

На правах рукописи



БАЛКОВ Евгений Вячеславович

**ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ
И АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
МАЛОГЛУБИННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ПРОФИЛИРОВАНИЯ, ЗОНДИРОВАНИЯ
И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Официальные оппоненты:

Дашевский Юлий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры геофизики Геолого-геофизического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», г. Новосибирск;

Ефремов Владимир Николаевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной геокриологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск;

Модин Игорь Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры Геологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», г. Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится 21 октября 2021 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета Д 003.068.03 (24.1.087.02) на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3,
факс (8-383) 330-28-07, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/commettee/Balkov2021>.

Автореферат разослан 10 сентября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м.н., доцент
8(383)3331639



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – малоглубинное электромагнитное профилирование, зондирование и электротомография с развитием программно-алгоритмического и аппаратурного обеспечения, а также использованием при решении задач инженерной геофизики, геоэкологии и археологии.

Актуальность

Для исследования неоднородного подповерхностного (до 100 м) пространства, постоянно изменяющегося в результате антропогенного, техногенного и климатического воздействия, необходим современный, мобильный, высокопроизводительный аппаратурно-программный электроразведочный комплекс, позволяющий определять распределение удельного электрического сопротивления (УЭС).

В ИНГГ СО РАН разработана многочастотная трехкатушечная аппаратура (ЭМС) для малоглубинного (до 10 м) электромагнитного профилирования (ЭМП) и частотного зондирования (ЧЗ). Две приемные катушки, имеющие ферритовые сердечники, спроектированы так, чтобы компенсировать сигнал генераторной катушки в воздухе (прямое поле). Для проведения количественной интерпретации сигналов, регистрируемых аппаратурой ЭМС, необходимо определять расстояния между центрами генераторной и измерительных катушек, а также моменты последних, которые имеют выраженную частотную зависимость. Определить значения указанных параметров с необходимой требуемой точностью не удастся ни прямым измерением, ни расчетом. Используемые в настоящее время способы калибровки наземных и каротажных приборов, заключающиеся в сопоставлении экспериментальных и расчетных сигналов при проведении единичных замеров на эталонных моделях, не обеспечивают возможность калибровки аппаратуры ЭМС из-за большого числа параметров, требующих определения.

Для первичной обработки сигналов аппаратуры ЭМП принято выполнять их трансформацию в кажущееся УЭС в модели однородного полупространства. Широко используемый за рубежом подход, заключающийся в применении линейного низкочастотного приближения, не обеспечивает необходимой точности при обработке сигналов аппаратуры ЭМС и требует совершенствования.

Большой объем производимых аппаратурой ЭМС измерений, состоящий из нескольких сотен или тысяч значений сигнала, требует разработки алгоритмов и специального программного обеспечения для автоматизации процедур анализа, фильтрации, обработки, инверсии и визуализации данных (1D, 2D и 3D).

Возросшие возможности промышленных карманных компьютеров (КПК) позволяют применять их для увеличения производительности и эффективности исследований аппаратурой ЭМС, предоставляя возможность

реализации оперативных процедур проектирования системы наблюдения, управления процессом съемки, привязки данных к координатам GPS, экспресс-обработки и визуализации результатов съемки. В известном зарубежном коммерческом ПО для обработки сигналов ЭМП используется линейное низкочастотное приближение, а возможности визуализации данных в режиме реального времени ограничены построением графиков.

Созданное в ИНГГ СО РАН ПО для работы с аппаратурой ЭМС и ее данными представляло собой набор консольных приложений с ограниченным функционалом и устарело. Поэтому разработка нового программно-алгоритмического комплекса, предназначенного для калибровки аппаратуры, управления процессом съемки, экспресс-обработки, инверсии и визуализации данных является актуальной задачей.

Электромагнитное зондирование (ЭМЗ) в частотной области может осуществляться по двум параметрам – частоте и разному. В первом случае зондирование называется частотным, во втором – геометрическим. В публикациях Л.Б. Гасаненко для проведения глубинных наземных зондирований предлагается осуществлять радиально-частотные зондирования, изменяя одновременно частоту и разнос между генераторной и приемной катушками, повышая зондирующую способность. В настоящее время аналогичный способ зондирования реализован в каротажных методах, например, в методе ВИКИЗ. Несмотря на это, во всей известной современной наземной портативной аппаратуре для малоглубинного ЭМЗ используется один зондирующий параметр, который реализует либо частотное, либо геометрическое зондирование, что существенно сужает диапазон применения средами с низким УЭС. Кроме того, в публикациях автора, а также В.Н. Глинских и М.И. Эпова показано, что в аппаратуре, все катушки которой расположены в одной горизонтальной плоскости, в силу принципа взаимности одному приповерхностному объекту могут соответствовать несколько экстремумов сигнала, что затрудняет интерпретацию. В известных аппаратурных реализациях компенсация прямого поля генераторной катушки осуществляется с помощью двух встречно включенных приемных катушек (аппаратура ЭМС и GEM2), что усложняет техническую реализацию геометрического зондирования с компенсацией прямого поля. Таким образом, разработка нового способа и устройства для малоглубинного радиально-частотного зондирования с компенсацией прямого поля катушками, разнесенными не только по горизонтали, но и по вертикали, расширит диапазон применения метода ЭМЗ и представляется актуальной.

За последние три десятилетия электротомография (ЭТ) зарекомендовала себя как высокопроизводительный метод, обеспечивающий высокое разрешение при исследовании сред на глубину до 100 м. Однако в России до 2008–2009 гг. специализированная аппаратура для ЭТ не производилась, а боль-

шинство серийно выпускаемой аппаратуры имело блочную структуру: генератор, измеритель, коммутатор и прочие вспомогательные устройства изготавливались в отдельных корпусах. Усложненная архитектура и большое число соединительных проводов снижают надежность аппаратуры, а применение ее для электротомографических измерений характеризуется низкой производительностью. Методу ЭТ свойственно большое и иногда избыточное число измерений – несколько сотен или первых тысяч при одной расстановке электродов. Традиционные табличные способы представления параметров системы измерения неудобны и малоэффективны, а результаты измерения, представленные в виде отдельных профильных диаграмм и кривых зондирования, не дают возможности эффективно отобразить и выполнить анализ всего массива измеренных сигналов и рассчитанных значений кажущегося УЭС. Таким образом, разработка моноблочной конструкции для новой высокопроизводительной аппаратуры ЭТ, объединяющей в одном компактном корпусе генераторный, измерительный и коммутационный блоки, и специализированного программного обеспечения для подготовки протоколов измерения, анализа, обработки и визуализации данных является актуальной задачей.

Метод ЭМП, реализованный в аппаратуре ЭМС, является высокопроизводительным инструментом, позволяющим делать бесконтактную экспресс-оценку распределения УЭС среды на достаточно больших площадях. Метод ЭТ менее производителен, но позволяет исследовать пространственное 2D- и 3D-распределение УЭС с высоким разрешением. Актуальной задачей представляется комплексирование этих дополняющих друг друга методов для практических задач по поиску и разведке аномальных геоэлектрических структур.

Цель исследований – повысить достоверность измерений при частотном профилировании, зондированиях и электротомографии с увеличенным пространственным разрешением геоэлектрических моделей среды на малых глубинах; улучшить технологические, эксплуатационные и эргономические характеристики аппаратуры; расширить применимость методов для решения задач в других областях знания.

Научные задачи

Разработать программно-алгоритмический комплекс для аппаратуры малоглубинного частотного зондирования и электромагнитного профилирования ЭМС (калибровка, управление, экспресс-обработка, инверсия и визуализация).

Создать устройство и модифицировать способ малоглубинного радиально-частотного зондирования за счет компенсации прямого поля многовиткового генераторного контура особым расположением измерительных катушек.

Создать компактную моноблочную конструкцию высокопроизводительной аппаратуры для электротомографии и программно-алгоритмическое обеспечение для работы с протоколами и результатами измерения.

Показать эффективность комплексного применения электромагнитного профилирования и электротомографии в задачах поиска и детального исследования аномалий УЭС.

Методы исследования, фактический материал и аппаратура

Теоретической основой решения поставленных задач являются классические уравнения квазистационарной электродинамики. Диссертант опирается на работы Л.Б. Гасаненко, Л.Л. Ваньяна, А.А. Кауфмана, Г.М. Морозовой, Л.А. Табаровского, М.И. Эпова, В.С. Могилатова и других широко известных специалистов в области геоэлектрики.

Технические решения базируются на теории электрических и электромагнитных зондирований, на практических решениях в области аппаратурных и программных разработок для наземных и скважинных исследований.

В качестве **методов** исследования широко используются численное моделирование, лабораторный и полевой эксперименты, а также аппаратурное прототипирование.

Для численных решений прямой и обратной задачи используются методы прикладной и вычислительной математики: аппроксимация и интегрирование быстроосциллирующих слабозатухающих функций с применением квадратур Гаусса; нелинейная оптимизация методами Ньютона и Нелдера-Мида; анализ точности полученных решений с внутренним и внешним тестированием. Верификация программно-алгоритмического обеспечения проводится с помощью программ М.И. Эпова, В.П. Соколова, Е.Ю. Антонова, И.Н. Ельцова, А.Е. Каминского, М.Н. Локе.

Аппаратура частотного электромагнитного зондирования ЭМС разработана в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН М.И. Эповым, А.К. Манштейном, К.В. Сухоруковой, Г.Л. Паниным и др. В течение 2008–2020 гг. выполнены серии полевых и экспериментальных работ с использованием аппаратурного и программно-алгоритмического комплекса ЭМС.

Для программной реализации алгоритмов и разработки визуальных интерфейсов используются среды программирования Fortran и Delphi. Конструкция аппаратуры Скала-48 разработан в системе автоматизированного проектирования SolidWorks.

В 2006 г. вблизи г. Латера (Италия) сотрудниками ИНГГ СО РАН и компании «Геостуди Астье» совместно выполнены комплексные электро-разведочные работы по изучению низкоомных газовых выходов в центральной части кальдеры древнего вулкана с использованием аппаратуры

ЭМС, канадской аппаратуры EM31 метода ЭМП и французской аппаратуры Iris Syscal метода ЭТ. Результаты применения аппаратуры ЭМС и разработанного соискателем программно-алгоритмического обеспечения верифицированы по латерали электромагнитным профилированием, по вертикали – электротомографическими измерениями.

В ходе комплексных исследований геотермальных зон в Камчатском регионе на Нефтяном поле Кальдеры Узон проведены сравнительные измерения аппаратурно-программными комплексами ЭМС и Скала-48. Сопоставление полученных значений указывает на высокую работоспособность и эффективность разработанных программно-алгоритмических средств и аппаратуры.

Программно-алгоритмические средства и аппаратура Скала-48 для ЭТ прошли многоэтапное тестирование на электрометрическом полигоне ИНГГ СО РАН в сравнении с серийной французской аппаратурой Iris Syscal Pro и программным обеспечением Electre II. Сравнительный анализ подтвердил высокие эксплуатационные качества аппаратуры, эффективность разработанных алгоритмов и программных реализаций для подготовки протоколов измерения, обработки и визуализации сигналов.

Защищаемые научные результаты

- Теоретически обоснованные и многократно апробированные на практике алгоритмы калибровки, управления, экспресс-обработки, одномерной инверсии и визуализации для аппаратуры малоглубинного электромагнитного профилирования и частотного зондирования ЭМС; их программные реализации;

- Обоснованные численным моделированием и апробированные на практике устройство и способ малоглубинного радиально-частотного зондирования, основанные на компенсации прямого поля многовиткового генераторного контура расположением набора измерительных катушек в области перехода через ноль вертикальной компоненты магнитного поля;

- Апробированные на практике и широко внедренные программно-алгоритмическое обеспечение для подготовки протоколов измерения, анализа, обработки, визуализации данных и компактная моноблочная конструкция высокопроизводительной аппаратуры для электротомографии Скала-48;

- Апробированное на практике комплексное применение электромагнитного профилирования для оперативного обследования среды и электротомографии для детального исследования геоэлектрических аномалий.

Научная новизна

1. Разработан комплекс алгоритмов и программ для аппаратуры малоглубинного частотного зондирования и электромагнитного профилирования ЭМС:

- новый способ и соответствующее программно-алгоритмическое

обеспечение с визуальным оконным интерфейсом, позволяющие проводить калибровку аппаратуры ЭМС, основанные на подборе эффективных параметров аппаратуры при использовании избыточного числа измерений на эталонной модели;

– единственное в России программно-алгоритмическое обеспечение EmsControl, позволяющее в реальном времени отображать информацию о распределении кажущегося УЭС среды с привязкой к спутниковым координатам по результатам зондирования и профилирования аппаратурой ЭМС. EMSControl разработано в виде оконного приложения диалоговой структуры для платформы Windows Mobile с синхронизацией с GPS-приемником по беспроводному протоколу Bluetooth™ и позволяет выполнять проектирование системы наблюдения, управление работой, экспресс-обработку, визуализацию и координатную привязку сигналов аппаратуры ЭМС;

– алгоритм трансформации данных ЧЗ в кажущееся УЭС по полным формулам для однородного полупространства с привязкой к кажущейся глубине, алгоритм автоматизированной визуализации в графическом редакторе Golden Software Surfer, автоматизированного построения геоэлектрических разрезов с учетом рельефа местности и псевдотрехмерной визуализации в виде набора геоэлектрических карт на разных частотах;

– уникальное программно-алгоритмическое обеспечение ISystem как составляющая аппаратурно-программного комплекса ЭМС, в котором реализованы возможности считывания данных с прибора, их просмотр, редакция и печать, нормировка, трансформация, а также полностью автоматизированная визуализация в Surfer с использованием технологии ActiveX;

– алгоритмы и встраиваемые программные модули в виде динамически подключаемых библиотек для моделирования и инверсии данных ЭМС над горизонтально-слоистой средой, с помощью которых изучены возможности и установлены ограничения малоуглубинного ЧЗ компактной аппаратурой с фиксированным разносом;

– единственное на момент создания программно-алгоритмическое обеспечение EMS v2 для профильной одномерной инверсии сигналов аппаратуры ЭМС в рамках горизонтально-слоистой модели, имеющее развитый визуальный интерфейс с оригинальным способом формирования профилей и набором табличных и интерактивных графических инструментов для подбора геоэлектрических моделей.

2. Разработан новый способ компенсации и оригинальное устройство для малоуглубинного радиально-частотного зондирования, включающий:

– особое расположение приемных катушек, которые устанавливаются вдоль линии, на которой вертикальная компонента напряженности магнитного поля от генераторной катушки равна нулю;

– использование одновременно двух зондирующих параметров: частоты и разности между генераторной и несколькими приемными катушками, расположенными вдоль линии компенсации прямого поля.

3. Разработана конструкция новой аппаратуры Скала-48 для электро-томографии и программно-алгоритмическое обеспечение, в том числе:

– компактное моноблочное исполнение аппаратуры, сочетающей в одном герметичном ударопрочном корпусе источник тока, измеритель тока и напряжения, коммутатор, имеющей самодостаточный интерфейс (клавиатура и графический дисплей) для создания измерительных протоколов, контроля над процессом и результатами измерения;

– алгоритмы создания протоколов измерения и способы визуального интерактивного представления систем наблюдения;

– эффективное программное обеспечение SibER Tools в виде оконного приложения диалоговой структуры, которое включает быструю автоматизированную подготовку и редакцию протоколов измерения для аппаратуры; оперативный анализ и фильтрацию зарегистрированных сигналов; открытие, сохранение и редакцию файлов, поддерживаемых аппаратурой; экспорт данных в форматы, поддерживаемые сторонним программным обеспечением (в том числе для инверсии данных).

4. Показана эффективность совместного применения ЭМП и ЭТ аппаратурно-программными комплексами ЭМС и Скала-48 в археологических, экологических и инженерных задачах поиска и детального изучения аномалий УЭС:

– установлены места скопления микросфер на территории золотвала Томь-Усинской ГРЭС (Кемеровская область);

– проведена оценка объемов загрязнения промышленными захоронениями пестицидов территории вблизи с. Юргинское (Тюменская область);

– локализованы и детально обследованы археологические объекты памятника Венгерovo-2 (Новосибирская область).

Теоретическая и практическая значимость

Разработанный подход к калибровке позволяет с высокой точностью устанавливать необходимые для описания параметры зонда, что делает возможным количественную обработку экспериментальных данных.

ПО EMSControl, разработанное для мобильных терминалов под управлением ОС Windows Mobile, при синхронизации с GPS-координатами повышает скорость сбора данных аппаратурой ЭМС в несколько раз по сравнению с традиционной предварительной разбивкой на пикеты; получение результата на экране терминала в реальном времени дает возможность оператору быстро оценивать ситуацию, принимать решение по корректировке системы наблюдения, изменению направления движения или об окончании работ; отображение статической и динамической информации о системе наблюдения уменьшает вероятность ошибки

позиционирования и повышает качество полевого материала.

ПО ISystem позволяет осуществлять экспресс-обработку сигналов аппаратуры ЭМС в виде трансформации данных ЧЗ в кажущееся УЭС с привязкой к кажущейся глубине; с использованием технологии ActiveX автоматизировать визуализацию в графическом редакторе Golden Software Surfer; автоматизировать построение геоэлектрических разрезов с учетом рельефа местности и псевдотрехмерной визуализации в виде набора геоэлектрических карт на разных частотах; выполнять компоновку и экспорт данных для последующей инверсии.

ПО EMS v2 за счет наличия развитого визуального интерфейса, включающего табличные и графические средства, позволяет выполнять одномерную инверсию профильных сигналов ЭМС и эффективно согласовывать результаты инверсии смежных моделей.

Предложенный способ компенсации за счет особого пространственного расположения одной приемной катушки позволяет компенсировать прямое поле генераторной катушки. Это существенно упрощает техническую разработку многокатушечного зондирующего устройства по сравнению с традиционным разностным подходом. За счет использования разности между источником и приемниками в качестве зондирующего параметра (наряду с частотой) повышается точность определения УЭС верхней части разреза до 10 м, возрастает контрастность получаемых кривых зондирования, что упрощает их интерпретацию. При профилировании над локальными аномальными объектами за счет разнесения генераторной и приемной катушек по вертикали в диаграммах исчезают ложные экстремумы, свойственные установкам, в которых катушки расположены в одной горизонтальной плоскости.

Разработанная герметичная моноблочная конструкция аппаратуры Скала-48 для ЭТ, совмещающая все традиционно разнесенные блоки в одном износостойком корпусе с возможностью автономного управления и контроля сигналов, существенно повышает эксплуатационные характеристики и надежность аппаратуры.

ПО SibER Tools разработано как оконное приложение диалоговой структуры. С помощью ряда интерактивных инструментов оно позволяет оперативно выполнять подготовку и редакцию протоколов измерения для аппаратуры ЭТ; анализ и фильтрацию измеренных данных; открытие, сохранение и редакцию файлов, поддерживаемых аппаратурой; экспорт данных в форматы, поддерживаемые сторонним программным обеспечением для инверсии обработанных сигналов.

Разработанные программно-аппаратурные комплексы ЭМС и Скала-48 позволяют проводить оперативный поиск, идентификацию и детальную оценку параметров аномальных геоэлектрических тел, что существенно

повышает эффективность применения электроразведочных методов в археологических, экологических и инженерных задачах.

Разработанная технология комплексного применения аппаратуры ЭМС и Скала-48 успешно апробирована при решении практических задач по поиску мест скопления микросфер на территории золоотвала Томь-Усинской ГРЭС (Кемеровская область), оценке объемов загрязнения промышленными захоронениями пестицидов территории вблизи с. Юргинское (Тюменская область), поиску и детальному исследованию археологических объектов памятника Венгерovo-2 (Новосибирская область).

Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение в составе аппаратурно-программных комплексов ЭМС и Скала-48 применяется в учебном процессе и полевой геофизической практике на геолого-геофизическом факультете в Новосибирском государственном университете.

Программно-алгоритмические разработки используются для калибровки аппаратуры, обработки и интерпретации данных в аппаратурно-программных комплексах ЭМС и Скала-48, серийно выпускаемых в ИНГГ СО РАН совместно с ООО «КБ Электротриии». К настоящему времени более 100 комплектов аппаратурно-программного комплекса ЭМС и более 70 Скала-48 используется производственными и научно-исследовательскими организациями в России и за рубежом.

Личный вклад

Роль соискателя в постановке научных задач исследования, разработке подходов к их решению, анализе, верификации и внедрении результатов является ключевой.

Предложенный диссертантом новый способ калибровки был реализован программно и в виде физической установки (в соавторстве с А.К. Манштейном, М.И. Эповым и К.В. Сухоруковой). Автор спроектировал ПО EMS Control, произвел тестирование на синтетических данных и при практических работах.

Соискатель полностью разработал и программно реализовал ПО ISystem. На основании подхода, опубликованного В.С. Могилатовым, автор программно реализовал численный алгоритм решения прямой и обратной задачи для аппаратуры ЭМС над горизонтально-слоистой средой с произвольным количеством слоев. Разработанный численный алгоритм, оформленный диссертантом как динамически подключаемая библиотека, широко протестирован на синтетических и полевых данных. Алгоритм инверсии встроен в ПО EMS v2 (разработанное в соавторстве с М.И. Эповым, И.Н. Ельцовым, Е.Ю. Антоновым, А.А. Власовым и А.Н. Фаре).

Используя численное моделирование, обработку полевого материала и сопоставление с результатами метода ЭТ соискатель провел исследование возможности и ограничений малоуглубинного ЧЗ компактным портативным зондом с фиксированным разномом.

Предложен новый способ компенсации первичного поля генераторной катушки (в соавторстве с А.К. Манштейном) и показана его эффективность на практике. Автор обосновал целесообразность использования нескольких приемных катушек и одновременно двух зондирующих параметров – частоты и разности для реализации малоглубинного радиально-частотного зондирования.

Соискателем в системе автоматизированного проектирования SolidWorks созданы 3D-модели основных аппаратурных узлов; разработана конструкция несущего каркаса и приборной панели компактной и высокопроизводительной аппаратуры для электротомографии Скала-48, разработаны чертежи и технология производства. При непосредственном участии диссертанта изготовлена опытная партия приборов Скала-48, созданы технические условия и получен сертификат соответствия. Автором полностью спроектировано и разработано ПО SibER Tools для аппаратуры Скала-48.

При активном участии диссертанта аппаратурно-программные разработки внедрены в ряд научно-исследовательских, образовательных и производственных организаций. Соискатель принимал решающее участие в обсуждении и подготовке основных публикаций по теме диссертации.

Апробация работы и публикации

Результаты известны научной общественности – они докладывались и получили одобрение специалистов на **зарубежных** конференциях: Ирландия, Дублин, 2009; Швейцария, Цюрих, 2010; Великобритания, Лестер, 2011; Франция, Париж, 2012; и **российских** конференциях, выставках и симпозиумах: Москва, 2009; Геленджик, 2009, 2013, 2014, 2015, 2019; Новосибирск, 2010, 2011, 2014; Санкт-Петербург, 2011; Анапа, 2016.

Соискатель имеет более **80 опубликованных научных работ** по теме диссертации. Научные результаты полностью отражены в **20 публикациях**, из них: 13 публикаций в ведущих рецензируемых отечественных журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы результаты диссертаций, два патента на изобретение, четыре свидетельства на программу для ЭВМ, одна монография (соавтор). В изданиях РИНЦ индексируется 71 публикация, Scopus – 33, в Web of Science – три.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук. Исследования проводились в соответствии с планами НИР Института по проектам программ фундаментальных исследований СО РАН: на 2007–2009 гг. (№ 7.3.1.1), на 2010–2012 гг. (№ VII.56.1.2), на 2013–2016 гг. (№ VIII.70.3.1), на 2017–2020 гг. (№ IX.128.3). Научные исследования поддер-

живались: госконтрактом ФЦП «Проведение научных исследований молодыми учеными – кандидатами наук» № П1270, грантом Президента для молодых кандидатов МК-7132.2013.5, интеграционными проектами СО РАН № 16 (2009–2011 гг.), № 118 (2012–2014 гг.).

Благодарности

Успешному проведению научно-исследовательской работы на всех этапах способствовала доброжелательность, поддержка и научные консультации сотрудников лабораторий электромагнитных полей, геоэлектрики и скважинной геофизики ИНГГ СО РАН: автор благодарен специалистам в области электромагнитных и электрических зондирований Е.Ю. Антонову, И.Н. Ельцову, Н.Н. Неведровой, Н.О. Кожевникову, В.Н. Глинских, В.В. Оленченко, В.В. Потапову, А.Ю. Соболеву, Е.В. Павлову, а также В.И. Самойловой за консультации и рекомендации по структурированию и оформлению диссертации.

Достижение защищаемых результатов было бы невозможно без консультаций, совместных исследований, теоретических и программных работ коллектива ИНГГ СО РАН. Автор признателен В.С. Могилатову, К.В. Сухоруковой, А.А. Адайкину, А.А. Власову, В.А. Белобородову.

Автор выражает отдельную благодарность кандидатам технических наук Ю.А. Манштейну и Г.Л. Панину за многолетнее плодотворное сотрудничество на всех этапах исследований, а также сотрудникам лаборатории электромагнитных полей, без участия которых настоящая работа не могла быть завершена в полной мере, Ю.Г. Карину, Д.И. Фадееву, И.О. Шапаренко, С.Ю. Халатову.

Автор признателен доктору исторических наук, академику РАН, профессору В.И. Молодину за реализацию разработок при решении научных задач археологии. Автор выражает благодарность сотрудникам Института археологии и этнографии СО РАН О.А. Поздняковой, И.Ю. Слюсаренко, А.Е. Гришину, Ю.Н. Гаркуше, содействовавшим выполнению интеграционных междисциплинарных археолого-геофизических работ.

Автор выражает признательность директору ИНГГ СО РАН, доктору технических наук, профессору И.Н. Ельцову за постоянное внимание к исследованиям, научные консультации и всестороннюю поддержку.

Необходимо отметить неоценимую помощь доктора технических наук А.К. Манштейна – научные консультации, важные обсуждения, помощь в организацию и проведении экспериментальных работ, внимание и поддержку.

Автор глубоко признателен своему учителю, доктору технических наук, академику РАН, профессору Михаилу Ивановичу Эпову, оказавшему существенное влияние на профессиональное становление, за неоценимый вклад при выполнении большинства этапов исследования и всеобъемлющую поддержку со студенческих лет.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Объем – 254 страницы текста, 89 рисунков и 7 таблиц. Список использованных источников содержит 255 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Программно-алгоритмический комплекс для аппаратуры электромагнитного профилирования и малоглубинного частотного зондирования ЭМС

Глава начинается с аналитического обзора современного программно-алгоритмического и аппаратурного обеспечения для малоглубинного электромагнитного профилирования и зондирования. Среди компактных устройств для выполнения малоглубинного электромагнитного зондирования известна российская аппаратура ЭМС [Балков, 2011а] и зарубежная, как например: GEM-2, DUALEM, CDM-Explorer. Широко распространена зарубежная аппаратура для электромагнитного профилирования: EM31, EM38, EMP-400, CMD. Разработчики указанной аппаратуры используют разное количество, ориентацию и расположение катушек. Известны как двух-, так и многокатушечные (до 7 штук) приборы с компланарной и ортогональной ориентацией генераторной и измерительных катушек (Рисунок 1). Приведен обзор более 25 моделей различных приборов с указанием основных характеристик, рассматриваются устройства и программное обеспечение (ПО), используемое для управления сбором, обработки, инверсии и визуализации данных известной аппаратуры.

Далее в главе описываются алгоритмические и программные разработки для аппаратуры ЭМС. Так, для количественной обработки регистрируемых сигналов разработаны оригинальный способ и ПО калибровки, основанные на подборе эффективных параметров при использовании избыточного числа измерений [Способ калибровки..., 2012].

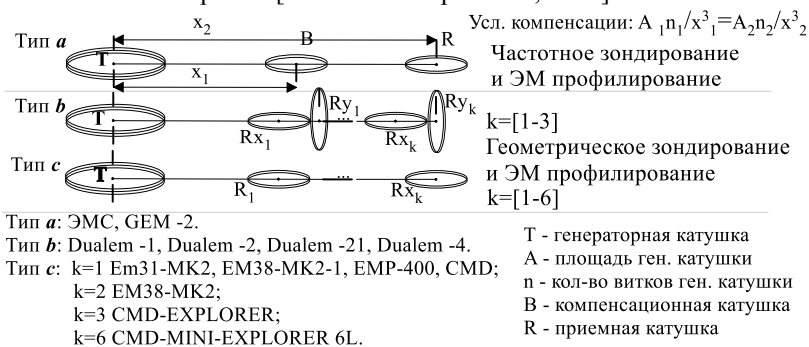


Рисунок 1 – Типы компоновки катушек портативной аппаратуры малоглубинного индукционного зондирования и профилирования

Разработан алгоритм трансформации сигналов, регистрируемых аппаратурой ЭМС в кажущееся удельное электрическое сопротивление (УЭС). В отличие от традиционно применяемого линейного приближения здесь для каждого измерения на конкретной частоте решается полное трансцендентное уравнение для модели однородного полупространства [Балков, 2011а].

Разработано ПО EMS Control [Свидетельство..., 2015] для проектирования системы наблюдения, управления работой, экспресс-обработки и координатной привязки сигналов аппаратуры ЭМС (Рисунок 2, слева). Приложение создано для платформы Windows Mobile и позволяет в реальном времени отображать результаты зондирования и профилирования [Balkov, 2009; Балков, 2009б]. Выгодным отличием данного ПО является возможность отображения не только значений и диаграмм регистрируемого сигнала, но и экспресс обработки данных с построением карт и псевдоразрезов в реальном времени [Балков, Адайкин, 2008].

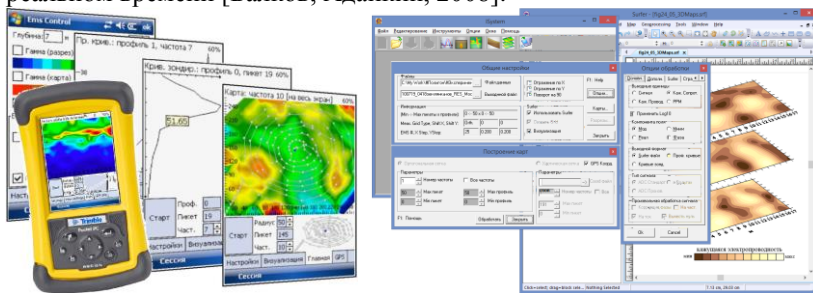


Рисунок 2 – Интерфейсы программ EMS Control (слева) и ISystem (справа)

Алгоритм трансформации встроен в ПО ISystem (см. Рисунок 2, справа), которое разработано для быстрой обработки и автоматической визуализации результатов [Балков, 2009а]. При площадном зондировании или профилировании с использованием всех 14 частот получается существенный объем информации, содержащий тысячи измерений. Для повышения качества интерпретации необходимо проводить многоступенчатую разностороннюю визуализацию. ISystem позволяет создавать файлы для одномерной визуализации профильных диаграмм и кривых зондирования (Рисунок 3, а). Полностью автоматизированы двухмерные построения карт, разрезов с учетом рельефа, а также псевдотрехмерная визуализация в графическом редакторе Surfer (см. Рисунок 3, б,в). Для этого один из модулей ISystem создан на основе технологии ActiveX как контроллер автоматизации Surfer. Также предусмотрен экспорт данных для трехмерной визуализации, что позволяет эффективно отображать сразу весь массив обработанных данных (см. Рисунок 3, г).

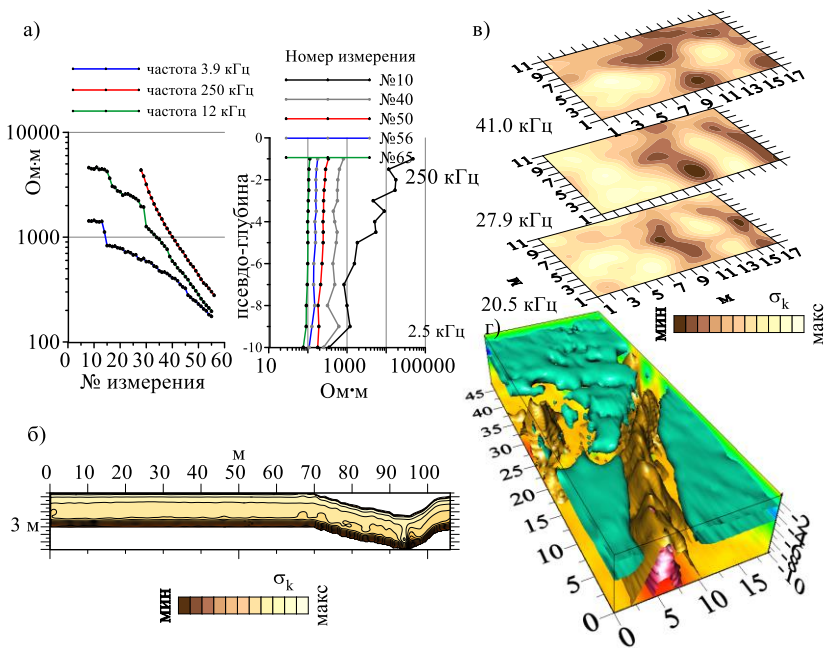


Рисунок 3 – Варианты визуализации результатов обработки данных аппаратуры ЭМС: одномерная визуализация в виде профильных диаграмм и кривых зондирования (а), псевдоразрез с учетом рельефа (б), трехмерное представление горизонтальными срезами на различных частотах (в), трехмерное представление набором изоповерхностей кажущегося УЭС (г)

Приведено описание электрометрического полигона ИНГГ СО РАН, на котором обустроено более трех десятков объектов, имитирующих реальные, и который предназначен для тестирования аппаратных и методических разработок [Balkov, 2012; Результаты..., 2013]. Описанные разработки прошли тестирование и верификацию в ходе исследований на тестовых объектах полигона. На картах распределения обработанных сигналов (Рисунок 4) выделяются все объекты. Зонд ЭМС имеет три разнесенные по горизонтали катушки, поэтому в силу принципа взаимности приповерхностные объекты могут создавать разное число экстремумов, зависящее от направления профилей и расположения объекта [Балков, 2011б]. Так, плоские металлические листы (см. Рисунок 4, объекты 1-5), заложенные на небольшую глубину, отражаются несколькими экстремумами. Положение объектов 6–9, имитирующих клады, мины и снаряды, определяется однозначно.

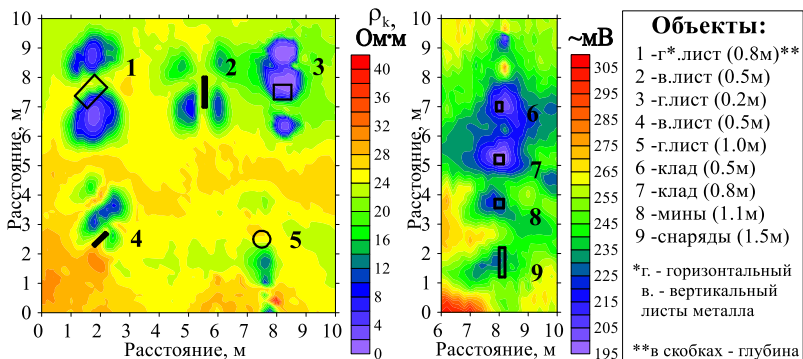


Рисунок 4 – Результаты электромагнитного профилирования на электрометрическом полигоне ИНГГ СО РАН: карта распределения кажущегося УЭС на частоте 3.9 кГц (слева), карта распределения реальной компоненты сигнала на частоте 111.1 кГц (справа)

Далее приводится описание результатов совместных работ, выполненных в 2006 г. сотрудниками ИНГГ СО РАН и итальянской компании Geostudi Astier, по исследованию структуры подземных газовых каналов в районе кальдеры древнего вулкана вблизи города Латера (Италия). На участке поля, растительность которого существенно изменена в связи с выходом газа на поверхность, проведено площадное зондирование аппаратурой ЭМС, площадное профилирование канадской аппаратурой EM31 и профильное зондирование французской аппаратурой Iris Syscal Junior Switch 48 для метода электротомографии (ЭТ). Измерения проведены на участке размером примерно $80 \times 50 \text{ м}^2$ и вдоль профиля, пересекающего центральную часть аномалии повышенной проводимости (Рисунок 5). Карта распределения кажущегося УЭС, полученная в результате трансформации сигналов ЭМС, близка по абсолютным значениям, но более детальна, чем карта, построенная по результатам обработки сигналов EM31, выполненной по приближенным формулам. На геоэлектрическом разрезе, построенном в результате инверсии данных ЭТ (см. Рисунок 5, в) прослеживается структура газовых каналов, выделяющихся по повышенной проводимости. Результаты трансформации сигналов частотного зондирования аппаратурой ЭМС, относимые по глубине к значениям, пропорциональным величине скин-слоя, составляют псевдоразрез (см. Рисунок 5, г), который с высокой степенью достоверности отражает как значения электропроводности, так и двухмерную структуру подземного пространства, хотя и с меньшей детальностью, чем ЭТ.

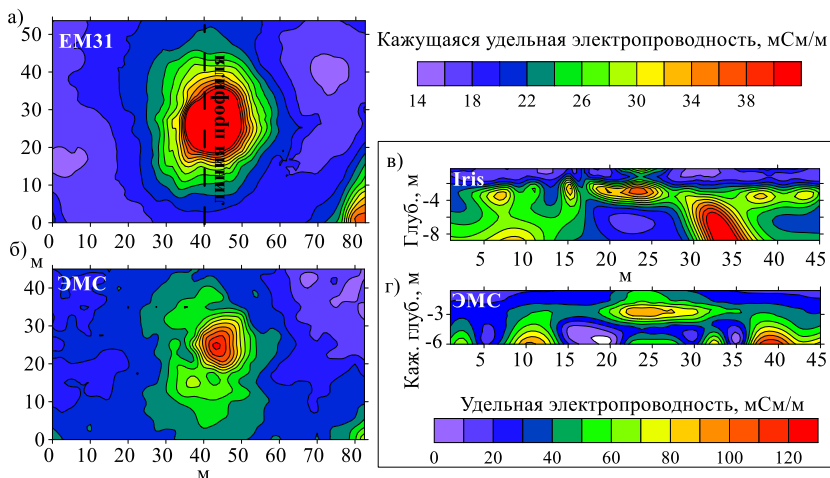


Рисунок 5 – Результаты комплексных работ по изучению газовых каналов древней кальдеры (г. Латера, Италия): распределение кажущейся электропроводности по результатам измерения аппаратурой EM31 (а); распределение кажущейся электропроводности по результатам измерения аппаратурой ЭМС (б); геоэлектрический разрез по результатам инверсии измерений аппаратурой Iris Syscal (в); псевдоразрез по результатам измерения аппаратурой ЭМС (г)

Рассмотрены результаты комплексных археолого-геофизических работ на археологическом памятнике Венгеро-2 (Венгеровский р-н Новосибирской обл.), выделяющемся своими уникальными объектами эпохи бронзы и неолита [Мультидисциплинарные исследования..., 2016]. За время исследований выполнен большой объем магнитной и электромагнитной съемки, однако результаты петромагнитных исследований показали низкую вероятность обнаружения неолитических конструкций магнитными методами. Лабораторными же исследованиями УЭС проб грунта объектов эпохи неолита и вмещающей среды обозначены перспективы получения результата с помощью геоэлектрических методов. На карте распределения кажущегося УЭС, построенной по данным аппаратуры ЭМС, выделяются структуры пониженного сопротивления, соответствующие жилищным западинам (Рисунок б) эпохи бронзы, и перспективные для раскопок аномалии кольцевой формы.

Опыт применения программно-аппаратурного комплекса ЭМС показывает высокую эффективность его использования для оперативной оценки распределения кажущегося УЭС среды.

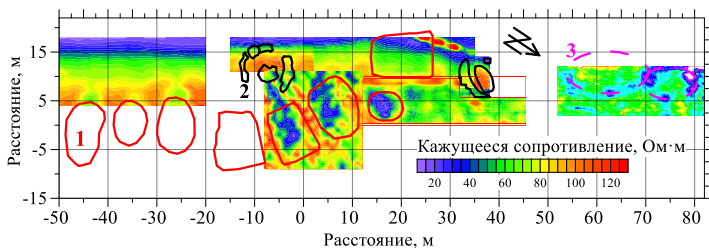


Рисунок 6 – Карта распределения кажущегося УЭС по данным электромагнитного профилирования в районе археологического памятника Венгерово-2:

1 – контуры котлованов жилищ эпохи бронзы, 2 – контуры обнаруженных раскопками погребальных комплексов эпохи неолита, 3 – перспективные аномалии

Глава 2. Малоуглубинное частотное зондирование при условии малой величины индукционных чисел

В главе рассматриваются исследования ограничения применения компактной индукционной аппаратуры для малоуглубинного частотного зондирования, опубликованные А.А. Кауфманом, G.V. Keller, J.B. Callagary, J.D. McNeil, H. Huang, I.J. Won, R.B. Spies, C.F. Frischknecht. Приведены результаты собственных расчетов, демонстрирующие, что аппаратура ЭМС функционирует в основном за пределами ближней зоны [Balkov, 2010].

Для определения зондирующей способности компактных многочастотных приборов на примере аппаратуры ЭМС выполнено численное моделирование синтетических сигналов и их трансформация для широкого диапазона параметров двухслойной среды и аппаратуры ЭМС [Балков, 2011а]. Показано, что более выраженными и информативными являются частотные кривые, полученные для модели проводящего основания (Рисунок 7). Установлено, что частотные кривые чувствительны только к существенному контрасту УЭС между слоями. Информативность кривых падает с уменьшением УЭС верхнего слоя при фиксированной его мощности. Информативность также падает с увеличением мощности верхнего слоя в случае, когда он имеет высокую проводимость. В целом расчеты показывают, что аппаратура ЭМС может быть использована не только для профилирования, но и для зондирования. Однако диапазон сред, для которых может выполняться зондирование, существенно ограничен проводящими средами с высоким контрастом УЭС слоев.

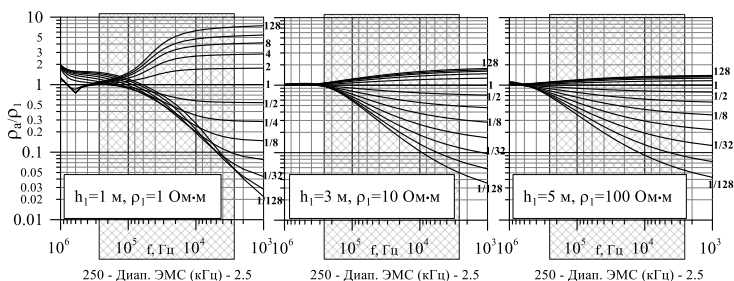


Рисунок 7 – Зависимость кажущегося относительного УЭС от частоты зондирования двухслойной среды при различных соотношениях между УЭС слоев ($=1/128, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 128$) для фиксированных значений h_1 и ρ_1 по результатам численного моделирования и трансформации синтетических сигналов

Для одномерной инверсии данных профильных наблюдений аппаратурой ЭМС в соответствии с подходом, изложенным В.С. Могилатовым, разработан вычислительный модуль для решения прямой задачи расчета электромагнитного поля над горизонтально-слоистой средой [Балков, 2011а] и обратной задачи восстановления УЭС и мощностей слоев среды по сигналам ЭМС. Разработанный как динамически подключаемая библиотека вычислительный модуль встроен в программное обеспечение EMS v2 [Свидетельство ..., 2018], имеющее развитый графический интерфейс профильной одномерной инверсии (Рисунок 8). Для пикетной инверсии созданы интерактивные графические, а также числовые табличные инструменты для работы с моделью пикета.

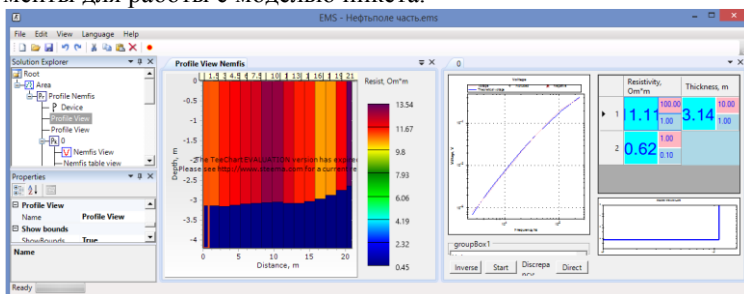


Рисунок 8 – Интерфейс программы EMS v2 для профильной одномерной инверсии данных аппаратуры ЭМС

Описанные разработки [Балков, 2011а; Свидетельство..., 2018] прошли успешное тестирование и апробацию в ходе комплексных исследований геотермальных зон в Камчатском регионе, результаты трансформации и инверсии данных сопоставлялись с результатами, полученными с использованием программы трансформации и одномерной инверсии

NEMFIS1D, разработанной А.Е. Каминским (<http://zond-geo.com>), а также с результатами, полученными методом ЭТ аппаратурой Скала-48 [Балков, Карин, Панин, 2010]. По одному и тому же профилю выполнено малоглубинное частотное зондирование аппаратурой ЭМС и зондирование на постоянном токе методом ЭТ аппаратурой Скала-48. Результаты различных способов обработки данных (Рисунок 9) показывают, что полученные в результате трансформации данных ЭМС структуры хорошо согласуются со структурами, полученными в результате двухмерной инверсии данных ЭТ (см. Рисунок 9, а, б). Геоэлектрические границы, полученные в результате одномерной инверсии данных ЭМС (см. Рисунок 9, в), достаточно точно коррелируют с границами по результатам ЭТ. Таким образом, на практике показано, что малоглубинное частотное зондирование осуществимо для контрастной высокопроводящей среды и может служить экспресс методом оценки пространственного распределения УЭС.

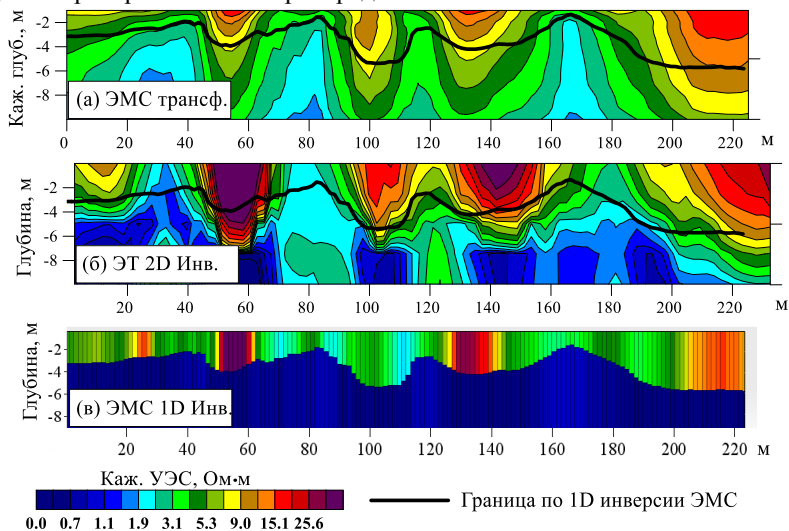


Рисунок 9 – Структура геотермальной зоны (нефтяное поле кальдеры Узон, Камчатка) по результатам профильного зондирования аппаратурой ЭМС и электротомографии аппаратурой Скала-48

Глава 3. Разработка устройства и модификация малоглубинного радиально-частотного зондирования за счет компенсации прямого поля генераторной катушки особым расположением измерительных катушек

Сегодня хорошо развиты и широко представлены на рынке компактные приборы для малоглубинных частотных и геометрических зондирования

ний (см. Рисунок 1). Однако приборы малоглубинного частотного зондирования (ЭМС, GEM-2) имеют существенное ограничение области применения контрастными средами с высокой электропроводностью. Аппаратура для геометрического зондирования (CDM-Explorer, DUALEM) использует одну фиксированную частоту, осуществляя зондирование лишь по одному параметру – разному. Диапазон практического применения малоглубинного зондирования может быть расширен за счет разработки нового способа радиально-частотного зондирования (РЧЗ). В главе описана разработка, реализующая малоглубинное индукционное зондирование, при котором, в отличие от всех рассмотренных в работе ранее приборов, генераторная и приемные катушки разнесены не только по горизонтали, но и по вертикали для компенсации первичного поля генераторной катушки [Манштейн, Балков, 2013]. Зондирование выполняется при одновременном изменении двух параметров – частоты и разности.

Вертикальная компонента напряженности магнитного поля магнитного диполя в однородном пространстве (Рисунок 10, слева) имеет область перехода через ноль [Новый подход..., 2017]. Описана разработка макета прибора, имеющего жесткий каркас, и его основных узлов (см. Рисунок 10, справа), в котором набор из пяти приемных катушек располагается в зоне компенсации прямого поля на разном удалении от генератора [Балков, Манштейн, 2014]. Приведены результаты численного моделирования и практических испытаний для оценки влияния на регистрируемый сигнал смещения измерительных катушек относительно линии компенсации.

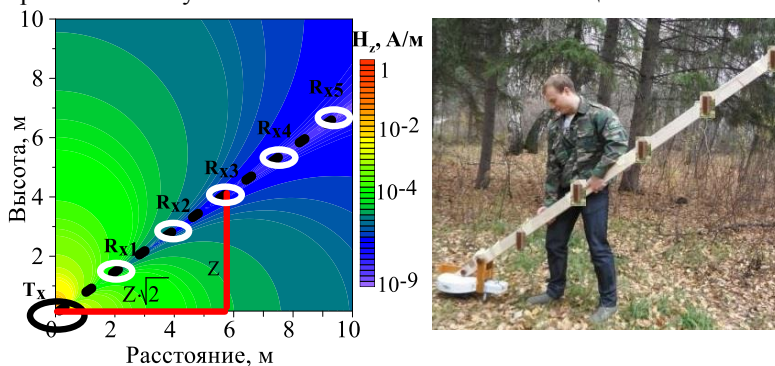


Рисунок 10 – Поле магнитного диполя, расположенного в начале координат однородного пространства с сопротивлением 1000 Ом·м, схема расположения измерительных катушек вдоль линии компенсации (слева); макет аппаратуры радиально-частотного зондирования (справа)

Графики зависимости кажущегося УЭС от частоты зондирования, построенные по результатам численного моделирования сигналов РЧЗ и

ЭМС над двухслойным полупространством (Рисунок 11) наглядно демонстрируют большую зависимость УЭС от частоты для сигналов РЧЗ. Это говорит о перспективности применения такой реализации зондирования.

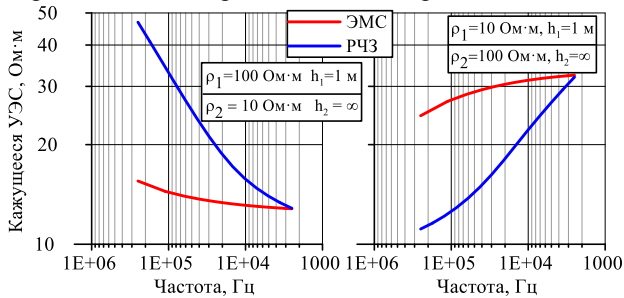


Рисунок 11 – Кажущееся УЭС в зависимости от частоты зондирования по результатам численного моделирования и трансформации сигналов для аппаратуры ЭМС и радиально-частотного зондирования

Не менее важной областью применения индукционной аппаратуры является поиск локальных объектов по аномальным значениям УЭС. Примерами таких объектов являются инженерные коммуникации, археологические объекты, захоронения отходов, неразорвавшиеся боеприпасы. Описаны расчеты сигналов для случая локальной неоднородности при аппроксимации катушек аппаратуры и локального проводника вертикальными магнитными диполями в однородной слабопроводящей среде [Новый подход..., 2017].

По результатам расчета э.д.с. для трех разных типов аппаратуры (малый радиально-частотный зонд, двухкатушечный зонд, трехкатушечный зонд ЭМС) получен модуль сигнала в зависимости от положения аппаратуры вдоль профиля над локальным проводником, помещенным на глубину 0,5 м (Рисунок 12). Последний имитируется магнитным диполем с моментом, эквивалентным одновитковой петле с радиусом 0.2 м.

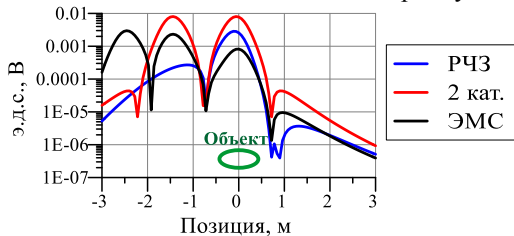


Рисунок 12 – Синтетический сигнал над локальным проводящим объектом (глубина 0.5 м) на частоте 50 кГц для малого зонда РЧЗ, двухкатушечной аппаратуры с копланарным горизонтальным расположением катушек в одной плоскости и трехкатушечной аппаратуры ЭМС

В силу принципа взаимности профильные кривые для трехкатушечной аппаратуры ЭМС имеют три экстремума, для двухкатушечной – два ярко выраженных, а для аппаратуры РЧЗ преобладает один, расположенный по центру генераторной катушки. Аналогичным способом выполнены расчеты для различных глубин заложения проводящего объекта, для набора разносов и частот [Балков, 2011а, 2011б; Balkov, 2011], которые показывают, что при увеличении глубины локального проводника для трехкатушечной аппаратуры ЭМС начинает преобладать один экстремум в сигнале, когда глубина заложения объекта соизмерима либо превышает разнос между катушками. Подобные расчеты в трехмерной постановке для трехкатушечного зонда, выполненные В.Н. Глинских и М.И. Эповым, подтверждают наличие нескольких экстремумов в сигнале от одного объекта. Для аппаратуры РЧЗ для любых разносов и глубин объекта преобладает один экстремум, что свидетельствует о преимуществах новой аппаратурной разработки РЧЗ при работах по поиску или с присутствием паразитных локальных приповерхностных объектов.

Для подтверждения результатов, полученных на синтетических данных, проведены полевые тесты макета аппаратуры РЧЗ на территории электрометрического полигона ИНГГ СО РАН. Проведено электромагнитное профилирование разработанным устройством РЧЗ вдоль профиля, проложенного над тремя металлическими листами, изготовленными из различного материала (дюраль, медь и сталь), заложеными на глубине 0.5 м. Превалирующие экстремумы на графике абсолютной величины регистрируемого сигнала для частоты 5 кГц (Рисунок 13, слева) совпадают с местами заложения искомых объектов. Также проведено площадное электромагнитное профилирование на частоте 28 кГц разработанным устройством РЧЗ и выполнено сопоставление результатов с результатами, полученными ранее при аналогичной съемке аппаратурой ЭМС. На изученном участке на глубине не более 1 м заложены три металлические мишени с различной пространственной ориентацией (см. Рисунок 13, справа), что обуславливает несколько экстремумов в сигнале [Балков, 2011а]. Для трехкатушечной аппаратуры ЭМС мишени, ориентированные горизонтально, создают два или три образа, что вполне согласуется с результатами математического моделирования [Балков, 2011б; Новый подход..., 2017]. Вертикально ориентированные мишени создают более сложные аномалии, напоминающие по своей форме квадруполь. Горизонтально ориентированные объекты при исследовании макетом аппаратуры РЧЗ проявляются в единственной аномалии сигнала (для объекта на глубине 0.8 м) либо в нескольких аномалиях, одна из которых преобладает (объект на глубине 0.2 м). Вертикально ориентированный объект так же, как и в случае с ЭМС, проявляется в виде несколь-

ких аномалий. Полевые испытания в целом подтверждают выводы, сделанные в результате численного моделирования, о преобладании одного экстремума над аномальными по УЭС объектами.

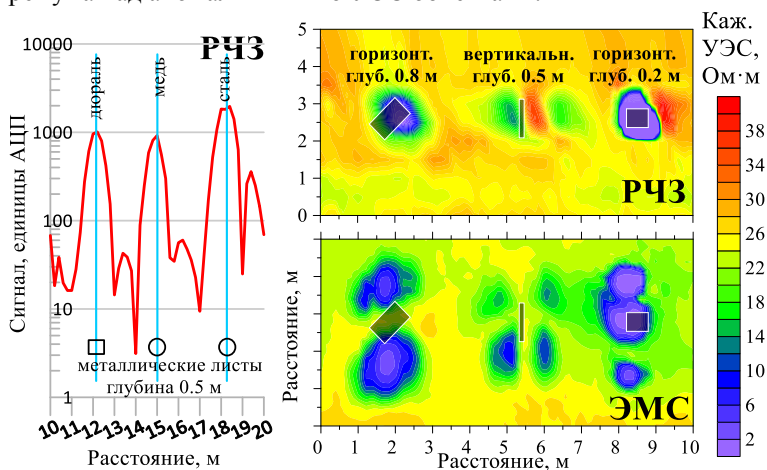


Рисунок 13 – Результаты испытаний макета аппаратуры РЧЗ на электрометрическом полигоне ИНГГ СО РАН: модуль сигнала на частоте 5 кГц по результатам исследований вдоль профиля, проходящего над тремя горизонтальными металлическими листами (слева). Карты распределения кажущегося УЭС при площадном профилировании на частоте 28 кГц над тремя медными листами (справа)

Глава 4. Конструкция, программно-алгоритмическое и методическое обеспечение аппаратуры Скала-48 метода электротомографии

Метод сопротивлений является одним из самых старых и широко используемых в электроразведке. В последние три десятилетия он получил развитие в варианте электротомографии, когда аппаратура является многоэлектродной системой, поддерживающей автоматическое переключение по заранее запрограммированному протоколу [Опыт..., 2012]. В главе дан обзор современного уровня развития аппаратурного и методического обеспечения метода, приведены результаты сравнения различных установок по результатам инверсии синтетических данных на модели золотосодержащего месторождения [Балков, 2010].

Далее описана разработка моноблочной конструкции новой аппаратуры Скала-48 [Опыт..., 2012], в которой генераторный, измерительный и коммутационный модули объединены в одном корпусе (в России до 2009 г. подобная аппаратура не производилась). Создана компактная дюралевая конструкция несущего каркаса и приборной панели, которые обеспечивают эффективный теплоотвод от нагревающихся элементов генераторного блока и экранировку измерительного и генераторного узлов (Рисунок 14).

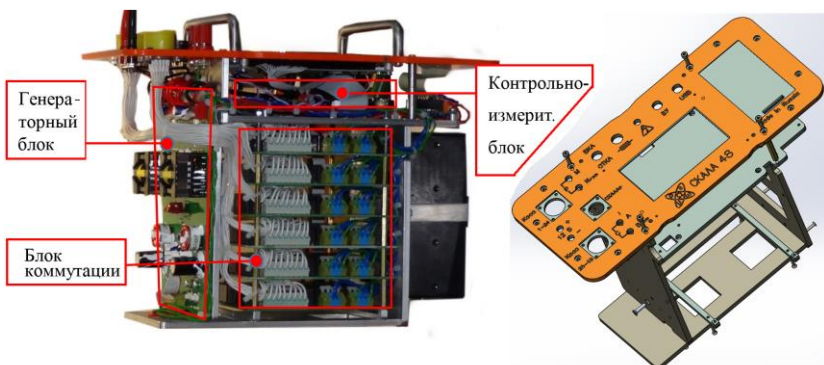


Рисунок 14 – Организация приборной панели, несущего каркаса и внутреннего пространства аппаратуры Скала-48: схема расположения основных аппаратурных блоков (слева), сборка трехмерных моделей приборной панели и несущего каркаса (справа)

Приборная панель содержит дисплей и клавиатуру для полностью автономной работы оператора (Рисунок 15). В целом аппаратура имеет герметичное исполнение. Ударопрочный кейс в закрытом состоянии имеет плавучесть с загрузкой более 26 кг. Аппаратура прошла испытания на вибрационном и ударном стендах, в термокамере и сертифицирована. В 2009 г. изготовлена опытная партия приборов.



Рисунок 15 – Приборная панель, элементы управления и индикации, разъемы для подключения электроразведочных кабелей, проводов, зарядного и считывающего устройств

Описывается разработанное программное обеспечение SibER Tools для создания протоколов измерения и обработки данных аппаратуры Скала-48 [Св-во..., 2015], которое имеет развитый графический интерфейс и максимально адаптировано для быстрого получения оптимального результата. В разработанном ПО заложена возможность создания протоколов измерения в автоматическом и полуавтоматическом режимах. При изменении параметров в интерактивном режиме изменяются графические диаграммы протокола, что дает возможность оперативной оценки и изменения плотности измерений и глубины исследования. В ПО поддерживаются установки Венеры, Шлюмберже, дипольная, трехэлектродные и двухэлектродная. Для анализа сигналов в программе предусмотрены табличные и графические способы отображения (Рисунок 16).

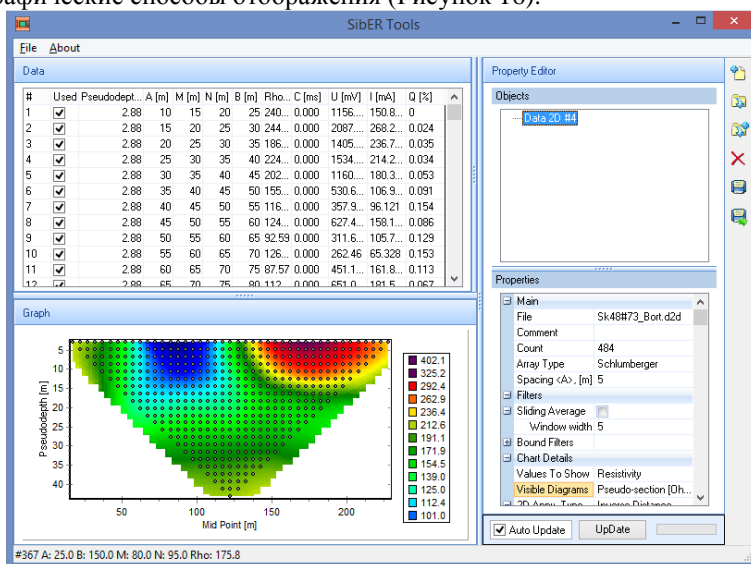


Рисунок 16 – Интерфейс программы SibER Tools для аппаратуры Скала-48 при отображении результатов измерения установкой Шлюмберже

ПО позволяет отображать двухмерный псевдоразрез (см. Рисунок 16), кривые зондирования, профильные кривые и графики исходных сигналов (Рисунок 17). Реализована интерактивная табличная и графическая фильтрация. Любое измерение в таблице или на диаграмме может быть исключено из обработки. Поддерживаются автоматическая фильтрация по диапазону значений и сглаживание плавающим окном.

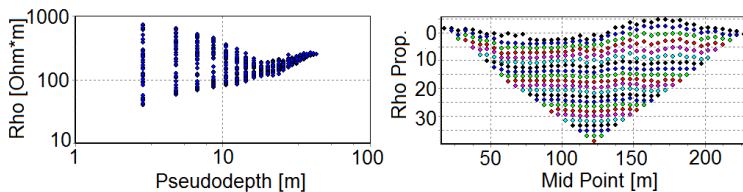


Рисунок 17 – Диаграммы кажущегося УЭС в графической области программы SibER Tools: набор кривых зондирования (слева), профильные кривые (справа)

Далее в главе рассмотрены примеры успешной апробации описанных аппаратных и программных разработок при решении практических задач по поиску мест скопления микросфер на территории золоотвала Томь-Усинской ГРЭС (Кемеровская область), оценке объемов загрязнения промышленными захоронениями пестицидов территории вблизи с. Юргинское (Тюменская область).

Так, в результате применения разработанной комплексной технологии электромагнитного профилирования и электротомографии найдены и обследованы области повышенного содержания микросфер. По картам распределения кажущегося УЭС, построенным по данным электромагнитного профилирования аппаратурой ЭМС, выбрана область для детального обследования методом электротомографии аппаратурой Скала-48. Полученные геоэлектрические разрезы, заверенные точечным бурением, позволили выбрать области повышенного УЭС (Рисунок 18), связанные со скоплением микросфер, наиболее перспективные для вскрытия и добычи последних [Поиск микросфер..., 2015].

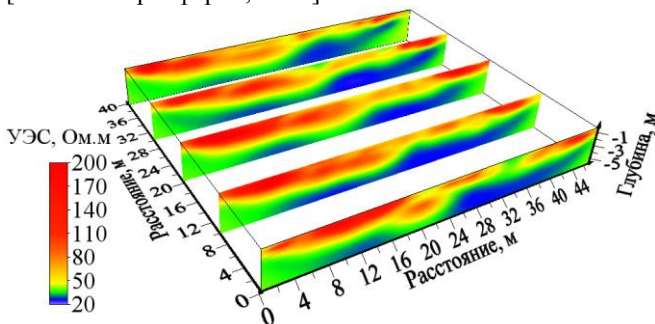


Рисунок 18 – Геоэлектрические разрезы по результатам электротомографии аппаратурой Скала-48

Совместное применение аппаратно-программных комплексов ЭМС и Скала-48 позволило выявить и оконтурить области пониженного УЭС, соответствующие местам повышенной концентрации пестицидов в грунте

(Рисунок 19), что вместе с лабораторным анализом проб грунта дало важнейшую информацию для затратного способа экологического ущерба [Об оценке..., 2016].

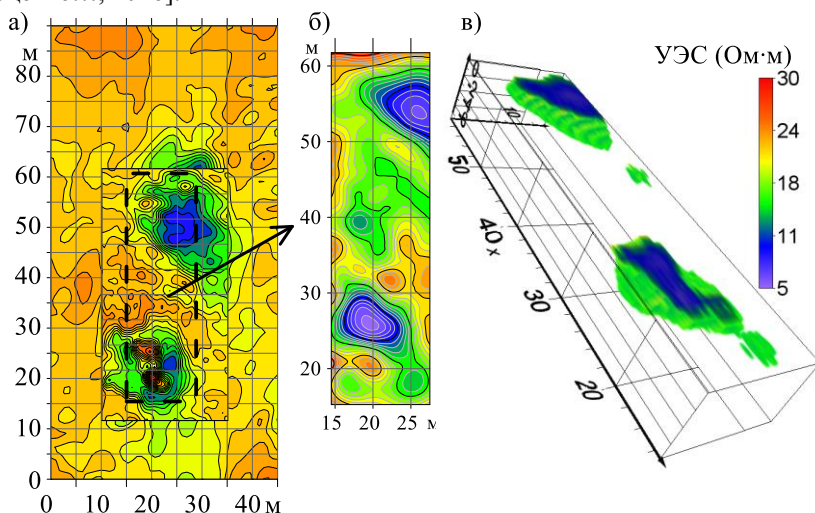


Рисунок 19 – Распределение УЭС зараженного пестицидами грунта: карта кажущихся значений по результатам электромагнитного профилирования аппаратурой ЭМС (а), детализация методом ЭТ аппаратуры Скала-48 – срез на глубине 1.8 м (б), области повышенного содержания пестицидов грунта по результатам трехмерной инверсии данных метода ЭТ (в)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатами работы являются: программно-алгоритмический комплекс для калибровки, управления и GPS-привязки, обработки сигналов, инверсии и визуализации данных аппаратуры ЭМС малоглубинного электромагнитного профилирования и частотного зондирования; новый способ и устройство малоглубинного электромагнитного радиально-частотного зондирования; компактная моноблочная конструкция и программно-алгоритмическое обеспечение новой аппаратуры Скала-48 для электротомографии. Разработки направлены на повышение достоверности, разрешающей способности, расширение диапазона применения, повышения эффективности и уровня автоматизации малоглубинных индукционных и гальванических методов электроразведки. Найденные новые решения имеют ряд преимуществ и выгодно отличаются от известных.

Во-первых, предложенный оригинальный подход к калибровке аппа-

ратуры ЭМС, основанный на использовании избыточной экспериментальной информации для подбора аппаратурных параметров, позволяет получить более точное математическое описание измеряемых сигналов. Программное обеспечение для управления аппаратурой ЭМС с мобильного терминала при синхронизации с GPS-координатами, обработкой и визуализацией данных в реальном времени существенно повышает скорость, эффективность измерения и качество сигналов ЭМС. В программном обеспечении для экспресс-обработки и визуализации данных ЭМС используются полные формулы описания сигнала над однородным полупространством, что позволяет повысить точность результатов по сравнению с традиционной обработкой, основанной на асимптотических приближениях ближней зоны. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение для одномерной инверсии данных ЭМС за счет наличия развитого визуального интерфейса, включающего табличные и графические средства, позволяет выполнять одномерную инверсию профильных сигналов и эффективно согласовывать результаты инверсии смежных моделей. Использование и внедрение специализированной программной технологии позволило автоматизировать процесс визуализации данных, что снимает проблему малоэффективной и трудоемкой ручной визуализации (существенно повышает скорость и вариативность представления результатов обработки).

Во-вторых, предложенный способ компенсации, основанный на расположении приемной катушки на линии нулевого значения напряженности вертикальной компоненты магнитного поля генераторной катушки, позволяет компенсировать ее прямое поле одной приемной катушкой. Это существенно упрощает техническую разработку многокатушечного зондирующего устройства по сравнению с традиционным разностным подходом. За счет использования разности между источником и приемниками в качестве зондирующего параметра (наряду с частотой) повышается точность определения удельного электрического сопротивления верхней части разреза до 10 м, возрастает контрастность получаемых кривых зондирования, что упрощает их интерпретацию, делает более точной. При профилировании над локальными аномальными объектами за счет разнесения генераторной и приемной катушек по вертикали в диаграммах исчезают ложные экстремумы, свойственные установкам, в которых катушки расположены в одной горизонтальной плоскости.

В-третьих, разработанная моноблочная конструкция аппаратуры Скала-48 для электротомографии совмещает все традиционно разнесенные блоки (генератор тока, измеритель напряжения, коммутирующее устройство и пр.) в одном износостойком герметичном корпусе. Описанное в совокупности с возможностью автономного управления и контроля сигналов существенно повышает удобство применения, эксплуатационные характе-

ристики и надежность аппаратуры. Оригинальное разработанное программно-алгоритмическое обеспечение диалоговой структуры с помощью интерактивных визуальных инструментов позволяет выполнять подготовку и редакцию системы измерения для аппаратуры Скала-48, которая может включать до нескольких тысяч единичных измерений при одной расстановке электродов. Это, в отличие от традиционных табличных способов представления системы измерения методом сопротивлений, существенно повышает наглядность и эффективность проектирования полевых работ. Программное обеспечение, кроме того, позволяет осуществлять анализ и фильтрацию измеренных данных; открытие, сохранение и редакцию файлов, поддерживаемых аппаратурой; экспорт данных в форматы, поддерживаемые сторонним программным обеспечением для инверсии обработанных сигналов. Описанные разработки обеспечивают высокую эффективность и уникальность аппаратурного и программно-алгоритмического комплекса Скала-48.

В-четвертых, на практике показана эффективность комплексного применения электромагнитного профилирования для поиска и электротомографии для детального исследования аномалий удельного электрического сопротивления. Совместное применение двух дополняющих друг-друга электроразведочных методов повышает скорость и информативность проводимых исследований.

Необходимо отметить ограничения диапазона применения аппаратурного и программно-алгоритмического комплекса ЭМС высокопроводящими средами, где осуществляется зондирование с последующем восстановлением вертикальной геоэлектрической структуры разреза. Для электромагнитного профилирования комплекс ЭМС применяется в широком диапазоне, однако сам зонд – довольно громоздкий.

Несмотря на высокую эргономику и развитые программные средства, аппаратурно-программный комплекс Скала-48 предназначен для эффективного проведения двумерных и псевдотрехмерных наблюдений по серии линейных профилей. Для эффективного планирования и выполнения трехмерных исследований необходимо расширение программно-алгоритмической базы для проектирования систем наблюдения, обработки и визуализации соответствующих массивов данных, а также повышение скорости работы самой аппаратуры.

Определенно, разработки в области малоглубинных электромагнитных зондирований и электротомографии следует продолжать. Опыт работы подсказывает, чтобы преодолеть указанные выше недостатки необходимо разрабатывать многокатушечную аппаратуру для малоглубинного радиально-частотного зондирования, а также компактную аппаратуру для электромагнитного профилирования, способ и принципиальное устройство которых из-

ложено в настоящей работе. Соответственно требует развития метрологическое, методическое и программно-алгоритмическое обеспечение для калибровки и управления аппаратурой, имитации, обработки, интерпретации и визуализации данных. Значительного повышения скорости электротомографических измерений можно достичь разработкой многоканальных аппаратурных реализаций, а применение современных средств программной разработки и графических библиотек позволит усовершенствовать соответствующее программно-алгоритмическое обеспечение.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах

из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы результаты диссертаций

1. Балков Е.В. Управление аппаратурой частотного электромагнитного зондирования с помощью карманного компьютера / Е.В. Балков, А.А. Адайкин // Геоинформатика. – 2008. – № 4. – С. 33–38.
2. Балков Е.В. Технология малоглубинного частотного зондирования / Е.В. Балков // Геофизика. – 2011а. – № 6. – С. 42–47.
3. Исследование замерзших курганов Горного Алтая комплексом геофизических и геохимических методов / М.И. Эпов, Е.В. Балков [и др.] // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 6. – С. 761–774.
4. Опыт применения электротомографии в геофизике / Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.А. Манштейн [и др.] // Геофизика. – 2012. – № 6. – С. 54–63.
5. Результаты применения малоглубинного электромагнитного профилирования на электрометрическом полигоне Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН / Е.В. Балков, ..., Ю.Г. Карин [и др.] // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14, № 3. – С.55–63.
6. Мультидисциплинарные археолого-геофизические исследования в Западной Сибири / М.И. Эпов, ..., Е.В. Балков [и др.] // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 3. – С.603–614.
7. Поиск микросфер в золоотвале методами электротомографии и электромагнитного профилирования / Ю.А. Манштейн, ..., Е.В. Балков [и др.] // Инженерные изыскания. – 2015. – № 13. – С. 58–61.
8. Об оценке экологического ущерба по данным электроразведки / Ю.А. Манштейн, Е.В. Балков [и др.] // Инженерные изыскания. – 2016. – № 4. – С. 34–37.
9. Новый подход к малоглубинным электромагнитным зондированиям / Е.В. Балков [и др.] // Геология и геофизика. – 2017. – № 5. – С. 783–792.
10. Калибровка и экспресс-трансформация сигналов компактной аппаратуры малоглубинного электромагнитного профилирования / Д.И. Фадеев, Е.В. Балков [и др.] // Геофизика. – 2018. – № 2. – С. 52–57.

11. Электромагнитное профилирование компактной аппаратурой, новый подход и результаты применения / Ю.Г. Карин, Е.В. Балков [и др.] // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 68–78.

12. Опыт детализации результатов магнитной съемки археологических памятников электроразведочными методами / Е.В. Балков, О.А. Позднякова, П.Г. Дядьков [и др.] // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2019. – Т. 17. – № 4. – С. 13–22.

13. Балков Е.В. Применение современных беспилотных технологий при решении комплексных задач археологической геофизики / Е.В. Балков, Ю.Г. Карин, О.А. Позднякова // Геофизика. – 2021. – № 1. – С. 57–65.

Патенты

14. Способ калибровки устройства для наземного электромагнитного индукционного частотного зондирования: пат. 2461850 Российская Федерация, МПК G01V 13/00 (2006.01) / Е.В. Балков, А.К. Манштейн, К.В. Сухорукова, М.И. Эпов; заявитель и патентообладатель ИНГГ СО РАН – № 2010126402/28; заявл. 28.06.2010; – опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26.–5 с.

15. Способ и устройство для индукционного частотного зондирования: пат. 2502092 Российская Федерация, МПК G01V 3/10 (2006.01) / А.К. Манштейн, Е.В. Балков; заявитель и патентообладатель ИНГГ СО РАН – № 2011132460/28; заявл. 01.08.2011; – опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35. – 7 с.

Свидетельства на программы для ЭВМ

16. Балков Е.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ ISystem / Е.В. Балков // Св-во о регистр. progr. № 2009615822; RU; № 2009614709, заявл. 27.08.2009, опубл. 20.10.2009а.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ SibER Tools / Е.В. Балков, Ю.А. Манштейн, Г.Л. Панин [и др.] // Св-во о регистр. progr. № 2015612489; RU; № 2014663966, заявл. 29.12.2014, опубл. 19.02.2015.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ EMS Control / Е.В. Балков, Ю.А. Манштейн, Г.Л. Панин [и др.] // Св-во о регистр. progr. № 2015616582; RU; № 2014663924, заявл. 29.12.2014, опубл. 15.06.2015.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ EMS v.2.0. / М.И. Эпов, И.Н. Ельцов, ..., Е.В. Балков [и др.] // № 2018614716; RU; № 2018610657, заявл. 25.01.2018, опубл. 17.04.2018.

Монографии

20. Геофизические исследования «замерзших» курганов Алтая / М.И. Эпов, М.А. Чемкина, ..., Е.В. Балков [и др.] // Замерзшие погребальные комплексы пазырыкской культуры на южных склонах Сайлюгема / Молодин В.И., Парцингер Г., Цэвээндорж Д. – Приложение III. – М.: ИД Триумф принт, 2012. – С. 324–346. – ISBN 978-905055-02-7.

Публикации в научных рецензируемых периодических изданиях

21. Результаты геофизических, геохимических и петромагнитных исследований памятника Венгеро-2 / В.И. Молодин, ... , Е.В. Балков [и др.] // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. – Т. XVIII. – 2012. – С. 221–225.

Материалы зарубежных конференций

22. Balkov E.V. Real-time EMI Mapping and Sounding – Equipment and Software [Электронный ресурс] / E.V. Balkov // 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Dublin, Ireland, 6–8 September 2009): Extended Abstracts. – Dublin, 2009. – 4 p. – DOI: 10.3997/2214-4609.20147085.

23. Balkov E.V. Frequency soundings at low induction numbers: transformation and 1D inversion comparing to 2D ERT inversion [Электронный ресурс] / E.V. Balkov, Y.G. Karin // 16th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Zurich, Switzerland, 5–8 September 2010): Extended Abstracts. – Zurich, 2010. – 4 p. – DOI: 10.3997/2214-4609.20144891.

24. Balkov E.V. A complicate response of compact EMI sensors over shallow local conductive targets [Электронный ресурс] / E.V. Balkov // 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Leicester, Great Britain, 12–14 September 2011): Extended Abstracts. – Leicester, 2011. – 4 p. – DOI: 10.3997/2214-4609.20144398.

25. Balkov E.V. Application results of compact EM tool at the geoelectric test site of Institute of Petroleum Geology and Geophysics (Novosibirsk, Russia) [Электронный ресурс] / E.V. Balkov // 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Paris, France, 3-5 September 2012): Extended Abstracts. – Paris, 2012. – 4 p. – DOI: 10.3997/2214-4609.20143381.

Материалы российских конференций

26. Балков Е.В. Малоглубинное частотное зондирование в реальном времени: аппаратура и программное обеспечение [Электронный ресурс] / Е.В. Балков // IV Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли (Москва, 1–4 сентября 2009 г.): Тез. докл. – М., 2009б. – 2 с.

27. Е.В. Балков. Комбинирование установок электротомографии / Е.В. Балков // VI Международная выставка и научный конгресс «ГЕО-Сибирь-2010». (Новосибирск, 19-29 апреля 2010 г.): Сб. материалов. – Новосибирск, 2010. –Т. 2. – С. 135–139.

28. Балков Е.В. Комплексирование малоглубинного частотного зондирования и электротомографии на гидротермальных объектах активных вулканов Курило-Камчатского региона / Е.В. Балков, Ю.Г. Карин, Г.Л. Панин // 6-я Международная конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика 2010» (Геленджик, 26-30 апреля 2010 г.): Расшир. тез. докл. – Геленджик, 2010. – 4 с.

29. Балков Е.В. Множественные образы в сигнале от локальных объектов при электромагнитном профилировании компактным зондом с разнесенными катушками [Электронный ресурс] / Е.В. Балков // Всероссийская школа-семинар имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли (Санкт-Петербург, 16–21 мая 2011 г.): Расшир. тез. докл. – Санкт-Петербург, 2011б. – 4 с.

30. Малоглубинное электромагнитное профилирование компактной аппаратурой: теоретические оценки и результаты экспериментальных работ [Электронный ресурс] / Е.В. Балков, ..., Г.Л. Панин [и др.] // 10-я Юбилейная конференция и выставка «Инженерная геофизика 2014» (Геленджик, 21–25 апреля 2014 г.): Расшир. тез. докл. – Геленджик, 2014. – 7 с. – DOI: 10.3997/2214-4609.20140331.

31. Балков Е.В. Макетирование аппаратуры малоглубинного электромагнитного профилирования и радиально-частотного зондирования / Е.В. Балков, А.К. Манштейн // X Международная выставка и научный конгресс «ГЕО-Сибирь-2014» (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.): Сб. материалов. – Новосибирск, 2014. – Т.2. – С.3–7

32. Комплексные геофизические исследования археологических объектов Западной Сибири [Электронный ресурс] / Е.В. Балков, О.А. Позднякова [и др.] // 11-я Научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика 2015» (Геленджик, 20–24 апреля 2015 г.): Расшир. тез. докл. – Геленджик, 2015. – 7 с. – DOI: 10.3997/2214-4609.201412246.

33. Малоглубинное электромагнитное профилирование и зондирование: современное состояние и перспективные разработки [Электронный ресурс] / Е.В. Балков, Ю.Г. Карин, Г.Л. Панин [и др.] // 12-я Научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика 2016» (Анапа, 25–29 апреля 2016 г.): Расшир. тез. докл. – Анапа, 2016. – 7 с. – DOI: 10.3997/2214-4609.201600295.

34. Комплексные геофизические исследования на археологических памятниках без рельефных признаков (Усть-Тартасские курганы и Тартас-1) [Электронный ресурс] / Е.В. Балков, О.А. Позднякова, П.Г. Дядьков [и др.] // 15-я Научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика 2019» (Геленджик, 22–26 апреля 2019 г.): Расшир. тез. докл. – Геленджик, 2019. – 8 с.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 30.06.2021

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 2,0. Тираж 130. Зак. № 199

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3