

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, доктора технических наук, профессора

Модина Игоря Николаевича

на диссертационную работу Волковицкого Андрея Кирилловича

«Методы и алгоритмы повышения эффективности аэроэлектроразведочных измерительных систем и комплексов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации»

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Диссертационная работа Волковицкого А.К. посвящена созданию новых методов и алгоритмов, обеспечивающих высокую эффективность технологии аэроэлектроразведки – одного из важнейших направлений в исследовании строения геологического разреза на глубину до нескольких сот метров и поиска полезных ископаемых. В работе рассмотрен принцип функционирования систем низкочастотной индуктивной аэроэлектроразведки, заключающийся в зондировании геологической среды с помощью генератора, возбуждающего низкочастотное магнитное поле, и измерении параметров вторичного магнитного поля от наведенных в среде вихревых токов. Это дает исследовать пространственное распределение в ней структур различной электропроводности. Зондирующая установка размещается на борту летательного аппарата-носителя, что обеспечивает высокую производительность при детальном съемках значительных территорий. Актуальность представленной диссертационной работы несомненна, поскольку эффективность решения геологических задач в полной мере определяется качеством получаемой измерительной информации, а также полноте использования летного времени – показателям, совершенствованию которых посвящена данная работа. На сегодняшний день аэроэлектроразведка является методом, который выполняет роль индикатора уровня развития геофизики в целом во всех развитых странах мира. Именно здесь сконцентрированы идеи и возможности людей с точки зрения теории, методики, техники, электроники,

возникающих в этой сложнейшей системе.

Основные проблемы, которые возникают при современном осмыслении аэроэлектроразведочного метода, заключаются в собственно самой методике измерений. Во-первых, системы могут работать в частотно-волновом и временном режимах. Во-вторых, системы состоят из отдельных блоков:

самолет или вертолет, части которого являются металлическими конструкциями из цветных металлов (высокая проводимость) и стали (высокая проводимость и высокая магнитная проницаемость)), которые сами по себе работают неидеально стабильно, и которые приближены к генераторной установке;

генераторная установка располагается на кабеле на некотором расстоянии от воздушного судна и может перемещаться относительно него произвольным образом, что создает свою дополнительную помеху;

измерительная гондола расположена относительно генераторного диполя на каком-то расстоянии на свободном кабеле и это при относительном движении приемной гондолы и генераторной петли тоже создает помеху.

При этом наблюдается огромное превалирование первичного сигнала над вторичным, который имеет геофизическую и геологическую значимость. Всю систему нужно контролировать (ее пространственное положение в целом и положение отдельных частей относительно друг друга), вводить соответствующие поправки и дополнять информационное магнитное поле составляющими, которые значительно расширяют диапазон исследуемых глубин и сопротивлений среды, который мы изучаем. В первый момент кажется, что эту задачу вообще решить нельзя. Тем не менее А.К.Волковицкий справился с этими проблемами.

### **Цели, задачи, научная новизна и практическая значимость исследования**

Целью диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов проектирования и функционирования аэроэлектроразведочных систем и ком-



плексов. Для достижения цели диссертантом поставлены и решены следующие задачи:

- 1) на основе системного подхода исследованы базовые принципы функционирования аэроэлектроразведочных установок и основные факторы, влияющие на их поисковую и производственную эффективность, определены пути их совершенствования;
- 2) исследованы методы обработки информации, получаемой при зондировании, сформулирован единый критерий оценки чувствительности аэроэлектроразведочных зондирующих систем к полю отклика от зондируемой среды;
- 3) разработаны методы и алгоритмы стабилизации параметров зондирующей установки путем непрерывного контроля частотных характеристик зондирующей системы и адаптивной коррекции результатов измерений;
- 4) разработан метод и алгоритмы, повышающие поисковую эффективность путем контроля условий зондирования за счет определения взаимного пространственного и углового расположения возбуждающей и приемной систем;
- 5) разработан метод и алгоритм определения полного значения комплексного вектора поля отклика от проводящей зондируемой среды на фоне непосредственного воздействия на датчики приемной системы первичного зондирующего поля;
- 6) разработана структура, схема вычислительной обработки и алгоритмы функционирования разнесенных аэроэлектроразведочных зондирующих систем с комбинированным (одновременно частотным и временным) представлением геофизически значимой информации;
- 7) разработана структура и алгоритмы информационной системы поддержки навигационных режимов аэросъемочных полетов, обеспечивающие повышение точности соответствия движения летательного аппарата-носителя заданным линиям пути и экономию летного времени;

8) разработанные методы и алгоритмы применены в структурах производственных аэроэлектроразведочных комплексов, на практике показана их эффективность.

### **Содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка публикаций, списка литературы и приложения. Работа изложена на 304 страницах, содержит 83 иллюстрации, 8 таблиц. Список цитируемой литературы включает 69 наименований.

Введение посвящено обоснованию актуальности темы, теоретической и практической значимости исследования. Дан краткий очерк истории аэроэлектроразведки. Формулируются цель и задачи исследования, изложена структура, основные положения работы и краткое содержание ее разделов.

Первая глава посвящена рассмотрению основных принципов функционирования аэроэлектроразведочных жестких, сосредоточенных и разнесенных систем, особенностям структуры получаемой полезной с точки зрения геофизики информации и возможностей ее интерпретации при временных и частотных формах представления. При этом вектор напряженности магнитного поля, определяется интегральным влиянием всех вихревых токов, возникающих под действием переменного вихревого электрического поля в проводящей среде, и сильным воздействием на датчик первичного поля непосредственно от источника. Для оценки информативности частотного представления рассмотрена частотная характеристика одиночного индуктивно-резистивного витка и сравнительная переходная характеристика от глубокого и поверхностного объектов.

Вторая глава посвящена оценке требуемой точности и стабильности измерений сигналов зондирующей установки (предложен критерий оценки чувствительности зондирующей системы к полю отклика) и разработке метода и алгоритма непрерывного контроля и адаптивной частотной коррекции, обеспечивающих стабильность при измерениях параметров квазистационарных периодических процессов. Для ведения непрерывного контроля параметров функции



преобразования измерительной системы  $\tilde{W}(t, j\omega)$  используется оригинальный метод адаптивной коррекции, который заключается в наблюдениях поля на частотах эталонного воздействия  $(\omega_0 \pm \delta)$ , в которых функция отклика должна быть нулевой. Поскольку считается, что помеха ведет себя линейно на данном отрезке, то можно ввести поправку за искажение поля в районе частоты  $\omega_0$ .

В третьей главе рассматриваются метод и алгоритм определения геометрических параметров условий зондирования для установок разнесенного типа. Теоретически показана возможность одновременно углового и пространственного позиционирования векторного измерителя поля относительно сосредоточенной системы трех дипольных излучателей, предложен алгоритм решения соответствующей нелинейной системы уравнений, представлена модель измерительных искажений, обусловленных несовершенством реальных измерительных систем, предложены методы калибровки и коррекции этих искажений. На практических примерах с реальным разработанным конструктивом системы показана высокая эффективность предложенных метода и алгоритма.

Четвертая глава посвящена разработке метода и алгоритма определения полного значения поля отклика в системах разнесенного типа во временном и частотном представлениях. Рассмотрены традиционные методы получения геофизически значимой информации в ныне существующих системах, показана их ограниченность. Рассмотрена проблема определения параметров поля отклика в системах с пространственным разнесением измерителя и источника поля их свободным перемещением друг относительно друга. Предложен метод и алгоритм обработки измерительных сигналов для определения поля отклика на фоне непосредственного сильного воздействия первичного возбуждающего сигнала. Этот подход основан на особенностях вырождения формы спектра при зондировании существенно изолирующих (область высоких частот) и существенно проводящих геологических структур (область низких частот). На конкретных практических примерах реальных съемок показана эффективность предложенного метода и алгоритма.

В пятой главе представлены результаты разработки алгоритмов информационной поддержки навигационных режимов аэросъемочного полета. Целью поддержки является создание технологических возможностей максимально эффективного использования летного времени при выполнении аэроэлектроразведочных исследований в режиме повышения точности покрытия исследуемой территории точками зондирования. Рассмотрены вопросы формирования управляющей информации для пилота при полетах в особо сложных условиях предельно малых высот. Предложены алгоритмы расчета управляющего параметра для режима стабилизации движения относительно заданной линии съемочного маршрута и режима приведения к входному ориентиру с заданным путевым углом. На практических примерах показана работоспособность предложенных алгоритмов и повышение эффективности съемочного процесса.

В шестой главе рассматриваются вопросы практической реализации предложенных методов и алгоритмов в структурах, используемых на практике комплексов ЕМ4Н и «Экватор», особенностям технической реализации и оценке их поисковой и производственной эффективности. Дано описание технического устройства зондирующих систем обоих комплексов и приведены их технические характеристики. Продемонстрированы конкретные примеры полученных полей и решенных геологических задач. В этой главе показан итог огромной работы, которая завершилась созданием аэроэлектроразведочных комплексов, не имеющих аналогов в мире.

В Заключении представлены выводы по работе, кратко отражена сущность решения поставленных задач.

В приложении приведены справки о внедрении результатов представленной диссертационной работы.

### **Научная новизна и практическая значимость исследования**

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:



1) сформулирован новый оригинальный критерий априорной оценки чувствительности различных аэроэлектроразведочных систем к геоэлектрическому разрезу;

2) разработан новый подход к решению задачи стабилизации измерительных систем аэроэлектроразведочных установок, найден метод непрерывного контроля частотных характеристик, основанный на введении дополнительных источников эталонных воздействий, предложен алгоритм адаптивной коррекции, позволяющий определить параметры спектральной и временной характеристик среды в процессе зондирования;

3) предложен метод и базовый алгоритм относительного позиционирования и определения пространственных и угловых координат приемной системы относительно возбуждающей на основе измерения параметров переменного магнитного поля системы компактно размещенных дипольных излучателей;

4) предложен алгоритм, позволяющий определить спектр и временную форму поля отклика в широком диапазоне свойств зондируемой среды при использовании разнесенной зондирующей системы;

5) обоснован принципиально новый подход к созданию перспективных комбинированных аэроэлектроразведочных систем, объединяющих преимущества частотных методов зондирования и метода переходных процессов, предложены структура и алгоритмы, обеспечивающие их функционирование;

6) разработаны алгоритмы калибровки разнесенных зондирующих систем, включающие калибровку системы относительного позиционирования;

7) разработана структура, методы и оригинальные алгоритмы информационной системы поддержки навигационных режимов аэросъемочного полета.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке научно-обоснованных методов формирования структур технических и программных средств аэроэлектроразведочных комплексов, обеспечивающих их эффективное применение в широком диапазоне условий зондирования на принципах частотно-временного представления геофизически значимой информации.

Предложенные в работе метод и алгоритм контроля частотной характеристики зондирующей системы и адаптивной коррекции результатов измерений может быть использован для обеспечения стабильности функционирования не только аэроэлектроразведочных, но и других измерительных систем.

Теоретические результаты, полученные в части алгоритмов относительного позиционирования в ближней зоне, могут быть использованы при разработке систем автоматической посадки, контроля взаимодействия подвижных объектов.

Предложенный метод и алгоритм определения полного значения вектора поля отклика от зондируемой среды открывает новые возможности при интерпретации результатов зондирования с применением разнесенных аэроэлектроразведочных установок.

Предложенные алгоритмы информационной поддержки навигационных режимов аэросъемочного полета, основанные на взаимодействии информационной системы с пилотом, могут быть применены и для управления движением автономных беспилотных аппаратов.

Практическая значимость работы подтверждается тем, что предложенные методы и алгоритмы составили основу системы технических решений, позволивших создать две принципиально новые аэроэлектроразведочные системы – ЕМ4Н и «Экватор», в реальных аэросъемочных работах демонстрирующие высокие показатели эффективности как в части полноты и достоверности результатов зондирования, так и в части технологичности, производительности и экономической эффективности применения, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

### **Соответствие работы паспорту специальности**

Работа соответствует специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации» в части обработки информации по пунктам:

1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.



2. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.
3. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.
4. Разработка специального математического и программного обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

### **Достоверность и апробация полученных результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата, результатами математического и компьютерного моделирования, подтверждается при анализе результатов обработки данных аэроэлектроразведочных измерений, полученных в процессе испытательных и производственных работ.

По теме диссертации опубликовано 42 работы, в том числе: две монографии, глава в книге в соавторстве с Р.Смитом и А.А.Кауфманом, пять статей и докладов из перечня Web of Science/Scopus, 12 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 22 работы в сборниках трудов российских и международных конференций, научно-технических журналах.

### **Замечания по диссертационной работе**

Диссертация Волковицкого А.К. содержит важные теоретические и практические результаты в области обработки информации применительно к задачам аэроэлектроразведки. Результаты внедрены в нескольких организациях, отмечается высокая эффективность их применения.

При анализе текста диссертации возникли следующие замечания.

1) При формировании критерия чувствительности аэроэлектроразведочной зондирующей системы (Глава 2) дан лишь метод оценки влияния геометрических параметров установки к амплитуде поля отклика, однако недостаточно детально рассмотрены вопросы чувствительности зондирующей системы к структуре геоэлектрического разреза. Этот вопрос А.К.Волковицкий обходит, используя некоторые примитивные модели, такие как метод зеркальных отражений для идеально проводящих сред или идеальные источники аномального поля в виде проводящей петли.

2) В структуре модели измерительных искажений для задачи калибровки системы относительного позиционирования (Глава 3) не приведена оценка степени влияния нелинейности измерительных преобразований. То есть при расчетах используются первые приближения, нет оценок насколько это применимо.

3) В Таблице 2.2 ошибочно указаны значения параметра главного динамического отношения для систем ЕМ4Н и «Экватор», также в Таблице 2 автореферата ошибочно указаны значения дипольного момента возбуждающей системы для комплекса ЕМ4Н.

4) На рисунках в части, посвященной результатам измерений при изображении графиков кажущегося сопротивления используется арифметический масштаб, что искажает представление о структуре поля (рис.6.15 и рис.6.16).

Отмеченные замечания, тем не менее, не снижают достоинств диссертационной работы, научная новизна и защищаемые положения диссертационной работы Волковицкого А.К., ее практическая значимость и достоверность приведенных данных содержит убедительные и яркие примеры применения полученных результатов на практике, теоретические, методические и практические результаты не вызывают сомнения в том, что данная работа является выдающимся научным вкладом автора в развитие аэроэлектроразведки для решения множества геологических и поисковых задач. Автореферат диссертации соответствует диссертации и защищаемым положениям и отражает основные выводы, полученные автором.



## Заключение

Диссертация Волковицкого А.К. на соискание ученой степени доктора технических наук является законченной научной квалификационной работой, в которой получено решение значимой проблемы повышения эффективности и точности съемки в методе аэроэлектроразведка, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание степени доктора наук.

Считаю, что Волковицкий Андрей Кириллович, заслуживает присуждения степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации».

Официальный оппонент

доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры геофизических методов

исследования земной коры геологического

факультета Московского государственного

университета имени М.В.Ломоносова



Игорь Николаевич Модин

01.09.2022



Почтовый адрес: Московский государственный университет имени

М.В.Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов ис-

следования земной коры, Ленинские горы, д.1, Москва, ГСП-1, 119991,

тел. +7 (495) 939 5766, e-mail: info@geophys.geol.msu.ru