}_j) = \mathbf{x}_j$.

Наконец, матрица $\mathbf{P}_0^-$, которая характеризует достоверность априорного знания модели, должна содержать дисперсии ошибок знания соответствующих параметров на диагонали и коэффициенты их корреляции вне диагонали.

3.2.2. Алгоритм итерационного обобщенного фильтра Калмана

Задача решается в цикле, на каждом шаге которого реализуются этап коррекции и этап прогноза. Этап прогноза — переход от апостериорных оценок в момент $j - 1$ к априорным в момент j :

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{x}}_j^- &= \mathbf{f}_{j-1}(\tilde{\mathbf{x}}_{j-1}^+), \\ \mathbf{P}_j^- &= \mathbf{A}_{j-1} \mathbf{P}_{j-1}^+ \mathbf{A}_{j-1}^T + \mathbf{Q}_{j-1}, \quad \mathbf{A}_{j-1} = \frac{\partial \mathbf{f}_{j-1}}{\partial \mathbf{x}}.\end{aligned}\quad (3.18)$$

Поскольку $\mathbf{f}$ априори неизвестна, иначе не было бы необходимости делать съемку, вся информация о среде и ее изменчивости закладывается в случайную составляющую модели — вектор $\mathbf{q}$. Матрица $\mathbf{A}$ — единичная.

Этап коррекции — переход от априорных оценок к апостериорным в момент j :

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{x}}_j^{k+} &= \tilde{\mathbf{x}}_j^{k-} + \mathbf{K}_j^k (\mathbf{z}_j - \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k-})), \\ \mathbf{P}_j^{k+} &= \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_j^k \frac{\partial \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^k)}{\partial \mathbf{x}} \right) \mathbf{P}_j^{k-}, \\ \mathbf{K}_j^k &= \mathbf{P}_j^{k-} \left(\frac{\partial \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k-})}{\partial \mathbf{x}} \right)^T \left[\frac{\partial \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k-})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{P}_j^{k-} \left(\frac{\partial \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k-})}{\partial \mathbf{x}} \right)^T + \mathbf{R}_j \right]^{-1}.\end{aligned}\quad (3.19)$$

Здесь функция $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ — нелинейна. Поэтому этап коррекции следует выполнять в несколько итераций, верхний индекс k в (3.19) обозначает номер итерации. На каждом шаге итерации необходимо заново пересчитывать матрицу Якоби $\partial \mathbf{h}_j / \partial \mathbf{x}$ и коэффициент фильтра $\mathbf{K}_j^k$. Условием выхода из итерационной процедуры следует считать достижение минимума величины невязки:

$$\|\mathbf{z}_j - \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k+})\| = \sqrt{(\mathbf{z}_j - \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k+}))^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z}_j - \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k+}))}. \quad (3.20)$$

В предположении о гауссовой природе шумов измерений это будет соответствовать максимуму правдоподобия, т. е. максимуму соответствующей функции распределения.

На каждом шаге итерации, кроме финального, предлагается выполнять реинициализацию фильтра:

$$\tilde{\mathbf{x}}_j^{k-} = \tilde{\mathbf{x}}_j^{k-1+}, \quad \mathbf{P}_j^{k-} = \mathbf{P}_j^{k-1-}. \quad (3.21)$$

Эмпирическая формула пересчета ковариационной матрицы $\mathbf{P}$, хотя и делает работу фильтра неоптимальной, все-таки позволяет избежать слишком быстрого уменьшения нормы от итерации к итерации, которое будет происходить из-за того, что формулы (3.19) для $\mathbf{P}$ не учитывают нелинейности $\mathbf{h}$.

Хорошо известно, что удельное электрическое сопротивление пород подчиняется логнормальному распределению [Palacky, 1987]. По этой причине часто рассматривают задачу подбора логарифмов удельных сопротивлений [Guillemoteau et al., 2011]. Это незначительно меняет условия: если x_k , k -я компонента вектора $\mathbf{x}$, отвечает удельному сопротивлению ρ_j , то можно ввести $x_k = \ln \rho_j$ и учесть это в выражении (3.19). Соответственно, при численном определении матрицы $\partial \mathbf{h}_j / \partial \mathbf{x}$ аддитивная вариация x_k будет соответствовать мультипликативной вариации ρ_j :

$$x_k + \delta x_k \rightarrow \rho_j (1 + \Delta x_k), \quad x_k - \delta x_k \rightarrow \frac{\rho_j}{(1 + \Delta x_k)}, \quad \delta x_k = \ln (1 + \Delta x_k) \quad (3.22)$$

Обсуждая основные методы решения одномерных обратных задач, стоит отметить, что форма решения, приведенная в (3.19), в общем виде схожа с традиционно рассматриваемыми формами для SVD, VCI, LCI. Важно, что при инверсии с вертикальными (VCI) и продольными (LCI) ограничениями подбираются только удельные сопротивления слоев с фиксированными наперед заданными мощностями.

Для введения вертикальных ограничений в матрицу, отвечающую за стабилизацию решения, вводятся внедиагональные элементы (в работе [Guillemoteau et al., 2011] в части, посвященной VCI, это матрица $\mathbf{S}$). В терминологии калмановского подхода это эквивалентно добавлению априорной

информации о коррелированности удельных сопротивлений соседних слоев: матрица $\mathbf{P}^-$ на этапе коррекции также должна содержать внедиагональные элементы. Этого можно добиться, если задавать эту матрицу на каждом шаге заново в том виде, в каком она задана в [Guillemoteau et al., 2011].

Для целей введения продольных ограничений за стабилизацию отвечает диагональная матрица (в работе [Guillemoteau et al., 2011] в части, посвященной LCI, это матрица $\lambda^2 \mathbf{I}$). В терминологии калмановского подхода это эквивалентно добавлению априорной информации о коррелированности пространственно соседних отсчетов: матрица $\mathbf{P}^-$ на этапе коррекции по норме должна быть сопоставима с матрицей $\mathbf{R}$. Этого можно добиться, задавая соответствующим образом матрицу $\mathbf{Q} = \nu^2 \mathbf{Q}^1$. Диагональные элементы $\mathbf{Q}^1$ по сути должны отражать, насколько может измениться сопротивление при смещении на один метр вдоль профиля.

Сингулярное разложение (SVD) обычно применяется при задании ковариационной матрицы ошибки оценки для обеспечения вычислительной устойчивости алгоритма. Используется либо метод корня, либо U-D разложение:

$$\mathbf{P} = \mathbf{S} \mathbf{S}^T \text{ или } \mathbf{P} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{U}^T, \quad (3.23)$$

где $\mathbf{S}$ — нижнетреугольная матрица, называемая квадратным корнем из $\mathbf{P}$, $\mathbf{U}$ — верхнетреугольная матрица с единицами на диагонали, $\mathbf{D}$ — диагональная матрица, на диагонали которой стоят сингулярные числа исходной матрицы $\mathbf{P}$. В литературе описаны алгоритмы этапов прогноза и коррекции непосредственно с матрицами $\mathbf{S}$ или $\mathbf{U}$ и $\mathbf{D}$ [Simon, 2006].

Также важно сказать о дополнительных возможностях, открывающихся при использовании фильтра Калмана. Во-первых, как можно видеть, такая постановка позволяет гармонично комбинировать существующие методики инверсии. Во-вторых, можно применять дополнительные механизмы, разработанные для фильтра Калмана. Данный подход дает возможность анализировать полученное

решение с помощью стохастических мер оценивания [Golovan and Parusnikov, 1998]. Например, величина:

$$\mu = 1 - \sqrt{\frac{\mathbf{a}^T \mathbf{P}_j^+ \mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \mathbf{P}_j^- \mathbf{a}}} \quad (3.24)$$

определяет меру оцениваемости величины, задаваемой в пространстве параметров вектором $\mathbf{a}$, в конкретной точке с индексом j — чем ближе μ к 1, тем лучше оценка. Сравнение таких мер позволяет не только оценивать качество решения по невязке, но и получить относительную достоверность полученных параметров для данного решения — какие удельные сопротивления оценились лучше, какие хуже.

3.3. Алгоритмы расчета кажущихся сопротивлений для комбинированных аэроэлектроразведочных систем

Изложенные выше алгоритмы можно использовать для решения обратных задач различного уровня: как, например, расчет кажущихся удельных электрических сопротивлений, карты которых могут давать значимую для интерпретации информацию.

3.3.1. Алгоритмы вычисления кажущихся сопротивлений во временной области

Под кажущимся удельным электрическим сопротивлением традиционно понимается сопротивление эквивалентного однородного полупространства [Ward, Hohman, 1988]. Как правило, данный параметр вычисляется для одного из каналов в частотной или во временной области. При этом геометрия считается полностью

известной, а именно взаимное расположение передатчика и приемника и высота установки над поверхностью Земли. В случае системы ЭКВАТОР координаты передатчика и приемника известны по данным соответствующих ГНСС приемников, а высота — по измерениям радиовысотомера на платформе передатчика.

Наиболее распространенный в настоящее время метод вычисления кажущихся сопротивлений — при помощи палеток [Матвеев, 1982]. Палетки — это заранее полученные матрицы, связывающие сигнал, геометрию и удельное сопротивление. Имея такие матрицы, можно практически в реальном времени для измеренных значений сигнала отклика и высоты над рельефом получить (вычитать из матрицы) величину кажущегося удельного сопротивления по соответствующему каналу.

Для формирования палеток расчета кажущихся сопротивлений во временной области необходимо использовать соотношения (3.13) для всего спектра частот, а затем осуществить преобразование Фурье (2.21) и (2.22) и выполнить осреднение по отсчетам времени, отвечающим временным каналам системы (Таблица 1.3):

$$x_i = \ln \frac{\sum_{j=i_{(i-1)}}^{j_i} b_{z,j}}{j_i - j_{i-1}}, \quad dx_i = \ln \frac{\sum_{j=i_{(i-1)}}^{j_i} \frac{db_{z,j}}{dt}}{j_i - j_{i-1}}. \quad (3.25)$$

Здесь i — номер временного канала, j_j, j_{i-1} — его границы в отсчетах АЦП, на соответствующей оси палеток берутся логарифмы отклика.

Варьируя логарифм удельных электропроводностей полупространства $\ln \sigma = -\ln \rho$ и логарифм высоты в формате

$$y = \ln(z + h_t) = \ln(2h_t + d_z), \quad (3.26)$$

где z — высота приемника над Землей, h_t — высота передатчика, $d_z = z - h_t$ — вертикальное смещение между передатчиком и приемником, вычисленное по

показаниям ГНСС в относительном дифференциальном режиме, можно получить набор функций

$$dx_i(\ln \sigma, y) [x_i(\ln \sigma, y)] \quad (3.27)$$

в широком диапазоне изменения $\ln \sigma$ и y , можно построить матрицы зависимости удельных сопротивлений (электропроводностей) от суммарной высоты (3.26) и отклика (3.25) (палетки):

$$\ln \sigma(dx_i, y) [\ln \sigma(x_i, y)]. \quad (3.28)$$

Стоит отметить, что с ростом электропроводности отклики начинают убывать, над идеальным проводником отклики после выключения тока в петле нулевые. По этой причине функции (3.28) неоднозначны. При необходимости возможно использовать два варианта палеток — для обычной и для низкоомной среды.

Палетки (3.28) можно использовать для первичной интерпретации сигналов во временной области и построения карт кажущихся сопротивлений, а также для построения псевдоразрезов (разрезов кажущихся сопротивлений) [Masnae et al., 1991]. Для этой цели необходимо вычислить кажущиеся глубины [Стогний, Коротков, 2010]:

$$\delta_i = k \sqrt{\frac{t_i \rho_i}{\mu_0}}, \quad (3.29)$$

где t_i — время, отсчитанное от момента выключения зондирующего тока, относящееся к середине i -го интервала временного накопления, ρ_i — вычисленное значение кажущегося удельного сопротивления, k — коэффициент, близкий к единице, обычно $k = 1$.

Опыт применения палеток на практике показывает, что разрезы кажущихся сопротивлений, построенные по значениям поля (x_i) и его производной (dx_i),

получаются разными. В первом случае сопротивления на больших глубинах оказываются в значительной мере коррелированы с сопротивлениями верхней части разреза. По этой причине на практике оказываются более информативными разрезы, построенные по скорости спада поля (dx_i). Некоторые авторы отмечают близость таких псевдоразрезов и результатов объемного моделирования [Legault et al., 2015].

3.3.2. Алгоритмы вычисления кажущихся сопротивлений в частотной области

Расчет кажущихся сопротивлений в частотной области может проходить по алгоритмам, аналогичным временной области. Однако необходимо отметить несколько нюансов.

Зависимость решения прямой задачи (3.13) от частоты ω_i (или циклической частоты f_i) может быть выражена через параметр $\sigma\omega_i = 2\pi\sigma f_i$. Это позволяет ограничиться одной палеткой, рассчитанной, например, для частоты $f_1 = 1$ Гц, а далее масштабировать полученное значение кажущейся электропроводности:

$$\rho_i = \rho_1 \cdot f_i, \quad \left[\sigma_i = \frac{\sigma_1}{f_i} \right]. \quad (3.30)$$

Расчет же палеток для частотной области можно выполнять несколькими способами. Пусть

$$x_R = \ln \operatorname{Re} B_z(2\pi\sigma, y), \quad x_I = \ln \operatorname{Im} B_z(2\pi\sigma, y). \quad (3.31)$$

Тогда можно получить следующие палетки:

$$\ln \sigma_I(x_I, y), \ln \sigma_R(x_R, y), \ln \sigma_{IR}(x_R, x_I). \quad (3.32)$$

Для варианта σ_{IR} возможно также получение зависимости $y(x_R, x_I)$, которая позволяет определить кажущуюся высоту.

К сожалению, никакая из палеток (3.32) не применима во всем диапазоне сигналов [Fraser, 1987]: в высокоомной области лучше работает палетка σ_I , т. к. синфазная часть отклика мала, в зоне максимума мнимой компоненты — σ_R , т. к. зависимость квадратурной компоненты от сопротивления слабая, в низкоомной — σ_{IR} или σ_R , т. к. имеется неоднозначность по квадратурной компоненте. Однако в случае неоднородного разреза все три палетки дадут разное значение кажущегося сопротивления. По этой причине нет определенного способа перехода с одной палетки на другую при изменении параметров среды.

Еще один аспект — трудности с выделением синфазной компоненты отклика. Чтобы работали аппроксимации (2.26), (2.29), необходимо выполнение неравенств (2.27) и (2.30) соответственно, контролировать которое на практике весьма затруднительно. И хотя палетки σ_{IR} и σ_R обеспечивают однозначность решения во всем диапазоне чувствительности системы, палетка σ_I оказывается удобнее для применения на практике.

В качестве альтернативы предлагается следующее. Поскольку размерность обратной задачи для однородного полупространства минимальна — только одно сопротивление, можно искать кажущееся сопротивление как решение обратной задачи при помощи алгоритма (3.18), (3.19), где в качестве функции $\mathbf{h}$ используется (3.13).

Чтобы гарантировать адекватность синфазной составляющей вне зависимости от свойств разреза, предлагается формировать вектор измерений для частоты f_i с помощью измерения на соседней частоте следующим образом:

$$\mathbf{z}_i = \begin{Bmatrix} \operatorname{Im} B_{zi}(2\pi f_i \sigma, y) \\ \operatorname{Re} B_z(2\pi f_i \sigma, y) - \operatorname{Re} B_z(2\pi f_{i\pm 1} \sigma, y) \end{Bmatrix}. \quad (3.33)$$

Сравнение кажущихся сопротивлений, полученных с помощью палеток и с помощью решения обратной задачи, приведено на Рис. 3.1. На нижнем графике для частоты 2 кГц приведены два решения — для низкоомной (пунктир) и высокоомной (сплошная) части палетки σ_l . Видно, что в правой части высокоомная часть работает адекватно, а в левой — достаточно много интервалов, где невозможно выбрать правильное решение.

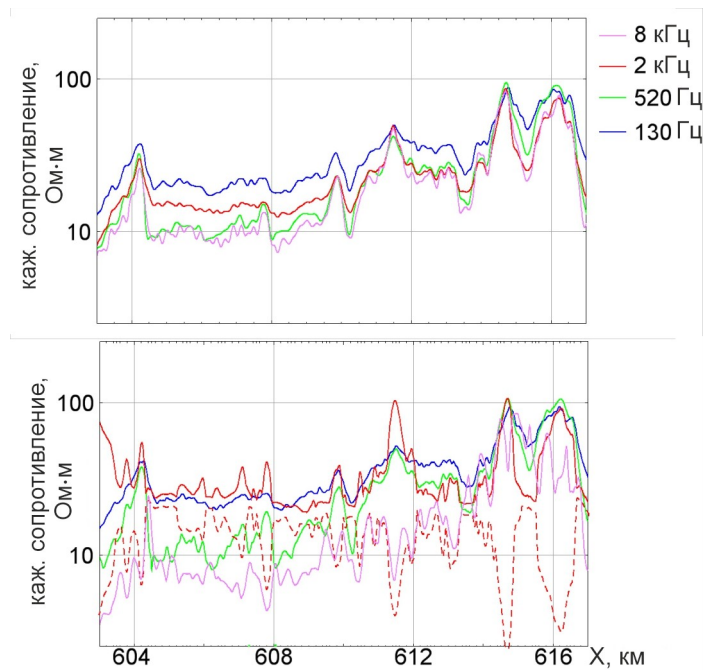


Рисунок 3.1. Сравнение кажущихся сопротивлений

решение обратной задачи (вверху), расчет по палеткам (внизу)

В качестве недостатков предложенного метода можно отметить, что вектор (3.33) обладает неоднозначностью, т. к. приращение синфазных компонент стремится к 0 как при высоких, так и при низких сопротивлениях. Однако эта неоднозначность на практике возникает при очень низких сопротивлениях в доли Ом·м.

3.4. Алгоритмы решения одномерной обратной задачи для комбинированных аэроэлектроразведочных систем

Для решения одномерной обратной задачи также предлагается использовать алгоритм (3.18), (3.19), где в качестве основы для функции $\mathbf{h}$ используется (3.12). Для работы алгоритма необходимо задать следующие параметры:

- модель среды, т. е. структуру вектора $\mathbf{x}$: количество подбираемых слоев, их мощности, если они не подбираются при решении обратной задачи;
- априорные значения параметров среды $\mathbf{x}_0$;
- начальные значения дисперсии ошибки знания параметров вектора $\mathbf{x}$: диагональная матрица $\mathbf{P}_0$;
- степень коррелированности сопротивлений между слоями, внедиагональные элементы матрицы $\mathbf{P}_0$;
- степень изменчивости $\mathbf{x}$ от точки к точке: диагональная матрица $\mathbf{Q}$ (матрица $\mathbf{A}$ — единичная);
- структура вектора измерений $\mathbf{z}$: те или иные компоненты измеренного поля в частотной и временной областях;
- дисперсии и коэффициенты корреляции шумов измерений для каждого канала: матрица $\mathbf{R}$.

Расчет матрицы Якоби $\partial \mathbf{h} / \partial \mathbf{x}$ в (3.19) осуществляется через последовательное варьирование каждой компоненты вектора $\mathbf{x}$ и решение соответствующей прямой задачи:

$$\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial x_i} = \frac{\mathbf{h}(\mathbf{x} + \delta_i \mathbf{x}) - \mathbf{h}(\mathbf{x})}{v_i}, \quad \delta_i \mathbf{x} = (0, \dots, 0, v_i, 0, \dots, 0)^T. \quad (3.34)$$

При работе с аэрогеофизическими данными чаще всего приходится иметь дело с полным отсутствием априорной информации о разрезе. Поэтому целью данной

работы является создание максимально «слепой» инверсии. Далее будут рассмотрены два основных варианта решения задачи.

3.4.1. Одномерная инверсия с подбором мощности слоев

В некоторых задачах возможно наличие априорной информации об общей структуре разреза. Это позволяет фиксировать количество слоев. Тогда вектор параметров имеет структуру:

$$\mathbf{x} = (\ln \rho_1, \ln \rho_2, \dots, \ln \rho_n, d_0, d_1, d_2, \dots, d_{n-1}), \quad (3.35)$$

где n — количество слоев, ρ_i — сопротивление i -го слоя в Ом·м, d_0 — погрешность измерения высоты в м, d_i — мощность i -го слоя в м, мощность слоя номер n принимается бесконечной. Подбор поправки высоты оказывается целесообразным при работе в области высокопроводящих сред, таких как морская вода, поскольку сигналы электроразведочной системы оказываются более чувствительными, чем точность радиовысотомера, которая обычно составляет до 3%.

Если сопротивления пород априори неизвестны, можно использовать в качестве стартовой модели однородное полупространство. Начальное сопротивление однородного полупространства предлагается задать равным кажущемуся сопротивлению ρ_{a0} на самой низкой частоте f_0 по вектору измерений (3.33) с помощью алгоритма инверсии, как описано в разделе 3.3.2.:

$$x_{0i} = \ln \rho_{a0}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (3.36)$$

Если задан диапазон $(\rho_{i \min}, \rho_{i \max})$, то

$$x_{0i} = \frac{1}{2} \ln \frac{\rho_{i \max}}{\rho_{i \min}}. \quad (3.37)$$

Начальное значение дисперсии для сопротивлений задается из представлений

о возможном диапазоне сопротивлений ($\rho_{i \min}$, $\rho_{i \max}$):

$$P_{0ii} = \frac{1}{16} \left(\ln \frac{\rho_{i \max}}{\rho_{i \min}} \right)^2. \quad (3.38)$$

В случае стартовой модели в виде однородного полупространства дисперсия для всех слоев одинакова.

Начальное значение и дисперсия для поправки d_0

$$x_{0n+1} = 0, \quad P_{0n+1n+1} = (0.03 h_t)^2. \quad (3.39)$$

Здесь h_t — высота платформы передатчика по измерениям радиовысотомера.

Априорные значения мощности должны быть заданы с точностью до диапазона ($d_{i \min}$, $d_{i \max}$).

$$x_{0n+1+i} = \frac{1}{2} (d_{i \max} - d_{i \max}), \quad P_{0n+1+i n+1+i} = \frac{1}{16} (d_{i \max} - d_{i \max})^2. \quad (3.40)$$

Матрицу $\mathbf{Q}$ удобно задавать через матрицу $\mathbf{P}_0$:

$$\mathbf{Q} = k \mathbf{P}_0, \quad k < 1. \quad (3.41)$$

Из (3.19) очевидно, что чем больше k , тем более независимые друг от друга решения будут получены в соседних точках.

Впрочем, возможна также реализация следующей, более «слепой» схемы инверсии:

- по полному вектору измерений подбирается модель однородного полупространства;
- при разделении ее на два слоя с одинаковыми удельными сопротивлениями она берется в качестве исходной модели для двухслойной инверсии;

- при наличии двухслойного решения каждый из слоев разделяется таким же образом, и получаются трехслойные решения для каждой исходной модели, из которых выбирается наилучшее с точки зрения величины невязки (3.20);
- таким же образом увеличивается количество слоев;
- если более сложная модель не уменьшает невязки, процедура останавливается;
- если невязка сопоставима с уровнем шума, процедура тоже останавливается.

Вектор измерений предлагается формировать следующим образом:

$$\mathbf{z}_i = \begin{pmatrix} \text{Im } B_{z0}(2\pi f_0) \\ \text{Re } B_z(2\pi f_0) - \text{Re } B_z(2\pi f_1) \\ \dots \\ \text{Im } B_z(2\pi f_{s-1}) \\ \text{Re } B_z(2\pi f_{s-1}) - \text{Re } B_z(2\pi f_s) \\ \text{Im } B_z(2\pi f_s) \\ db_{z1}/dt \\ \dots \\ db_{zl}/dt \end{pmatrix}. \quad (3.42)$$

Здесь s — количество используемых частотных каналов, l — количество используемых временных каналов. Если какой-то из указанных параметров равен 0, решение будет либо чисто в частотной, либо чисто во временной области.

Компоненты самого поля $\mathbf{b}$ во временной области предлагается не включать, т. к. они в первом приближении получаются при суммировании (интегрировании) компонент скорости спада. Можно говорить о том, что в целом отклики во временной области могут быть получены по откликам в частотной области, т. к. преобразование Фурье — линейная операция. Однако основания для рассмотрения комбинированного вектора будут представлены ниже.

Составляющие матрицы $\mathbf{R}$ можно задавать, анализируя шумы квадратурных компонент отклика, разностей синфазных откликов, а также откликов во временной области в зоне калибровки системы на большой высоте, где отклики от Земли пренебрежимо малы, т. е. вектор измерений в зоне калибровки $\mathbf{z}_c$, заданный соотношениями (3.42), в зоне калибровки содержит только шумы измерений:

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{z}_c \mathbf{z}_c^T]. \quad (3.43)$$

3.4.2. Одномерная инверсия с фиксированными мощностями слоев

Вариант, когда отсутствует всякая информация о структуре разреза, встречается наиболее часто. В этом случае в мировую практику вошел вариант инверсии с фиксированным набором n слоев с мощностями

$$\mathbf{D}_n = (d_1, d_2, \dots, d_{n-1}), \quad (3.44)$$

мощность слоя номер n принимается бесконечной, а изменение сопротивлений между слоями выбирается по возможности гладким [Constable et al., 1987]. При этом количество слоев может быть избыточным — несколько десятков. Мощности, как правило, растут с глубиной экспоненциально — от единиц до десятков метров.

В этом случае вектор параметров имеет структуру:

$$\mathbf{x} = (\ln \rho_1, \ln \rho_2, \dots, \ln \rho_n, d_0), \quad (3.45)$$

где n — количество слоев, ρ_i — сопротивление i -го слоя в Ом·м, d_0 — погрешность измерения высоты в м.

В качестве стартовой модели используется однородное полупространство с сопротивлением ρ_{a0} , определенным на самой низкой частоте f_0 по вектору измерений (3.33) с помощью алгоритма инверсии:

$$x_{0i} = \ln \rho_{a0}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (3.46)$$

Начальное значение дисперсии для сопротивлений задается из представлений о возможном диапазоне сопротивлений (ρ_{min} , ρ_{max}):

$$P_{0ii} = \frac{1}{16} \left(\ln \frac{\rho_{max}}{\rho_{min}} \right)^2. \quad (3.47)$$

В случае стартовой модели в виде однородного полупространства дисперсия для всех слоев одинакова. Для обеспечения сглаживания между слоями следует задать априорное значение коэффициента корреляции для соседних слоев:

$$P_{0ii+1} = P_{0i+1i}, \quad P_{0ii+1} < P_{0ii}. \quad (3.48)$$

Начальное значение и дисперсия для поправки d_0

$$x_{0n+1} = 0, \quad P_{0n+1n+1} = (0.03 h_t)^2. \quad (3.49)$$

Здесь h_t — высота платформы передатчика по измерениям радиовысотомера.

Вектор измерений $\mathbf{z}$ и матрицу шумов $\mathbf{R}$ следует задавать исходя из (3.42) и (3.43), соответственно.

Отдельно следует сказать об эффективности расчета мер оцениваемости (3.24). Выбирая вектор $\mathbf{a}$ так, чтобы исследовать меры оцениваемости сопротивлений для каждого слоя, можно получить набор

$$\mu_i = 1 - \sqrt{\frac{P_{ii}^+}{P_{ii}^-}}. \quad (3.50)$$

Опыт применения показывает, что меры оцениваемости, как правило, убывают с ростом i , т. е. с ростом глубины. Задав пороговое значение, можно в автоматическом режиме определить изменение степени достоверности

результатов инверсии с глубиной. К сожалению, меры оцениваемости зависят от значения сопротивлений: чувствительность отклика к вариациям сопротивлений на одной и той же глубине в проводящих породах оказывается выше, чем в высокоомных, что может привести к лучшим мерам оцениваемости, но это не означает, что в высокоомном случае решение менее достоверное.

3.5. Исследование алгоритмов решения одномерной обратной задачи для комбинированных аэроэлектроразведочных систем

Для обоснования применения совместного вектора измерений во временной и в частотной области вида (3.42) в этом разделе рассматриваются несколько модельных задач, на которых сопоставляются решения в частотной, во временной области и комбинированное решение.

3.5.1. Модель однородного полупространства

На Рис. 3.2 показан расчетный график невязки (3.20) сигналов откликов для модели однородного полупространства с удельным сопротивлением $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и с произвольным удельным сопротивлением. Невязка — величина безразмерная, нормированная на среднеквадратическое отклонение шумов соответствующих сигналов в зоне компенсации. При расчетах задействованы все частотные и временные каналы согласно таблицам 1.3 и 1.4. Очевидно, что при начальном значении сопротивления более $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ решение и в частотной, и во временной областях будет сходиться к значению $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. При этом даже для модели однородного полупространства максимумы функций невязок находятся в разных точках: в частотной области максимум достигается в точке $9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а во временной области — в точке $3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

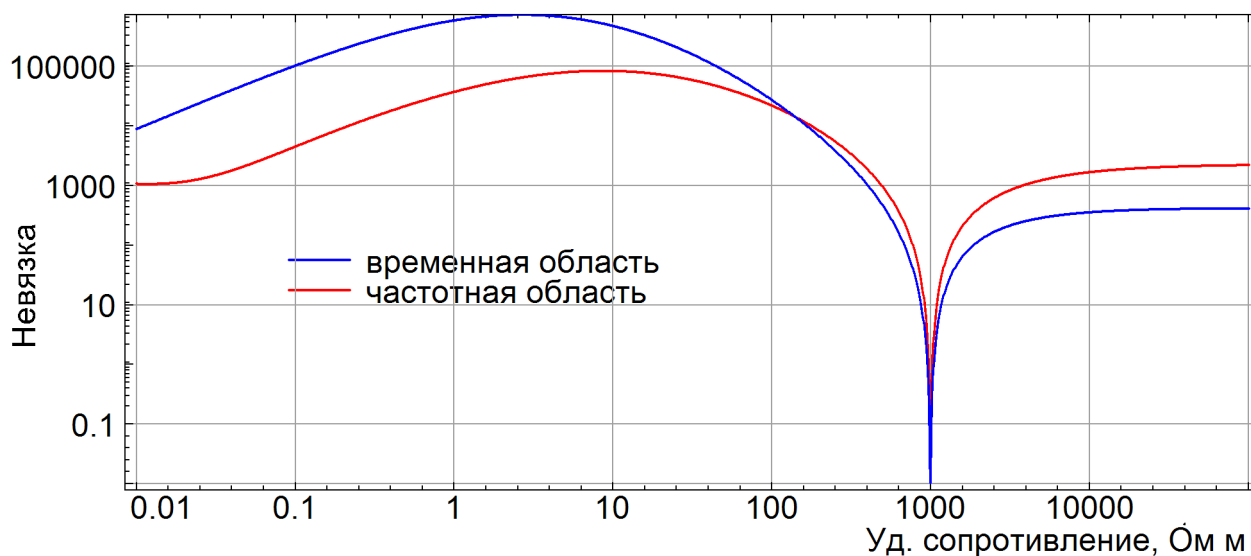


Рисунок 3.2. Невязка для модели однородного полупространства с произвольным удельным сопротивлением (ось X) и для модели 1000 Ом·м во временной и частотной областях

Это означает, что при обработке только частотных данных для корректной сходимости важно, чтобы начальное приближение было более 9 Ом·м, а наличие временных каналов расширяет данную область до 3 Ом·м.

3.5.2. Модель двухслойной среды

На Рис. 3.3 приведены функции невязок сигналов в частотной и во временной области в зависимости от сопротивления основания и мощности верхнего слоя для следующей модели двухслойной среды:

- первый слой сопротивлением 2000 Ом·м мощностью 200 м;
- основание сопротивлением 10 Ом·м.

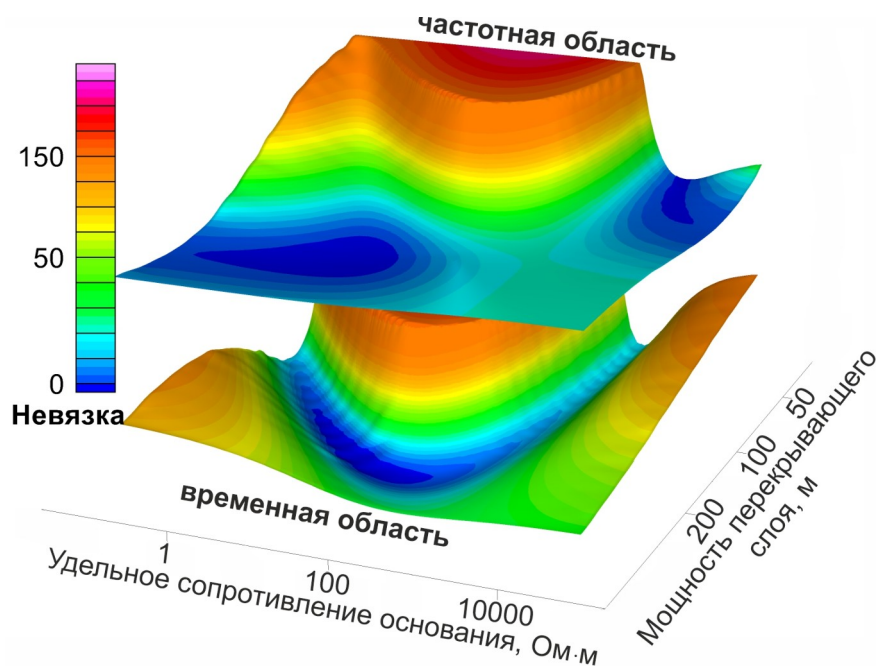


Рисунок 3.3. Невязка между рассчитанным откликом для модели двуслойной среды с меняющимся сопротивлением основания и мощностью верхнего слоя и отклика от модели (перекрывающий слой 2000 Ом·м мощностью 200 м и основание 10 Ом·м) для частотной (вверху) и временной (внизу) областей

Можно видеть, что при неудачном выборе начального приближения для частотной области можно получить решение, отвечающее локальному минимуму в точке:

- первый слой сопротивлением 2000 Ом·м мощностью 70 м вместо 200 м;
- основание сопротивлением 10000 Ом·м вместо 10 Ом·м.

Во временной области решение корректно.

На Рис. 3.4 приведены функции невязок сигналов в частотной и во временной области в зависимости от сопротивления основания и сопротивления верхнего слоя для следующей модели двухслойной среды:

- первый слой сопротивлением 100 Ом·м мощностью 20 м;
- основание сопротивлением 80 Ом·м.

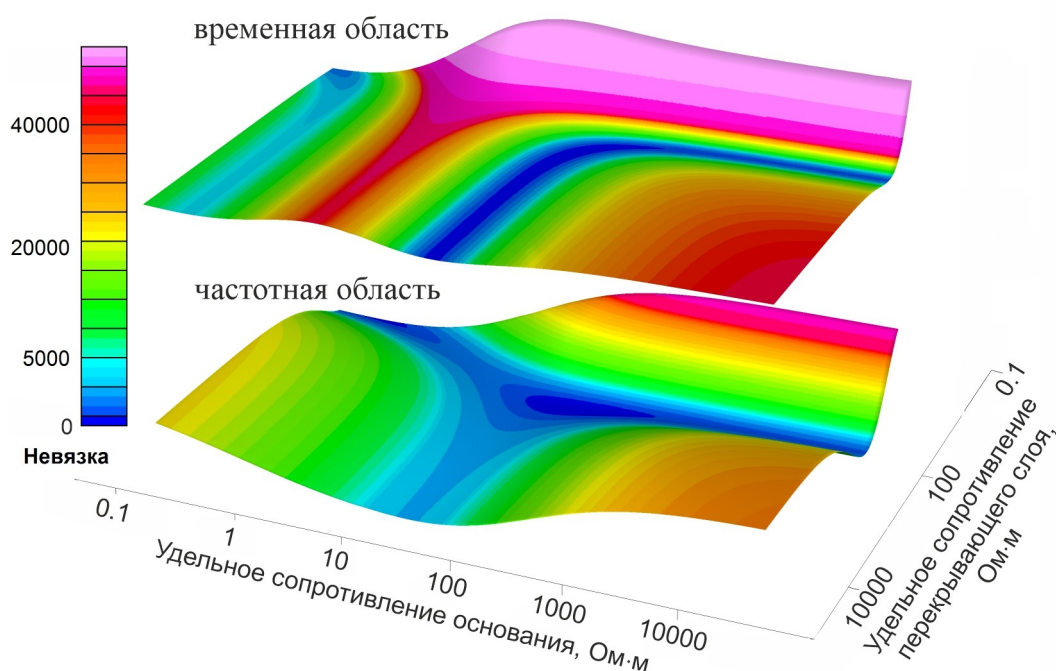


Рисунок 3.4. Невязка между рассчитанным откликом для модели двухслойной среды с меняющимся сопротивлением основания и верхнего слоя и отклика от модели (перекрывающий слой 100 Ом·м мощностью 20 м и основание 80 Ом·м) для временной и частотной областей

Здесь уже во временной области можно прийти к неверному решению при выборе начального приближения с удельным сопротивлением основания менее 4 Ом·м:

- первый слой сопротивлением 0,1 Ом·м мощностью 20 м;
- основание сопротивлением 0,13 Ом·м.

В частотной области решение корректно.

3.5.3. Модель четырехслойной среды

К сожалению, с увеличением размерности не удастся показать наглядно функции невязок. Поэтому для модели четырехслойной среды выполнялось моделирование, а затем инверсия с подбором мощности слоев по схеме, описанной в разделе 3.4.1..

Результаты инверсии, полученные для четырехслойной модели в частотной и временной областях, а также исходная модель представлены на Рис. 3.5:

- первый слой сопротивлением 100 Ом·м мощностью 30 м;
- второй слой сопротивлением 80 Ом·м мощностью 30 м;
- третий слой сопротивлением 20 Ом·м переменной мощности;
- основание сопротивлением 240 Ом·м.

Видно, что частотная инверсия хорошо показывает низкоконтрастную границу в приповерхностной области, а сопротивление основания точнее определяется при временной инверсии. Однако именно комбинированная инверсия наилучшим образом согласуется с исходной моделью (Рис. 3.5).

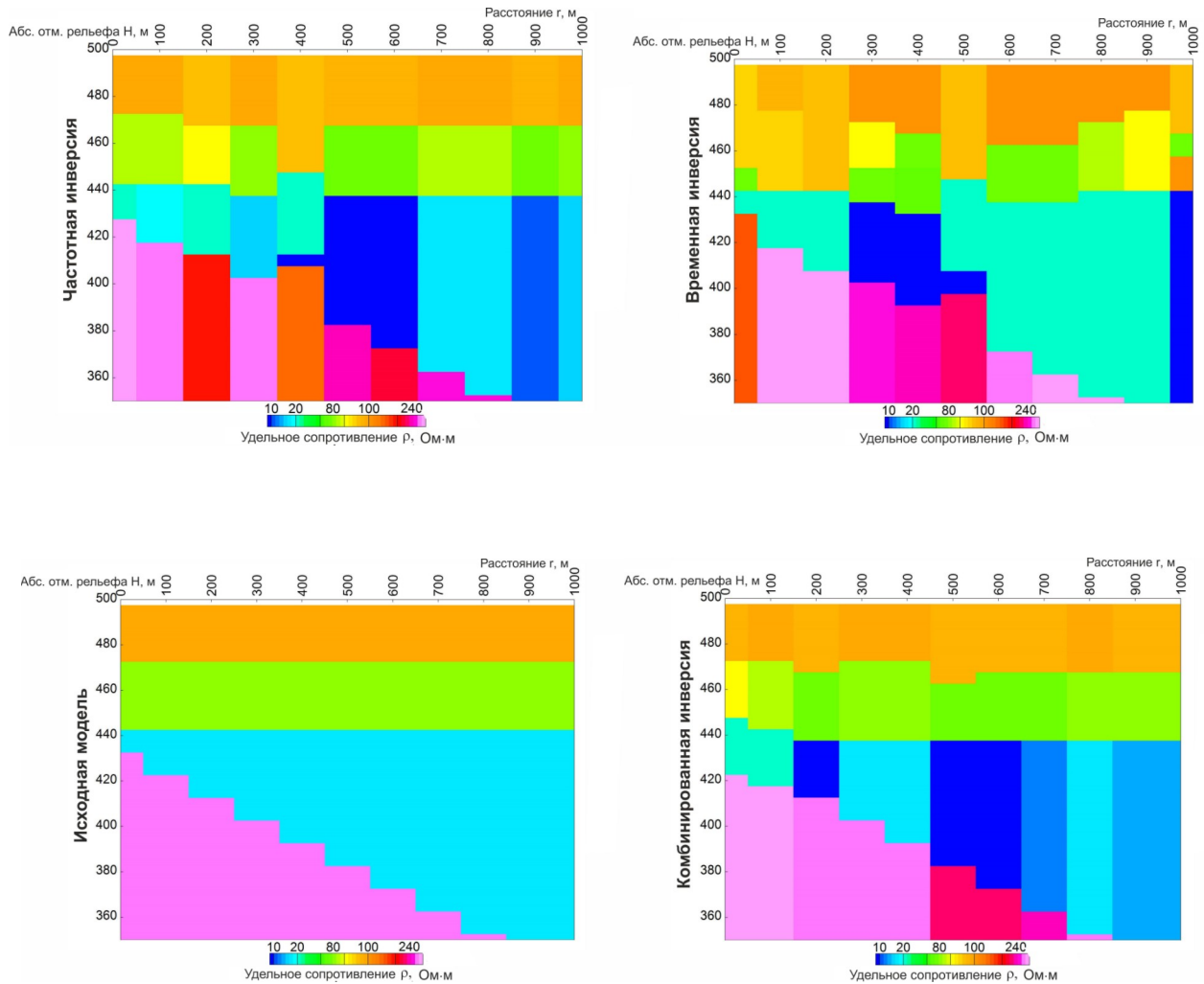


Рисунок 3.5. Одномерная инверсия в частотной (левый верхний) и временной (правый верхний) области и комбинированная (правый нижний) одномерная инверсия данных, полученных от четырехслойной модели (левый нижний)

Важно отметить, что алгоритм инверсии использовался одинаковый. Матрица шумов $\mathbf{R}$ для сигналов во временной и частотной области задавалась согласованной с реальными данными системы ЭКВАТОР, в то время как в модельных сигналах шумы не добавлялись. Метод инверсии выбирался «слепой», стартовый с подбора однородного полупространства, с той особенностью, что алгоритму не позволялось подбирать более четырех слоев — выбиралась наилучшая с точки зрения невязок из полученных четырехслойных моделей.

3.6. Выводы по Главе 3

В данной главе рассмотрены постановка и варианты решения обратной задачи для данных комбинированной электроразведочной системы в случае модели однородной или горизонтально-слоистой среды. Приведены алгоритмы получения значений кажущихся удельных сопротивлений во временной и в частотной области. Для частотной области разработан вариант решения в формате инверсии без необходимости выбирать между различными палетками, тем самым исключая возможную неоднозначность значения кажущегося сопротивления.

Разработаны два алгоритма построения «слепой» одномерной инверсии, т. е. решения обратной задачи для модели горизонтально-слоистой среды с использованием минимальной априорной информации. Формальное описание алгоритмов позволяет применять их при обработке данных только в частотной, только во временной или одновременно в частотной и временной области.

Рассмотрено несколько численных примеров, на которых показано, что функционал невязок выглядит по-разному в частотной и во временной области. По этой причине комбинирование этих данных позволяет исключить возможные локальные экстремумы и с большей надежностью обеспечить сходимость

решения обратной задачи.

Результаты данной главы опубликованы в работах [Волковицкий и др., 2013; Каршаков и Мойланен, 2021; Каршаков и Мойланен, 2018; Karshakov et al., 2017; Karshakov and Moilanen, 2018; Karshakov and Moilanen, 2020; Volkovitsky et al., 2019].

ГЛАВА 4. Интерпретация практических данных комбинированной аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР⁴

4.1. Подходы к интерпретации данных аэроэлектроразведки

Основные методы и алгоритмы обработки аэроэлектроразведочных данных во временной и частотной областях описаны в Главах 2, 3. В данном разделе приводятся примеры применения полученных результатов.

4.1.1. Районирование по кажущимся сопротивлениям

Районирование по кажущимся сопротивлениям обычно включает следующие этапы.

- 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:

Агеев В.В., Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Применение аэроэлектроразведки для решения гидрогеологических задач // Физика Земли. – 2022. – № 5. – с. 181-188. (0,5 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 1,176 (РИНЦ). EDN: MCDERF;

Ageev V.V., Karshakov E.V., **Moilanen J.** Using Airborne Electromagnetic Survey to Solve Hydrogeological Problems // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2022. – Vol. 68, No. 5. – p. 765–771. (0,44 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 0,343 (SJР). EDN: IHNMJM;

Керцман В.М., **Мойланен Е.В.**, Подмогов Ю.Г. Возможности аэрогеофизики при поисках золоторудных месторождений различного типа // Геофизика. – 2019. – № 4. – с. 52-59. (0,5 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ). EDN: NQXECO;

Козак С.З., Агеев В.В., **Мойланен Е.В.**, Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю. Комплексирование наземной и вертолетной электроразведки методом переходных процессов при выделении участков, перспективных для бурения на воду (на примере Якутии) // Инженерные изыскания. – 2015. – № 10-11. – с. 42-45. (0,25 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор 0,088 (РИНЦ). EDN: VHEERV;

Подмогов Ю.Г., Каршаков Е.В., Керцман В.М., **Мойланен Е.В.** Применение современных аэрогеофизических технологий для детальных инженерно-геологических изысканий // Инженерные изыскания. – 2015. – № 12. – с. 40-47. (0,5 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор 0,088 (РИНЦ). EDN: VBСDIT;

Потанин А.С., Чварова Н.В., Керцман В.М., **Мойланен Е.В.** Анализ эффективности стадийных поисковых геолого-геофизических работ при открытии новых золоторудных месторождений // Геофизика. – 2023. – № 6. – с. 78-86. (0,56 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ). EDN: MRYEAD.

1. Анализ статистики кажущихся сопротивлений и типа кривых

Необходимо изучить статистику распределения кажущихся сопротивлений для информативных временных и/или частотных каналов. В электроразведке различают трехслойные типы Н, А, Q, К [Хмелевской, 2005] и их комбинации. Изменение типа разреза может быть связано с тектоническими нарушениями, изменением режима осадконакопления, эрозионными срезами на складках различной морфологии и т. п., а также с локальными тектоническими неоднородностями (зонами дробления).

2. Сопоставление с априорной геологической информацией

Следует отдельно выделить области с высокой и низкой степенью соответствия геологической карте.

Например, базальтовым покровам могут соответствовать и высокоомные, и низкоомные области. Априори базальты высокоомны. Необходимо выяснить причины такого расхождения. Проводящие области могут быть связаны, например, с развитием мощных латеритных кор выветривания по базальтам.

Другой пример: карбонаты — на геологической карте однородные малопористые известняки, как правило, имеют высокие сопротивления. По данным аэроэлектроразведки могут проявиться их различия по удельным сопротивлениям. Соответственно, можно предположить различный литологический состав. Например, одни известняки — более магнезиальные (более доломитизированные), как следствие, более высокоомные (2 000 — 3 000 Ом·м), а другие — более мергелистые или глинистые — более проводящие (400 — 1 000 Ом·м).

Следующий пример — одинаковый возрастной состав, но разная степень пористости и возможное наличие свободной воды. В этом случае известняки могут быть достаточно проводящими (100–200 Ом·м).

Отдельно следует рассмотреть кажущиеся сопротивления в условиях многолетнемерзлых пород. В присутствии свободной воды при отрицательных

температурах вышеуказанные известняки будут максимально высокоомны (2 000 — 5 000 Ом·м).

Известняки с минимальной пористостью (впрочем, как и магматические породы (базальты и другие)) и в мерзлом, и в талом состояниях высокоомны. А водоупорные породы (типа ленточных глин) остаются проводящими и в талой, и в мерзлой среде. Эти породы не содержат открытых пор, а капиллярная вода не замерзает даже при очень низких температурах.

4.1.2. Выделение локальных объектов внутри однородных областей

После районирования участка работ осуществляется переход к выделению локальных объектов внутри однородных областей. Наиболее очевидные примеры: современные русловые отложения, речные долины или палеодолины, локальный проводник или изолятор произвольной конфигурации.

Хорошие результаты получаются при выделении проводников среди высокоомных пород — например, на кристаллических щитах. По картам кажущихся сопротивлений, построенным по поздним временным каналам, удастся выделить изометричные в плане тела, например кимберлиты. В то же время частотные карты кажущихся сопротивлений обычно отражают интегральное сопротивление геоэлектрического разреза. Локальные изометричные объекты «размываются» в частотных картах кажущихся сопротивлений. Для локализации трубок в такой геоэлектрической обстановке необходимо перейти к решению обратной задачи.

По результатам интерпретации данных аэроэлектроразведки выделяются аномальные области по картам кажущихся сопротивлений.

4.1.3. 1D инверсия с начальным приближением — однородное полупространство

Алгоритм решения одномерной обратной задачи для комбинированных аэроэлектроразведочных систем описан в разделе 3.4.

Аэрогеофизические работы обычно выполняются на начальном этапе исследования территории. Априорная информация в большинстве случаев практически отсутствует. С ростом размерности растет сложность задачи. Возрастают время решения и степень неопределенности. Даже для одномерной задачи, например, введение параметров Коле-Коле делает задачу плохо определенной. Под измеренную кривую можно подобрать практически неограниченное количество моделей. В условиях отсутствия априорной информации кажется разумным минимизировать количество подбираемых параметров, чтобы обеспечить лучшую сходимость. Поэтому интерпретация данных аэроэлектроразведки лишь в рамках одномерных моделей представляется хорошим решением. Области с высокой невязкой (3.20) решения обратной задачи также представляют поисковый интерес.

В результате решения одномерной обратной задачи по регулярной сети аэрогеофизических наблюдений строится объемная геоэлектрическая модель с размерами ячейки до $25 \times 25 \times 5$ м. Анализируются ее горизонтальные срезы и разрезы.

В результате анализа данной модели:

- 1) выделяются линияменты;
- 2) производится сопоставление с имеющимися геологическими и (или) геоморфологическими материалами (гидросеть, тальвеговые зоны, водораздел, палеодолина, палеогеографические данные);
- 3) локализуются аномальные объекты и дается оценка их связи с возможными объектами поиска, анализируются имеющиеся эталонные объекты поиска;

- 4) дается прогноз перспектив на обнаружение объектов, аналогичных эталонному, или других возможных;
- 5) устанавливается возможная связь результатов электроразведки и ландшафтных особенностей территории съемки.

Так, в элювиальном ландшафте видно хорошее отражение кор выветривания по коренным породам. При пологом склоне проявляется элювиально-аккумулятивный (или элювиально-делювиальный) тип ландшафта (увеличение мощности четвертичных отложений) — понижение удельных сопротивлений. Для углов склонов более 20 градусов при мощности четвертичных отложений менее 20 м (транс-элювиальный тип ландшафта) картируется удельное сопротивление коренных пород. А подверженные сносу (размываемые) рыхлые фракции коренных пород будут откладываться ниже по склону в зонах аккумуляции. Зоны аккумуляции (долина или подпойменные террасы разного уровня) могут иметь различные удельные сопротивления. В зонах аккумуляции часто отражается степень разной отсортированности материала от тонкосортированных песков до конгломерата. По аэроэлектроразведке могут определяться вариации мощности рыхлых отложений. При этом часто места с положительными отметками локальных высот (тундровых холмов) сопровождаются увеличением мощности рыхлых отложений («зеркальный рельеф»), что является помехой при поисках, например, кимберлитовых тел.

В аккумулятивном типе ландшафта можно локализовать образование россыпей от рудоносных массивов. В аллювии повышение мощности рыхлых отложений может быть связано с накоплением россыпного материала.

В следующем разделе приводятся практические примеры аэроэлектроразведочных съемок, в которых иллюстрируются описанные возможности анализа данных аэроэлектроразведки.

4.2. Результаты применения комплекса ЭКВАТОР для решения рудных задач

Результаты обработки данных комплекса ЭКВАТОР и их интерпретации описывают варианты применения предложенных подходов при решении следующих задач:

- поиск золоторудных месторождений на Камчатке;
- поиск кимберлитов в условиях Ангольского щита;
- поиск кимберлитов на зимнем берегу Белого моря.

4.2.1. Результаты работ по поиску золоторудных месторождений на Камчатке (2021 г.)

Комплексная аэрогеофизическая съемка с применением системы ЭКВАТОР выполнена на участках Толятой и Чеинг масштаба 1:10 000, на участках Каменная. Авдейко и Малетойваям масштаба 1:20 000. При точности оценки удельных сопротивлений 2,1 % зарегистрировано изменение сопротивлений от 10 до 8 500 Ом·м при среднем значении 190 Ом·м и среднеквадратичном отклонении 300 Ом·м.

Общая совокупность процедур, участвующих в интерпретационном процессе, представляется следующей:

- 1) выбор наиболее информативных частотных и временных каналов для построения карт кажущихся сопротивлений с учетом особенностей геолого-поисковых обстановок: по предварительным результатам выбираются наиболее представительные в интерпретационном отношении временные (раздел 3.3.2.) и частотные каналы (раздел 3.3.1.);
- 2) выделяются локальные аномалии кажущегося сопротивления, производится

их сопоставление с картами и графиками магнитного поля, графиками сопротивлений и электропроводностей, вычисленных по частотным и временным каналам;

- 3) по результатам инверсии данных аэроэлектроразведки (раздел 3.4.2.) строятся геоэлектрические разрезы;
- 4) производится анализ всей совокупности материалов с целью определения возможной природы аномалии;
- 5) создается детальная геофизическая основа для любых последующих геологических построений.

Данные электроразведки позволяют дифференцировать породы по свойствам электропроводности. Построенные разрезы дают возможность оценить структуру распределения свойств по глубине. Определение геологической структуры — задача наземных и горнобуровых работ.

Рассмотрим результаты обработки данных съемки на примере одного из участков.

Участок Толятой. Для интерпретации данных системы ЭКВАТОР на данном участке были исследованы статистические характеристики значений удельных сопротивлений. На Рис. 4.1 представлены статистические данные (минимальное, максимальное, среднее значения и СКО). Диапазон изменения значений кажущегося сопротивления составляет 3 порядка.

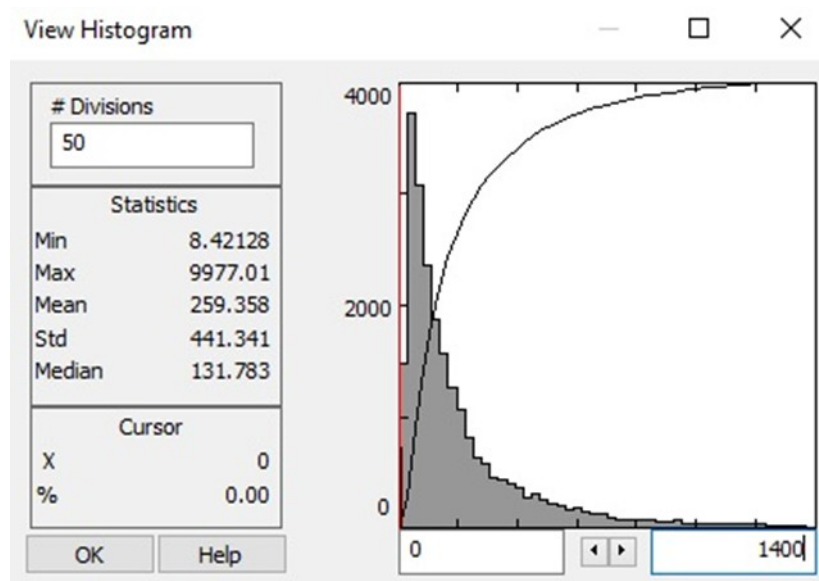


Рисунок 4.1. Гистограмма распределения кажущегося сопротивления для частоты 1620 Гц для участка Толятой (по оси X отложено кажущееся сопротивление, по Y – количество встречающихся значений)

На карте кажущихся сопротивлений (Рис. 4.2) выделены только высокоомные аномалии, входящие в контур немагнитных пород. Большая часть этих аномалий имеет пространственную связь с аномалиями, выделенными по результатам обработки мультиспектральных космических снимков ASTER (космический аппарат TERRA), где были определены области, перспективные по золотоносности. Они находятся в линейной зоне северо-восточного простирания развития вторичных кварцитов, обозначенной на геологической карте.

Внутри зон интенсивных и знакопеременных значений магнитного поля наблюдаются контрастные аномалии низких и высоких сопротивлений. Это характерно для областей развития вулканогенных пород, сопротивление которых определяется их составом, степенью глинизации или гидротермальных изменений.

Для наиболее интересных зон были построены геоэлектрические разрезы. По построенным разрезам удастся не только оценить качество решения, но и получить относительную достоверность полученных параметров для решения на каждой глубине исследования. На геоэлектрических разрезах (Рис. 4.3–4.4) блед-

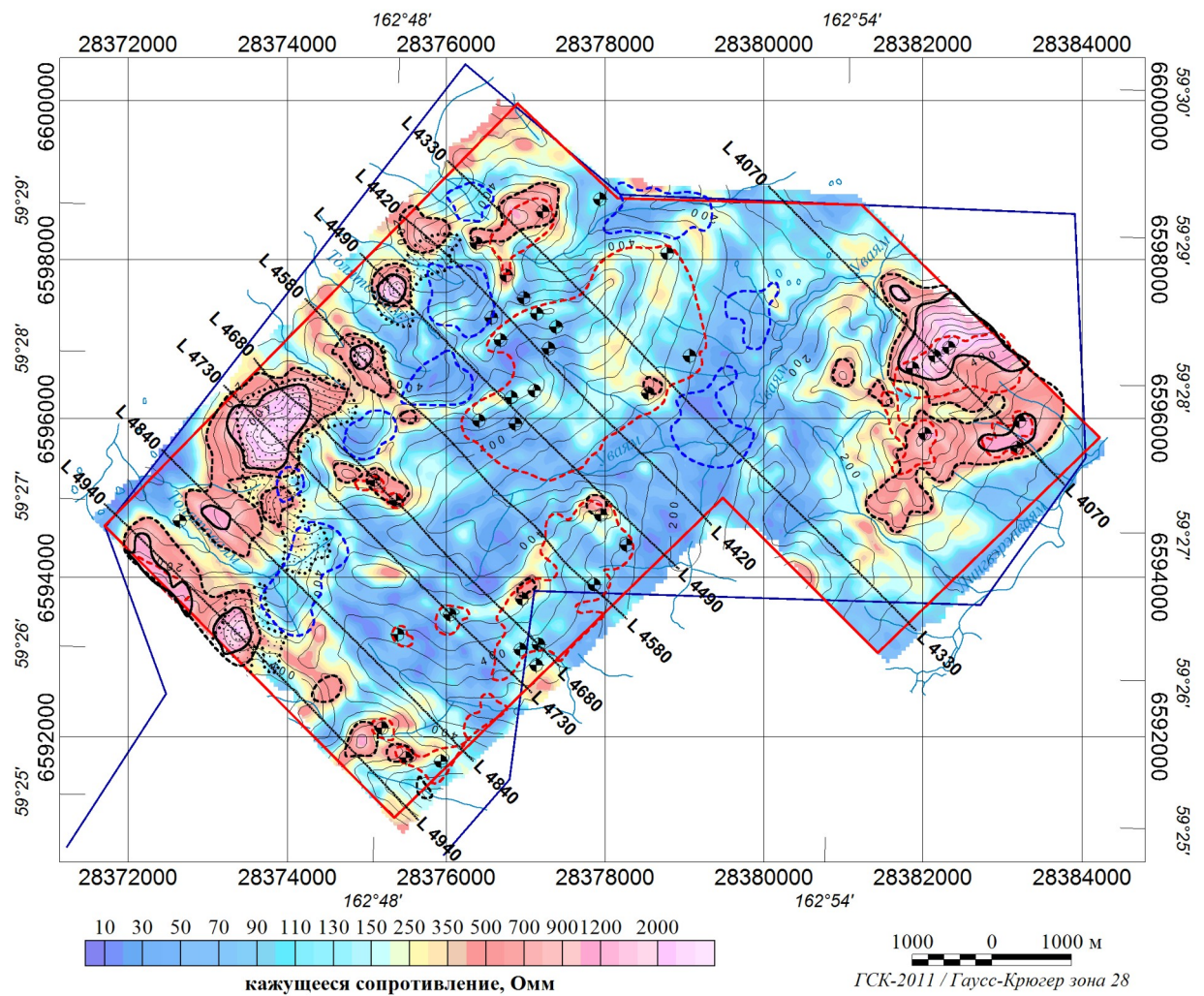
ным цветом показаны места с низкой достоверностью решения, как область с мерой оцениваемости (3.24), близкой к нулю. Пороговое значение меры оцениваемости выбирается по следующей эмпирической формуле:

$$\mu_i > 0.1 \cdot \|z - h(\tilde{x})\|. \quad (4.1)$$

Коэффициент 0.1 выбирается из соответствия геолого-геофизической модели на известных геоэлектрических разрезах, второй сомножитель — это невязка, посчитанная по формуле (3.20).

Количество решений с низкой достоверностью для каждой глубины 1D инверсии аэроэлектроразведочных данных представлено в Табл. 4.1. Средняя достоверная глубина 1D инверсии данных аэроэлектроразведки на площади Толятой составляет 240 м.

Анализ показал, что на данной площади присутствует два типа золотой минерализации. Первый связан с высокоомным, нерадиоактивным и немагнитным кварцевым ядром. Второй — с алунитовыми рудами, развитыми по вторичным кварцитам с избыточным количеством глинистых минералов, обогащенных слюдами. Такие области отмечаются пониженными сопротивлениями по сравнению с вторичными кварцитами. Для данной съемки поисковый интерес представляли как проводники, так и изоляторы, что не типично при производстве электроразведочных работ. Применение именно комбинированной инверсии данных системы ЭКВАТОР (раздел 3.2) наилучшим образом позволяет решить данные задачи. Данные во временной области локализуют проводники, а данные в частотной области имеют хорошее разрешение в верхней части разреза для детектирования изоляторов.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- | | | | |
|--|--|--|---|
| | Области развития пород с удельными сопротивлениями:
а) более 400 Омм; б) более 1000 Омм | | Интерпретационные профили для построения геолого-геофизических разрезов и их номера |
| | Предполагаемые контуры слепых интрузий положительно намагниченных пород | | Контур площади работ |
| | Предполагаемые контуры слепых интрузий отрицательно намагниченных пород | | Контур лицензии |
| | Эпицентры локальных магнитных аномалий от объектов близких к поверхности | | Изолинии рельефа с сечением через 50 м |
| | Контуры аномалий ASTER | | Водотоки, их названия |

Рисунок 4.2. Кажущиеся удельные сопротивления в канале 1620 Гц по участку Толятой

Таблица 4.1 Оценка глубинности аэроэлектроразведочных данных по результатам 1D инверсии
на площади Толятой

№ канала	Глубина, м	Количество решений с низкой достоверностью	Общее количество решений
0–6	0–60	0	33389
7	61	38	
8	80	99	
9	101	298	
10	125	970	
11	151	2216	
12	180	4791	
13	211	9324	
14	243	15755	
15	281	23824	
16	320	31206	
17	361	33222	
18	405	33389	

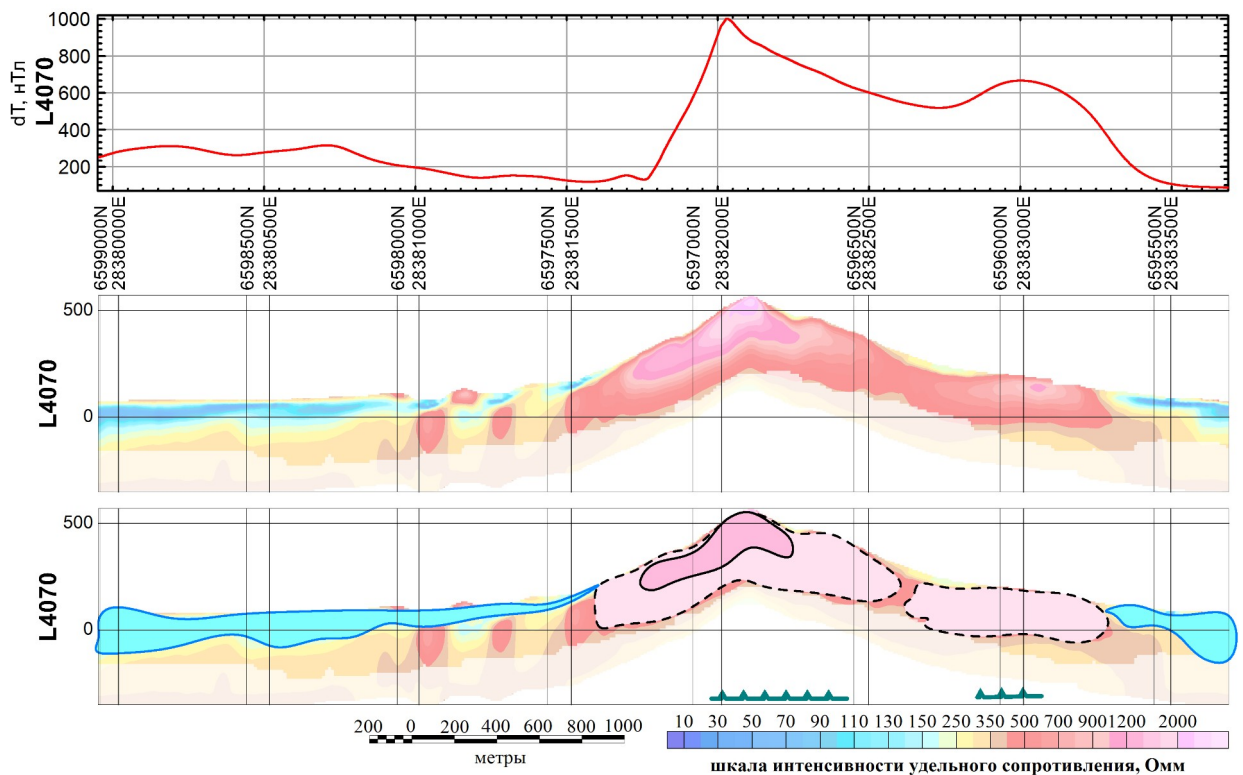


Рисунок 4.3. Геолого-геофизический разрез по профилю 4070 по участку Толятой

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

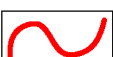
-  Контуры высокоомных объектов с сопротивлениями более 500 Ом*м, вероятно связанные со вторичными кварцитами
-  Контуры высокоомных объектов с сопротивлениями более 1000 Ом*м, вероятно связанные с монокварцитами
-  Приповерхностный проводник, вероятно связан с зоной сезонной оттайки
-  Контуры низкоомных объектов с сопротивлениями менее 200 Ом*м, возможно аргиллизиты или области с сульфидной минерализацией
-  Графики аномального магнитного поля
-  Предполагаемое плановое положение слепой магнитной интрузии

Рисунок 4.4. Условные обозначения к геоэлектрическим разрезам участка Толятой

4.2.2. Результаты работ по поиску кимберлитов в условиях Ангольского щита (2013 г.), на зимнем берегу Белого моря (2010 г.)

Поиск кимберлитов в Республике Ангола в условиях кристаллического щита (2013 г.)

Масштаб съемки системой ЭКВАТОР составил 1:10 000, детализация до масштаба 1:5 000, объем работ 28 000 пог. км. Качество электроразведочной съемки, оцененное по временным каналам V_z в зонах компенсации, составило 15 ppm от первичного поля, точность по оценке удельных сопротивлений — 5 %.

В условиях Ангольского кристаллического щита основным поисковым критерием обнаружения кимберлитов считается присутствие локальных аномалий пониженных сопротивлений значительного распространения на глубину. Удельные сопротивления трубки, в том числе ее обводненного кратера и диатремы бывают, как правило, ниже удельных сопротивлений вмещающих пород (Рис. 4.5, 4.6). Трубки взрыва некимберлитовой природы и многочисленные интрузивные образования различного состава похожие по форме на тела кимберлитов обычно имеют более высокие сопротивления. Для Ангольского щита это главный и достаточно надежный критерий выделения аномалий трубчатого типа кимберлитовой природы.

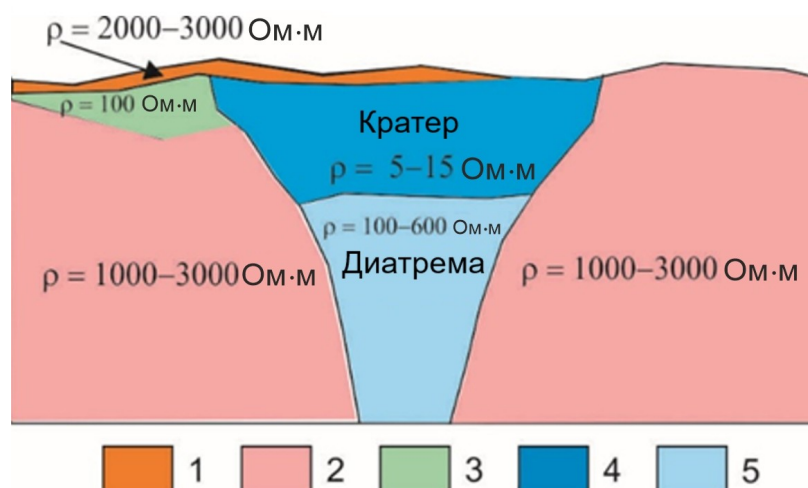


Рисунок 4.5. Схематическая геоэлектрическая модель для кимберлитовых трубок Ангольского щита. 1 — пески группы Калахари, 2 — кристаллическое основание, 3 — коры выветривания по породам основания, 4 — кратерная часть кимберлитовой трубки, 5 — диатрема

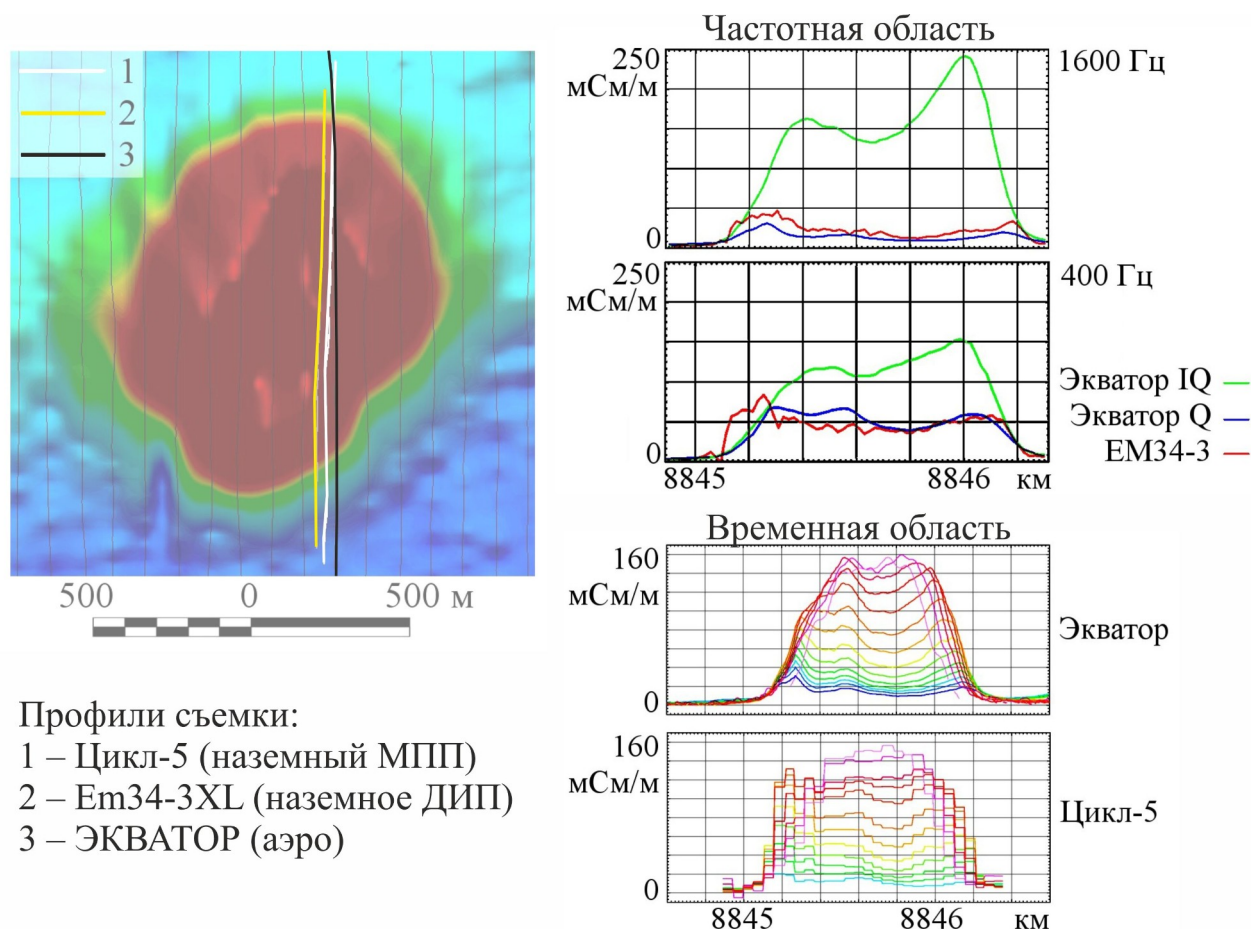


Рисунок 4.6. Сравнение аэро- и наземных геофизических данных, полученных на промышленно алмазодобывающей кимберлитовой трубке Лорелей [Феликс и др., 2014]

Приведем несколько примеров. Они будут касаться съемки, выполненной в Анголе в 2013 г. на концессии Quitubia по заказу ГРО КАТОКА. Компания «Геотехнологии» совместно с Норильским филиалом Института Карпинского

выполнили комплексную съемку с системой ЭКВАТОР масштаба 1:10 000 (1:5 000 на участках детализации) на площади около 3 000 кв. км.

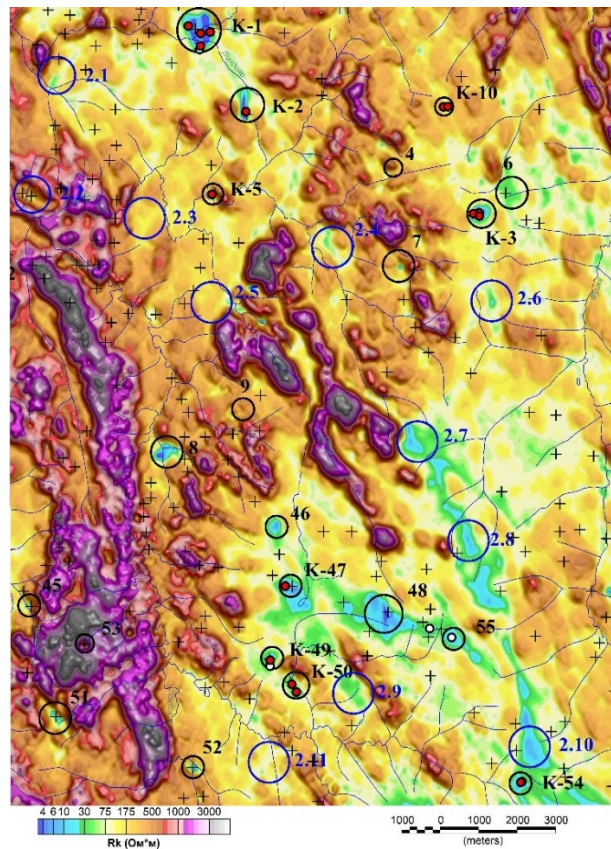


Рисунок 4.7. Карта кажущихся сопротивлений, вычисленных для частотного канала 3163 Гц

Анализ карт кажущихся удельных электрических сопротивлений на различных временных интервалах (раздел 3.3.1.) позволил надежно идентифицировать объекты кимберлитовой природы, даже в неблагоприятных условиях развития низкоомных латеритных кор выветривания мощностью 30–70 м, которые проявляют себя в картах кажущихся сопротивлений по частотным каналам (раздел 3.3.2.). В результате проведенных в 2015 году заверочных буровых работ по восемнадцати рекомендованным аномальным объектам, выделенным после анализа карт кажущихся сопротивлений в частотной области (Рис. 4.7) и во временной (Рис. 4.8), на шестнадцати из них был вскрыт кимберлит, один — алмазоносный.

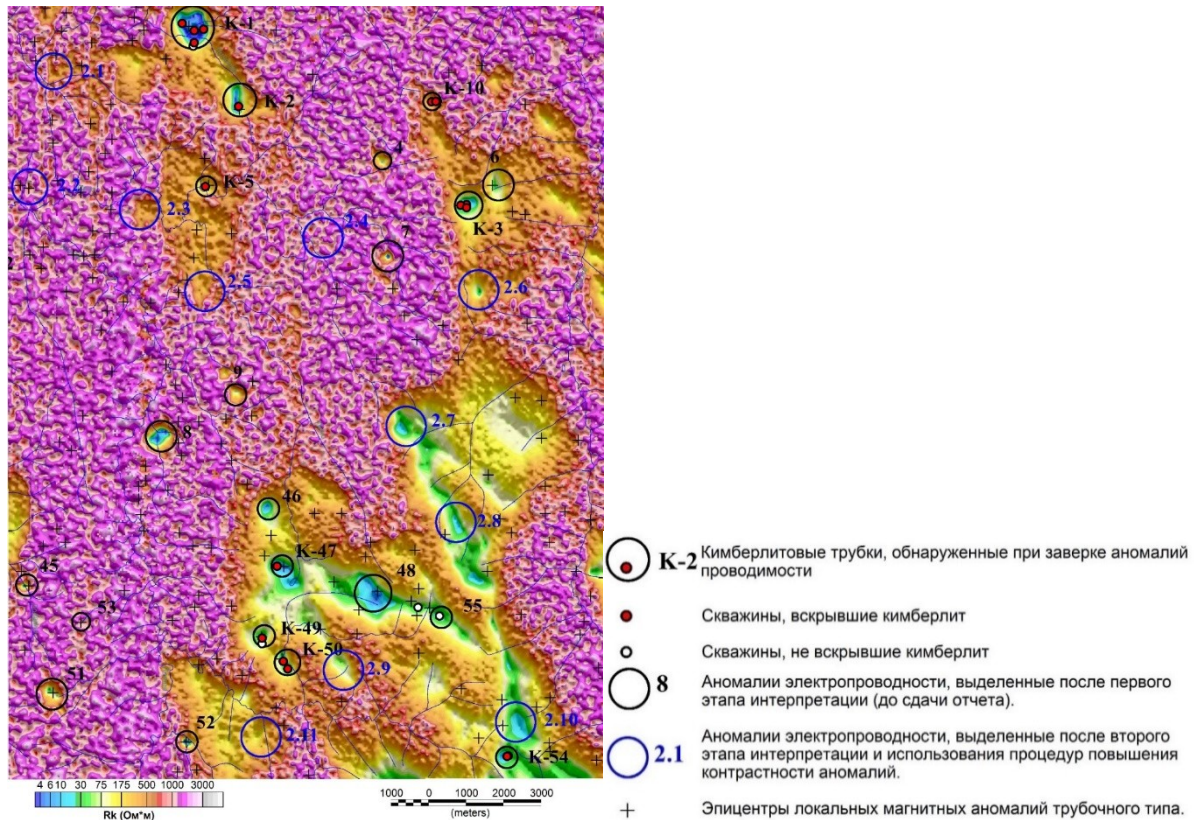


Рисунок 4.8. Карта кажущихся сопротивлений, вычисленных для временного канала 250 мкс

На Рис. 4.7 и 4.8 показаны кимберлитовые трубки К-1, К-2, К-3, К-5, К-10, К-47, К-49, К-50, вскрытые бурением. В целом, результаты обработки данных подтвердили, что при изучении верхней части разреза высокочастотные каналы более предпочтительны, чем ранние временные [Hodges, 2013]. В то же время для изучения глубинных проводников в изоляторе временная область подходит лучше частотной, что подтверждает сравнение карт на Рис. 4.7 и 4.8: даже на низких частотах карты кажущихся сопротивлений сохраняют влияние перекрывающих проводящих пород, тогда как временные каналы (dB/dt) от такого влияния во многом избавлены.

Поиск кимберлитов на зимнем берегу Белого моря (2010 г.)

Масштаб съемки системой ЭКВАТОР составил 1:5 000, объем работ — 2 000 пог. км. Качество электроразведочной съемки, оцененное по временным каналам B_z в зонах компенсации, составила 15 ppm от первичного поля, точность

по оценке удельных сопротивлений — 5 %.

Алмазо-поисковые работы с использованием комплекса ЭКВАТОР осуществлялись в 2010 г. совместно ГНПП «Аэрогеофизика» и компанией Геотехнологии. По просьбе Алмазного отдела ЦНИГРИ и АГД Даймондс была выполнена переобработка всей первичной информации по эталонным объектам Верхотинского и Черноозерского кимберлитовых полей. При расчете сопротивлений использовались алгоритмы комбинированной инверсии частотных и временных электромагнитных данных (раздел 3.4.2.), поскольку карты удельных сопротивлений ни в частотной, ни во временной области не позволили увидеть даже отдельные эталонные объекты.

На исследуемой территории четвертичные отложения представлены всем разнообразием водно-ледниковых отложений мощностью до 120 м. Значения удельных сопротивлений варьируются от величин менее 50 Ом·м для торфяников и глин до величин более 300–500 Ом·м для перемытых песков в сухом состоянии (Рис. 4.9).

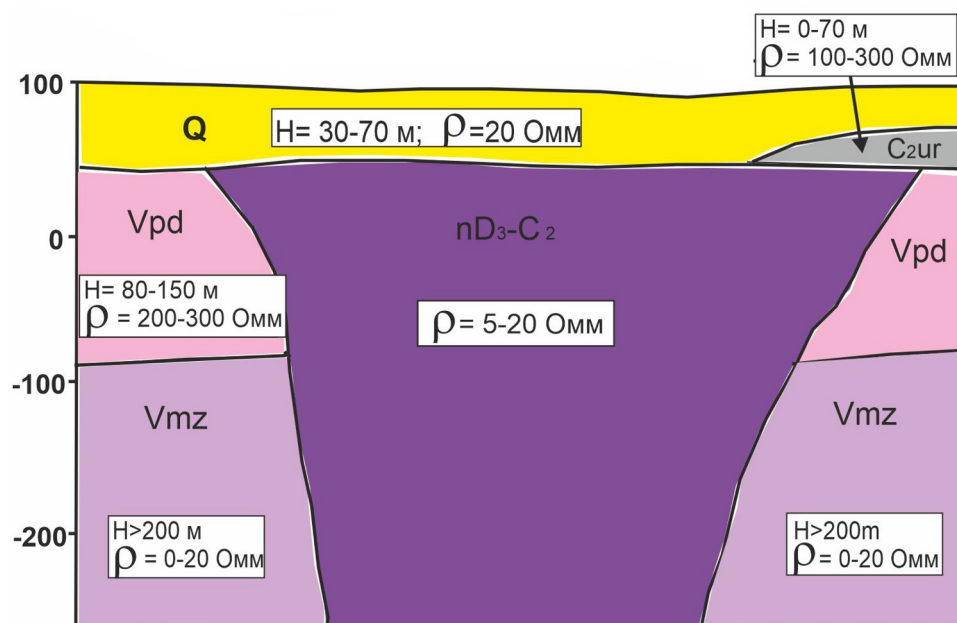


Рисунок 4.9. Обобщенная геоэлектрическая модель трубок Зимнебережного района

Трубка им. В.П. Гриба. Данные по этому объекту представляют особый интерес, так как исследования были выполнены до начала масштабных

вскрышных работ на этом известном месторождении. Трубка уверенно фиксируется контрастной аномалией пониженных сопротивлений как горизонтальными, так и вертикальным геоэлектрическими разрезами (Рис. 4.10). На Рис. 4.10 (А) белыми квадратами выделена область менее 60 Ом·м в районе трубки. Данная область увеличена на рисунке 4.10 (Б). По значению 60 Ом·м построена изоповерхность.

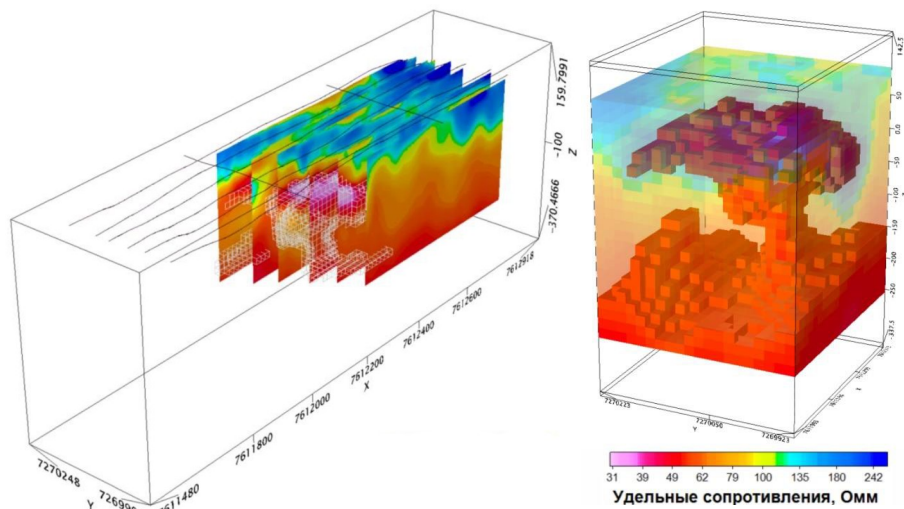


Рисунок 4.10. Геоэлектрические разрезы (1011870–1011892), проходящие через трубку им. В.П. Гриба, черными линиями показаны фактические маршруты полета (А) и геоэлектрическая модель трубки (Б)

Трубка Волчья. Является единственным эталонным объектом, на котором есть возможность сравнить данные двух систем ЭКВАТОР («Геотехнологии») и HeliTEM (CGG, в настоящее время XCalibur).

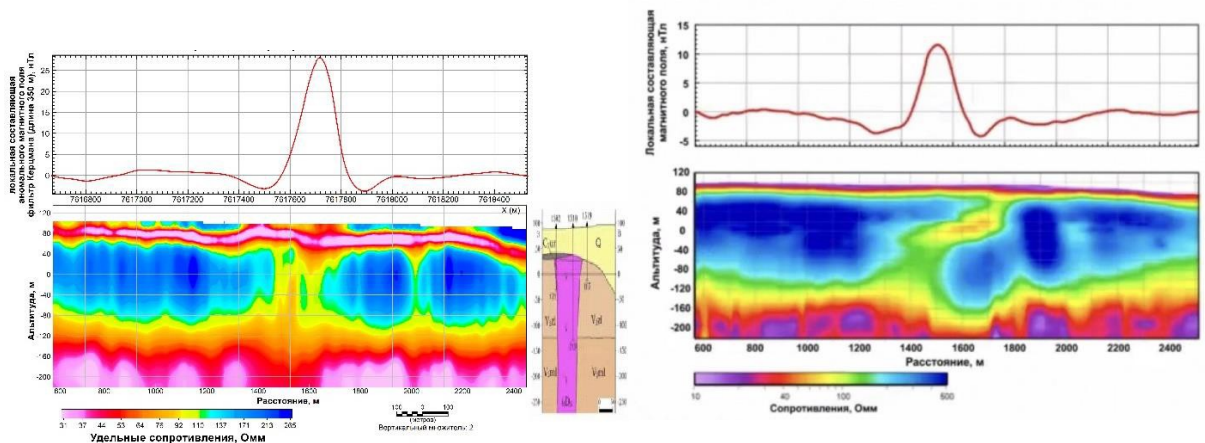


Рисунок 4.11. Геоэлектрические разрезы по совмещенным профилям через трубку Волчья по ЭМ данным систем ЭКВАТОР (А) и Helitem (Б), геологическая модель трубки между ними

На геоэлектрических разрезах (Рис. 4.11) проводник (70–100 Ом·м на фоне 140–260 Ом·м), связанный с кимберлитовым телом по данным системы ЭКВАТОР имеет вид вертикальной неоднородности и схож с имеющейся геологической моделью.

Трубка Майская. Геоэлектрический разрез очень напоминает аналогичный разрез по трубке Волчья, где контрастный проводник (70–100 Ом·м на фоне 140–260 Ом·м) находится в пределах песчаников падунской свиты венда (Рис. 4.12).

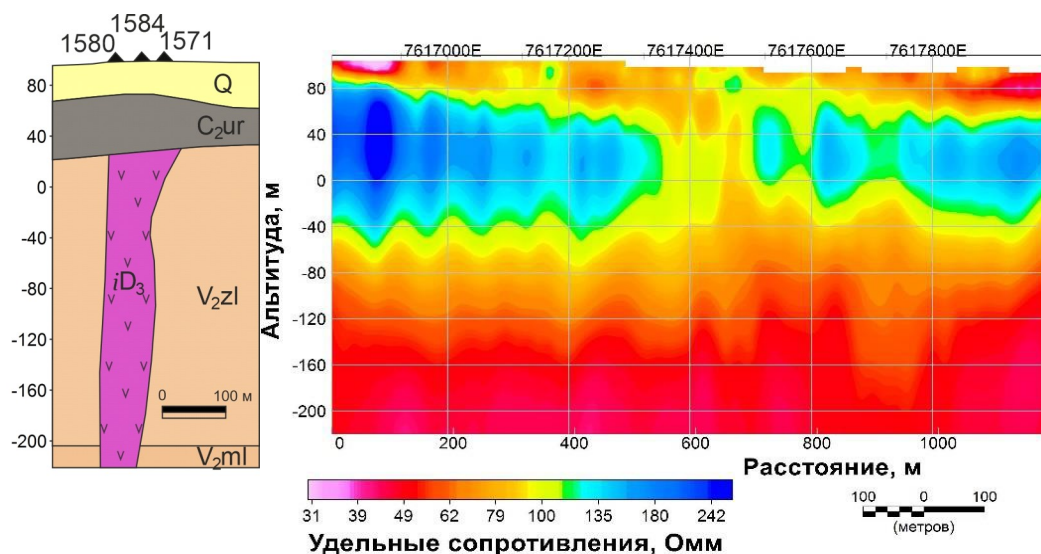


Рисунок 4.12. Геоэлектрический разрез по линии 1011730 через кимберлитовую трубку Майская

По результатам анализа данных при поисках кимберлитов можно сделать следующие выводы.

На примере данных, полученных в Анголе, видно, что в условиях «открытого поля» (правая часть модели на Рис. 4.5) локальные аномалии электропроводности, выявленные по поздневременным картам кажущихся сопротивлений (раздел 3.3.1), по результатам буровых работ являются кимберлитами. Для более сложных геоэлектрических обстановок необходимо использовать комбинированную инверсию данных (раздел 3.5). В то же время приведенные примеры убедительно свидетельствуют, что в условиях Зимнебережного алмазоносного района система ЭКВАТОР фиксирует кимберлитовые тела по электрическим характеристикам только при условии выполнения качественной одномерной комбинированной инверсии. Ограничиться только картами кажущихся сопротивлений ни в частотной, ни во временной области здесь нельзя.

4.3. Результаты применения комплекса ЭКВАТОР для решения гидрогеологических задач

4.3.1. Результаты работ по поиску воды в условиях многолетнемерзлых пород (в Республике Саха — Якутия в 2014–2015 гг.)

Чаяндинское и Среднеботуобинское месторождения

Для целей определения границ распространения надмерзлотных, внутримерзлотных и подмерзлотных подземных вод были выполнены профильные электроразведочные работы (Рис. 4.13).

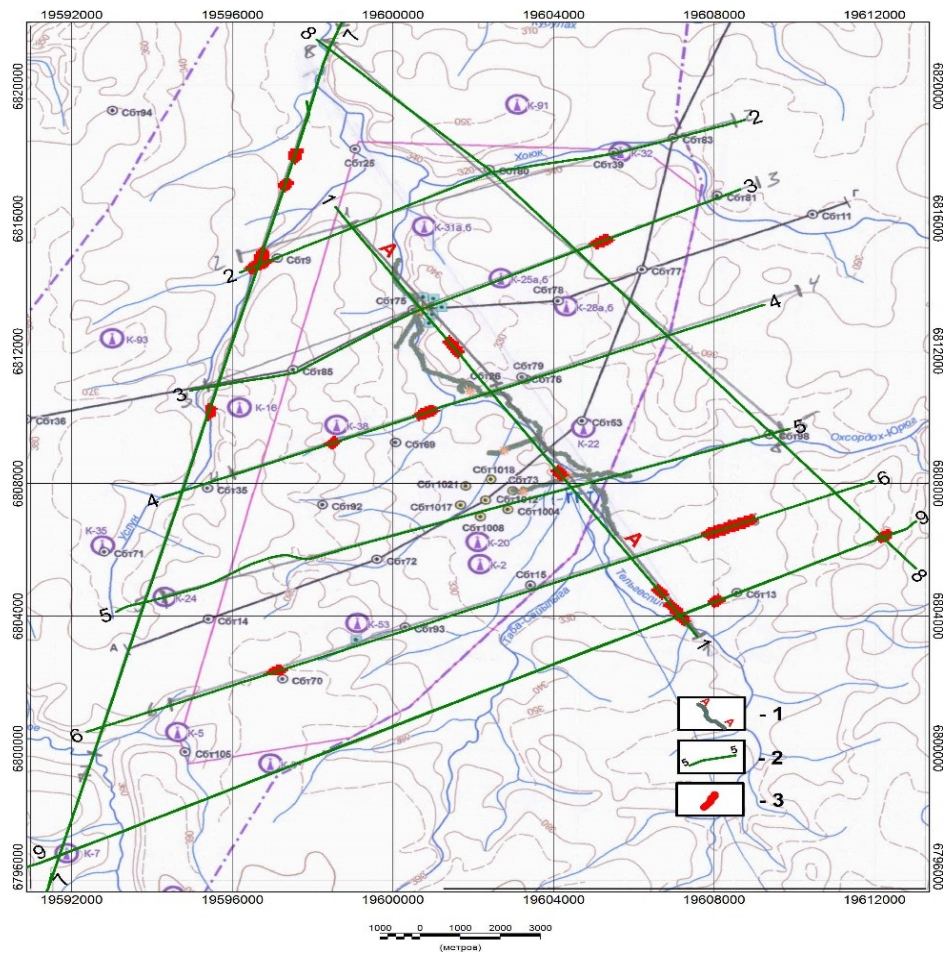


Рисунок 4.13. Схема перспективных для бурения на воду субвертикальных зон по данным аэроМПП (1 — профили наземных ЗСБ-МПП, 2 — маршруты полетов с аппаратурой ЭКВАТОР, 3 — зоны, перспективные для бурения на воду)

Построение разрезов удельных электрических сопротивлений

Разрезы распределения удельных электрических сопротивлений строились по результатам выполнения одномерной инверсии для всех профилей съемки в соответствии с алгоритмами, учитывающими изменчивость мощности слоев вдоль линии профиля (раздел 3.4.1.). Построение разрезов выполнялось для обеспечения возможности решения следующих задач.

- Определение глубины залегания верхней кромки верхоленской свиты (β_{2vl}), характеризующейся удельными сопротивлениями 12–30 Ом·м, достаточно контрастными на фоне перекрывающих четвертичных (Q) и юрских (J_1) отложений удельным сопротивлением 65–250 Ом·м.

- Определение глубины залегания верхней и нижней кромок мощного изолирующего слоя (150–180 м удельным сопротивлением 120–400 Ом·м), отождествляемого с отложениями метегерской и ичерской свит ($\beta_{1-2}mt-ic$).
- Выделение зон повышенной электропроводности в верхней части разреза, которые могли бы соответствовать таликам, и определение глубины залегания их нижней кромки.

На основе полученных разрезов с осреднением по восьми точкам было произведено выделение зон повышенной электропроводности с удельным сопротивлением ниже 40 Ом·м в верхней части разреза. Обязательным условием для выделения данных зон являлся выход проводящего горизонта на поверхность при его значимой, не менее 30 метров, мощности. Именно такие зоны представляются перспективными с точки зрения обнаружения таликов.

При совместной обработке разрезов, полученных с осреднением по восьми и по шестнадцати точкам, выделялись зоны повышенной электропроводности с удельным сопротивлением ниже 60 Ом·м внутри слоя, ассоциированного с метегерской и ичерской свитами. Данные зоны могут отвечать тем или иным структурным нарушениям рассматриваемого слоя. Подобные зоны нередко сопровождаются увеличением невязки (3.20) полученного решения, что также подтверждает гипотезу о наличии структурных нарушений.

При анализе совместно разрезов, полученных без ограничений и с закрепленной границей основания, были также выделены зоны, характеризующиеся повышенной электропроводностью основания, т. е. обладающие удельным сопротивлением ниже 40 Ом·м.

Совместный анализ всех данных аэроэлектроразведки и наземных исследований МПП позволил установить следующее:

- Геоэлектрические разрезы, составленные по данным наземных работ и аэроработ, хорошо совпадают, что говорит как об устойчивости принятой геоэлектрической схематизации, так и об удовлетворительном расчленении разреза по удельному сопротивлению. Пример сопоставления разрезов по

близко расположенным аэро- и наземным профилям (расхождение в плане до 2 000 м) приведен на Рис. 4.14.

- В разрезе выделены четыре геоэлектрических горизонта со следующей стратиграфической привязкой (описание ведется сверху вниз, номер горизонта соответствует номеру на разрезе, Рис. 4.14):

1. Горизонт с удельным электрическим сопротивлением ($УЭС$) = 100–200 Ом·м объединяющий отложения четвертичного и юрского возраста и, возможно, верхнюю часть верхоленской свиты (условно назовем «верхний» горизонт, $Q + J_1 + \epsilon_{2vl}$).
2. Горизонт с $УЭС = 15–30$ Ом·м, относящийся к верхоленской свите (ϵ_{2vl}) преимущественно глинистого состава. Является хорошим маркером при составлении геоэлектрических разрезов.
3. Горизонт с $УЭС = 120–250$ Ом·м, уверенно маркирует терригенно-карбонатные породы метегеро–ичерской свиты ($\epsilon_{1-2mt-i\check{c}}$).
4. Горизонт с $УЭС = 40–90$ Ом·м, соответствует породам чарской свиты ($\epsilon_{1-2\check{c}r}$). Глубина до кровли этого горизонта около 300–350 м, альтитуда кровли от 0 до 50 м (условно назовем «нижний» горизонт). Этот горизонт является последним для системы ЭКВАТОР в силу заданной базовой частоты возбуждения 77 Гц.

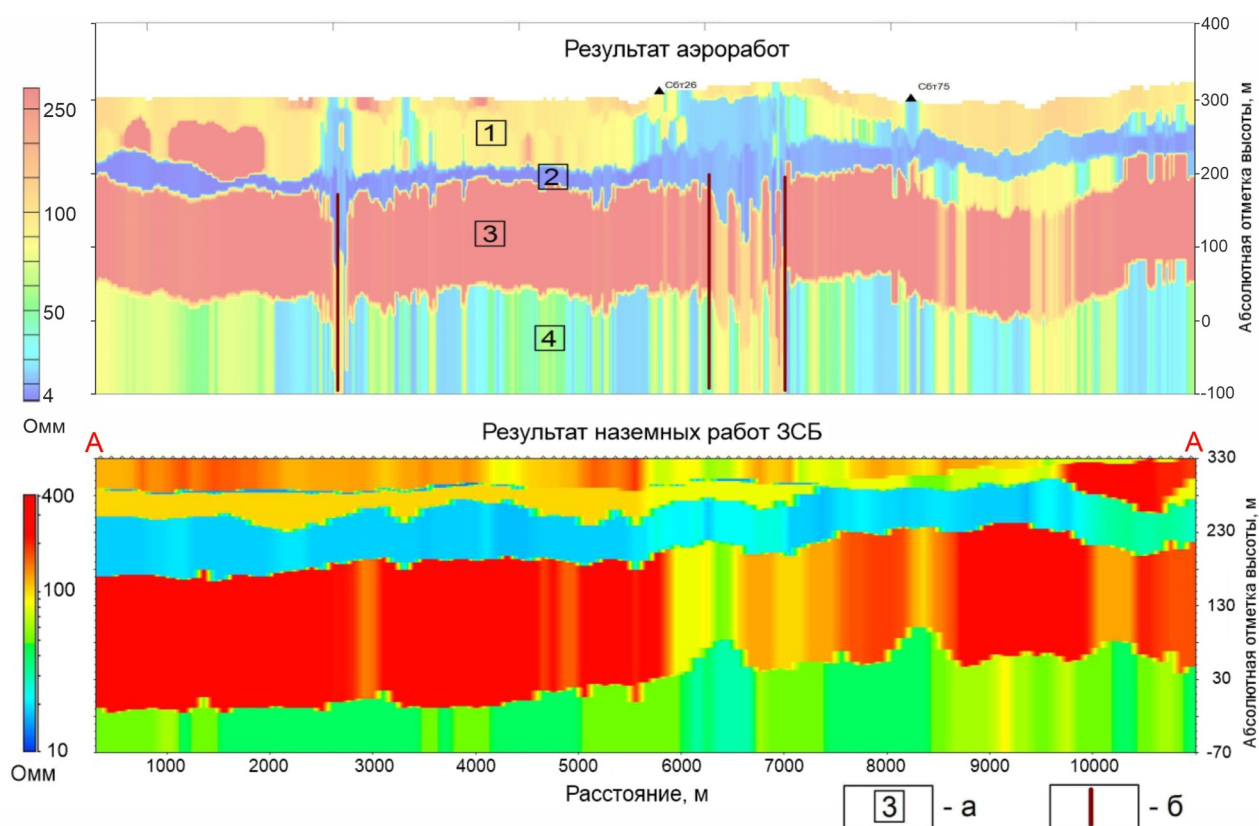


Рисунок 4.14. Сопоставление по линии АА результатов аэроработ с аппаратурой ЭКВАТОР и наземных работ ЗСБс выделением аномальных зон в метегеро-ичерском горизонте (а – номер геоэлектрического горизонта, б – зоны, перспективные для бурения на воду).

В вышеперечисленных геоэлектрических горизонтах какие-либо неоднородности с относительно пониженными значениями УЭС с высокой вероятностью фиксируются по всему участку. Именно такие зоны были рекомендованы для заверки бурением на воду. Наиболее уверенно эти зоны фиксируются в «первом» и «третьем» геоэлектрических горизонтах (Рис. 4.14)

4.3.2. Результаты работ по анализу гидрогеологии в присутствии соленой морской воды в Хорватии (2021 г.)

В 2021 году с помощью системы ЭКВАТОР была проведена аэроэлектроразведочная съемка на площади около 100 км². Общая цель съемки состояла в том, чтобы лучше понять гидрогеологию равнины и дать оценку

засоленности грунтовых вод.

По результатам обработки данных была построена (псевдо-)трехмерная модель удельного сопротивления. В терминах удельных электрических сопротивлений задача состояла в том, чтобы обнаружить и охарактеризовать относительно изолирующий слой, потенциально содержащий пресную воду, предположительно, на глубине около 100 м. Исследуемой областью была дельта Неретвы в Хорватии (Рис. 4.15). Первоначально здесь были болота, но сейчас этот район активно используется в сельскохозяйственных целях.

Измерения проводились в прибрежной зоне в условиях высокопроводящего геоэлектрического разреза. Учет скорости перемещения приемника в поле передатчика позволил существенно повысить соотношение сигнал-шум на низких частотах и поздних временах, что позволило повысить глубинность исследования.

В дополнение к проблемам, связанным со сниженным проникновением сигнала из-за низких фоновых удельных сопротивлений, в районе работ присутствует большое количество промышленных помех. На значительной части территории расположены линии электропередач, а на севере площади исследования проходит железная дорога, работающая на постоянном токе.

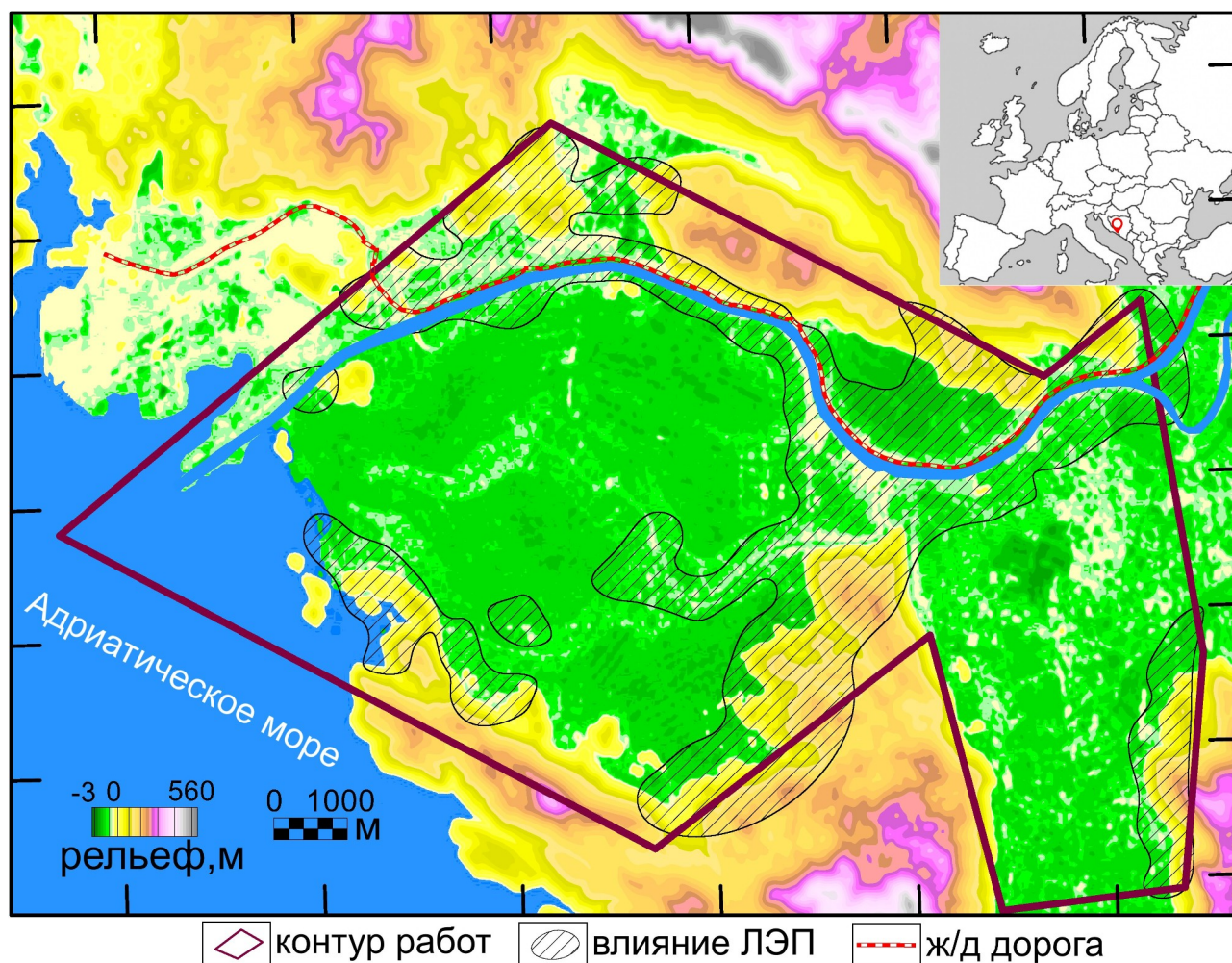


Рисунок 4.15. Обзор района исследования в Хорватии

На Рис. 4.16 нижний слой, полученный из инверсии данных аэроэлектроразведки, характеризуется удельным сопротивлением $0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. В этом контексте такое низкое удельное сопротивление может быть признаком присутствия соленой воды, и в этих случаях следует проявлять особую осторожность при размещении скважин. В этом отношении при бурении следует избегать участков, где соленая вода подходит близко к поверхности (например, левая часть на Рис. 4.16, в которой буровая скважина 1 заканчивается в верхней части последнего блока повышенных удельных сопротивлений. На Рис. 4.17 приведено сравнение стратиграфии, полученной из буровой скважины 1, с профилем удельного электрического сопротивления, полученным по данным системы ЭКВАТОР. Для проверки предложений по обследованию было пробурено

несколько буровых скважин.

Результаты аэроэлектроразведки были подтверждены многочисленными наземными измерениями и информацией, полученной в результате бурения. На основе геологической интерпретации результатов аэроэлектроразведки была создана гидрогеологическая модель. Она используется для осуществления наиболее эффективных инициатив по противодействию засолению территории.

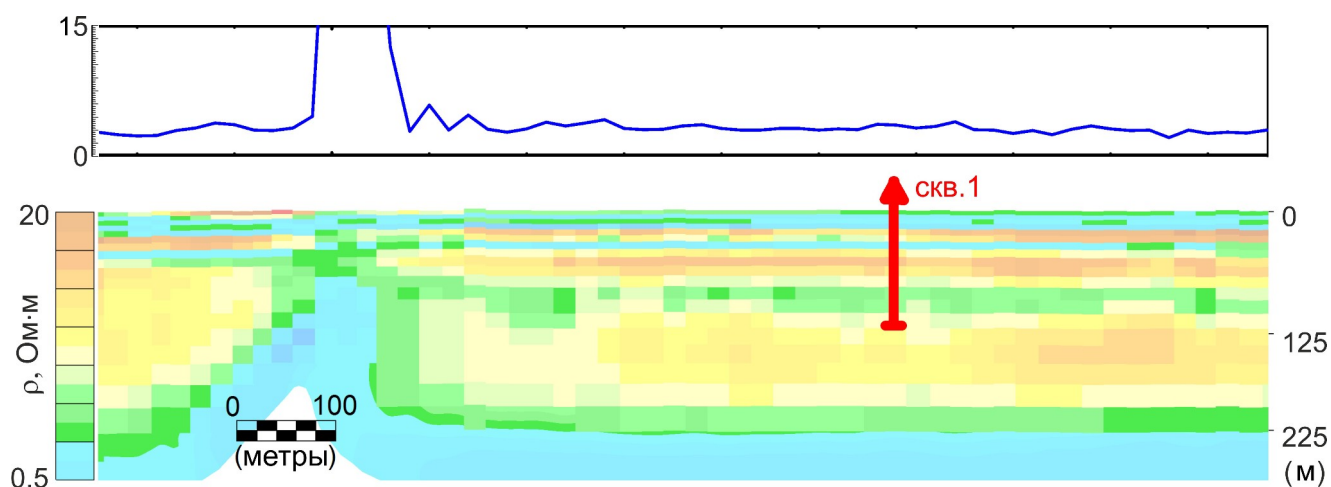


Рисунок 4.16. Сечение удельного сопротивления, полученное по данным аэроэлектроразведки (нижняя диаграмма), с соответствующей невязкой данных (верхняя диаграмма) и местоположением буровой скважины 1 (выделено красным); см. рис. 4.17

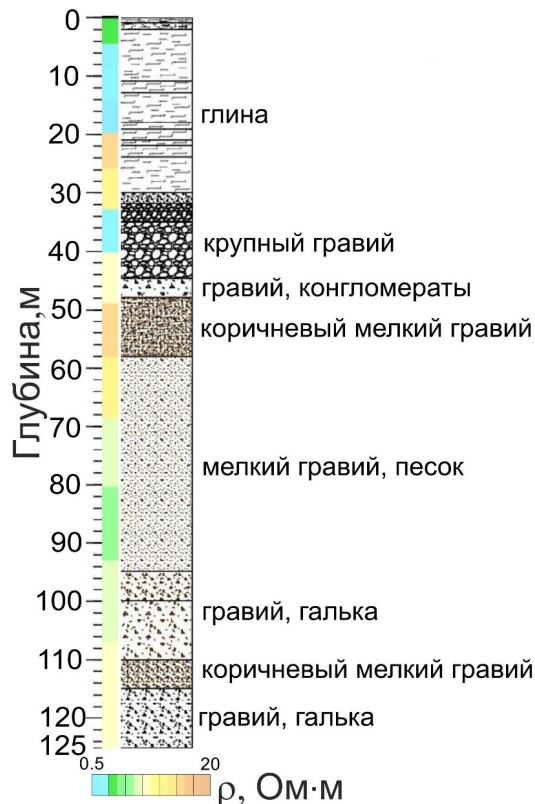


Рисунок 4.17. Стратиграфия буровой скважины 1 сравнивается с соответствующим вертикальным профилем удельного сопротивления, полученным из инверсии данных аэроэлектроразведки

Для инверсии главным образом использовались данные частотной области в соответствии с алгоритмом, изложенным в разделе 3.4.2., так как данные во временной области более подвержены влиянию промышленных помех. Тем не менее была возможность сопоставить результаты инверсии различными способами. На Рис. 4.18 показано сопоставление на одном из профилей данных временной, частотной и комбинированной инверсии. Стоит отметить, что временная инверсия показала более высокоомный слой на глубине 50–100 метров по сравнению с частотной. Комбинированная инверсия в этой части дала решение, более близкое ко временной. Детали верхней части разреза в комбинированной инверсии в большей мере соответствуют частотной инверсии. Причины такого формирования решения видно при анализе мер оцениваемости, вычисленных согласно (3.24), (3.50), приведенных справа. Они иллюстрируют оцениваемость сопротивлений (ось Y) в зависимости от глубины (ось X) для точки зондирования

с координатой $X = 3700$ м. Видно, что в верхней части разреза (слева на графиках) меры оценваемости в частотной области выше, и напротив, в глубинной части разреза есть более высокие значения меры для временной области. Меры оценваемости при комбинированной инверсии дают лучшие значения и вверху, и на глубине, тем самым объединяя преимущества двух подходов. Отдельно следует отметить, что получено качественно разное решение в частотной и временной областях в центральной части геоэлектрического разреза (точка зондирования с координатой $X = 2900$ м). Комбинированная инверсия практически дублирует результаты частотной инверсии.

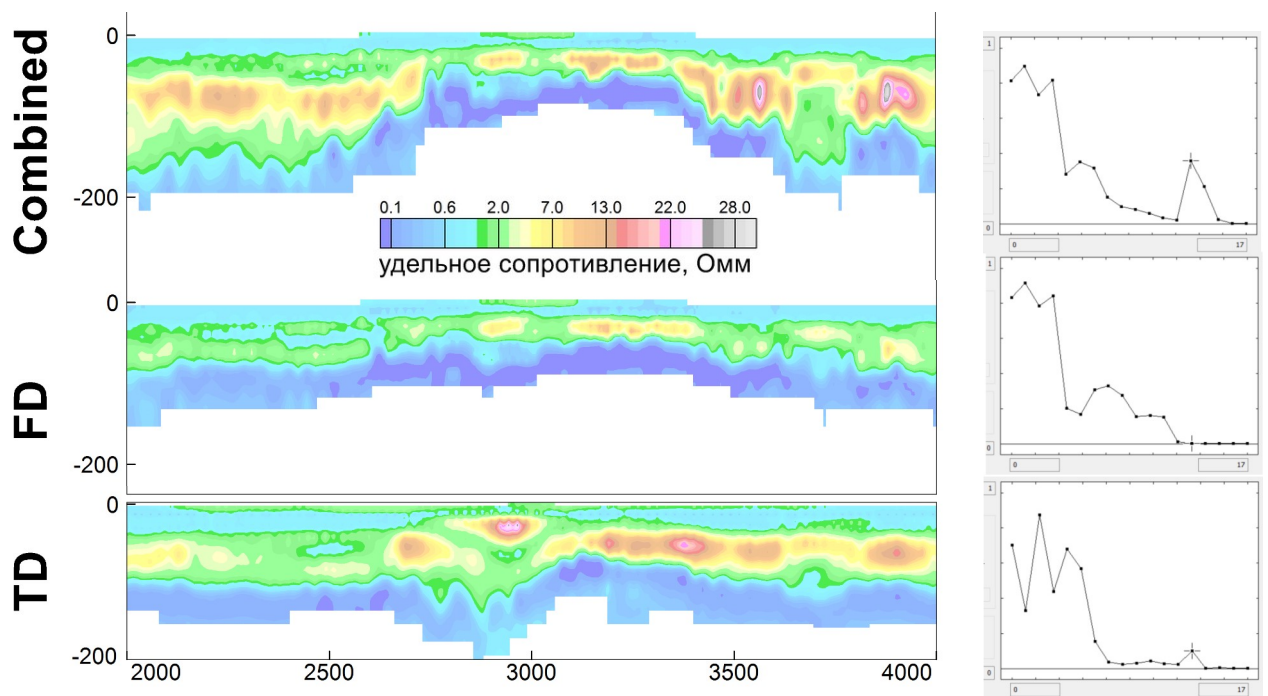


Рисунок 4.18. Одномерная инверсия в комбинированном, частотном и временном варианте, а также меры оценваемости сопротивлений

Приведенные примеры показывают, что в районах присутствия многолетнемерзлых пород аэроэлектроразведка позволяет детектировать границы распространения надмерзлотных, внутримерзлотных и подмерзлотных подземных вод. Свободная вода может быть связана с областями дробления. Подобные зоны нередко сопровождаются увеличением невязки (3.20) полученного решения. В условиях присутствия морской воды значительно снижается глубинность

исследований. По батиметрии глубина залива в месте проведения работ составила 27 м. Тем не менее под ней удалось определить не только удельные сопротивление донных отложений, но и проводника (предположительно, глины) под ними. Глубинность комбинированной аэроэлектроразведки в условиях экстремально проводящего геоэлектрического разреза около 100 м.

4.4. Выводы по Главе 4

В данной главе приведены примеры применения комбинированной электроразведочной системы и обработки данных при решении следующих задач:

- поиск золоторудных месторождений на Камчатке;
- поиск кимберлитов в условиях Ангольского щита;
- поиск кимберлитов на зимнем берегу Белого моря;
- поиск грунтовых вод в условиях многолетнемерзлых пород Якутии;
- анализ гидрогеологии в присутствии соленой морской воды в Хорватии.

Показаны различные варианты применения предложенных алгоритмов обработки данных в предположении модели однородной или горизонтально-слоистой среды.

Проиллюстрированы два способа построения «слепой» одномерной инверсии, т. е. решения обратной задачи для модели горизонтально-слоистой среды с использованием минимального объема априорной информации. Алгоритмы применялись при обработке данных только в частотной, только во временной или одновременно в частотной и временной области. На основе анализа стохастических мер оцениваемости показано преимущество использования комбинированной инверсии, которая позволяет одновременно использовать информативность частотных данных в верхней части разреза и чувствительность временных данных к особенностям распределения сопротивлений на глубине.

При работах на Камчатке данные электроразведки позволили дифференцировать породы по свойствам электропроводности в очень широком диапазоне. Построенные разрезы дают возможность оценить распределение свойств по глубине. Применение именно комбинированной инверсии данных системы ЭКВАТОР наилучшим образом позволяет решить задачи поиска как проводников, с которыми могут быть связаны алунитовые руды, так и изоляторов, к которым относится кварцевое ядро.

В условиях Ангольского кристаллического щита при поиске кимберлитов основным поисковым критерием оказалось наличие локальных аномалий пониженных сопротивлений значительного распространения на глубину. В результате проведенных заверочных буровых работ по восемнадцати рекомендованным аномальным объектам, выделенным после анализа карт кажущихся сопротивлений во временной области, на шестнадцати из них был вскрыт кимберлит, один — алмазоносный.

В условиях Зимнебережного алмазоносного района система ЭКВАТОР фиксирует кимберлитовые тела по электрическим характеристикам только при выполнении качественной одномерной комбинированной инверсии. Ограничиться только картами кажущихся сопротивлений ни в частотной, ни во временной области здесь нельзя. Трубка им. В.П. Гриба уверенно фиксируется контрастной аномалией пониженных сопротивлений как горизонтальными, так и вертикальным геоэлектрическими разрезами. На разрезах через трубку Волчья проводник (70–100 Ом·м на фоне 140–260 Ом·м), связанный с кимберлитовым телом, имеет вид вертикальной неоднородности и схож с имеющейся геологической моделью. Трубка Майская выглядит аналогичным образом.

При решении гидрогеологических задач в зонах распространения многолентнемерзлых пород Якутии при интерпретации разрезов выделялись зоны повышенной электропроводности с удельным сопротивлением (ниже 60 Ом·м) внутри слоя, ассоциированного с метегерской и ичерской свитами, которые могут отвечать тем или иным структурным нарушениям данного слоя. Удалось

детектировать границы распространения надмерзлотных, внутримерзлотных и подмерзлотных подземных вод. Свободная вода оказывается связана с областями дробления. Подобные зоны нередко сопровождаются увеличением невязки полученного решения.

В условиях населенных территорий в дельте реки Неретва в Хорватии для инверсии главным образом использовались данные частотной области, так как данные во временной области более подвержены влиянию индустриальных помех. В условиях присутствия морской воды значительно снижается глубинность исследований. Тем не менее получена оценка глубинности исследований на уровне 100 м, согласующаяся с результатами бурения.

Результаты данной главы опубликованы в работах [Агеев и др., 2021; Агеев и др., 2022; Богатырев и др., 2022а; Богатырев и др., 2022б; Богатырев и др., 2023; Каршаков и др., 2021а; Каршаков и др., 2021б; Керцман и др., 2018; Керцман и др., 2019; Керцман и др., 2020; Керцман и др., 2023; Козак и др., 2015а; Козак и др., 2015б; Мойланен и др., 2017; Мойланен и др., 2020; Мойланен и др., 2021; Подмогов и др., 2015а; Подмогов и др., 2015б; Подмогов и др., 2023; Потанин и др., 2023а; Потанин и др., 2023б; Kertsman et al., 2018; Moilanen, 2018; Moilanen et al., 2019; Podmogov et al., 2019; Volkovitsky et al., 2018].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

Приведен обзор современных аэроэлектроразведочных систем. Предложена новая классификация таких систем, выделяющая среди систем с контролируемым мобильным источником, помимо частотных и временных, еще и комбинированные системы. Дано описание структуры одной из существующих комбинированных систем — аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР.

Приведено описание всех методов и алгоритмов, предлагаемых для обработки данных комбинированной аэроэлектроразведочной системы. Приведена модель измерений, и показано, что основными составляющими модели, требующими компенсации, являются инструментальные погрешности и наведенное поле. Описаны методы и алгоритм такой компенсации.

Описаны составляющие сигналов, отвечающие полю отклика во временной и в частотной областях. Предложены методы и алгоритмы выделения отклика на фоне первичного поля. Показана эквивалентность двух форм представления откликов — временной и частотной. Дано описание способов выделения полного отклика в частотной области с дальнейшим пересчетом во временную область. Показаны границы их применимости.

На основе разработанных и описанных методов и алгоритмов предложена процедура обработки первичных измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы. Описана ее реализация для системы ЭКВАТОР.

Рассмотрены постановка и варианты решения обратной задачи для данных комбинированной электроразведочной системы в случае модели однородной или горизонтально-слоистой среды. Приведены алгоритмы получения значений кажущихся удельных сопротивлений во временной и в частотной области. Для частотной области разработан вариант решения в формате инверсии без

необходимости выбирать между различными палетками, тем самым исключая возможную неоднозначность значения кажущегося сопротивления.

Разработаны два алгоритма построения «слепой» одномерной инверсии, т. е. решения обратной задачи для модели горизонтально-слоистой среды с использованием минимальной априорной информации. Формальное описание алгоритмов позволяет применять их при обработке данных только в частотной, только во временной или одновременно в частотной и временной областях.

Рассмотрено несколько численных примеров, на которых показано, что функционал невязок выглядит по-разному в частотной и во временной областях. По этой причине комбинирование этих данных позволяет исключить возможные локальные экстремумы и с большей надежностью обеспечить сходимость решения обратной задачи.

Приведены примеры применения комбинированной электроразведочной системы и обработки данных при решении следующих задач:

- поиск золоторудных месторождений на Камчатке;
- поиск кимберлитов в условиях Ангольского щита;
- поиск кимберлитов на зимнем берегу Белого моря;
- поиск грунтовых вод в условиях многолетнемерзлых пород Якутии;
- анализ гидрогеологии в присутствии соленой морской воды в Хорватии.

Показаны различные варианты применения предложенных алгоритмов обработки данных в предположении модели однородной или горизонтально-слоистой среды.

Проиллюстрированы два способа решения обратной задачи для модели горизонтально-слоистой среды с использованием минимального объема априорной информации. Алгоритмы применялись при обработке данных только в частотной, только во временной или одновременно в частотной и временной областях. На основе анализа стохастических мер оцениваемости показано преимущество использования комбинированной инверсии, которая позволяет одновременно использовать информативность частотных данных в верхней части разреза и чувствительность временных данных к особенностям распределения

сопротивлений на глубине.

При работах на Камчатке данные электроразведки позволили дифференцировать породы по свойствам электропроводности в очень широком диапазоне. Построенные разрезы дают возможность оценить распределение свойств по глубине. Применение именно комбинированной инверсии данных системы ЭКВАТОР наилучшим образом позволяет решить задачи поиска как проводников, с которыми могут быть связаны алунитовые руды, так и изоляторов, к которым относится кварцевое ядро.

В условиях Ангольского кристаллического щита при поиске кимберлитов основным поисковым критерием оказалось наличие локальных аномалий пониженных сопротивлений значительного распространения на глубину. В результате проведенных заверочных буровых работ по восемнадцати рекомендованным аномальным объектам, выделенным после анализа карт кажущихся сопротивлений во временной области, на шестнадцати из них был вскрыт кимберлит, один — алмазоносный.

В условиях Зимнебережного алмазоносного района система ЭКВАТОР фиксирует кимберлитовые тела по электрическим характеристикам только при выполнении качественной одномерной комбинированной инверсии. Ограничиться только картами кажущихся сопротивлений ни в частотной, ни во временной области здесь нельзя. Трубка им. В.П. Гриба уверенно фиксируется контрастной аномалией пониженных сопротивлений как горизонтальными, так и вертикальным геоэлектрическими разрезами. На разрезах через трубку Волчья проводник (70–100 Ом·м на фоне 140–260 Ом·м), связанный с кимберлитовым телом, имеет вид вертикальной неоднородности и схож с имеющейся геологической моделью. Трубка Майская выглядит аналогичным образом.

При решении гидрогеологических задач в зонах распространения многолентнемерзлых пород Якутии при интерпретации разрезов выделялись зоны повышенной электропроводности с удельным сопротивлением (ниже 60 Ом·м) внутри слоя, ассоциированного с метегерской и ичерской свитами, которые могут

отвечать тем или иным структурным нарушениям данного слоя. Удалось детектировать границы распространения надмерзлотных, внутримерзлотных и подмерзлотных подземных вод. Свободная вода оказывается связана с областями дробления. Подобные зоны нередко сопровождаются увеличением невязки полученного решения.

В условиях населенных территорий в дельте реки Неретва в Хорватии для инверсии главным образом использовались данные частотной области, так как данные во временной области более подвержены влиянию индустриальных помех. В условиях присутствия морской воды значительно снижается глубинность исследований. Тем не менее получена оценка глубинности исследований на уровне 100 м, согласующаяся с результатами бурения.

Результаты, полученные в данной работе – новые методы и алгоритмы, открывают перспективы создания новых подходов к обработке и интерпретации данных низкочастотного индуктивного зондирования, позволяют расширить класс задач, эффективное решение которых может быть получено с использованием аэроэлектроразведочных технологий в область инженерных и рудных исследований.

Рекомендации и перспективы по дальнейшему изучению заключаются в разработке алгоритмов решения обратной 2D и 3D задачи с использованием минимальной априорной информации при обработке данных одновременно в частотной и временной областях, а также добавление индуктивно вызванной поляризации в расчетные параметры подбора решения обратной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев В.В., Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Применение аэроэлектроразведки для решения гидрогеологических задач // Материалы 8-й Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021, Москва). — М.: ИФЗ РАН, 2021. — С. 292–296. (0,31 п.л., авторский вклад 33%).
2. Агеев В.В., Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Применение аэроэлектроразведки для решения гидрогеологических задач // Физика Земли. — 2022. — № 5. — С. 181-188. (0,5 п.л, авторский вклад 33%). Импакт-фактор 1,176 (РИНЦ). EDN: MCDERF.

Ageev V.V., Karshakov E.V., **Moilanen J.** Using Airborne Electromagnetic Survey to Solve Hydrogeological Problems // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2022. — Vol. 68, No. 5. — P. 765–771. (0,44 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 0,343 (SJР). EDN: IHNМJM.
3. Адамар Ж. Задача Коши для линейных уравнений с частными производными гиперболического типа / пер. с фр. Ф. В. Шугаева; под ред. О. М. Белоцерковского. — М.: Наука, 1978. — 352 с.
4. Александров В.В., Болтянский В.Г., Лемак С.С., Парусников Н.А., Тихомиров В.М. Оптимальное управление движением. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 376 с.
5. Богатырев Д.И., Каршаков Е.В., Керцман В.М., **Мойланен Е.В.**, Подмогов Ю.Г. Аэроэлектроразведка для решения инженерных и рудных задач // Материалы 18-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика 2022» (Геленджик). — Геленджик: ООО «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2022. — С. 42–47. (0,38 п.л., авторский вклад 25%).
6. Богатырев Д.И., Каршаков Е.В., Керцман В.М., **Мойланен Е.В.**, Подмогов Ю.Г. Аэроэлектроразведка для решения инженерных и рудных

задач // Золото и технологии. — 2022. — № 1 (55). — С. 88–91. (0,25 п.л., авторский вклад 25%).

7. Богатырев Д.И., Керцман В.М., **Мойланен Е.В.**, Подмогов Ю.Г. Электроразведочная система комплекса ЭКВАТОР, её возможности и результаты применения // Материалы научно-практической конференции «Электроразведка - 2022». — М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2023. — С. 265–271. (0,44 п.л., авторский вклад 25%).
8. Великин А.Б., Великин А.А. Новый корреляционный метод импульсной электроразведки с шумоподобными сигналами СТЕМ для электромагнитного зондирования недр при поисках углеводородного сырья // Труды VII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна. — Иркутск, 2015. — 13 с.
9. Вовенко Т.А., Волковицкий А.К., Павлов Б.В., Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю. Модели и структура бортовых измерений пространственных физических полей // Проблемы управления. — 2015. — № 33. — С. 59–68.
10. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Определение полного вектора отклика в частотных аэроэлектроразведочных системах с нежёсткой базой // Труды IV Всероссийской школы-семинара по электромагнитным (ЭМ) зондированиям Земли (ЭМЗ-2009). — М., 2009. — С. 210. (0,12 п.л., авторский вклад 33%).
11. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Использование синфазной компоненты отклика для низкочастотной аэроэлектроразведки системы ЕМ-4Н // Записки Горного института. — 2011. — Т. 194. — С. 150-153. (0,25 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 6,451 (РИНЦ). EDN: ROVVWT.

12. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Новая вертолётная электроразведочная система «Экватор» для аэрометода переходных процессов // Записки Горного института. – 2011. – Т. 194. – С. 154-157. (0,25 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 6,451 (РИНЦ). EDN: ROVVXD.
13. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Высокоразрешающая аэроэлектроразведка в масштабе 1:5000 // Записки Горного института. – 2013. – Т. 200. – С. 19-22. (0,25 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 6,451 (РИНЦ). EDN: QLIKDV.
14. Волковицкий А.К., Гольдин Д.А., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Принципы построения, структуры и алгоритмы аэроэлектроразведочных комплексов: монография в двух частях. Часть 1. Состояние, проблемы и теоретические основы. — М.: ИПУ РАН, 2013. — 142 с.
15. Волковицкий А.К., Гольдин Д.А., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Принципы построения, структуры и алгоритмы аэроэлектроразведочных комплексов: монография в двух частях. Часть 2. Пути и методы реализации. — М.: ИПУ РАН, 2013. — 114 с.
16. Волковицкий А.К. Структура и алгоритмы бортовых электромагнитных систем относительного позиционирования : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01. — М., 2012. — 115 с.
17. Волковицкий А.К. Методы и алгоритмы повышения эффективности аэроэлектроразведочных измерительных систем и комплексов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01. — М., 2022. — 304 с.
18. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. — М.: Наука, 1966. — 576 с.
19. Гаракоев А.М., **Мойланен Е.В.** Управление процессом аэрогеофизической съёмки с помощью системы ЭКВАТОР // Материалы 15-й Всероссийской школы-конференции молодых учёных «Управление большими системами» (УБС'2018, Воронеж). Т. 2. — Воронеж: Воронежский государственный

- технический университет, 2018. — С. 13–17. (0,31 п.л., авторский вклад 50%).
20. Дмитриев В.И., Морозов В.А., Жданов М.С., Никитин А.А., Брусенцов Н.П. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике. — М.: Недра, 1990. — 498 с.
 21. Дмитриев В.И. Обратные задачи геофизики. — М.: МАКС Пресс, 2012. — 340 с.
 22. Ершов Е.М., Новак В.Д., Прис Г.В., Светов Б.С. Аэроэлектроразведка методом дипольного индуктивного профилирования. — М.: ОНТИ, ВИАМС, 1976. — 100 с.
 23. Жданов М.С. Электроразведка: учебник для вузов. — М.: Недра, 1986. — 316 с.
 24. Иванов В.К. О линейных некорректных задачах // Доклады Академии наук СССР. — 1962. — Т. 145, № 2. — С. 270–272.
 25. Инструкция по электроразведке / Министерство геологии СССР. — Л.: Недра, 1984. — 352 с.
 26. Каменецкий Ф.М., Литвинов Ю.П., Луцышин А.С. Первые результаты опробования аэроварианта метода переходных процессов // Разведочная геофизика. — 1972. — Вып. 50. — С. 97–106.
 27. Каменецкий Ф.М., Тимофеев В.М., Мамаев В.А. Аэроэлектроразведка методом переходных процессов. — М.: Недра, 1978. — 64 с.
 28. Каршаков Е.В., Волковицкий А.К., **Мойланен Е.В.** Аэроэлектроразведочные измерительные комплексы // Автоматизация в промышленности. — 2020. — № 4. — С. 60–64. (0,31 п.л., авторский вклад 33%). Импакт-фактор 0,298 (РИНЦ). EDN: DLXLXO.
 29. Каршаков Е.В., Керцман В.М., Подмогов Ю.Г., **Мойланен Е.В.**

Возможности аэроэлектроразведки при детальном поисках кимберлитов // Материалы 8-й Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021, Москва). — М.: ИФЗ РАН, 2021. — С. 251–256. (0,38 п.л., авторский вклад 25%).

30. Каршаков Е.В., Керцман В.М., **Мойланен Е.В.**, Подмогов Ю.Г. Возможности аэрогеофизики при поисках месторождений цветных и благородных металлов // Материалы 8-й Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021, Москва). — М.: ИФЗ РАН, 2021. — С. 234–240. (0,44 п.л., авторский вклад 25%).
31. Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Аэроэлектроразведочная система Экватор: разрешающая способность, чувствительность, универсальность // Труды 6-й Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна (Новосибирск, 2013). № 30. — Новосибирск: Институт вычислительных технологий СО РАН, 2013. — С. 1–4. (0,25 п.л., авторский вклад 50%).
32. Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Совместная интерпретация аэроэлектроразведочных данных во временной и в частотной областях // Инженерные изыскания. — 2018. — Т. 12, № 7-8. — С. 76-83. (0,5 п.л., авторский вклад 50%). Импакт-фактор 0,088 (РИНЦ). EDN: YTOGGD.
33. Каршаков Е.В., **Мойланен Е.В.** Комбинированные аэроэлектроразведочные системы — взгляд в будущее // Труды 4-й Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях». Т. 1. — Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2021. — С. 184–187. (0,25 п.л., авторский вклад 50%).
34. Каршаков Е.В. Структура и алгоритмы обработки бортовых измерений в аэромагнитных и аэроэлектромагнитных системах : дис. ... д-ра техн. наук :

05.13.01. — М., 2018. — 286 с.

35. Керцман В.М., **Мойланен Е.В.**, Подмогов Ю.Г. Результаты комплексных аэрогеофизических исследований по технологии ЭКВАТОР в зоне Центрально-Африканского разлома // Труды Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». — Тверь: ООО «Издательство Полипресс», 2018. — С. 188–194. (0,44 п.л., авторский вклад 33%).
36. Керцман В.М., **Мойланен Е.В.**, Подмогов Ю.Г. Возможности аэрогеофизики при поисках золоторудных месторождений различного типа // Геофизика. – 2019. – № 4. – С. 52-59. (0,5 п.л, авторский вклад 40%).
Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ). EDN: NQXECO.
37. Керцман В.М., **Мойланен Е.В.**, Подмогов Ю.Г. Применение аэрогеофизики в зоне Центрально-Африканского разлома, на золоторудных месторождениях в Иркутской области (Сухой Лог, Урях) и в Якутии // Золото и технологии. — 2020. — № 4 (50). — С. 74–80. (0,44 п.л., авторский вклад 33%).
38. Керцман В.М., **Мойланен Е.В.**, Подмогов Ю.Г. Результаты работ аэрогеофизического комплекса ЭКВАТОР на рудных объектах // Труды научно-практической конференции «Актуальные проблемы поисковой геологии» (Москва, 2023). Т. 78. — М.: ФГБУ «ВИМС», 2023. — С. 123–132. (0,63 п.л., авторский вклад 33%).
39. Козак С.З., Агеев В.В., **Мойланен Е.В.**, Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю. Комплексирование наземной и вертолётной электроразведки методом переходных процессов при выделении участков, перспективных для бурения на воду (на примере Якутии) // Инженерные изыскания. – 2015. – № 10-11. – С. 42-45. (0,25 п.л, авторский вклад 40%). Импакт-фактор 0,088 (РИНЦ). EDN: VHEERV.

40. Козак С.З., Агеев В.В., **Мойланен Е.В.**, Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю. Комплексирование наземного и вертолетного МПП при выделении участков, перспективных для бурения на воду в сложных условиях, на примере Якутии // Материалы 11-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная геофизика» (ИНЖГЕО 2015, Геленджик). — Геленджик: The European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE), 2015. — С. 1–5. (0,31 п.л., авторский вклад 20%).
41. Лаврентьев М.М. О задаче Коши для уравнения Лапласа // Известия АН СССР. Серия математическая. — 1956. — Т. 20, № 6. — С. 819–842.
42. Матвеев Б.К. Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1982. — 375 с.
43. **Мойланен Е.В.**, Волковицкий А.К. Новые возможности квадратурных аэроэлектроразведочных систем // Труды 6-й Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна (Новосибирск, 2013). — Новосибирск: Институт вычислительных технологий СО РАН, 2013. — С. 1–4. (0,25 п.л., авторский вклад 50%).
44. **Мойланен Е.В.**, Гараков А.М., Каршаков Е.В. Аэрогеофизическая съёмка республики Руанды (26 000 км²) с помощью системы ЭКВАТОР // Материалы 10-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2017, Москва). Т. 2. — М.: ИПУ РАН, 2017. — С. 154–157. (0,25 п.л., авторский вклад 33%).
45. **Мойланен Е.В.**, Керцман В.М., Подмогов Ю.Г. Возможности аэрогеофизики при поисках золоторудных месторождений различного типа // Труды 3-й Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии». Т. 2. — Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020. — С. 31–34. (0,25 п.л., авторский вклад 33%).

46. **Мойланен Е.В.,** Керцман В.М., Подмогов Ю.Г. Применение комбинированных аэроэлектроразведочных систем для решения рудных задач // Труды 4-й Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях». Т. 1. — Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2021. — С. 148–151. (0,25 п.л., авторский вклад 33%).
47. **Мойланен Е.В.** Современные методы аэроэлектроразведки // Материалы 8-й Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021, Москва). — М.: Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 2021. — С. 42–48. (0,44 п.л.)
48. **Мойланен Е.В.** Современные методы аэроэлектроразведки // Физика Земли. — 2022. — № 5. — С.171-180. (0,63 п.л.). Импакт-фактор 1,176. EDN: KWESLR.

Moilanen J. Modern methods of airborne electromagnetic survey // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2022. — Vol. 68, No. 5. — P. 755–764. (0,63 п.л.). Импакт-фактор 0,343 (SJР). EDN: NXHGFY.
49. Немировский А.С., Поляк Б.Т. Итеративные методы решения линейных некорректных задач при точной информации. II // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. — 1984. — № 3. — С. 18–25.
50. Павлов Б.В., Волковицкий А.К., Каршаков Е.В. Низкочастотная электромагнитная система относительной навигации и ориентации // Гироскопия и навигация. — 2010. — № 1 (68). — С. 3–14.
51. Павлов Б.В., Волковицкий А.К. Аэроэлектроразведочные измерительные комплексы и пути повышения их эффективности // Управление большими системами. — 2015. — № 54. — С. 134–165.
52. Подмогов Ю.Г., Каршаков Е.В., Керцман В.М., **Мойланен Е.В.** Применение

современных аэрогеофизических технологий для детальных инженерно-геологических изысканий // Инженерные изыскания. – 2015. – № 12. – С. 40-47. (0,5 п.л, авторский вклад 40%). Импакт-фактор 0,088 (РИНЦ). EDN: VBCDIT.

53. Подмогов Ю.Г., Каршаков Е.В., Керцман В.М., **Мойланен Е.В.** Применение современных аэрогеофизических технологий для детальных инженерно-геологических изысканий // Материалы 7-й Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна. — Иркутск: ИВТ СО РАН, 2015. — С. 1–5. (0,31 п.л., авторский вклад 25%).
54. Подмогов Ю.Г., Керцман В.М., **Мойланен Е.В.** Опережающие аэрогеофизические исследования комплексом «ЭКВАТОР» для повышения эффективности поиска рудных месторождений // Сборник тезисов 12-й Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» (Москва, 2023). — М.: ЦНИГРИ, 2023. — С. 366–369. (0,25 п.л., авторский вклад 33%).
55. Потанин А.С., Чварова Н.В., Керцман В.М., **Мойланен Е.В.** Анализ эффективности стадийных поисковых геолого-геофизических работ при открытии новых золоторудных месторождений // Геофизика. – 2023. – № 6. – с. 78-86. (0,56 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ). EDN: MRYEAD.
56. Потанин А.С., Чварова Н.В., Керцман В.М., **Мойланен Е.В.** Стадийность геолого-геофизических работ при открытии нового золоторудного поля на лицензиях компании Nordgold: месторождения Врезанное, Токкинское, Роман и другие перспективные объекты // Золото и технологии. — 2023. — № 1 (59). — С. 82–89. (0,50 п.л., авторский вклад 25%).
57. Светов Б.С., Алексеев Д.А., Агеев В.В., Каринский С.Д., Яковлев А.Г.

- Применение шумоподобных сигналов в зондированиях становлением поля // Геофизика. — 2012. — № 1. — С. 52–60.
58. Светов Б.С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индукционной электроразведки. — М.: Недра, 1973. — 254 с.
 59. Седельников Э.С. Анализ и синтез геофизических систем на примере электроразведки с использованием сверхдлинных волн. — М.: ЦНИГРИ, 2006. — 144 с.
 60. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. — СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ «Электроприбор», 2003. — 370 с.
 61. Стогний В.В., Коротков Ю.В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. — Новосибирск: Малотиражная типография 2D, 2010. — 121 с.
 62. Тархов А.Г., Бондаренко В.М., Никитин А.А. Комплексирование геофизических методов. — М.: Недра, 1982. — 221 с.
 63. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1990. — 232 с.
 64. Тихонов А.Н. Об устойчивости обратных задач // Доклады Академии наук СССР. — 1943. — Т. 39, № 5. — С. 195–198.
 65. Третьякова Е.А. Компенсация помех в аэроэлектроразведочных системах по измерениям поля двух диполей // Труды 19-й Всероссийской школы-конференции молодых учёных «Управление большими системами» (УБС'2023, Воронеж). — Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2023. — С. 393–400.
 66. Тхоренко М.Ю., Каршаков Е.В., Павлов Б.В., Козлов А.В. Алгоритм позиционирования подвижного объекта в низкочастотном электромагнитном поле // Автоматика и телемеханика. — 2015. — № 11. —

С. 160–173.

67. Тхоренко М.Ю., **Мойланен Е.В.**, Гаракоев А.М. Анализ работы аэроэлектроразведочных систем с различной геометрией на материалах геофизических съёмок в зоне Центрально-Африканского разлома // Труды 16-й Всероссийской школы-конференции молодых учёных «Управление большими системами» (УБС'2019, Тамбов). — Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. — С. 244–248. (0,31 п.л., авторский вклад 33%).
68. Феликс Ж.Т., Каршаков Е.В., Мельников П.В., Ванчугов В.А. Результаты сопоставления данных аэро- и наземных электроразведочных систем, используемых при поисках кимберлитов в республике Ангола // Геофизика. — М.: МОО ЕАГО, 2014. — № 4. — С. 17–22.
69. Халфин Л.А. Информационная теория интерпретации геофизических исследований // Доклады Академии наук СССР. — 1958. — Т. 122, № 6. — С. 1007–1010.
70. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / под ред. В. К. Хмелевского, И. Н. Модина, А. Г. Яковлева. — М., 2005. — 311 с.
71. Человечков А.И., Ратушняк А.Н., Байдилов С.В., Астафьев П.Ф. Аэроэлектроразведка при поисках месторождений проводящих руд. — Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. — 72 с.
72. Якубовский Ю.В. Индуктивные методы электроразведки. — М.: Госгеолтехиздат, 1963. — 212 с.
73. Яновская Т.Б., Порохова Л.Н. Обратные задачи геофизики: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2004. — 124 с.
74. Auken E., Boesen T., Christiansen A. V. A Review of Airborne Electromagnetic Methods with Focus on Geotechnical and Hydrological Applications from 2007 to 2017 // Advances in Geophysics. — 2017. — Vol. 58. — P. 47–94.

75. Becker A., Barringer A.R., Annan A.P. Airborne electromagnetics 1978–1988. Developments and Application of Modern Airborne Electromagnetic Surveys // United States: Geological Survey Bulletin. — 1990. — Vol. 1925. — P. 9–20.
76. Chang-Chun Y., Xiu-Yan R., Yun-He L., Yan-Fu Q., Chang-Kai Q., Jing C. Review on airborne electromagnetic inverse theory and applications // Geophysics. — 2015. — Vol. 80, No. 4. — P. W17–W31.
77. Chen T., Hodges G., Christensen A. N., Lemieux J. Multipulse Airborne TEM Technology and Test Results Over Oil-sands // 76th EAGE Conference. — Amsterdam, 2014. — P. 1–4.
78. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // Geophysics. — 1987. — Vol. 52, No. 3. — P. 289–300.
79. Ernst O.G., Sprungk B., Starkloff H.-J. Bayesian Inverse Problems and Kalman Filters // Extraction of Quantifiable Information from Complex Systems. Lecture Notes in Computational Science and Engineering. — 2014. — Vol. 102. — P. 133–159.
80. Farquharson C.G., Oldenburg D.W., Routh P.S. Simultaneous 1D inversion of loop–loop electromagnetic data for magnetic susceptibility and electrical conductivity // Geophysics. — 2003. — Vol. 68, No. 6. — P. 1857–1869.
81. Fiandaca G., Auken E., Madsen L. M. 3-D time-domain spectral inversion of resistivity and full-decay induced polarization data — full solution of Poisson's equation and modelling of the current waveform // Geophysical Journal International. — 2020. — Vol. 223, No. 3. — P. 2101–2116.
82. Forsberg R. A Study of Terrain Reductions, Density Anomalies and Geophysical Inversion Methods in Gravity Field Modelling. — Columbus: The Ohio State University, 1984. — 134 p.
83. Fountain D. Airborne Electromagnetic Systems — 50 Years of Development //

- Exploration Geophysics. — 1998. — Vol. 29. — P. 1–11.
84. Fountain D. 60 Years of Airborne EM — Focus on the Last Decade // Proceedings of the 5th International Conference on Airborne Electromagnetics (AEM2008). — Haikko Manor, Finland, 2008. — 8 p.
 85. Franklin J.N. Well-Posed Stochastic Extensions of Ill-Posed Linear Problems // Journal of Mathematical Analysis and Applications. — 1970. — Vol. 31. — P. 682–716.
 86. Fraser D.C. Layered-earth resistivity mapping // United States: Geological Survey Bulletin. — 1987. — P. 33–41.
 87. Gisselø P.G., Nyboe N.S. SkyTEM312HP — Optimized for depth of investigation // Proceedings of the 7th International Workshop on Airborne Electromagnetics (AEM2018). — Kolding, Denmark: Aarhus University, 2018. — P. 1–3.
 88. Golovan A.A., Parusnikov N.A. A relationship between the stochastic estimability measure and singular matrix expansions // Automation and Remote Control. — 1998. — Vol. 59, No. 2. — P. 190–193.
 89. Green A., Lane R. Estimating Noise Levels in AEM Data // 16th Geophysical Conference and Exhibition. — Adelaide, Australia, 2003. — 5 p.
 90. Guillemoteau J., Sailhac P., Béhaegel M. Regularization strategy for the layered inversion of airborne transient electromagnetic data: application to in-loop data acquired over the basin of Franceville (Gabon) // Geophysical Prospecting. — 2011. — Vol. 59. — P. 1132–1143.
 91. Havlik J., Straka O. Performance Evaluation of Iterated Extended Kalman Filter with Variable Step-Length // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — Vol. 659. — P. 12–22.
 92. Hefford S.W., Smith R.S., Samson C. Quantifying the Effects That Changes in Transmitter-Receiver Geometry Have on the Capability of an Airborne

- Electromagnetic Survey System to Detect Good Conductors // Exploration and Mining Geology. — 2006. — Vol. 15, Nos. 1–2. — P. 43–52.
93. Hodges G. The power of frequency domain: When you should be using it // 6th International AEM Conference. — Kruger Park, South Africa, 2013. — P. 1–5.
94. Kaminski V., Viezzoli A. Modeling induced polarization effects in helicopter time-domain electromagnetic data: Field case studies // Geophysics. — 2017. — Vol. 82, No. 2. — P. B49–B61.
95. Karshakov E.V., Kharichkin M.V. A stochastic estimation problem at aeromagnetometer deviation compensation // Automation and Remote Control. — 2008. — Vol. 69, No. 7. — P. 1162–1170.
96. Karshakov E.V., **Moilanen J.** Combined interpretation of time domain and frequency domain data // Proceedings of the 7th International Workshop on Airborne Electromagnetics (AEM2018). — Kolding, Denmark: Aarhus University, 2018. — P. 1–3. (0,19 п.л., авторский вклад 50%).
97. Karshakov E.V., **Moilanen J.** Overcoming Airborne IP in Frequency Domain: Hopes and Disappointments // Extended Abstracts of the 16th SAGA Biennial Conference & Exhibition (Durban, South Africa, 2019). — Durban: SAGA, 2019. — P. 1–4. (0,25 п.л., авторский вклад 50%).
98. Karshakov E.V., **Moilanen J.** Overcoming Airborne IP in Frequency Domain // Труды 16-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика 2020» (Пермь). — Пермь: EarthDoc, 2020. — P. 1–9. (0,56 п.л., авторский вклад 50%).
99. Karshakov E.V., Podmogov Y.G., Kertsman V.M., **Moilanen J.** Combined Frequency Domain and Time Domain Airborne Data for Environmental and Engineering Challenges // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. — 2017. — Vol. 22, № 1. — P. 1–11. (0,69 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор 0,234 (SJR). EDN: YVMURZ.

100. Karshakov E.V., Tretyakova E. A., Kaplun D. V. Analysis of the self-interference model and compensation methods in airborne electromagnetics // Short Abstracts of the 8th Workshop on Airborne Electromagnetics (AEM 2023, Fitzroy Island). Vol. 2023, No. 2. — Fitzroy Island: Australian Society of Exploration Geophysicists, 2023. — P. 97–100.
101. Karshakov E.V. Iterated extended Kalman filter for airborne electromagnetic data inversion // Exploration Geophysics. — 2020. — Vol. 51, No. 1. — P. 66–73.
102. Karshakov E. Airborne electromagnetics: dealing with the aircraft speed // 8th International Airborne Electromagnetics Workshop (3–7 September 2023). — Fitzroy Island, 2023. — P. 281–284.
103. Kaufman A.A., Alekseev D.A., Oristaglio M. Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics // Methods in Geochemistry and Geophysics. — 2014. — Vol. 45. — 412 p.
104. Kaufman A.A. A paradox in geoelectromagnetism, and its resolution, demonstrating the equivalence of frequency and transient domain methods // Geoexploration. — 1989. — Vol. 25, No. 4. — P. 287–317.
105. Keppenne C.L., Rienecker M. Assimilation of temperature into an isopycnal ocean general circulation model using a parallel Ensemble Kalman filter // Journal of Marine Systems. — 2003. — Vols. 40–41. — P. 363–380.
106. Kertsman V.M., **Moilanen J.**, Podmogov Y.G. Special place of airborne electromagnetic survey in detailed exploration of kimberlites in the conditions of the Angolan Shield // Proceedings of the 7th International Workshop on Airborne Electromagnetics (AEM2018, Kolding, Denmark). — Kolding: Aarhus University, 2018. — P. 1–4. (0,25 п.л., авторский вклад 33%).
107. Killeen P.G. Exploration Trends and Developments in 2010 / ed. A. Hiyate. — Toronto: The Northern Miner, 2011. — 28 p.

108. Legault J.M., Izarra C., Prikhodko A., Zhao S., Saadawi E.M. Helicopter EM (ZTEM–VTEM) survey results over the Nuqrah copper–lead–zinc–gold SEDEX massive sulphide deposit in the Western Arabian Shield, Kingdom of Saudi Arabia // *Exploration Geophysics*. — 2015. — Vol. 46. — P. 36–48.
109. Legault J.M. Airborne Electromagnetic Systems — State of the Art and Future Directions // *CSEG Recorder*. — 2015. — Vol. 40, No. 6. — P. 38–49.
110. Lo B., Kuzmin P. Z-TEM (airborne AFMAG) as applied to hydrocarbon prospecting // 5th International Conference on Airborne Electromagnetics (AEM-2008). — 2008. — P. 1–4.
111. Macnae J.C., Smith R., Polzer B.D., Lamontagne Y., Klinkert P.S. Conductivity-depth imaging of airborne electromagnetic step-response data // *Geophysics*. — 1991. — Vol. 56, No. 1. — P. 102–114.
112. Macnae J., King A., Stolz N., Osmakoff A., Blaha A. Fast AEM data processing and inversion // *Exploration Geophysics*. — 1998. — Vol. 29, No. 2. — P. 163–169.
113. Macnae J. Developments in Broadband Airborne Electromagnetics in the Past Decade // *Proceedings of Exploration 07: 5th International Conference on Mineral Exploration* / ed. B. Milkereit. — 2007. — P. 387–398.
114. Macnae J., Kratzer T. An Airborne Heterodyne Sulphide Exploration Test at Kempfield // 8th International Airborne Electromagnetics Workshop. — 2023. — P. 295–298.
115. Mitchell H.L., Houtekamer P.L., Pellerin G. Ensemble size, and model-error representation in an Ensemble Kalman filter // *Monthly Weather Review*. — 2002. — Vol. 130. — P. 2791–2808.
116. **Moilanen J.**, Karshakov E.V., Volkovitsky A.K. Time Domain Helicopter EM System „Equator“: Resolution, Sensitivity, Universality // *Papers of the 13th SAGA Biennial and 6th International AEM Conference* (Mpumalanga, South

- Africa, 2013). — Mpumalanga: AEM, 2013. — P. 1–4. (0,25 п.л., авторский вклад 33%).
117. **Moilanen J.**, Pavlov B.V., Karshakov E.V., Volkovitsky A.K., Garakoev A.M. Airborne Geophysical Technologies as a Basis for Diamond Field Prognoses in Regional and State Scale // Proceedings of the 12th International Conference «Management of Large-Scale System Development» (MLSD). — Moscow: IEEE, 2019. — P. 1–4. (0,25 п.л., авторский вклад 20%).
118. **Moilanen J.** Different scale complex airborne geophysical survey in the Central African ridge area // Proceedings of the 24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Porto, 2018). — Porto: European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. — Vol. 2018. — P. 1–5. (0,31 п.л.)
119. Mule S., Lockwood R. Evolution of TEMPEST — Bird Positioning // Proceedings of AEM2013. — Mpumalanga, South Africa, 2013. — 4 p.
120. Olson D. GT-1A and GT-2A airborne gravimeters: improvements in design, operation, and processing from 2003 to 2010 // Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2010 Workshop / ed. R. Lane. — Canberra: Geoscience Australia, 2010. — P. 152–171.
121. Palacky G.J., West G.F. Airborne Electromagnetic Methods // Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Vol. 2: Applications / ed. M. N. Nabighian. — Tulsa: SEG, 2008. — P. 811–880.
122. Palacky G.J. Resistivity characteristics of geologic targets // Electromagnetic Methods / ed. M. N. Nabighian. — Tulsa: SEG, 1987. — P. 53–129.
123. Park J.H., Kaneko A. Assimilation of coastal acoustic tomography data into a barotropic ocean model // Geophysical Research Letters. — 2000. — Vol. 27. — P. 3373–3376.
124. Podmogov Y.G., **Moilanen J.**, Kertsman V.M. Results of the Complex Airborne Geophysical Survey in the Central African Ridge Area // Practical and

Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. — Cham: Springer, 2019. — P. 387–394. (0,50 п.л., авторский вклад 33%).

125. Prihodko A., Bagrianski A., Kuzmin P. Capabilities of the Airborne MobileMT for the Expansion of Active and Historical Mines // Fast TIMES EEGS. — 2020. — Vol. 25, No. 4. — P. 107–113.
126. Sengpiel K.P. Approximate inversion of airborne EM data from a multilayered ground // Geophysical Prospecting. — 1988. — Vol. 36. — P. 446–459.
127. Simon D. Optimal State Estimation: Kalman, H_∞ and Nonlinear Approaches. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. — 550 p.
128. Smith R.S. Tracking the Transmitting-Receiving Offset in Fixed-Wing Transient EM Systems: Methodology and Application // Exploration Geophysics. — 2001. — Vol. 32. — P. 14–19.
129. Smith R. Electromagnetic induction methods in mining geophysics from 2008 to 2012 // Surveys in Geophysics. — 2014. — Vol. 35. — P. 123–156.
130. Sorensen K.I., Mai S., Mohr K.R., Nyboe N.S. Development of High Dipole TDEM Systems // Proceedings of AEM 2013. — Mpumalanga, South Africa, 2013. — 2 p.
131. Sorensen K.I. The Developments in Helicopter TEM // Proceedings of AEM 2018. — Kolding, Denmark, 2018. — 2 p.
132. Spies B.R., Frischknecht F.C. Electromagnetic Sounding // Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Vol. 2: Applications / ed. M. N. Nabighian. — Tulsa: SEG, 2008. — P. 285–425.
133. Tarantola A. Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. — Philadelphia: SIAM, 2005. — 358 p.
134. Viezzoli A., Kaminski V., Ebner N., Menghini A. Extracting IP information

- from AEM data to improve the hydrogeological interpretation // Extended Abstracts of ASEG 2016 Conference. — Adelaide, Australia, 2016. — P. 4.
135. Volkovitsky A.K., Karshakov E.V. Airborne EM systems variety. What is the difference? // Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference. — Kruger Park, South Africa, 2013. — P. 1–4.
136. Volkovitsky A.K., Karshakov E.V., **Moilanen J.**, Pavlov B.V. Integration Magnetic Gradiometer Correlation-Extremal and Inertial Navigation Systems // Proceedings of the 19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. — SPb.: Concern CSRI Elektropribor, 2012. — P. 182–184. (0,19 п.л., авторский вклад 25%).
137. Volkovitsky A.K., Kertsman V.M., **Moilanen J.**, Podmogov Y.G. Different scale complex airborne geophysical survey in the Central African ridge area // Proceedings of the European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE). — 2018. — P. 1–9. (0,56 п.л., авторский вклад 25%).
138. Volkovitsky A.K., Kertsman V.M., **Moilanen J.**, Podmogov Y.G. Airborne Electromagnetic System Equator. The Comparison of Geological Information in Electromagnetic Soundings in Time Domain and Frequency Domain // Proceedings of the 15th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2019. — Gelendzhik: EAGE, 2019. — P. 836–845. (0,63 п.л., авторский вклад 25%).
139. Volkovitsky A.K., Karshakov E.V. Adaptive correction for airborne electromagnetic measurements // 8th International Airborne Electromagnetics Workshop (3–7 September 2023). — Fitzroy Island, 2023. — P. 285–288.
140. Vovenko T.A., **Moilanen J.**, Volkovitsky A.K., Karshakov E.V. New Abilities of Quadrature EM Systems // Papers of the 13th SAGA Biennial and 6th International AEM Conference (Mpumalanga, South Africa, 2013). — Mpumalanga: AEM, 2013. — P. 1–4. (0,25 п.л., авторский вклад 33%).

141. Ward S.H., Hohmann G.W. Electromagnetic Theory for Geophysical Applications (Chapter 4) // Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Vol. 1: Theory. — Tulsa: SEG, 1988. — P. 131–310.
142. Whitford M., Fitzpatrick A. Some comparisons of AEM systems for specific mineral exploration problems // Proceedings of the 8th International Airborne Electromagnetics Workshop. — 2023. — P. 231–236.
143. Zhdanov M.S. Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems. — Amsterdam: Elsevier, 2002. — 635 p.

Список иллюстраций

Рисунок 1.1. Классификация основных типов аэроэлектроразведочных систем....	22
Рисунок 1.2. Спектральная плотность измерений шумов текущего и предыдущих поколений приемников (на примере SkyTEM).....	22
Рисунок 1.3. Пассивная система MobileMT.....	24
Рисунок 1.4. Частотная и временная вертолетные системы.....	25
Рисунок 1.5. Геоэлектрические разрезы, построенные по 1D инверсии частотных (а) и временных (б) данных.....	26
Рисунок 1.6. Частотная система с нежестким креплением передатчика относительно приемника ЕМ-4Н во время съемки.....	27
Рисунок 1.7. Комбинированная система SkyTEM.....	28
Рисунок 1.8. Форма тока аэроэлектроразведочных систем.....	28
Рисунок 1.9. Спектры сигналов аэроэлектроразведочных систем.....	29
Рисунок 1.10. Аэроэлектроразведочная система ЭКВАТОР.....	31
Рисунок 1.11. Ток в петле передатчика комплекса ЭКВАТОР и форма импульса, с которой выполняется свертка для получения сигналов отклика во временной области.....	32
Рисунок 1.12. Диполи системы ЭКВАТОР.....	33
Рисунок 1.13. Структура программно-алгоритмического комплекса для регулярной камеральной обработки комбинированной аэроэлектроразведки ЭКВАТОР.....	34
Рисунок 2.1. Приемник системы ЭКВАТОР.....	47
Рисунок 2.2. Компенсация в частотной области.....	51
Рисунок 2.3. Компенсация во временной области.....	52
Рисунок 2.4. Компенсация колебаний приемника. Исходные (слева) и скомпенсированные (справа) данные вертикальной компоненты отклика для частотной области (вверху), скорости спада (в центре) и спада (снизу).....	53

Рисунок 2.5. Синфазный и квадратурный отклик МПП-систем (db/dt) [Hefford et al., 2006].....	56
Рисунок 2.6. Отраженный диполь.....	59
Рисунок 2.7. Отклики для однородного полупространства.....	60
Рисунок 3.1. Сравнение кажущихся сопротивлений.....	82
Рисунок 3.2. Невязка для модели однородного полупространства с произвольным удельным сопротивлением (ось X) и для модели 1000 Ом·м во временной и частотной областях.....	90
Рисунок 3.3. Невязка между рассчитанным откликом для модели двуслойной среды с меняющимся сопротивлением основания и мощностью верхнего слоя и отклика от модели (перекрывающий слой 2000 Ом·м мощностью 200 м и основание 10 Ом·м) для частотной (вверху) и временной (внизу) областей.....	91
Рисунок 3.4. Невязка между рассчитанным откликом для модели двухслойной среды с меняющимся сопротивлением основания и верхнего слоя и отклика от модели (перекрывающий слой 100 Ом·м мощностью 20 м и основание 80 Ом·м) для временной и частотной областей.....	92
Рисунок 3.5. Одномерная инверсия в частотной (левый верхний) и временной (правый верхний) области и комбинированная (правый нижний) одномерная инверсия данных, полученных от четырехслойной модели (левый нижний).....	93
Рисунок 4.1. Гистограмма распределения кажущегося сопротивления для частоты 1620 Гц для участка Толятой (по оси X отложено кажущееся сопротивление, по Y – количество встречающихся значений).....	103
Рисунок 4.2. Кажущиеся удельные сопротивления в канале 1620 Гц по участку Толятой.....	105
Рисунок 4.3. Геолого-геофизический разрез по профилю 4070 по участку Толятой	107
Рисунок 4.4. Условные обозначения к геоэлектрическим разрезам участка Толятой	107
Рисунок 4.5. Схематичная геоэлектрическая модель для кимберлитовых трубок	

Ангольского щита. 1 — пески группы Калахари, 2 — кристаллическое основание, 3 — коры выветривания по породам основания, 4 — кратерная часть кимберлитовой трубки, 5 — диатрема.....	109
Рисунок 4.6. Сравнение аэро- и наземных геофизических данных, полученных на промышленно алмазоносной кимберлитовой трубке Лорелей [Феликс и др., 2014]	109
Рисунок 4.7. Карта кажущихся сопротивлений, вычисленных для частотного канала 3163 Гц.....	110
Рисунок 4.8. Карта кажущихся сопротивлений, вычисленных для временного канала 250 мкс.....	111
Рисунок 4.9. Обобщенная геоэлектрическая модель трубок Зимнебережного района.....	112
Рисунок 4.10. Геоэлектрические разрезы (1011870–1011892), проходящие через трубку им. В.П. Гриба, черными линиями показаны фактические маршруты полета (А) и геоэлектрическая модель трубки (Б).....	113
Рисунок 4.11. Геоэлектрические разрезы по совмещенным профилям через трубку Волчья по ЭМ данным систем ЭКВАТОР (А) и HelITEM (Б), геологическая модель трубки между ними.....	114
Рисунок 4.12. Геоэлектрический разрез по линии 1011730 через кимберлитовую трубку Майская.....	114
Рисунок 4.13. Схема перспективных для бурения на воду субвертикальных зон по данным аэроМПП (1 — профили наземных ЗСБ-МПП, 2 — маршруты полетов с аппаратурой ЭКВАТОР, 3 — зоны, перспективные для бурения на воду).....	116
Рисунок 4.14. Сопоставление по линии АА результатов аэроработ с аппаратурой ЭКВАТОР и наземных работ ЗСБс выделением аномальных зон в метегероичерском горизонте (а — номер геоэлектрического горизонта, б — зоны, перспективные для бурения на воду).....	119
Рисунок 4.15. Обзор района исследования в Хорватии.....	121
Рисунок 4.16. Сечение удельного сопротивления, полученное по данным	

аэроэлектроразведки (нижняя диаграмма), с соответствующей невязкой данных (верхняя диаграмма) и местоположением буровой скважины 1 (выделено красным); см. рис. 4.17.....122

Рисунок 4.17. Стратиграфия буровой скважины 1 сравнивается с соответствующим вертикальным профилем удельного сопротивления, полученным из инверсии данных аэроэлектроразведки.....123

Рисунок 4.18. Одномерная инверсия в комбинированном, частотном и временном варианте, а также меры оцениваемости сопротивлений.....124

ПРИЛОЖЕНИЕ П.1. Справки о внедрении результатов работы



МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А. П. КАРПИНСКОГО»
(ФГБУ «ИНСТИТУТ КАРПИНСКОГО»)

НОРИЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

Ленинский пр., 21А, г. Норильск,
Красноярский край, 663302

Телефон: (3919) 46-83-49

Факс: (3919) 46-83-49

E-mail: nf@karpinskyinstitute.ru

29.10.2024

№ 20/213

АКТ

**О внедрении результатов диссертационной работы
«Методы и алгоритмы обработки измерений и
интерпретации данных в комбинированных
аэроэлектроразведочных системах» на соискание
ученой степени кандидата технических наук по
специальности 1.6.9. «Геофизика»
Мойланена Евгения Викторовича**

ИПУ РАН
научному сотруднику
Лаборатории № 1
Мойланену Е.В.

117997, г. Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65

Результаты диссертационной работы Мойланена Е.В. были применены при выполнении Норильским филиалом ФГБУ «ВСЕГЕИ» аэрогеофизических исследований с аэроэлектроразведочной системой ЭКВАТОР для поиска новых кимберлитовых тел на участке Китубия в республике Ангола в 2013 году. Разработанный Е.В. Мойланенным методы и алгоритмы обработки первичных измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы, а также алгоритмы вычисления кажущегося сопротивления в формате инверсии позволили выделить ряд перспективных аномалий по полученным данным. В результате проведенных заверочных буровых работ на восемнадцати рекомендованных аномальных объектах, на шестнадцати из них был вскрыт кимберлит, в том числе один — алмазонасный.

При помощи системы ЭКВАТОР были выполнены работы на участках Лорелей и Китубия в Анголе, Ак-Суг в республике Тыва, Енжинская, Монкрес, Желос в Иркутской области, Разведочная, Могенская, Нижне-Халильская, Халильская и Нирунгдисккая в Красноярском крае общим объемом около 30 тыс. пог. км. Для обработки всего объема данных успешно применялись указанные методы и алгоритмы, разработанные Е.В. Мойланенным.

Директор



Ф.Д. Лазарев



"АЛРОСА" акционерная компания **Акционерная компания "АЛРОСА"** **ALROSA**
 (аһаһас акционернай уопсастыба) (публичное акционерное общество) Public Joint Stock Company
 ул. Ленина, д. 6, г. Мирный, Мирнинский улус, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация, 678174
 Тел: +7 (41136) 3-00-30 Факс: +7 (41136) 3-04-51
 Email: mirinfo@alrosa.ru Сайт: www.alrosa.ru

02.10.2024 № 02-Р# / 37

На № _____ от _____

ИПГУ РАН
 научному сотруднику лаборатории №1
Мойланену Е.И.

Адрес: г. Москва
 ул. Профсоюзная д. 65 стр. 1

Акт
о внедрении результатов диссертационной работы «Методы и алгоритмы
обработки измерений и интерпретации данных в
комбинированных аэроэлектроразведочных системах»
на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 1.6.9. «Геофизика»
Мойланена Евгения Викторовича

Результаты диссертационной работы Мойланена Е.В. были применены при выполнении аэрогеофизических исследований с аэроэлектроразведочной системой ЭКВАТОР для изучения свойств удельной электропроводности на эталонных участках АК «АЛРОСА» в 2014 году. Разработанные Е.В. Мойланенным методы и алгоритмы обработки первичных измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР обеспечили выделение поля отклика на фоне первичного поля и компенсацию наведенных помех до уровня инструментальных погрешностей приемника.

При помощи аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР были выполнены работы на участках Улегир-1, 2, Мар-Сиене-1, 2 и Полигон в объеме 3100 погонных километров.

Главный геолог

Р. Ю. Желонкин

Гончаров Е.М.,
 +7 (9142521668)
 GoncharovEM@alrosa.ru





**Акционерное Общество
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ
«ГИДЭК»**

Адрес места нахождения: 105203, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Восточное Измайлово,
ул. 15-я Парковая, д. 10а, этаж 1, помещ. 3
тел. (495) 965-98-61; e-mail: info@hydec.ru www.hydec.ru ИНН 7719014380 КПП 771901001
ОГРН 1037739319914

ИПУ РАН
научному сотруднику Лаборатории № 1
Мойланену Е.В.

Исх. № 01-04/15 от 26.03 2025 г.

Адрес: 117997, г. Москва
ул. Профсоюзная, д. 65

**Акт о внедрении результатов диссертационной работы «Методы и алгоритмы
обработки измерений и интерпретации данных в
комбинированных аэроэлектроразведочных системах»
на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
1.6.9. «Геофизика»
Мойланена Евгения Викторовича**

Результаты диссертационной работы Мойланена Е.В. были применены при решении АО «ГИДЭК» гидрогеологических задач. Разработанные Е.В. Мойланенным методы и алгоритмы обработки первичных измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы, а также алгоритмы вычисления удельного сопротивления в формате инверсии позволили выделить ряд перспективных аномалий по полученным данным.

При помощи системы ЭКВАТОР были выполнены работы на Чаяндинском и Среднеботуобинском нефтегазоконденсатных месторождениях (Якутия) в 2014-15 гг. и на золоторудном месторождении Сухой Лог (Иркутская обл.) в 2019 г. общим объемом 1 500 пог. км. В результате проведенных заверочных буровых работ были получены притоки свободной воды.

Генеральный директор

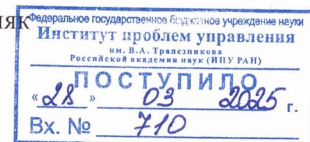
Главный специалист,
кандидат геол.-минерал. наук



(Signature of A.Yu. Kaplan)
(Signature of A.G. Chernyakh)

А.Ю.Каплан

А.Г.Чернях





ООО «Геотехнологии»
ИНН 7702390266 КПП 770201001
р/с 40702810938000110438 в ПАО Сбербанк
к/с 30101810400000000225, БИК 044525225

107031, г. Москва, ул. Рождественка, д. 5/7, стр. 2
пом. V, ком. 18, тел.: +7 499 344 04 24
info@geotechnologies.ru

Исх. № 09-09/2024-1 от 09 сентября 2024 г.

ИПУ РАН
н.с. Лаборатории № 1
Мойланену Е.В.

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

**Акт о внедрении результатов диссертационной работы «Методы и алгоритмы обработки измерений и интерпретации данных в комбинированных аэроэлектроразведочных системах» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9. «Геофизика»
Мойланена Евгения Викторовича**

Разработанные в диссертационной работе методы и алгоритмы обработки первичных измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы, алгоритмы вычисления кажущихся сопротивлений, алгоритмы решения обратной задачи были в полной мере реализованы в пакете программ обработки данных электроразведочной системы ЭКВАТОР. Внедрение комбинированной инверсии данных позволило обеспечить максимальную эффективность при анализе удельной электропроводности как в верхней части разреза, так и на глубине до 400 метров, обеспечивая при этом широкий диапазон оцениваемых сопротивлений — от долей до десятков тысяч Ом·м.

Данные алгоритмы были реализованы при анализе данных для решения гидрогеологических задач (Якутия, Хорватия, Италия), для поиска кимберлитов (Ангола, Зимнебережный алмазоносный район, Якутия), а также других рудных задач (Иркутская область, Бурятия, Тыва, Якутия, Камчатка, Красноярский край, Хабаровский край, Руанда).

Исполняющий обязанности
генерального директора

Корбаков М.В.



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки	
Институт проблем управления	
им. В.А. Трапезникова	
Российской академии наук (ИПУ РАН)	
ПОСТУПИЛО	
« 28 »	09 2025 г.
Вх. №	709

ПРИЛОЖЕНИЕ П.2. Техническое описание съемочного комплекса

П.2.1. Аппаратурное обеспечение

Комплекс технических средств технологии ЭКВАТОР включает бортовое оборудование, а также приборы наземного обеспечения измерений. Все приборы, составляющие бортовой комплекс, объединены единой системой регистрации информационных потоков и записи бортовой информации. Приборы, входящие в комплекс наземного обеспечения работ, функционируют автономно. Обработка информации, полученной в процессе регистрации на борту летательного аппарата во время съемки, а также данные, получаемые приборами наземного комплекса, совместно обрабатываются на этапе первичной полевой обработки данных.

В состав технических средств бортового комплекса входят:

- аэроэлектроразведочная система ЭКВАТОР;
- аэромагнитометрическая система ГТ-МАГ;
- аэрогамма-спектрометрическая система (32 л NaI(Tl) сцинтилляторы);
- устройства-источники геопозиционной информации;
- система регистрации аэрогеофизической информации и управления процессом выполнения полетного задания NAVDAT.

Состав и устройство аэрокомплекса ЭКВАТОР показаны на Рис. 1.

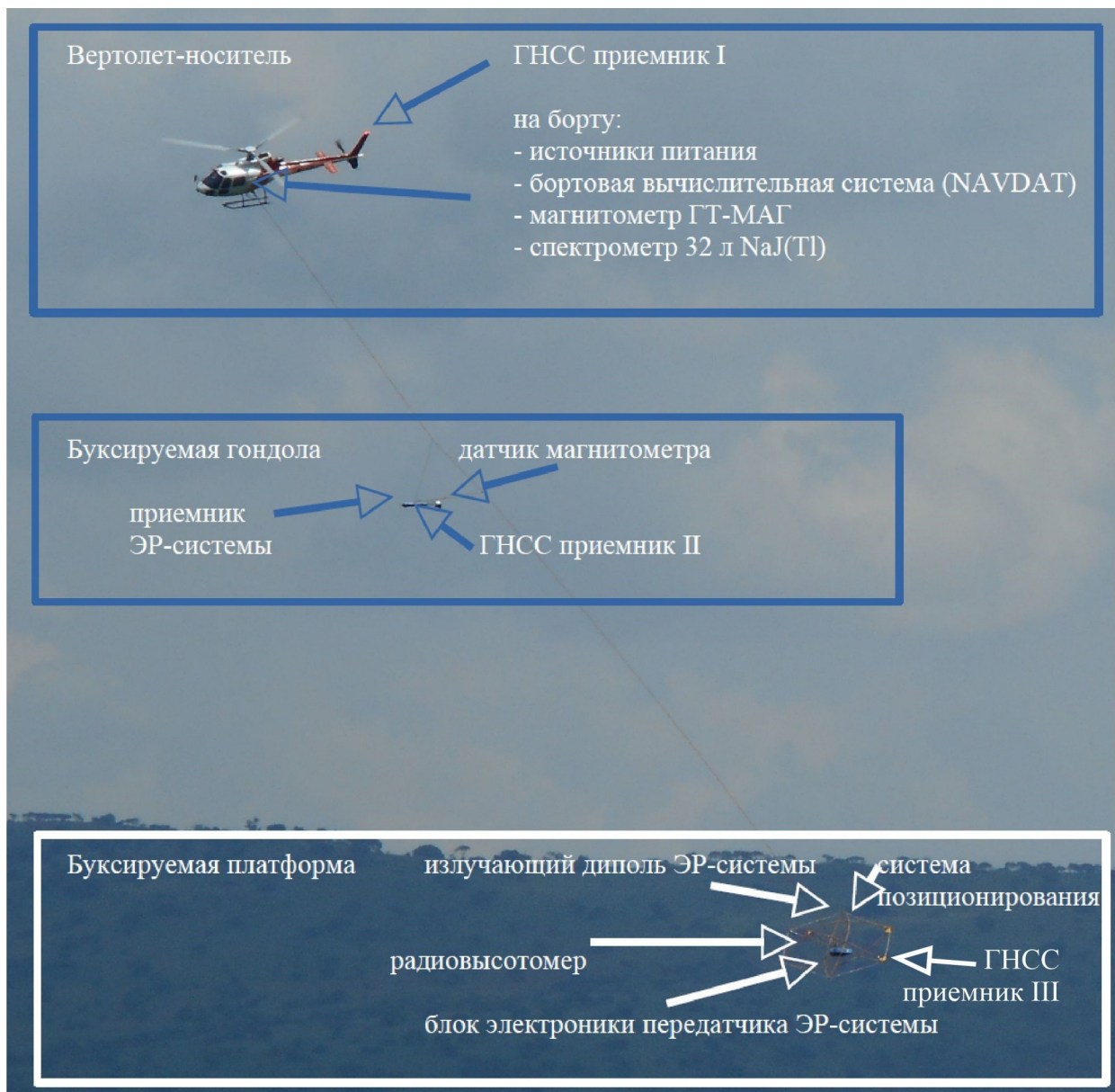


Рисунок 1. Внешний вид и устройство бортового комплекса ЭКВАТОР

Аэродинамические характеристики буксируемого оборудования позволяют производить съемочные полеты в широком диапазоне скоростей (20 — 200 км/ч) и пилотажных маневров — штатный радиус разворота при пилотировании составляет 150 — 200 м. В рамках данной диссертации не будем подробно останавливаться на изложении особенностей аэромагнитометрии и аэрогамма-спектрометрии.

П.2.2. Аэроэлектроразведочная система комплекса ЭКВАТОР

Электроразведочная система аэрокомплекса ЭКВАТОР предназначена для определения параметров распределения свойств электропроводности в верхних слоях горных пород (до 400 м) на исследуемой территории. Система представляет собой полностью буксируемую, разнесенную активную индуктивную низкочастотную установку с нижним расположением источника возбуждающего поля. В системе использован уникальный принцип представления результатов зондирования одновременно в двух формах — временной, в виде набора накоплений по серии временных каналов, и частотной — в форме спектра, составленного из значений комплексных амплитуд поля отклика для значащих гармоник. В Табл. 1 приведены технические характеристики аэроэлектроразведочной системы.

Технические характеристики аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР

Параметр	Значение
Тип установки	Буксируемая, разнесенная, передатчик внизу
Диаметр дипольного излучателя передатчика, количество витков	D=7,5 м, N=6 витков
Расположение приемника	На буксировочном кабеле в 40 м от передатчика
Дипольный момент возбуждающей системы	M=100 000 Ам ²
Форма зондирующего сигнала	Двухполярный полусинус с дополнительными гармониками
Базовая частота возбуждения	77 Гц
Частота дискретизации при измерении сигналов	200 кГц, непрерывно
Частота счисления параметров накопления	6,61 Гц
Каналы измерения X, Y, Z	Временное накопление V(t), dB/dt 14 окон: 5 – 4500 мкс; Частотное когерентное накопление V(t): Синфазные: 34 частоты 77 – 15 000 Гц Квадратурные: 34 частоты 77 – 15 000 Гц

Зондирующее переменное магнитное поле системы ЭКВАТОР возбуждается петлевым дипольным излучателем диаметром 7,5 м, размещаемым на буксируемой платформе. Направление вектора дипольного момента передающей системы — вертикальное.

Взаимное угловое расположение источника возбуждающего поля и приемника определяется с использованием метода относительного электромагнитного позиционирования [Волковицкий, 2012].

Приемная система, размещаемая в буксируемой гондоле, содержит трехкомпонентный индукционный датчик, в форме куба, размером 160 мм, на гранях

которого попарно размещены экранированные приемные рамки на сердечниках из пресс-пермаллоя так, что центры чувствительности по всем трем направлениям находятся в точке пересечения главных диагоналей. Сигналы, снимаемые с клемм индукционного датчика, подаются на вход блока электроники, где подвергаются оцифровке, предварительной вычислительной обработке, после чего передаются по цифровой магистрали троса-кабеля на интерфейс бортового вычислительного комплекса.

Вычисления, выполняемые на борту летательного аппарата, служат целям контрольной визуализации. Вся информация, получаемая в результате оцифровки сигналов аэроэлектроразведочной системы, записывается на диск бортовой ЭВМ и заново полностью переобрабатывается в пост-процессинге на этапе полевой первичной обработки.

П.2.3. Аэронавигационное оборудование

Аэронавигационное обеспечение в структуре комплекса ЭКВАТОР обеспечивается с использованием трех спутниковых навигационных приемников GPS/ГЛОНАСС/Galileo/Beidou, электромагнитной подсистемы относительного позиционирования (в составе аэроэлектроразведочной установки) и радиовысотомера Smartmicro (Германия).

Антенна навигационного приемника I устанавливается на борту летательного аппарат-носителя и обеспечивает высокоточное позиционирование и информацию для управления движением по заданным линиям пути. Измерительная электроника этого приемника устанавливаются на борту летательного аппарата. Цифровая информация передается в бортовую вычислительную систему с использованием USB-соединения.

Антенна навигационного приемника II устанавливается на корпусе буксируе-

мой гондолы и обеспечивает точное определение координат датчика магнитометра и приемника электроразведочной системы в географической системе координат. Измерительная электроника этого приемника устанавливается в буксируемой гондоле, поток данных транслируется в бортовую вычислительную систему по тросу-кабелю.

Антенна навигационного приемника III устанавливается на буксируемой платформе и обеспечивает точное определение координат диполя-излучателя аэро-электроразведочной системы в географической системе координат. Измерительная электроника этого приемника устанавливается в блоке электроники возбуждающей системы, поток данных транслируется в бортовую вычислительную систему по тросу-кабелю.

Система относительного электромагнитного позиционирования [Павлов и др., 2010] обеспечивает высокоточное определение параметров пространственного и углового взаимного расположения приемника электроразведочной системы относительно источника поля.

Технические характеристики средств навигационного обеспечения бортового комплекса ЭКВАТОР приведены в Табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики средств навигационного обеспечения бортового комплекса ЭКВАТОР

№	Устройство	Тип	Параметры
1	Приемник I Приемник II Приемник III	ОЕМ-ГНСС- приемник Novatel	Созвездие: GPS, ГЛОНАСС Частоты: L1 Измерения: КОД, фаза Темп счисления: 10 изм. в сек. Синхронизация: метка PPS
2	Электромагнитная система относительного позиционирования	---	Точность определения расстояния: 10 см. Точность определения углов 2 град. Чувствительность к изменению расстояния: 0,1 см Чувствительность к изменению угла: 0,1 град.
3	Радиовысотомер	Smartmicro	Точность измерения высоты: 3-5%

П.2.4. Бортовая вычислительная система регистрации аэрогеофизической информации и управления процессом выполнения полетного задания NAVDAT

В структуре технических средств бортового комплекса вычислительная информационно-управляющая система NAVDAT обеспечивает решение следующих задач:

- получение информации от измерительных приборов и датчиков бортового комплекса;
- предварительную вычислительную обработку поступающей информации;
- оперативную визуализацию контрольной геофизической информации;
- хранение и редактирование данных полетного задания;
- автоматическую выработку информации для управления исполнением по-

летного задания.

В состав системы входят бортовой компьютер (IBM/PC, операционная система Debian GNU/LINUX) и набор индикаторов пилота (на базе планшетного компьютера, операционная система Android).

Система NAVDAT регистрирует данные, поступающие от всех бортовых источников цифровой информации. Для взаимодействия используются стандартные компьютерные интерфейсы. Гибкая структура программного обеспечения системы позволяет осуществлять информационное взаимодействие более чем с двадцатью различными устройствами. Контроль поступающих данных осуществляется автоматически в реальном времени. Программное обеспечение системы NAVDAT осуществляет автоматический контроль поступающей информации: целостность потока данных, полноту структуры и достоверность.

Получаемая информация доступна для отображения на экране компьютера в реальном времени в удобном для оператора виде. При работе без участия оператора возможности визуализации информации используются инженером, осуществляющим предполетную подготовку комплекса.

Вся поступающая информация регистрируется на жесткий диск компьютера системы. Формат и структура записываемых данных обеспечивают информационную полноту и привязку к единой шкале времени. Запись производится в реальном времени непрерывно от момента включения аппаратуры до ее выключения. Содержание регистрируемой информации не зависит от каких бы то ни было действий оператора или пилота. Целостность записи гарантирована.

В процессе съемки система NAVDAT осуществляет выработку управляющей информации для отображения ее пилоту на специальных индикаторах, что позволяет ему выполнять полет, точно следуя заданным линиям маршрутов без потерь летного времени. Для настройки информационного взаимодействия с пилотом в качестве параметров задаются допустимые значения боковых и вертикальных отклонений от заданной траектории пути и некоторые динамические характеристики летательного аппарата. Подготовка формального описания полетного задания

производится геофизиком в виде текстового файла — списка и последовательности заданных маршрутов и составляющих их точек в формате географических координат. Это может быть сделано с использованием программы Geosoft Oasis Montaj.

После необходимых настроек система NAVDAT в части информационного взаимодействия с пилотом участие оператора не требуется. Аэросъемочные полеты могут выполняться без него.

П.2.5. Авиационное обеспечение работ

В качестве летательного аппарат-носителя аэрогеофизической аппаратуры бортового комплекса ЭКВАТОР используются вертолеты Airbus Helicopter AS350B3, Airbus Helicopter AS350B2, Ми-8МТВ, Ми-17, Ми-8Т.

На фотографиях (Рис. 2, 3) показаны вертолет-носитель и буксируемая платформа комплекса.



Рисунок 2. Вертолет Airbus Helicopter AS350B3 оборудованный комплексом ЭКВАТОР (рудник Таборный, Якутия, 2020)



Рисунок 3. Вертолет Ми-8Т оборудованный комплексом ЭКВАТОР (п. Майский, п-ов Камчатка, 2021 г.)

П.2.6. Наземное оборудование

Станции дифференциальной коррекции спутниковой навигации

Для дифференциальной коррекции данных спутниковой навигации устанавливается базовая GPS-станция.

При проведении съемок с использованием технологии ЭКВАТОР работы проводятся в два этапа: развертывание (подготовка к работе) и рядовая съемка в соответствии с полетным заданием.

ПРИЛОЖЕНИЕ П.3. Методика съемки

П.3.1. Развертывание аэрогеофизического комплекса

На этом этапе выполняются следующие операции:

- 1) монтаж бортового и наземного оборудования;
- 2) комплексная проверка оборудования, настройка и облет;
- 3) контроль качества данных по результатам облета.

Подготовка станции дифференциальной коррекции

Антенна базовой станции дифференциальной коррекции GPS-станции устанавливается на крыше здания с учетом следующих требований:

1. Пространство вокруг ГНСС антенны не должно закрываться посторонними предметами (зданиями, спутниковыми тарелками, лестницами, самой крышей).
2. Чем большая часть небесной сферы будет видна, тем выше качество данных базовой станции.
3. Вокруг антенны должно быть как можно меньше кабелей и металлических конструкций.
4. Желательно наличие молниеотвода на той же крыше, где будет устанавливаться антенна базовой станции.
5. Максимальная длина кабеля от антенны до ГНСС приемника обычно составляет не более 30 м.

Монтаж бортового оборудования

Монтаж и подключение бортового оборудования выполняются в соответствии с технической документацией в следующей последовательности операций.

- Выполняется сборка буксируемой платформы аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР. Собирается несущая конструкция, устанавливаются кабели диполей-излучателей, блок электроники возбуждающей системы, элементы системы позиционирования, антенна Навигационного приемника III, радиовысотомер.
- Выполняется сборка буксируемой гондолы. В корпус устанавливаются: приемник аэроэлектроразведочной системы, антенна Навигационного приемника II (в центральной части).
- На борту вертолета устанавливается система обеспечения работы бортового комплекса.
- На борту вертолета устанавливаются и подключаются к системе обеспечения: бортовой компьютер, индикаторы пилота, бортовой Навигационный приемник I.
- Выполняется монтаж и подключение троса-кабеля к системе обеспечения и производится проверка работы автоматического сброса (с участием представителей авиакомпании).
- Выполняется монтаж и подключение к тросу-кабелю буксируемой платформы и гондолы системы ЭКВАТОР.

Комплексная проверка оборудования и облет

По завершению монтажа наземного и бортового оборудования осуществляется проверка работоспособности всех используемых систем и комплекса в целом, а также производится контрольно-настроечный полет (полеты), в процессе которого выполняются:

1) настройка параметров навигационной поддержки комплекса NAVDAT и обучение пилота восприятию управляющей информации, представляемой на ин-

дикаторе;

2) калибровка показаний радиовысотомера. По серии пролетов над взлетно-посадочной полосой при различных высотах буксировки платформы определяется корректность показаний радиовысотомера в записываемых данных и на индикаторах пилота;

3) оценка качества электроразведочных измерений. В условиях наземного эксперимента работоспособность электроразведочной системы оценивается по непрерывной записи данных в течение 1–2 часов. Проверяется целостность данных, стабильность формы тока в петле возбуждения, а также соответствие амплитуды и формы возбуждения паспортным значениям, стабильность измерений эталонного сигнала, качество измерений параметров системы относительного позиционирования.

Перед началом выполнения работ аэроэлектроразведочная система требует проведение процедур настройки, компенсации и калибровки. Их применение позволяет существенно повысить точность измерений с учетом влияния трудно контролируемых дестабилизирующих факторов — влажности атмосферы, механических усталостных деформаций и т. п.

Операции настройки, компенсации и калибровки автоматизированы и выполняются без участия оператора в специальных условиях полета: летательный аппарат поднимается на высоту 500–700 м, чтобы влиянием сигнала отклика от проводящих слоев земли можно было пренебречь. В этих условиях производятся:

- контроль и настройка измерительных параметров приемника (определение и коррекция амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик по каждому из трех каналов — XYZ);

- контроль и калибровка параметров электромагнитной системы относительного позиционирования (определяются и корректируются значения масштабных коэффициентов, а также угловых поправок).

В ходе калибровочного полета летчик выполняет пилотирование таким образом, что передающая платформа и буксируемая гондола совершают по возмож-

ности независимые колебания друг относительно друга.

Определение корректируемых параметров и введение поправок осуществляется при обработке данных в пост-процессинге. Процесс калибровки носит чисто вычислительный характер и проходит без участия оператора в течение 5–10 мин. В целях дополнительного повышения точности рекомендуется операции калибровки выполнять дважды в ходе съемочного полета — непосредственно перед началом съемки и сразу после ее завершения.

Оценка качества функционирования в полете производится на основе данных, получаемых на большой высоте, где влияние поля отклика от электропроводных слоев земли можно считать пренебрежимо малым. В процессе пилотирования выполняются такие изменения скорости, углов тангажа и крена летательного аппарата, при которых взаимное угловое расположение приемной и возбуждающей систем аэроэлектроразведочной установки оказывается существенно различным. По полученным данным оценивается остаточное влияние помех, величина которых не должна превышать контрольного значения, указанного в технической документации. При этом также автоматически настраиваются параметры калибровки аэроэлектроразведочной системы.

После выполнения калибровки производится проверка стабильности работы аэроэлектроразведочной системы по серии пролетов на рабочей высоте по заданной линии специально выделенного маршрута.

П.3.2. Выполнение рядовой съемки

Выполнение рядовой съемки производится согласно требованиям технического задания с контролем соблюдения заданных параметров. В каждом полете при выполнении рядовой съемки производятся контрольно-настроечные операции, а по завершении полета — контроль качества выполненной съемки.

Контрольно-настроечные операции

В начале и конце каждого съемочного полета выполняются операции калибровки параметров аэроэлектроразведочной системы. Выполняемые при этом операции аналогичны п. 3 раздела «Комплексная проверка оборудования и облет».

Съемочные полеты

Облет рядовых маршрутов необходимо было выполнить по точкам, заданным в системе координат WGS-84. Аэросъемка выполнялась с детальным огибанием рельефа на минимальной высоте полета платформы над землей, значение которой согласовывается с пилотом для обеспечения безопасности. В процессе выполнения съемки ведется бортовой журнал выполнения работ.

П.3.3. Контроль качества аэросъемочных работ

Контроль качества прохождения маршрутов в плане

По данным, полученным в ходе каждого съемочного полета, определяются значения отклонений фактических траекторий от заданных линий намеченных маршрутов.

Контроль качества прохождения маршрутов по высоте

По результатам, полученным в ходе каждого съемочного полета, определяются превышения высоты буксируемой платформы значения, определенного техническим заданием.

Контроль качества аэроэлектроразведочных измерений

Оценка качества осуществляется по уровню среднеквадратического отклонения абсолютного значения суммарной помехи в режиме калибровки по временным каналам.

При построении предварительных карт анализируется согласованность данных, полученных за разные вылеты.