

## ОТЗЫВ

### официального оппонента на диссертационную работу

Балкова Евгения Вячеславовича

«ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАЛО-ГЛУБИННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ, ЗОНДИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ» по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых». Диссертация представлена на соискание ученой степени доктора технических наук»

1. Актуальность темы диссертации, представленной соискателем на рассмотрение, у оппонента не вызывает сомнения. Актуальность работы обусловлена необходимостью решения проблемы создания современных электроразведочных приборов и, соответственно, программного обеспечения для работы с этим оборудованием. Поскольку в нашей стране в течение ряда постперестроечных лет наблюдалось определенное отставание в обеспечении современными приборами геофизического рынка в области малоглубинной электроразведки, необходимо было сравнительно быстро переломить эту негативную ситуацию. К середине двухтысячных годов особенно сильное отставание сложилось в области малоглубинных методов частотного и частотно-радиального зондирования и профилирования, а также электротомографии. Кроме морально-устаревшей аппаратуры ДЭМП-Сч, которую выпускал красноярский завод геофизического оборудования, у нас ничего не было. Именно новосибирская школа разведочной геофизики, оснащенная теоретическими знаниями и техническими возможностями, оказалась способной решить эту задачу. Вклад автора диссертационной работы в решение этой тяжелой, прежде всего технической проблемы общеизвестен, а энергия Евгения Балкова и уровень его компетенции в этой области являются очень высокими.

## 2. Защищаемые научные положения:

**Первое положение:** «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».

Безусловно, первое защищаемое положение является главным и в целом правильно сформулировано. В первом положении кратко и в самом общем виде сформулированы научные достижения Евгения Балкова.

**Второе положение:** «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»

Второе положение, пожалуй, самое технически оригинальное, а, по сути, реально очень простое решение трудной задачи. Автор доказал его правомочность. С точки зрения физики не вызывает сомнений. Единственная проблема - как такую установку сделать практически. Однако для небольших размеров вся конструкция может быть установлена на жесткий каркас, который обеспечивает с очень высокой точностью равенство нулю соответствующей компоненты первичного магнитного поля. В таком случае приемная катушка обеспечивает прием только аномального магнитного поля.

**Третье положение:** «Апробированное на практике и широко внедренное программно-алгоритмическое обеспечение для подготовки протоколов измерения, анализа, обработки, визуализации данных и компактная моноблочная конструкция высокопроизводительной аппаратуры для электротомографии Скала-48». Евгений Вячеславович разработал оригинальное программное обеспечение и конструкцию электротомографической станции, которая по своему дизайнерскому исполнению является лучшей станцией российского

происхождения. Обеспечив свыше 70 внедрений и продаж станции типа Скала-48, Балков Е.В. вместе со своими коллегами внедрил в промышленное геофизическое производство сложное электроразведочное оборудование, использование которого обеспечило широкое распространение электротомографии в производственные организации и одновременно избавило нашу отрасль от импортной зависимости.

**Четвертое положение:** «Апробированное на практике комплексное применение электромагнитного профилирования для оперативного обследования среды и электротомографии для детального исследования геоэлектрических аномалий...». В конце работы диссертант показал преимущества комплексного подхода при интерпретации материалов, используя совместные данные электротомографии и электромагнитного профилирования. На примере изучения захоронения пестицидов в Тюменской области продемонстрированы конкретные геофизические материалы. Применение электроразведки основано на том, что захороненные химикаты имеют аномально высокие проводимости по сравнению с вмещающими естественными грунтами. Поставленная задача по картированию геометрии и определению свойств загрязненного грунта была успешно и предсказуемо решена двумя малоглубинными электроразведочными методами: электромагнитным профилированием и электротомографией. За счет высокой производительности задача поиска объекта была решена с помощью электромагнитного профилирования, а детальное изучение загрязнения было выполнено электротомографией. Применение такого комплекса является физически абсолютно понятным и оптимальным. Поэтому четвертое положение является доказанным. Тем более решение этой задачи выглядит достаточно привлекательным, учитывая тот факт, что оба прибора разработаны автором диссертации.

### 3. Научно-практические результаты.

1) Автором в результате теоретических разработок показано, что компактный многочастотный прибор может функционировать в основном вне ближней

зоны, при больших величинах индукционного числа. Кроме этого теоретически была сделана оценка зондирующей способности таких приборов на простой слоистой модели и проведена инверсия полевых данных. По результатам расчетов приведен график значений индукционного числа в зависимости от УЭС в диапазоне от 0.001 до  $\cdot 1000$  Ом м и для частот, варьируемых от 1 кГц до 1 МГц, для расстояния  $s = 2.5$  м, что соответствует аппаратуре ЭМС. Построены графики границы аппроксимации для малых значений индукционного числа, полученных разными исследователями. Показано, что если принять за верхние границы пределы, полученные Callegary или Frischknecht, то аппаратура ЭМС будет работать в основном за пределами ближней зоны.

2) Выполнены теоретические расчеты численного моделирования сигналов, которые определили область применимости низкочастотного приближения по результатам для аппаратуры ЭМС от однородного полупространства.

3) Автором обоснован новый способ компенсации прямого поля генераторной катушки путем физического расположения их в точках, где вертикальная компонента первичного поля равна нулю. Для увеличения глубины зондирования автором предложено использовать несколько измерительных катушек, расположенных вдоль определенной линии и одновременно увеличивать рабочую частоту при уменьшении разноса, выполняя тем самым радиально-частотное зондирование. Описываемый оригинальный способ компенсации прямого поля и зондирования автором диссертации был запатентован.

4) Автором разработано программно-алгоритмическое обеспечение ISystem для обработки и трансформации сигналов аппаратуры ЭМС.

5) Совместно с А.К. Манштейном проведено макетирование и разработана аппаратура радиально-частотного зондирования, применение этой аппаратуры подтвердило ранее сделанные теоретические оценки. Разработаны методы обработки и интерпретации результатов измерения для изучения сигнала над локальными неоднородностями в плане, что послужило основой для разработки упрощенной двухкатушечной аппаратуры электромагнитного профилирования.

- 6) Выдающийся вклад автора заключается в разработке аппаратуры Скала-48, которая стала прототипом дальнейших разработок «КБ Электрметрии» таких как Скала – 48К12 и Скала-64К15. Аппаратура разработана сотрудниками лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН совместно с резидентом Новосибирского технопарка ООО «КБ Электрметрии». В настоящее время несколько десятков станций Скала-48 разными организациями успешно применяются при решении различного рода научных и инженерных задач.
- 7) В среде быстрой разработки Borland Delphi при участии автора разработано программное обеспечение SibER Tools для операционных систем Windows XP и выше. При этом в 2015 году получено свидетельство о государственной регистрации этой программы. ПО SibER Tools имеет развитый графический интерфейс и служит для подготовки шаблонов измерения, загрузки, сшивки, анализа, фильтрации, сглаживания и экспорта данных электротомографии, является неотъемлемой частью аппаратурно-программного комплекса Скала-48.
- 8) Комплекс Скала-48 разработки новосибирских геофизиков, в котором большая роль принадлежит Е.В.Балкову, применяется уже 12 лет для решения широкого круга инженерно-геологических, археологических и экологических задач. При участии автора выполнен большой объем археогеофизических работ методом сопротивлений и дипольного индукционного профилирования в Монголии, Горном Алтае, Западной Сибири. Кроме этого, интересные результаты получены автором и его коллегами на гидротермальных объектах Камчатки, Северных и Южных Курил. При руководстве и участии автора в комплексных исследованиях методом электротомографии и дипольного профилирования выявлены объекты химического загрязнения на захоронении пестицидов. Внедренная во множестве организаций аппаратура, разработанная Балковым Е.В., показала хорошую эргономику, способность решать разнообразные задачи малоглубинной геофизики, что указывает на очень большой вклад автора в развитие отечественной геофизики.

9) При участии автора для нужд института и Новосибирского государственного университета на территории обсерватории Ключи с учетом опыта организации других геофизических полигонов создан электрометрический полигон ИНГГ СО РАН. При этом территория полигона делится на два участка: на первом – шесть квадратов для тестовых объектов, на втором – четыре. Площадь каждого квадрата составляет 100 м<sup>2</sup>. Всего на двух участках заложено 33 тестовых объекта.

#### 4 Замечания по диссертационной работе.

- 1) В части 1.1 «Аналитический обзор известного программно-алгоритмического и аппаратурного обеспечения» *«Среди компактных устройств для выполнения малоглубинного электромагнитного зондирования известна российская аппаратура ЭМС [Способ индукционного частотного зондирования, 2000; Multi-frequency electromagnetic sounding tool EMS..., 2003]»*. Речь идет об электромагнитном сканере «Немфис» - известной разработке «КБ Электрометрия». Однако про другие российские разработки ничего не сказано. Так в таблице 2- «Характеристики малоглубинных приборов для электромагнитного зондирования и профилирования» упоминается 27 изделий 7 фирм, которые производят приборы для малоглубинных электромагнитных исследований, в том числе и ИНГГ СО РАН, но нет двух российских станций: разработка екатеринбургских геофизиков МЧЗ-8 (Байдиков С.В., Человечков А.И. Аппаратура для индукционных зондирований МЧЗ-8./ Уральский геофизический вестник № 1(18), 2011 г., с.4-8) и Высокочастотная аппаратура Дипольного ЭлектроМагнитного Профилирования ДЭМП-СЧ (Домашняя страница инженера-геофизика. URL: <http://davyde.nm.ru/shems.htm> (дата обращения: 15.04.2011)). И та и другая аппаратура предназначены для малоглубинных исследований. При этом аппаратура ДЭМП-СЧ работает по методике радиально – частотных зондирований. Надо отдать должное, про аппаратуру МЧЗ-8 Е.В.Балков на стр.38 упоминает, что *«Известен цикл аппаратурных и методических разработок коллектива из Института геофизики УрО РАН*

*А.И. Человечкова, А.Н. Ратушкняка и др..... Оригинальные способы и устройства, предложенные авторами, основаны на индукционном возбуждении переменного электромагнитного поля и многокомпонентной регистрации отклика от среды для изучения первых десятков и сотен метров». Но дальше этого поверхностного взгляда дело не идет. По мнению оппонента, такое отношение к работе наших коллег является неправильным.*

2) В части 1.2 «Метрологическое обеспечение для поиска эффективного набора параметров аппаратуры». Автор пишет: *«Для осуществления калибровки выбрано тонкое металлическое кольцо. Оно удовлетворяет всем предъявленным выше требованиям. На фото калибровки прибора (Рисунок 12) видно, что прибор и калибровочное кольцо устанавливаются на некоторой высоте над полом на деревянных стойках. Кольцо передвигается в горизонтальной плоскости параллельно генератору и приемнику».* Однако понять, что изображено на рис.12 невозможно. Кольцо выполняет функцию аномального тела? Тогда причем здесь калибровка? Ведь мы должны измерять какое-то точно известное поле. В чем смысл калибровки, не написано. Схемы нет, пояснительный текст лишь поверхностно описывает эксперимент. Можно только догадываться, что там было сделано. Часть, связанная с калибровкой, остается понятной только для тех, кто видел или участвовал в этой работе.

3) В части 1.5 «Автоматическая визуализация в виде геоэлектрических карт и псевдоразрезов ...». Представленный пример разреза на рис.17 является крайне невыразительным. Не показана шкала сопротивлений. Отсюда не понятно, этот геоэлектрический разрез находится в зоне чувствительности метода или нет. Почему такой однородный разрез? Что-то происходит в районе ручья. Автор утверждает, что разрез кажущегося сопротивления сделан с учетом рельефа. Что это значит, неясно. Автор умеет считать прямую задачу от рельефа и вводит соответствующие поправки? Про это нигде не сказано в тексте диссертации. Поскольку мне в последнее время приходится заниматься этой проблемой, я думаю, это отдельная большая и сложная тема исследования, которой в диссертации нет. Или он умеет рисовать

псевдоразрез на негоризонтальной поверхности? И то и другое является очень важным при интерпретации. Если он рисует псевдоразрез, то на мой взгляд, результат, представленный на рис. 17, отражает какое-то поле (быстрее всего связанное с рельефом), но связано ли оно с разрезом, большой вопрос.

4) В части 1.5.3 «Трехмерная визуализация данных» рис.18 представлен для демонстрации результатов, которые получаются с помощью аппаратуры частотного зондирования. Однако этот результат на известном археологическом памятнике надо было представить как-то более привлекательно. Где на рис. 18 искать «жилище» и где границы «рва» непонятно и не очень убедительно.

На рис.19 показана *«карта распределения кажущейся удельной электропроводности и трехмерного набора изоповерхностей фиксированного уровня кажущейся удельной электропроводности визуализирована структура подземного пространства. В процессе работ уточняется расположение металлического трубопровода и неэксплуатируемого канализационного люка, перекрытых...»* асфальтовым покрытием. Результат убедительный, но довольно грубый. Такие задачи могут быть решены и другими методами. Например, с помощью георадара или магниторазведки. Для этого не нужно создавать такую сложную аппаратуру.

5) Часть 1.6 «Программно-алгоритмическое обеспечение с визуальным эргономичным интерфейсом для выполнения одномерной инверсии профильных данных EMS v.2.0» по сути представлена одним названием и ссылкой в другую часть работы. Уважаемый диссертант должен помнить, что он пишет научную работу, а не инструкцию.

6) В части 1.7 «Управление работой аппаратуры ЭМС, экспресс-обработка сигналов и визуализация данных в виде диаграмм и карт в реальном времени» показан пример работы на археологическом памятнике на Монгольском Алтае. Рисунок 20 носит чисто рекламный характер. Результат тут не представлен. Встроенный вместе с КПК приемник GPS при археоло-



гических исследованиях недопустим. У него точность привязки от 3 до 5 м. Построить карту или разрез в таких условиях даже в масштабе 1:100 нереально (это очень грубый масштаб для археологии, когда точки наблюдения отстоят друг от друга примерно на 1 м). Часто требуется масштаб 1:50 или даже 1:25. Поэтому картировать подземные коммуникации и археологические памятники с помощью обычного, современного GPS-приемника нельзя. Та ценная информация, которая получается с помощью уникальных разработанных и точнейших геофизических приборов будет полностью смазана построением невразумительных карт.

7) В части 1.9.1 «Тестирование на объектах электрометрического полигона ИНГГ СО РАН» показан рис.27, на котором демонстрируются результаты съемки с помощью аппаратуры ЭМС. Все проводящие металлические цели обнаружены. Чуть – чуть компактнее выглядят аномалии кажущегося сопротивления. Аномалии фазы более широкие. Но, во-первых, почему не показаны результаты над высокоомными телами? А, во-вторых, следует обратить внимание на то, что аномальные поля имеют чрезвычайно сложную форму. Где у нас при этом была точка записи, неизвестно. Как была ориентирована ось установки? При изменении ориентации этой оси форма аномалии поменяется? Это хорошо, когда локальные объекты отстоят друг от друга на большом расстоянии, а если они вытянуты и меняют свое простираие, их несколько и они близко расположены относительно друг друга? Какую картину мы увидим в этом случае? И будет ли она однозначно проинтерпретирована?

Возможно, что это проблемы будущего развития метода и аппаратуры, но оппонент неоднократно сталкивался именно с такими случаями, и они являются принципиальными. Простых ситуаций в реальной практике почти не бывает. Все время приходится бороться с перечисленными трудностями. Прошу соискателя обратить особое внимание на мои слова и в будущем, желая дальше развивать и продвигать свой метод, попробовать решить эти проблемы.

8) В части 2.6 «Численное моделирование сигналов над слоистой средой и их трансформация» на рис.34 показаны результаты расчетов кривых кажущегося сопротивления. Здесь автор продемонстрировал свои прекрасные теоретические способности и построил целую серию палеток частотных зондирований. Учитывая некоторые технические ограничения по разносам в аппаратуре, оценивая возможности метода, получаем по пятибальной шкале среднюю оценку около 3.6. Конечно, это все очень субъективно, но реально глубинность метода ограничена 5-ю метрами и не более. Фактически нижние слои с высоким сопротивлением проявляются слабо. Хорошие результаты получаются только в случае, когда мощность первого слоя не более 1 м. Расчеты, связанные с ограничением метода, показаны в работе на рис.35 и 36. За что автору можно выразить благодарность.

9) В части 3.4 «Численное моделирование и трансформация сигналов на слоистых средах» почему-то на рис.46 даны только радиально-частотные кривые для высокоомного основания. Возникает вопрос, нет ли каких-то осложнений с проводящим основанием?

10) В части на стр.131 *«До 2008–2009 гг. в России специализированная аппаратура для электротомографии не выпускалась, что вместе с отсутствием нормативной документации привело к тому, что активно развивающаяся за рубежом методика недостаточно применялась в отечественной геофизической отрасли»*. Немного перевернутая логика. Электротомография в нашей стране слабо развивалась не из-за того, что не было отечественных приборов, а из-за того, что она не была востребована. Должен был пройти какой-то переходный период для того, чтобы в головах геологов и геофизиков эта технология приобрела свое значение. А приборы можно было купить и на Западе. Только они действительно доступны для сравнительно богатых фирм, которые работают прежде всего на рынке полезных ископаемых. Поэтому долгое время огромная область инженерной геологии и геофизики, археологии, геоэкологии, мерзлотоведения оставалась без этого метода. Переломным моментом был действительно 2009 год, когда в России сразу 4 ком-

пании начали выпускать электротомографическую аппаратуру, основной особенностью которой является автоматизированный сбор данных.

Мне не хотелось бы углубляться в особенности трактовки, что такое электротомография. Но определенной логики при изложении материала необходимо придерживаться. Только в этом случае приходит понимание особенностей этого метода, который прежде всего направлен на решение двумерных и трехмерных задач электроразведки. Отсюда и характерная методика электротомографии и линейный шаг по разносам, равный шагу по профилю.

11) В конце я хотел бы сказать о некотором рекламном характере написанного текста. Например, в части 4.2 «Аппаратура Скала-48» утверждается следующее «Среди современных российских разработок, реализующих метод электротомографии, выделяется аппаратура Скала-В 48 как первая российская разработка для этого метода». Это утверждение, мягко говоря, является неверным. Одновременно весной 2009 года появилось сразу четыре отечественные электротомографические станции: Скала-48, Омега-48, ERA-MultiMAX и SGD-ETT. Все станции работают в автоматическом режиме, используя сложную коммутацию электродов под управлением компьютера, а первые две станции выполнены в моноблочном конструктиве. Уверен, что автор об этом хорошо осведомлен. И на стр.176 эта фраза еще раз повторяется «... Скала-48 на момент запуска в серийное производство (2009 г.) являлась первой российской аппаратурой, реализующей в полной мере метод электротомографии». А на стр.176 еще одна неточность. Вот что пишет автор: «...в силу своего моноблочного исполнения, эффективной конструкции аппаратурно-программный комплекс Скала-48 превосходит эти разработки по удобству, эргономике и скорости работы». Я согласен, что по удобству и эргономике «Скала-48» и последующие разработки «КБ Электрметрии» стоят на высшей ступени. Но по части скорости работы нельзя сравнивать одноканальную станцию Скала – 48 и десятиканальную «Омега-48», которая производит сбор данных примерно в 5-7 раз быстрее.

Отмеченные замечания и недостатки несколько снижают качество выполненного исследования, но они не влияют на главные научные и практические результаты. Соискатель выполнил огромную работу, которая включала теоретические исследования, программирование, он выполнил конструкторские разработки, провел опытно-методические и полевые исследования, и таким образом продемонстрировал способность решать сложнейшие современные научно-технические проблемы геофизики.

Диссертация Е.В.Балкова является завершенной научно-исследовательской работой. Она выполнена на высоком техническом и методологическом уровне и имеет четкую практическую направленность в области инженерной геофизики, археологии и экологии. Диссертационная работа Е.В.Балкова является важным этапом создания технического оснащения современной малоглубинной геофизики. Результаты работы можно трактовать как новое решение крупной научно-технической проблемы, имеющей важное значение для инженерной геофизики, археологии, военной геофизики и археологии.

Диссертация Е.В.Балкова соответствует критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а также требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям.

Несмотря на высказанные замечания оппонента, научная новизна и защищаемые положения данной диссертационной работы, ее практическая значимость и достоверность приведенных данных не вызывают сомнения в том, что данная работа является значительным научным вкладом автора в развитие малоглубинной геофизики для решения множества задач инженерной геологии, технической геофизики, археологии. Автореферат диссертации соответствует диссертации и защищаемым положениям и отражает основные выводы, полученные автором. Работа соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, а её автор **Балков Евгений Вячеславович**

заслуживает присуждения **учёной степени доктора технических наук** по специальности **25.00.10** - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент

профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

**МОДИН Игорь Николаевич**

*(подпись)*

Контактные данные:

тел.: 8 495 939 49 63, e-mail: imodin@yandex.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Адрес места работы: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Ц-03, МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры.

Тел.: 8 495 939 13 01; e-mail: dean@geol.msu.ru