

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук Ефремова Владимира Николаевича на диссертационную работу Балкова Евгения Вячеславовича «Программно-алгоритмическое и аппаратное обеспечение малоглубинного электромагнитного профилирования, зондирования и электротомографии», представленную на соискание степени доктора технических наук по специальности 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

На рассмотрение представлены рукопись диссертационной работы и ее автореферат. Диссертационная работа Балкова Е.В. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 255 наименований, содержит 254 страницы текста, 89 рисунков и 7 таблиц. Автореферат изложен на 33 страницах, включающих 19 рисунков.

### Актуальность темы диссертации

По применимости, малоглубинные наземные электроразведочные методы геофизики, достаточно широко востребованы для решения широкого круга инженерно-геологических, горно-геологических и других задач, связанных с обнаружением локальных неоднородностей в грунте. Безусловно, они важны для обеспечения детальной геологической разведки месторождений, при их открытой разработке, в обеспечении изысканий под строительство зданий и линейных инженерных сооружений. Применение их, актуально и для научных исследований в геокриологии, экологии и археологии. Обосновано это еще и необходимостью проведения съемки этими методами там, где при изучении требуется сохранение подповерхностной среды в ненарушенном состоянии, где недопустимо бурение скважин. Кроме того, потребность в малоглубинной наземной электроразведке вызвана снижением затрат и оперативностью исследования, при достаточной информативности, по сравнению с выполнением работ другими геофизическими методами или бурением.

Представленные автором диссертации научные разработки направлены на повышение качества обработки данных, на улучшение технологических и эргономических характеристик аппаратурно-программных комплексов, реализующих два базовых метода электроразведки – индукционный метод и метод сопротивлений. Разработанное им программно-алгоритмическое обеспечение аппаратуры ЭМС, способ и устройство компенсации поля генераторного контура для мобильного радиально-частотного зондирования способствуют повышению скорости обработки и качества полученных данных. Разработки моноблочной конструкции аппаратуры электротомографии и ее программного обеспечения способствует повышению производительности получения данных. Комплексное применение этих двух, различающихся возможностями, электроразведочных методов повышает информативность, точность и производительность получения результата работ на изучаемом объекте. Малоглубинное электромагнитное профилирование и зондирование дают оперативно полученную, с небольшими затратами времени и средств, картину распределения кажущегося электрического сопротивления по площади и обнаруживают на глубине до 5 м разного рода проводящие объекты. Это позволяет выделить зоны пониженного, либо повышенного электрического сопротивления и, тем самым, рационально спланировать проведение электротомографии – метода более затратного по времени, но имеющего высокую степень разрешения при построении геоэлектрического разреза.

Таким образом, тема исследований, проведенных автором диссертации, и представленных им разработок являются вполне актуальной, поскольку обеспечивает повышение результативности геофизической съемки двумя малоглубинными методами электромагнитного профилирования и зондирования, отличающимися высокой мобильностью, и метода электротомографии, хорошо зарекомендовавшего себя и получившего широкое применение в последнее время. Более того, указанные методы имеют перспективное значение в их комплексном применении.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций,  
сформулированных в диссертации**

Обоснованность защищаемых научных положений, представленных автором, как научные результаты, характеризуется следующим образом.

*1. «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».*

Обоснованность положения достаточно высока, так как базируется на переходе от теоретических построений в общем виде к выкладкам автора для поля вертикального магнитного диполя на поверхности горизонтально-слоистой среды, его расчета численным интегрированием и к последующим методическим и аппаратным разработкам. Численным моделированием сигналов аппаратуры ЭМС определена их зондирующая способность. Разработано метрологическое обеспечение для количественной обработки сигналов и их трансформация для экспресс-обработки. Разработан программно-алгоритмический пакет ISystem, позволяющий провести загрузку полученных данных, их обработку и экспорт результатов в различных форматах для визуализации и интерпретации различными зарекомендовавшими себя на практике графическими редакторами. Сформулировано положение по результатам исследований, проведенных автором и его коллегами. При этом учтены работы других специалистов в этой области, опубликованные в России и за рубежом. Эффективность применения предложенных автором разработок прошла апробацию и верификацию.

*2. «Обоснованные численным моделированием и апробированные на практике устройство и способ малоглубинного радиально-частотного зондирования, основанные на компенсации прямого поля многовиткового генераторно-*

*го контура расположением набора измерительных катушек в области перехода через ноль вертикальной компоненты магнитного поля».*

Данное положение обосновано новым подходом к радиально-частотному зондированию, состоящим в использовании для измерений зоны, в которой, по результатам численного моделирования, вертикальная компонента напряженности магнитного поля генераторного контура будет близка к нулю. Новый подход позволил разработать прибор, у которого приемные катушки расположены в подобной зоне с минимальным приемом прямого поля генераторной катушки. Тестированием и верификацией измерений, проведенных разработанным макетом аппаратуры в лаборатории и в полевых условиях, на электрометрическом полигоне, показана достаточная стабильность уровня компенсации прямого поля.

3. «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».

Обоснованность положения подтверждается оригинальной программно-алгоритмической разработкой диалоговой структуры SibER Tools, которая интерактивными визуальными инструментами позволяет обеспечить подготовку и редакцию системы измерения аппаратурой Скала-48 для электротомографии, провести анализ и фильтрацию измеренных данных, экспортировать их в форматы, поддерживаемые используемыми программами их инверсии. Положение обосновывается и разработкой моноблочной конструкцией, объединяющей в одном корпусе модули, выполняющие генераторные, измерительные и коммуникативные функции прибора Скала-48. Такая конструкция повышает надежность и эксплуатационно-эргономические характеристики прибора.

**4.** *«Апробированное на практике комплексное применение электромагнитного профилирования для оперативного обследования среды и электротомографии для детального исследования геоэлектрических аномалий».*

Защищаемое положение обосновано мобильностью электромагнитного профилирования в сочетании с оперативностью получения достаточной информации о распространении кажущегося сопротивления по изучаемой площади, с одной стороны. Обосновано оно и возможностью получения геоэлектрических разрезов с высокой степенью разрешения методом электротомографии на выделенных аномальных зонах, с другой стороны. В комплексе эти два метода, судя по приведенным в диссертации материалам результатов одномерной инверсии кажущегося сопротивления и двух- или трехмерной инверсии удельного сопротивления, могут с высокой степенью оперативности и наглядности представить результат поиска и оконтуривания аномальных, по проводимости, зон.

#### **Достоверность, новизна и значение**

#### **научных положений и выводов для науки и практики**

**Достоверность научных положений и выводов** обеспечена высокопрофессиональным и корректным использованием теории и методов исследования электромагнитного поля, методов математического и физического моделирования, методов прикладной и вычислительной математики, методов электроразведочной геофизики, цифровой электроники и программирования. Достоверности способствует и логично выстроенный путь исследования от общих теоретических построений к получению расчетных формул, численному моделированию, методическим, аппаратурным и программным разработкам, к лабораторному и полевому эксперименту, тестированию и верификации. В частности, достоверность научных положений и выводов подтверждается следующим:

по 1 научному положению – более детальным получением карты распределения электропроводности по древней кальдере (Латера, Италия), полученной аппаратурой ЭМС, по сравнению с полученной серийной канадской аппаратурой EM31, сравнением, полученных на нефтяном поле кальдеры Узон (Камчатка), результатов обработки сигналов аппаратуры ЭМС авторским программным обеспечением для нее и программой Nemfis1D (автор Каминский Е.Д.), показавшим близкие результаты;

по 2 научному положению – численным моделированием, исследованиями на электрометрическом полигоне ИНГГ СО РАН, сравнением результатов профилирования аппаратурой РЧЗ и ЭМС над локальными проводящими объектами, там же;

по 3 научному положению – сопоставлением результатов зондирования аппаратурой Скала-48 и серийной французской аппаратурой электротомографии Iris Syscal Pro, расхождение по которым не превышало 5%, что соответствовало аппаратурным погрешностям;

по 4 научному положению – результатом совместных работ методами электропрофилирования и электротомографии по поискам пластов с высоким содержанием микросфер в золоотвалах, подтвержденных позднее результатами бурения с отбором проб.

**Новизна основных научных положений и выводов** состоит в нижеследующем.

1. Научный подход в трансформации сигналов аппаратуры мобильного электромагнитного профилирования, выполняемой по полным формулам для однородного полупространства, без использования асимптотик. Этот подход улучшает детальность карты распределения электропроводности, получаемой при площадной съемке.
2. Новый способ снижения влияния вертикальных компонент напряженности магнитного поля на данные измерений при мобильном радиочастот-

ном зондировании путем расположения измерительных катушек на линии близких к нулю значений этих компонент.

3. Разработка оригинальных составляющих программного обеспечения аппаратуры электротомографии, включающих создание протоколов измерений, визуального интерактивного представления систем наблюдения, а также автоматизированную подготовку и редакцию протоколов измерений, оперативную обработку сигналов и экспорт результатов в форматы стороннего программного продукта.
4. Представление результатов комплексного применения мобильного электромагнитного профилирования и электротомографии на примерах оценки запасов микросфер в золотоотвалах и оценки масштабов загрязнения грунтов пестицидами.

Обоснованные проведенными исследованиями и созданные автором разработки программного обеспечения для аппаратурно-программных комплексов мобильного электромагнитного профилирования, зондирования и электротомографии повышают возможности, точность и эргономию соответствующих наземных методов при съемке ими с целью обнаружения и оконтуривания аномальных зон электропроводности грунтов.

**Значение для науки** результатов, представленных автором в диссертации, состоит в следующем:

- численное моделирование, на основе теоретических построений, выведенных формул, и разработка алгоритмов, позволивших программно осуществить калибровку, управление и экспресс-обработку данных, их инверсию и визуализацию для малоглубинного электромагнитного профилирования и частотного зондирования;

- разработка метода малоглубинного мобильного радиально-частотного зондирования и принципов построения соответствующей аппа-

ратуры, макетирование аппаратуры, ее опробование и тестирование на электрометрическом полигоне;

- повышение качества результатов обработки данных электротомографии разработанным программным обеспечением;

- опробование комплексного применения для обнаружения аномалий электропроводности индукционного, по существу, мобильного метода малоглубинного электромагнитного профилирования и электротомографии, как метода сопротивлений с расширенными современными технологиями возможностями высокого разрешения.

**Значение для практики** результатов авторских аппаратурно-программных разработок подтверждается использованием более 100 комплектов аппаратурно-программного комплекса в научно-исследовательских и производственных российских и зарубежных организациях. Положительные отзывы об использовании разработок отражены приложенными справками о внедрении в ОАО «Стройизыскания», в АО «Росжелдорпроект», Казахстанском Агенстве Прикладной Экологии, НИУ «БелГУ», ООО «ГЕОДЕВАЙС» (оборудование и программное обеспечение для геологоразведочных работ), ФИЦ Угля и углехимии СО РАН, в подразделениях ИНГГ СО РАН.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

1. Учитывая наработанный опыт и авторские представления по развитию программного обеспечению аппаратуры ЭМС, рекомендуется продолжить работы над ним в плане добавления двумерной инверсии и модификации под актуальные операционные системы.

2. Рекомендуется расширить изучение области применения малоглубинного электромагнитного профилирования слоистыми средами с сильно-



индуктивными свойствами, когда проводящий опорный слой или исследуемый объект резко контрастирует с плохопроводящим перекрывающим слоем. В природных средах таким условиям отвечают криопэги, минерализованные грунтовые воды, засоленные отложения, над- и межмерзлотные талики криолитозоны.

3. Безусловно, рекомендуется и дальнейшее развитие аппаратурно-программного комплекса для малоглубинного радиально-частотного зондирования при площадной съемке, которое повысит рациональность его применения, в комплексе с электротомографией, для решения инженерно-геологических задач.

4. Рекомендуется получить поддержку проведению намеченных работ по совершенствованию аппаратурно-программного комплекса Скала в направлении трехмерных исследований и увеличения глубинности зондирования при сохранении разрешающей способности.

5. Рекомендуется исследовать возможности и перспективы применения мобильного малоглубинного электромагнитного профилирования и частотного зондирования в надземном беспилотном варианте.

#### **Оценка содержания диссертации, её завершенность**

Диссертация является завершенной научной работой, в которой на основе теоретических и экспериментальных исследований предложены **новые научно обоснованные технические и технологические решения** в отношении разработок составляющих создание действующих аппаратурно-программных комплексов для мобильного электромагнитного профилирования, частотного зондирования и электротомографии при решении широкого круга задач, связанных с развитием различных отраслей хозяйства в стране. К новым техническим решениям, подтвержденным Свидетельствами о государственной реги-

страции программ для ЭВМ (опубликованы в 2009, 2015, 2018 и 2015 годах), относятся программно-алгоритмические обеспечения:

- ISystem – обработка и трансформация сигналов аппаратуры ЭМС;
- EMS v.2.0 – одномерная инверсия профильных данных ЭМС;
- EMS Control – обработка данных аппаратуры ЭМС в графическом виде;
- SibER Tools – обработка, анализ и экспорт данных электротомографии.

К новым технологическим решениям относится способ калибровки устройства для наземного электромагнитного индукционного частотного зондирования, подтвержденный патентом РФ 2461850 (2010 г), примененный для аппаратуры ЭМС, а также способ индукционного частотного зондирования, подтвержденный патентом РФ 2152058 (2000 г.), послуживший основой для последующих аппаратурных и программных разработок автора.

Диссертация характеризуется внутренним единством основных разделов, а название диссертации соответствует ее содержанию.

Диссертация является полностью завершенной научной работой, показывающей высокую научную квалификацию ее автора.

Результаты исследований и основные материалы диссертации представлены на различных научных и научно-практических конференциях, в том числе международных.

По теме диссертации опубликовано 80 работ, в том числе 13 в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 патента, 4 свидетельства о гос. регистрации программ для ЭВМ, 1 монография (в соавторстве). Основные результаты достаточно полно отражены в опубликованных автором работах и соответствуют требованиям пунктов 11 и 13 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.

Содержание реферата полностью соответствует основным идеям и выводам диссертации.

### **Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации**

**Достоинствами** диссертационной работы являются представленные разработки программного и аппаратного обеспечения, позволившие создать действующие оригинальные аппаратно-программные комплексы, не уступающие по эффективности аналогам в России и за рубежом, нашедшие применение в науке и практике, внедренные в различных организациях. Автором подробно освещен его личный вклад в создание этих разработок. Несомненным достоинством диссертации является и создание ее содержанием полного представления о высокой научной квалификации автора. В главах с достаточной полнотой и убедительностью представлена информация по защите каждого из научных положений. В заключениях каждой главы присутствуют выводы, показывающие перспективы и ограничения применения достигнутых результатов, в том числе и с критических позиций. Достоинством оформления диссертации являются хорошая подготовка вполне внятного текста и достаточно информативных иллюстраций к нему.

**Замечания** по содержанию диссертации сводятся к следующему.

1. В обзоре представлены в сравнении с разработками ИНГГ СО РАН конструкции и параметры аналогичных приборов и используемого программного обеспечения. Однако, для лучшего восприятия текста, не хватает более полного представления характеристик аппаратуры ЭМС и макета аппаратуры для радиально-частотного зондирования.

2. Результаты исследования многокатушечной аппаратурой над локальными проводящими объектами электрометрического полигона выглядели бы нагляднее, если их представить не в единицах АЦП, а в процентном отношении к фоновому сигналу.

3. Хорошо было бы показать еще и выделение малоглубинным электромагнитным профилированием аномалий, вызванных проводящими неглубоко-

залегающими геологическими объектами, такими как, например, угольные пласты, глинистые и высокоминерализованные отложения.

Замечания ни в коей мере не умаляют ни достоинства диссертации, ни степени научной квалификации диссертанта и относятся к техническим погрешностям оформления работы.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным  
Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Диссертация Балкова Евгения Вячеславовича «Программно-алгоритмическое и аппаратное обеспечение малоглубинного электромагнитного профилирования, зондирования и электротомографии», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых, является научно-квалификационной работой, в которой, на основании проведенных исследований, предложены новые научно обоснованные технические и технологические решения в создании аппаратурно-программных комплексов мобильного малоглубинного электромагнитного профилирования, зондирования и электротомографии, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.10 - геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых и требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Балков Евгений Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.10 - геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Официальный оппонент, Ефремов Владимир Николаевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Якутск).

Почтовый адрес: 677010 РФ, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ФГБУН Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова.

Тел.: 8 9142252980.

Эл. почта: vnefremov@mpi.ysn.ru

\_\_\_\_\_ Н. Ефремов

05.09.2021