

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Мойланен Евгений Викторович

**Методы и алгоритмы обработки измерений и интерпретации
данных в комбинированных аэроэлектроразведочных системах**

1.6.9. Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025 г.

Диссертация подготовлена в лаборатории № 1 «Динамических информационно-управляющих систем им. Б.Н. Петрова» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук

Научный
руководитель:

Каршаков Евгений Владимирович, доктор технических наук

Официальные
оппоненты:

Степанова Инна Эдуардовна, доктор физико-математических наук, профессор РАН, ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, лаборатория № 102: «Происхождение и внутреннее строение Земли и планет», главный научный сотрудник

Персова Марина Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», факультет прикладной математики и информатики, кафедра прикладной математики, профессор

Трусов Алексей Андреевич, кандидат технических наук, АО «Геофизическое научно-производственное предприятие «Аэрогеофизика», отдел геолого-геофизических технологий, начальник отдела

Защита диссертации состоится 19 ноября 2025 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, сектор «А», аудитория 308.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3591>

Автореферат разослан «___» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.016.6,
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы 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 сформировался подход к классификации аэроэлектроразведочных систем с контролируемым источником по принципу формы регистрации и обработки данных: либо в частотной, либо во временной области. Один из наиболее цитируемых обзоров был опубликован Дэвидом Фонтейном в 1998 году в журнале *Exploration Geophysics*. Тот же подход сохранился и в дальнейшем, например, у Жана Лего в 2015.

Частотные системы (Frequency Domain Airborne Electromagnetics, FD AEM) анализируют гармонические составляющие переменного магнитного поля от источника, установленного на борту носителя. Патент, описывающий первую такую систему, заявил С. Дэвидсон в 1948 году. В России такие системы были известны как ДИП-А (дипольное индуктивное профилирование в аэроварианте). Разработки велись В.И. Суцевым, С.И. Петровым, В.Д. Новаком, А.К. Волковицким. Основы теории таких систем были заложены Б.С. Световым.

Временные системы (Time Domain Airborne Electromagnetics, TD AEM) измеряют компоненты переменного магнитного поля в разные моменты времени после включения/выключения возбуждения для анализа переходной характеристики. Разработка первой системы, названной INPUT, была закончена Энтони Бэрринджером к 1959 году. В России такие системы называются АМПП

(аэрометод переходных процессов). Среди основных разработчиков — Ф.М. Каменецкий, автор первой в мире вертолетной версии АМПП, Г.М. Тригубович.

АМПП остается наиболее актуальным вариантом, поскольку он позволяет игнорировать некоторые помехи, связанные в первую очередь с особенностями поля источника (системы VTEM, Xcite, Helitem, Horizond, Tempest). Частотные же системы в зарубежной практике часто применяются в жесткой конструкции, которая позволяет до некоторой степени пренебречь изменениями первичного поля в точке расположения приемника (системы Dighem, Resolve).

Новые решения включают использование комбинированных систем, использующих дополнительное возбуждение для насыщения высокочастотной части спектра с целью более детального анализа верхней части разреза (системы SkyTEM, Multipulse, ЭКВАТОР, новые модификации Tempest).

В части первичной обработки данных стоит отметить достижения, предложенные А.К. Волковицким и А.Н. Дроботенко и воплощенные в системах ДИП-4А, ЕМ4Н и ЭКВАТОР. Пожалуй, главное из них — вариант алгоритмической компенсации искажений первичного поля, который позволяет выделить вторичное поле на фоне изменяющегося первичного. Также огромное значение имеет метод контроля частотной характеристики приемника, предложенный А.К. Волковицким. Необходимый для многих аэроэлектроразведочных систем способ определения координат приемника относительно передатчика был предложен Ричардом Смитом для систем типа Tempest, и получил свое развитие в работах А.К. Волковицкого и Е.В. Каршакова для систем ЕМ4Н и ЭКВАТОР.

Для решения обратной задачи — задачи оценки распределения в среде удельной электропроводности, — могут применяться различные методы, включая детерминированные, изложенные, например, М.С. Ждановым в своих работах, и стохастические подходы, хорошо описанные А. Тарантолой. Основные результаты в области решения обратных задач в аэроэлектроразведке получены М.Г. Персовой, Г.М. Тригубовичем, Дж. Макнеем, Д. Ольденбургом.

Идеи оптимального оценивания в линейных стохастических задачах были сформулированы Рудольфом Калманом в 1960 г. Соответствующий подход при решении нелинейных обратных задач появился в варианте калмановского фильтра частиц в работе британских ученых Марко Иглесиаса и др. в 2012 году. В 2015 году Дж. Халвик и О. Страка предложили использование для таких задач итерационного обобщенного фильтра Калмана. Вариант применения такого фильтра в аэроэлектроразведке предложен Е.В. Каршаковым в 2018 году. Теория решения задач оценивания методами калмановской фильтрации и сглаживания изложена, например, в книге Д. Саймона.

С 2010 года в лаборатории «Динамических информационно-управляющих систем имени Б.Н. Петрова» (ИПУ РАН) начались исследования по созданию нового математического и программного обеспечения для решения задач аэроэлектроразведки в комбинированном варианте, которые вели

А.К. Волковицкий, Е.В. Каршаков, М.Ю. Тхоренко и другие, а также автор данной диссертационной работы, которая представляет собой продолжение этих исследований.

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 при анализе удельной электропроводности как в верхней части разреза, так и на глубине.

Для достижения поставленной цели потребовалось 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.

Объект диссертационного исследования: комбинированная аэроэлектроразведочная система.

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

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». И в тех, и в других разновидностях может содержаться промышленное золото.

На Ангольском кристаллическом щите по результатам работ 2013 года в результате анализа карт кажущихся сопротивлений во временной области к буровой заверке было предложено 18 аномалий. На 16 из них были вскрыты кимберлитовые трубки, в том числе алмазоносные. Следует отметить, что по данным магниторазведки, выполненной в составе комплекса ЭКВАТОР, число аномалий «трубчатого типа» составило более 700.

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. Только небольшой интервал геологического разреза кимберлитовмещающих пород является контрастным по отношению к трубке.

Задача поисков свободной воды в условиях развития многолетнемерзлых пород решалась в Якутии в 2014-15 гг. Свободная вода была необходима для эксплуатации Среднеботуобинского и Чаяндынского месторождений. Удалось

установить 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. Решение этой задачи было необходимо для установления зон возможного просачивания соленой воды в отгороженную дамбой область сельскохозяйственной деятельности, которая расположена ниже уровня моря. 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 данными бурения.

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 научных 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 аэроэлектроразведке (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); 15-я, 16-я SAGA Биенале конференция и выставка (Кейптаун, ЮАР, 2017, 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 Геоевразия (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.

Личный вклад автора.

Разработанные автором методы и алгоритмы легли в основу программного комплекса для обработки и интерпретации данных комбинированной аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР.

Все данные ЭКВАТОРа (более 30 миллионов точек зондирования) были получены под непосредственным руководством автора. Решены ряд рудных и гидрогеологических задач. В результате аэрогеофизических работ 2019 г. было открыто крупное месторождение золота (месторождение Роман).

Работы по поиску свободной воды в Якутии показали хорошую сходимость между аэрогеофизикой и наземными исследованиями методом переходных процессов во всем интервале глубин геоэлектрического разреза. Что касается трудозатрат, то наземные работы заняли один месяц, а аэроработы 2 дня.

Личный вклад автора в совместные публикации.

[1], [2], [4], [5], [10] – алгоритмы обработки и результаты интерпретации данных для комбинированной аэроэлектроразведочной системы, верификация результатов.

[8] – исторический очерк, алгоритмы первичной обработки данных для комбинированной аэроэлектроразведочной системы.

[11] – методы и алгоритмы обработки первичных измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы.

[9] – анализ особенностей аэроэлектроразведочных систем, алгоритм вычисления кажущегося сопротивления в частотной области в формате инверсии.

[12] – обзор и сравнительный анализ аэроэлектроразведочных систем.

[6], [7] – метод и алгоритм выделения первичного поля для комбинированной аэроэлектроразведочной системы.

Структура работы. Диссертационная работа состоит введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка обозначений, списка литературы, списка иллюстраций. Работа изложена на 175 страницах, содержит 43 иллюстрации, 8 таблиц, 3 приложения. Список цитируемой литературы включает 143 наименования.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 **разделе 1.1** рассмотрена и предложена модификация для традиционной классификации аэроэлектроразведочных комплексов. По имеющимся в настоящее время обзорам такие комплексы с контролируемым источником можно разделить на два основных типа: метод дипольного индукционного профилирования в аэроварианте – частотные системы, – и аэрометод переходных процессов – временные системы. Мощные низкочастотные временные системы позволяют обнаружить проводники в относительном изоляторе на больших глубинах даже в присутствии проводящего перекрывающего слоя, однако обладают относительно низким разрешением для удельных сопротивлений свыше 1000 Ом·м. Напротив, частотные системы позволяют измерять удельные сопротивления в заметно более широком диапазоне, часто обеспечивают более высокую детальность в верхней части разреза, но при этом обладают меньшей глубинностью.

Для эффективного изучения и верхней, и глубинной части разреза в настоящее время предложено несколько вариантов. Например, в некоторых системах наряду с длинным и мощным основным импульсом добавляется короткий малоамплитудный дополнительный импульс (SkyTEM, MultiPulse), или другой вариант — усложнение формы сигнала с сохранением достаточно низкой базовой частоты (ЭКВАТОР, Tempest) (рис. 1). Во всех случаях насыщается высокочастотная часть спектра возбуждения (рис. 2). Подобные аэроэлектроразведочные комплексы предлагается называть комбинированными. Смешанная форма первичного сигнала при непрерывных измерениях позволяет эффективно обрабатывать данные в частотной области.

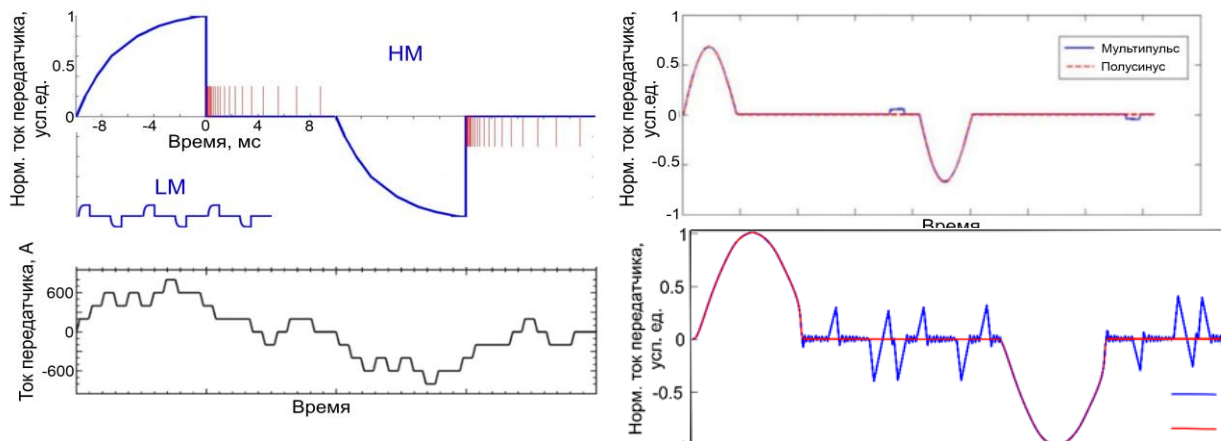


Рисунок 1. Форма тока аэроэлектроразведочных систем SkyTEM — последовательное включение мощного (НМ) и высокочастотного (ЛМ) сигналов (слева сверху); MultiPulse — дополнительный импульс в конце основного времени спада (справа сверху); Tempest — многоступенчатое переключение (слева внизу); ЭКВАТОР — дополнительные высокочастотные импульсы (справа внизу).

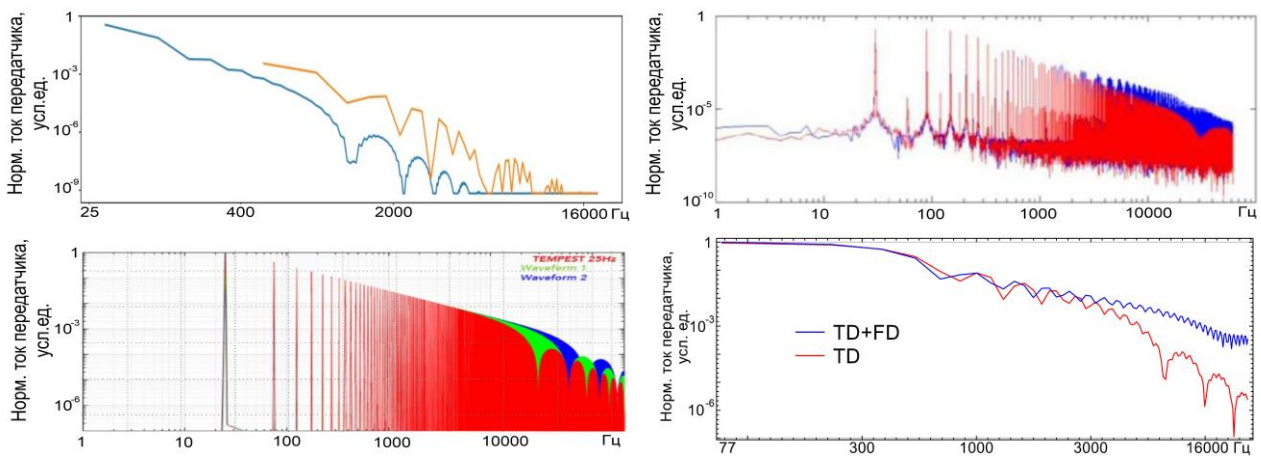


Рисунок 2. Спектры сигналов аэроэлектроразведочных систем SkyTEM — НМ (голубой) и ЛМ (оранжевый) (слева сверху); MultiPulse — без доп. импульса (красный) и с ним (синий) (справа сверху); Tempest — без доп. переключений (красный) и с ними (зеленый, синий) (слева внизу); ЭКВАТОР — без доп. импульсов (TD) и с ними (TD + FD) (справа внизу).

Особенности комбинированного аэроэлектроразведочного комплекса ЭКВАТОР, принципы его функционирования, схема компоновки (рис. 3), структура регистрируемых данных, а также описание подготовки данных к камеральной обработке приведены в **разделе 1.2**. Результатом накопления для временных каналов являются данные суммирования значений измеряемых

сигналов в границах временных окон от 5 мкс до 4.4 мс, для частотных — комплексные значения амплитуд после синхронного детектирования измеряемого сигнала на частотах от 77 Гц до 15 кГц.

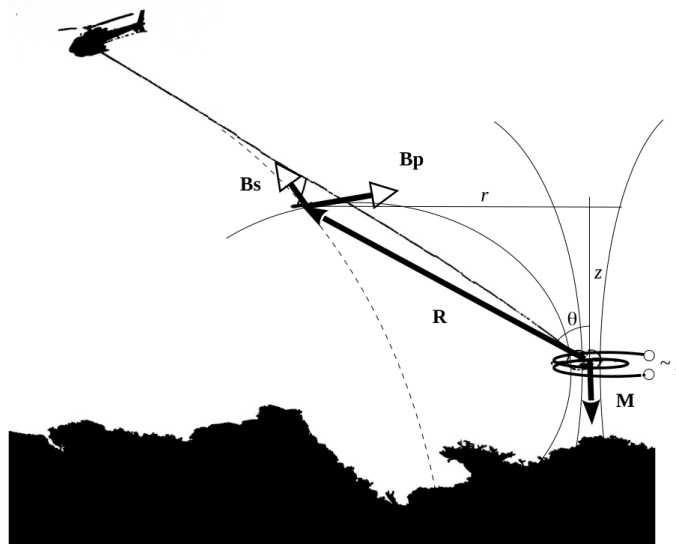


Рисунок 3. Схема аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР
 $\mathbf{M}$ — дипольный момент, $\mathbf{B}_p$, $\mathbf{B}_s$ — первичное поле и отклик, $\mathbf{R}$ — радиус-вектор передатчик-приемник

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.

В разделе 2.1 описывается 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(г).

Измеренное на борту летательного аппарата поле $\mathbf{B}_{mes}$ складывается из нормальной составляющей $\mathbf{B}_p$, описывающей поле источника, аномальной 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 $\Delta \mathbf{B}$.

$$\mathbf{B}_{mes} = \mathbf{B}_p + \mathbf{B}_s + \mathbf{B}_v + \mathbf{B}_c + \Delta \mathbf{B}. \quad (1)$$

Характерные значения соответствующих величин $B_* = |\mathbf{B}_*|$ приведены в таблице 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. 2(г)) на 1–2 порядка к самым высоким частотам, соотношение сигнал-шум несколько уменьшается на более высоких частотах.

Таблица 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 инструментальных погрешностей, приведенных в скобках таблицы 1, очевидно, что основная задача после применения аппаратной 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.

В разделе 2.2 описывается следующая модель инструментальных погрешностей:

$$\Delta \mathbf{B} = \mathbf{A} \mathbf{B}_{\text{mes}} + \delta \mathbf{B}, \quad (2)$$

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 описывает погрешность с точностью порядка 10^{-6} .

Введение комплексной матрицы в (2) 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.

Для обеспечения стабилизации 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 при контроле дипольного магнитного момента источника. Идея работы эталонного сигнала была предложена А.К. Волковицким. Соотнося спектр эталонного сигнала и спектр измеренного сигнала, можно получить частотную характеристику передатчика по измерениям тока и приемника по измерениям трех компонент вектора индукции поля и контролировать ее изменения во времени. Благодаря такому контролю измерений матрицу $\mathbf{A}$ в уравнении можно считать постоянной.

Раздел 2.3 посвящен методам компенсации наведенного поля. Для работы алгоритмов компенсации в системе ЭКВАТОР введены два дополнительных диполя (Рис. 4), 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.

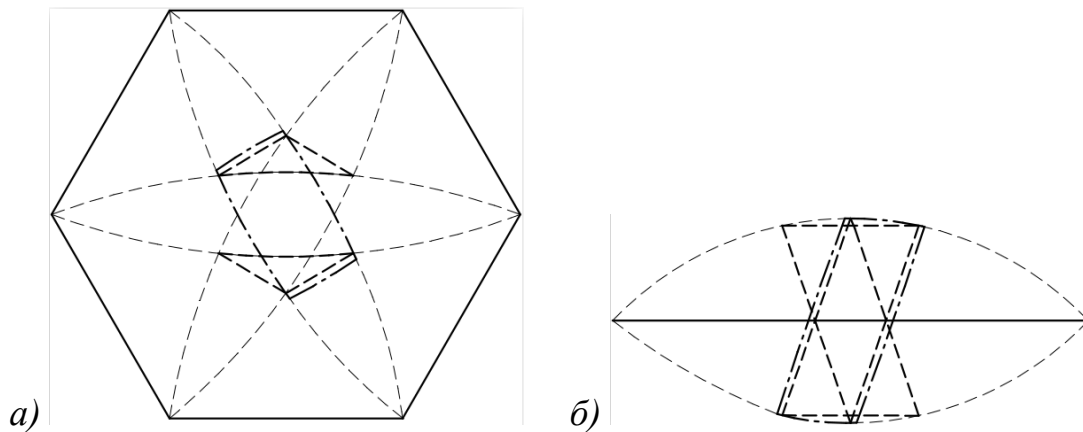


Рисунок 4. Диполи системы ЭКВАТОР: а) вид сверху, б) вид спереди.

— $\mathbf{M}$, --- $\mathbf{M}_1^c$, - · - $\mathbf{M}_2^c$

При сделанных выше предположениях неизвестный вектор, описывающий наведенное поле на каждой отдельной частоте k , может быть представлен как линейная комбинация трех известных векторов:

$$\mathbf{B}_{ck} = c_{0k} \mathbf{B}_k + c_{1k} \mathbf{B}_1^c + c_{2k} \mathbf{B}_2^c. \quad (3)$$

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.

Еще один аспект, который не учтен в модели (2), (3) 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:

$$\frac{d\mathbf{B}(t, \omega_k)}{dt} = i\omega_k \mathbf{B}_k^0(t) \cdot e^{i\omega_k t} + \left\{ \frac{d\mathbf{B}_k^0(t)}{dt} \cdot e^{i\omega_k t} \right\}, \quad (4)$$

при этом второе слагаемое в правой части, как правило, не учитывается.

Предлагается объединить модели (2), (3) и модель влияния эволюций из (4) следующим образом (опуская номер гармоники):

$$\mathbf{B}_c + \Delta \mathbf{B} = \mathbf{C}_0 \mathbf{B}_{\text{mes}} + \mathbf{C}_1 \mathbf{B}_1^c + \mathbf{C}_2 \mathbf{B}_2^c - \frac{i}{\omega} \cdot \frac{d\mathbf{B}_{\text{mes}}}{dt} + \delta \mathbf{B}, \quad (5)$$

где $\mathbf{C}_0, \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$ — комплексные матрицы 3×3 , полученные произведением матриц $\mathbf{A}$ в выражении (2) для каждого вектора каждой частоты на соответствующий коэффициент c_i в выражении (3). Коэффициенты модели (5) подбираются при полетах на достаточно большой высоте, где откликами можно пренебречь. Случайная составляющая $\delta \mathbf{B}$ моделируется белым шумом с нулевым средним. Критерий для выбора коэффициентов — отсутствие квадратурной компоненты поля и полное совпадение синфазных векторов поля для всех частот. Подбор осуществляется методом наименьших квадратов.

После компенсации всех погрешностей сигналы в частотной области на всех гармониках оказываются нормированными на одну и ту же величину, представляя собой отклик на дельта-импульс в ограниченной полосе частот. Полученный спектр может быть свернут во временную область с формой первичного сигнала (Рис. 1(г)) без дополнительных импульсов для получения скорости спада или самого поля во временных окнах. Пример результатов компенсации представлены на Рис. 5.

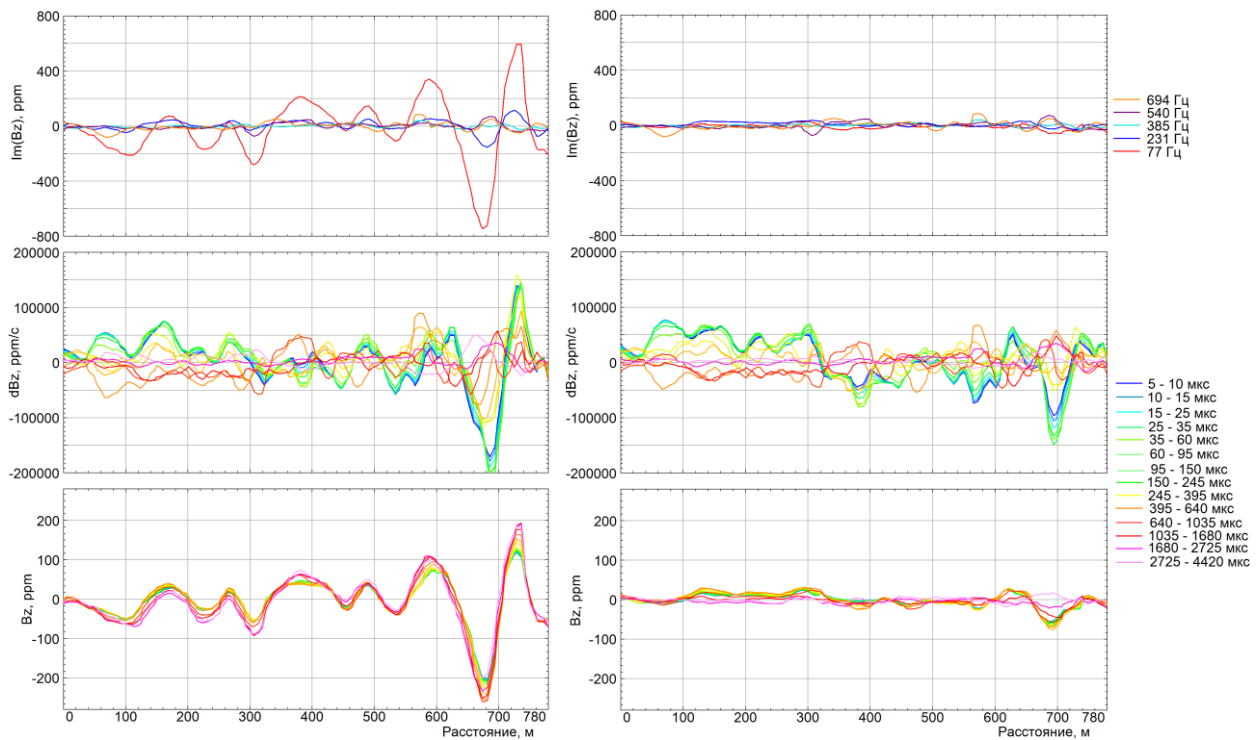


Рисунок 5. Компенсация колебаний приемника. Исходные (слева) и скомпенсированные (справа) данные вертикальной компоненты отклика для частотной области (вверху), скорости спада (в центре) и спада (снизу)

В разделе 2.4 приведен метод разделения первичного и вторичного поля. Описано, как получить поле спада через свертку полученных после коррекции сигналов в частотной области. Выдвигаются требования для выделения отклика во время действия импульса.

Показано, что в частотной области максимально достоверны измерения квадратурных компонент, а также разности синфазных компонент на любой паре частот. Показано, что при пересчете во временную область именно эти параметры описывают поле отклика офф-тайм, т.е. поле спада после выключения тока в петле.

Далее описываются способы определения полного отклика с ограниченной точностью: варианты резистивного и индуктивного предела. Например, в зоне малого параметра ($\sigma\omega \ll 1$), т.е. при малых удельных электропроводностях σ (резистивный предел), квадратурная компонента зависит линейно от частоты, а синфазная — квадратично. Таким образом, если есть основания полагать, что если 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:

$$\operatorname{Re} \mathbf{B}_0^i = \frac{\operatorname{Re} \mathbf{B}_{10}^i}{8}, \quad \operatorname{Re} \mathbf{B}_k^i = \operatorname{Re} \mathbf{B}_0^i + \mathbf{B}_{k0}^i. \quad (6)$$

До тех пор, пока

$$\left(\operatorname{Re} \mathbf{B}_0^i\right)^2 \lesssim \|E[\delta \mathbf{B}_0 \delta \mathbf{B}_0^T]\|_2, \quad (7)$$

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

В разделе 2.5 описаны программные процедуры обработки первичных измерений комбинированной аэроэлектроразведочной системы, реализующие все описанные выше идеи применительно к данным системы ЭКВАТОР.

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. Такого рода задачи относятся к классу некорректно поставленных задач по Адамару и требуют регуляризации для обеспечения единственности и устойчивости решения.

Раздел 3.1 посвящен описанию хорошо известных алгоритмов решения одномерной прямой задачи аэроэлектроразведки.

В разделе 3.2 обратная задача аэроэлектроразведки формулируется как стохастическая задача оценивания. Алгоритм оценивания строится на предположении, что вектор измерений удовлетворяет следующей модели:

$$\mathbf{z}_j = \mathbf{h}_j(\mathbf{x}_j) + \mathbf{r}_j, \quad E[\mathbf{r}_j] = 0, \quad E[\mathbf{r}_j \mathbf{r}_k^T] = \mathbf{R}_j \delta_{jk}, \quad (8)$$

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:

$$\mathbf{x}_{j+1} = \mathbf{f}_j(\mathbf{x}_j) + \mathbf{q}_j, \quad E[\mathbf{q}_j] = 0, \quad E[\mathbf{q}_j \mathbf{q}_k^T] = \mathbf{Q}_j \delta_{jk}, \quad (9)$$

где $\mathbf{q}_j$ — вектор случайной составляющей, который моделируется гауссовским белым шумом с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей $\mathbf{Q}_j$.

Показано, что описанная задача может решаться при помощи алгоритма обобщенного фильтра Калмана.

Функция $\mathbf{h}_j(\mathbf{x}_j)$ в формуле (8) выражает решение той или иной прямой задачи, моделирующей отклик для аэроэлектроразведочной системы. Это может быть модель однородного полупространства, горизонтально-слоистой среды

или любая другая, связывающая параметры среды, выраженные вектором $\mathbf{x}_j$, с измерениями, выраженными вектором $\mathbf{z}_j$. Все перечисленные параметры относятся к моменту времени измерений j .

Функция $\mathbf{f}_j(\mathbf{x}_j)$ в формуле (9) описывает связь между параметрами среды в момент времени j и $j+1$. При отсутствии априорной информации она может быть задана в виде

$$\mathbf{x}_{j+1} = \mathbf{x}_j + \mathbf{q}_j. \quad (10)$$

В этом случае все изменения, которые происходят вдоль линии полета, описываются случайным вектором $\mathbf{q}_j$. Его ковариационная матрица задает степень изменчивости среды от точки к точке.

Если имеется априорная информация об удельных сопротивлениях и глубинах, функция $\mathbf{f}_j(\mathbf{x}_j)$ задается таблицей значений.

Для решения поставленной задачи используется алгоритм итерационного обобщенного фильтра Калмана. Задача решается в два этапа: этап коррекции и этап прогноза. Этап прогноза — переход от апостериорных оценок (верхний индекс «+») в момент $j-1$ к априорным (верхний индекс «-») в момент j :

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_j^- &= \mathbf{f}_{j-1}(\tilde{\mathbf{x}}_{j-1}^+), \\ \mathbf{P}_j^- &= \mathbf{A}_{j-1} \mathbf{P}_{j-1}^+ \mathbf{A}_{j-1}^T + \mathbf{Q}_{j-1}, \quad \mathbf{A}_{j-1} = \frac{\partial \mathbf{f}_{j-1}}{\partial \mathbf{x}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Волна над вектором обозначает оценку вектора состояния $\mathbf{x}_j$, чтобы отличать от истинного значения вектора параметров среды. Если $\mathbf{f}_j$ задана формулой (10), матрица $\mathbf{A}$ — единичная. Если это табличная функция, матрицу

$$\mathbf{P}_j^- = \mathbf{E}[(\tilde{\mathbf{x}}_j^- - \mathbf{x}_j)(\tilde{\mathbf{x}}_j^- - \mathbf{x}_j)^T] \quad (12)$$

следует задавать непосредственно, исходя из достоверности априорной модели.

Этап коррекции — переход от априорных «-» оценок к апостериорным «+» в момент j :

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_j^{k+} &= \tilde{\mathbf{x}}_j^{k-} + \mathbf{K}_j^k (\mathbf{z}_j - \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k-})), \\ \mathbf{P}_j^{k+} &= \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_j^k \frac{\partial \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^k)}{\partial \mathbf{x}} \right) \mathbf{P}_j^{k-}, \\ \mathbf{K}_j^k &= \mathbf{P}_j^{k-} \left(\frac{\partial \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k-})}{\partial \mathbf{x}} \right)^T \left[\frac{\partial \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k-})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{P}_j^{k-} \left(\frac{\partial \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k-})}{\partial \mathbf{x}} \right)^T + \mathbf{R}_j \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (13)$$

Поскольку функция $\mathbf{h}_j(\mathbf{x}_j)$ существенно нелинейна, этап коррекции следует выполнять в несколько итераций, верхний индекс k в обозначает номер итерации. На каждом шаге итерации необходимо заново пересчитывать матрицу

Якоби $\partial \mathbf{h}_j(\mathbf{x}_j)/\partial \mathbf{x}$ и коэффициент фильтра $\mathbf{K}_j^k$. Условием выхода из итерационной процедуры следует считать достижение минимума величины невязки:

$$\|\mathbf{z}_j - \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k+})\| = \sqrt{(\mathbf{z}_j - \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k+}))^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z}_j - \mathbf{h}_j(\tilde{\mathbf{x}}_j^{k+}))}. \quad (14)$$

Форма решения, приведенная в (14), в общем виде эквивалентна традиционно применяемым в аэроэлектроразведке методам сингулярного разложения (Singular Value Decomposition), инверсии с вертикальными ограничениями (Vertically Constrained Inversion), инверсии с горизонтальными ограничениями (Laterally Constrained Inversion). Важным отличием является наличие вычисленной ковариационной матрицы ошибки оценки

$$\mathbf{P}_j^+ = \mathbf{E}[(\tilde{\mathbf{x}}_j^+ - \mathbf{x}_j)(\tilde{\mathbf{x}}_j^+ - \mathbf{x}_j)^T], \quad (15)$$

которая позволяет оценивать достоверность полученного решения с учетом особенностей модели в данной точке при данных параметрах среды.

Так, можно применять дополнительные механизмы, разработанные для фильтра Калмана. Например, параметр

$$\mu = 1 - \sqrt{\frac{\mathbf{a}^T \mathbf{P}_j^+ \mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \mathbf{P}_j^- \mathbf{a}}}, \quad (16)$$

определяющий стохастическую меру оцениваемости величины, задаваемой в пространстве параметров вектором $\mathbf{a}$, в точке измерений с индексом j — чем ближе μ к 1, тем лучше оценка.

В разделе 3.3 описывается алгоритм вычисления кажущихся сопротивлений во временной и в частотной области на основе решения обратной задачи для модели однородного полупространства. Во многих случаях данный подход позволяет избавиться от неоднозначности, которая возникает при работе палеточным методом, часто применяемым для аэроэлектроразведочных систем.

Раздел 3.4 посвящен алгоритмам решения одномерной обратной задачи для комбинированных аэроэлектроразведочных систем на основе итерационного обобщенного фильтра Калмана. Приводятся необходимые параметры для работы алгоритма. Поскольку при работе с аэрогеофизическими данными часто приходится иметь дело с полным отсутствием априорной информации о разрезе, важно создание максимально «слепой» инверсии. Рассмотрены два основных варианта решения задачи: одномерная инверсия с подбором мощности слоев и с фиксированными мощностями слоев.

В качестве стартовой модели в обоих случаях используется однородное полупространство с сопротивлением ρ_{a0} , отвечающим кажущемуся сопротивлению на самой низкой частоте.

Если мощности слоев фиксированы, то выбирая вектор $\mathbf{a}$ в (16) так, чтобы исследовать меры оцениваемости сопротивлений для каждого отдельного слоя, можно получить набор:

$$\mu_i = 1 - \sqrt{\frac{P_{ii}^+}{P_{ii}^-}}. \quad (17)$$

Опыт применения показывает, что стохастические 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.

В разделе 3.5 проведено исследование алгоритмов решения одномерной обратной задачи для комбинированных аэроэлектроразведочных систем. Рассматривается некоторое количество модельных задач, на которых сопоставляются результаты решения по данным только в частотной области, только во временной области и по комбинированным измерениям, включающим и частотную и временную область:

$$\mathbf{z}_i = \left\{ \begin{array}{c} \text{Im } B_{z0}(2\pi f_0), \dots, \text{Im } B_z(2\pi f_{s-1}), \\ \text{Re } B_z(2\pi f_0) - \text{Re } B_z(2\pi f_1), \dots, \text{Re } B_z(2\pi f_{s-1}) - \text{Re } B_z(2\pi f_s), \\ dB_{z1}/dt, \dots, dB_{zl}/dt \end{array} \right\}. \quad (18)$$

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.

Показано, что для однородного полупространства 1000 Ом·м 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.

Для двухслойной среды с первым слоем сопротивлением 2000 Ом·м мощностью 200 м и основанием 10 Ом·м при неудачном выборе начального приближения для частотной области можно получить решение, отвечающее локальному минимуму с первым слоем сопротивлением 2000 Ом·м мощностью 40 м и основанием сопротивлением 4000 Ом·м. Во временной области решение корректно всегда. Для двухслойной среды с первым слоем сопротивлением 100 Ом·м мощностью 20 м и основанием 80 Ом·м при неудачном выборе начального приближения для временной области можно получить решение, отвечающее локальному минимуму с первым слоем сопротивлением 2,5 Ом·м мощностью 20 м и основанием сопротивлением 0,1 Ом·м. В частотной области

решение корректно всегда. Комбинированные данные в обоих случаях приводят к корректному решению.

Для варианта четырехслойной среды выполнялось моделирование, а затем инверсия с подбором мощности слоев. Исходная модель и результаты инверсии в трех вариантах показаны на рис. 6. Видно, что частотная инверсия хорошо показывает низкоконтрастную границу в приповерхностной области, а сопротивление основания точнее определяется при временной инверсии. Но именно комбинированная инверсия наилучшим образом согласуется с исходной моделью.

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», стартующий 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.

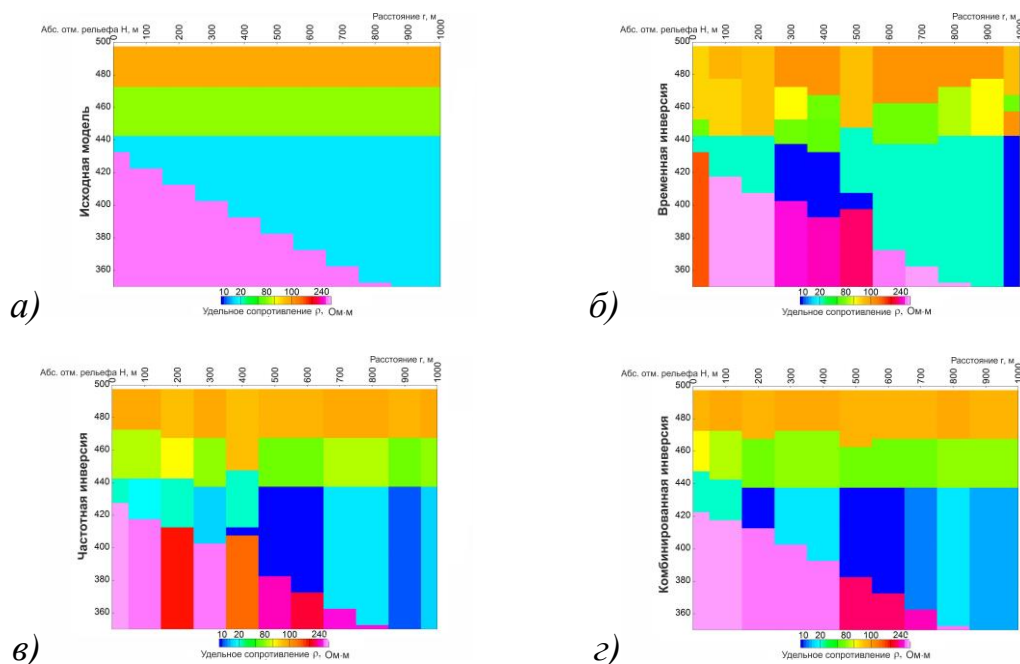


Рисунок 6. Модель и результаты инверсии модельных данных
а) исходная модель; б) инверсия во временной области; в) инверсия в частотной области; г) комбинированная инверсия

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

Подходы к интерпретации данных аэроэлектроразведки изложенные в **разделе 4.1** включают в себя следующие шаги:

- 1) Районирование по кажущимся сопротивлениям:
 - *Статистика кажущихся сопротивлений* – необходимо изучить статистику распределения кажущихся сопротивлений для информативных временных и/или частотных каналов.
 - *Сопоставление с априорной геологической информацией* – следует отдельно выделить области с высокой и низкой степенью соответствия геологической карте.
- 2) Выделение локальных объектов внутри однородных областей:
 - Переход к выделению локальных объектов внутри однородных областей. В качестве примеров можно привести современные русловые отложения, речные долины или палеодолины, локальный проводник или изолятор произвольной конфигурации.
- 3) 1D инверсия.

В **разделе 4.2** представлены результаты работ по поиску золоторудных месторождений на Камчатке (2021 г., интерпретация на основе 1D инверсии) кимберлитов в условиях Ангольского щита (2013 г., интерпретация на основе кажущихся сопротивлений) и на зимнем берегу Белого моря (2010 г.) (Рис. 7, интерпретация на основе 1D инверсии).

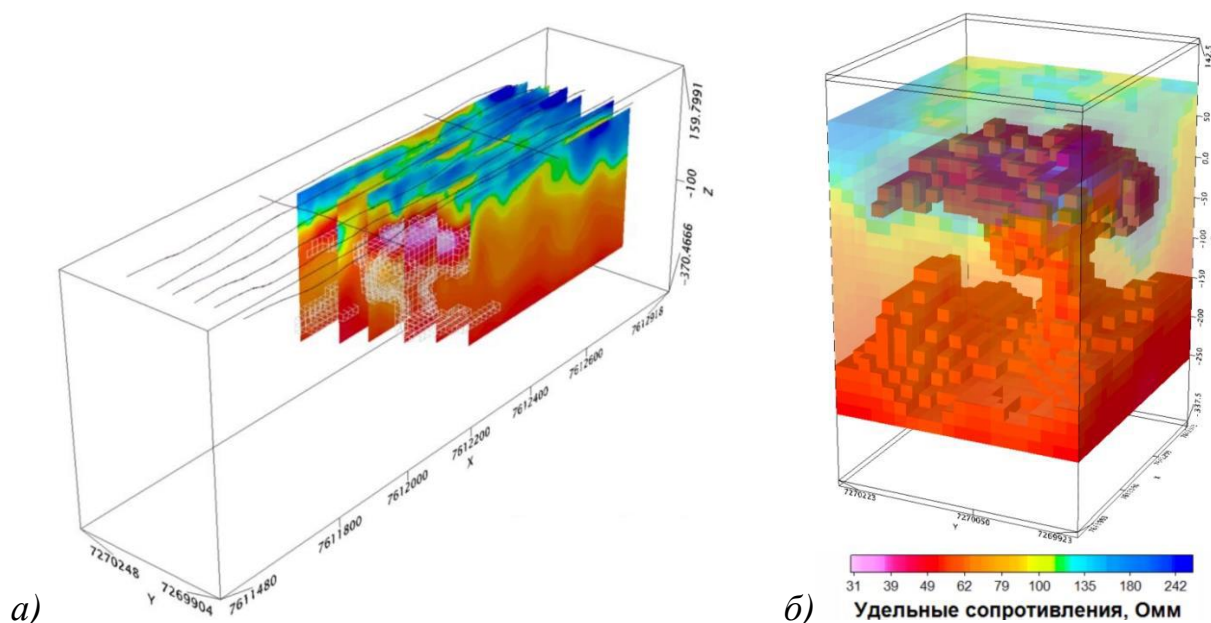


Рисунок 7. Геоэлектрические разрезы (1011870–1011892), проходящие через трубку им. В.П. Гриба, черными линиями показаны фактические маршруты полета (А) и геоэлектрическая модель трубки (Б)

Применение комплекса ЭКВАТОР для решения гидрогеологических задач и результаты приведены в **разделе 4.3**. В данном разделе представлены результаты работ по поиску воды в условиях многолетнемерзлых пород в

Якутии (2014-2015 гг., интерпретация на основе 1D инверсии) и по анализу гидрогеологии в присутствии соленой морской воды в Хорватии (2021 г., интерпретация на основе 1D инверсии) (Рис. 8).

Стоит отметить, инверсия по временным каналам (Рис. 8, Временная) показала более высокоомным слой на глубине 50 – 100 метров по сравнению с частотной. Комбинированная инверсия (Рис. 8, Комбинированная) в этой части дала решение, более близкое ко временной. Детали верхней части разреза в комбинированной инверсии в большей мере соответствуют частотной инверсии (Рис. 8, Частотная). Причины такого формирования решения видно при анализе мер оцениваемости, приведенных справа. Они иллюстрируют оцениваемость сопротивлений (ось Y) в зависимости от глубины (ось X) для одной из точек. Видно, что в верхней части разреза (слева на графиках) меры оцениваемости в частотной области выше, и напротив, в глубинной части разреза есть более высокие значения меры для временной области. Меры оцениваемости при комбинированной инверсии дают лучшие значения и вверху, и на глубине, тем самым объединяя преимущества двух подходов.

Применение разработанных в рамках данной диссертации методов и алгоритмов обработки измерений, и интерпретации данных в комбинированных аэроэлектроразведочных системах позволило:

- 1) При работах на Камчатке дифференцировать породы по свойствам электропроводности в очень широком диапазоне. Построенные разрезы дают возможность оценить распределение свойств по глубине. Использование комбинированной инверсии данных системы ЭКВАТОР наилучшим образом решает задачи поиска как проводников (алунитовые руды), так и изоляторов (кварцевое ядро).
- 2) При решении гидрогеологических задач в зонах распространения многолетнемерзлых пород Якутии при интерпретации разрезов выделялись зоны пониженного удельного сопротивления ($< 60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) внутри слоя, ассоциированного с метегерской и ичерской свитами, которые могут отвечать структурным нарушениям. Удалось детектировать границы распространения надмерзлотных, внутримерзлотных и подмерзлотных подземных вод. Свободная вода связана с областями дробления. Подобные зоны нередко сопровождаются увеличением невязки полученного решения.

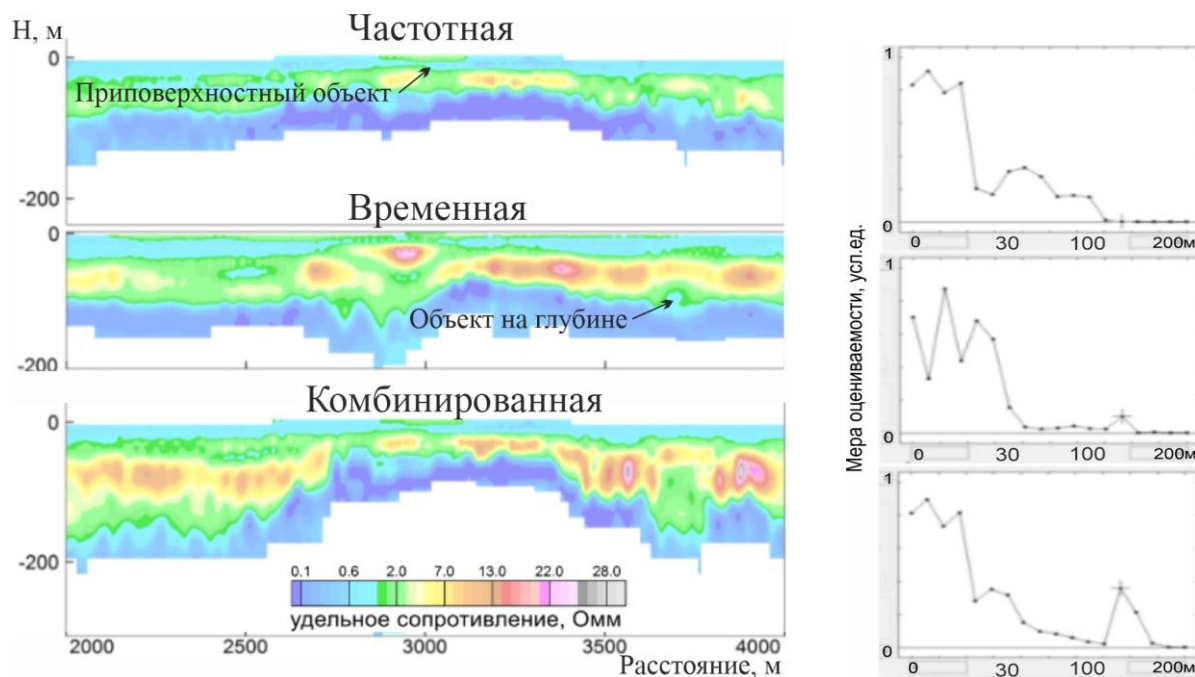


Рисунок 8. Геоэлектрические разрезы, построенные в результате одномерной инверсии в комбинированном, частотном и временном варианте, а также меры оцениваемости сопротивлений (справа)

Заключение

В диссертационной работе разработаны методы и алгоритмы обработки измерений и интерпретации данных в комбинированных аэроэлектроразведочных системах. В итоге данного исследования предложен новый вариант классификации современных аэроэлектроразведочных систем, выделяющий среди систем с контролируемым мобильным источником, помимо частотных и временных, еще и комбинированные системы. Описаны методы и разработаны алгоритмы для обработки данных комбинированной аэроэлектроразведочной системы, обеспечивающие компенсацию инструментальных погрешностей и наведенного поля. Разработаны методы и алгоритмы выделения отклика на фоне первичного поля, показана эквивалентность двух форм представления откликов — временной и частотной. Для комбинированной электроразведочной системы в случае модели однородной среды предложены алгоритмы получения значений кажущихся удельных сопротивлений во временной и в частотной области. Разработаны два алгоритма решения обратной задачи для модели горизонтально-слоистой среды с использованием минимальной априорной информации при обработке данных только в частотной, только во временной или одновременно в частотной и временной областях. Показана эффективность 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.

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.

III. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования eLibrary Science index:

1. 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.

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 (SJR). EDN: IHNMJM.

3. **Мойланен Е.В.** Современные методы аэроэлектроразведки // Физика Земли. – 2022. – № 5. – С.171-180. (0,63 п.л.). Импакт-фактор 1,176 (РИНЦ). 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

Научные статьи, опубликованные в других рецензируемых научных изданиях, включенных в дополнительный список изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук:

9. 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.

Иные публикации

Научные статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ

10. 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: VNEERV.

11. 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.

12. 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.

Публикации в сборниках

13. 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%).

14. 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%).

15. 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%).

16. 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%).

17. 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%).

18. 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%).

19. 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%).

20. 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%).

21. 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%).

22. 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%).

23. 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%).

24. 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%).

25. 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%).

26. **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%).

27. **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%).

28. **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%).

29. **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%).

30. **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.)

31. 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%).

32. 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%).

33. Тхоренко М.Ю., **Мойланен Е.В.**, Гараков 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%).

34. 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%).

35. 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%).

36. 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. — Р. 1–9. (0,56 п.л., авторский вклад 50%).

37. 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. — Р. 1–4. (0,25 п.л., авторский вклад 33%).

38. **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. — Р. 1–4. (0,25 п.л., авторский вклад 33%).

39. **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. — Р. 1–4. (0,25 п.л., авторский вклад 20%).

40. **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. — Р. 1–5. (0,31 п.л.)

41. 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. — Р. 387–394. (0,50 п.л., авторский вклад 33%).

42. 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. — Р. 182–184. (0,19 п.л., авторский вклад 25%).

43. 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. — Р. 1–9. (0,56 п.л., авторский вклад 25%).

44. 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. — Р. 836–845. (0,63 п.л., авторский вклад 25%).

45. 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. — Р. 1–4. (0,25 п.л., авторский вклад 33%).