

Отзыв
официального оппонента Владимира Петровича Колесникова

на диссертационную работу Павловой Александры Михайловны «Применение малоглубинной электроразведки для изучения трехмерно неоднородных сред», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Поиски методов, обеспечивающих получение трехмерного представления об изучаемой геологической среде, при использовании методов электроразведки всегда привлекали внимание исследователей. Но их реализация сталкивалась с рядом проблем, в первую очередь, с ограниченным теоретическим и аппаратурно-программным обеспечением выполнения электроразведочных работ, которое базировалось в основном на использовании теории и технологий одномерной аппроксимации реальной модели среды. В условиях некорректности решения обратных задач это приводило к наличию модельной эквивалентности решений, существенно ограничивающей достоверность выделения трехмерных объектов.

Современный уровень развития теоретического, программного и аппаратурного обеспечения электроразведочных работ, обеспечивающий возможность расчета и моделирования электрических полей для двух- и трехмерных моделей сред, а также появление новых технологий, главным образом, методики 2D-, 3D-электротомографии, основанных на многократном просвечивании изучаемой среды при разных положениях источника поля, открывают новые пути повышения однозначности и информативности изучения трехмерных сред.

Как всякое новое направление это порождает много вопросов и задач, в данном случае – изучение степени повышения информационных возможностей, оценку влияния различных факторов на результаты наблюдений, поиск путей создания эффективных технологий выполнения полевой съемки и интерпретации полевых материалов, максимально учитывающих специфику решаемых задач. Именно этому и посвящена данная диссертационная работа. В этом ее несомненная практическая значимость и актуальность.

Общий объем рецензируемой работы составляет 128 страниц, включая 58 иллюстраций, 9 таблиц и список литературы отечественных и зарубежных авторов из 135 названий. Она состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во **введении** соискателем раскрывается актуальность, поставленные цели и задачи, научная новизна и практическая значимость в их решении, личный вклад в проведении научных и экспериментальных работ, практическая апробация результатов исследований.

В **первой главе** подробно и содержательно рассмотрены существующие подходы к изучению трехмерных сред, включающие два основных направления, первое из которых охватывает методы, направленные на непосредственное определение параметров трехмерных сред, второе – выявление различного рода искажений, вызываемых трехмерным объектом при использовании одно-, либо двумерных методов интерпретации электрических полей.

В ходе исследований соискателем проанализированы как современные варианты методик электротомографии, нацеленных на использование разнообразных пространственных подходов к исследованию трехмерных сред, так и развиваемые в последние годы традиционные методы – метод срединного градиента с двумя взаимно перпендикулярными питающими линиями, метод двух составляющих и методики изучения анизотропных сред.

На основе анализа весьма обширной информации проведена оценка достоинств и недостатков различных методик, показано наличие ряда проблем в их практической реализации, послуживших основой для формирования путей дальнейшего развития данного направления. Так, учитывая ограниченные возможности проведения полевой съемки в режиме 3D-электротомографии, показано, что на современном этапе повышение информативности, рентабельности, производительности и экономической эффективности ведения работ

возможно путем сочетания достоинств каждого из этих направлений. Именно это взято соискателем за основу при проведении исследований по развитию и оптимизации методов изучения трехмерно неоднородных сред.

Судя по широте охвата рассмотренной информации, критическому всестороннему анализу существующих подходов, обоснованным рациональным выводам, наметившим пути развития нового направления, следует отметить, что А.М. Павлова хорошо владеет материалом по теме диссертации.

Основные результаты проведенных исследований и защищаемых положений раскрываются и обосновываются в следующих трех главах.

Во **второй главе** приводятся результаты исследований по оценке возможностей выделения трехмерных тел по результатам съемки методом 2D-электротомографии, а также по разработке способов минимизации влияния трехмерного строения среды на данные двумерных исследований.

Учитывая весьма широкий класс объектов, соответствующих понятию трехмерной неоднородности, в целях систематизации процесса исследований соискателем предложена классификация трехмерных неоднородностей для конкретной решаемой задачи – определение характера их влияния на данные двумерных измерений. Для этого сформирован набор достаточно простых линейных объектов различной пространственной ориентации, обладающих эффектами трехмерных образований. Следует отметить, что, несмотря на достаточно узкий класс выбранных моделей, он обеспечивает общие принципы учета влияния трехмерных неоднородностей на результаты 2D-измерений при решении широкого круга задач - выполнении инженерно-геофизических, археологических изысканий, работ вблизи рек, каналов, гидрогеологических сооружений, в том числе в условиях горного рельефа, городской застройки и т.п., где часто отсутствует возможность проведения трехмерной съемки.

Исследования проведены на основе тесного сочетания численного моделирования и результатов производственных опытно-методических работ. Для численного моделирования использован набор современных программ решения прямых задач и инверсии расчетного поля для 2D, 3D-мерных моделей сред.

В целях исследования возможности и точности выделения локальных объектов по результатам 2D-электротомографии соискателем на основе опыта его работ в условиях закарстованных территорий (Калужская область, Гватемала) сформирована модель, проведен расчет наблюдаемого расчетного 3D поля с его 2D-инверсией для 2D съемки, имитирующей стандартную методику томографических наблюдений, и проведен сравнительный анализ 3D-моделирования с результатами 2D-электротомографии.

В результате численного моделирования, выполненного для широкого диапазона глубины залегания верхней и нижней кромки трехмерного тела, раскрыт важный аномальный эффект, проявляющийся в существенном завышении глубины залегания нижней кромки локального тела, свидетельствующий о том, что использование традиционной 2D-томографии без учета трехмерности среды может приводить к существенным искажениям реальной картины, усложняющим прогноз возможных провальных явлений.

По ходу изучения материала на данном этапе появился ряд небольших замечаний. Так, слово “невязка” и ее значения, приводимые в комментариях к таблице 2.2 и рис. 2.2, воспринимается с разным смыслом. В первом случае (в названии таблицы 2.2) оно характеризует расхождение между геоэлектрическим разрезом и стартовой моделью (надо понимать, что чем меньше величина невязки, тем ближе геоэлектрическая модель к реальной). Во втором случае (комментарий к рисунку 2.2) минимальная величина невязки отождествляется с минимальной степенью, как условно называется в работе, «видимости» объекта в результатах инверсии (что, по сути, соответствует наибольшему отклонению от реальной модели). Это, скорее всего, словесный недочет. Потому что сам процесс информативности восстановления модели среды вполне отчетливо проявляется в результатах моделирования.

Второе замечание связано с оценкой проявления эффекта завышения нижней границы трехмерного тела. В результатах моделирования, к сожалению, не полностью раскрыты реальные возможности 3D-электротомографии, в частности, 3D-инверсии электрического поля, рассчитанного для анализируемого класса трехмерных моделей среды. Это, на мой взгляд, сняло бы некоторые вопросы, связанные с информационными возможностями метода 3D-инверсии, которые, судя по результатам многочисленных примеров выполненного моделирования, также имеют определенные ограничения: значительное повышение погрешности в оценке электрического сопротивления по мере увеличения контрастности свойств среды, зависимость от плотности наблюдений и др. Впрочем, это, отчасти, выходит за рамки данной работы и может рассматриваться лишь в качестве пожелания для проведения дальнейших исследований.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера в решении поставленных задач. Материал, приведенный в первой части этой главы, на мой взгляд, в полной мере раскрывает и обосновывает первое защищаемое положение.

Далее в работе приводятся результаты исследований по разработке способов минимизации влияния трехмерного строения среды на данные двумерных измерений. Для этого соискателем разработано два пути коррекции наличия возможных искажений: 1) введением поправочных коэффициентов на этапе подготовки данных для инверсии, определяемых с помощью численного моделирования и 2) использованием разностных разрезов, получаемых по данным режимных (мониторинговых) наблюдений.

В силу того что при двумерной инверсии невозможно учесть влияние объектов, расположенных вне профиля и зачастую являющихся основным искажающим элементом (склон дамбы, обрывистый берег реки), найдено удачное решение для оценки влияния такого типа неоднородности. Оно основано на оценке расхождения значений кажущегося сопротивления, получаемых по одиночному профилю методом 2D-томографии и вычисляемых путем решения прямой задачи для трехмерной среды с неоднородностью, расположенной вблизи профиля. В качестве примера рассмотрена возможность оценки влияния рельефа дамбы гидросооружения. При моделировании эта задача учета влияния рельефа была сведена к учету влияния линейной неоднородности, расположенной субпараллельно профилю, при наличии известной информации о конфигурации рельефа и контрастности электрического сопротивления на границе раздела земля-воздух.

Расчеты, выполненные на примере обследования дамбы Богучанской ГЭС в целях контроля возможных фильтрационных процессов, показали, что использование предложенного способа снижения влияния трехмерных неоднородностей на результаты 2D-электротомографии на этапе, предшествующем инверсии, позволяет повысить качество и достоверность результатов.

Вместе с этим, на основе моделирования были оценены величины УЭС конструктивных элементов плотины и вклад таких факторов, как наличие изолирующих и проводящих включений, частичное обводнение тела КНП со стороны верхнего бьефа при подъеме уровня воды. Что особенно важно, соискателем показана возможность более уверенного выделения аномальных зон по их двумерному характеру проявления в результатах 2D-инверсии, а не по обычно используемой амплитуде сопротивления, которая в данном случае сопоставима с уровнем помех от влияния продольных неоднородностей.

Комплексные исследования, выполненные на основе решения прямой и обратной задач, имитирующих различные варианты возможных методик проведения электротомографических исследований, в совокупности с результатами реальных практических опытно-методических работ позволили выявить ряд отмеченных выше важных для геологического истолкования элементов, способствующих дальнейшему продвижению данного направления.

В целом, из данного раздела главы вполне логично следует формулировка и доказательство второго защищаемого положения.

В **третьей** главе излагаются теоретические наработки и результаты экспериментальных исследований по созданию и оценке информативности пространственных инвариантов тензора кажущегося сопротивления при площадной съемке методом срединного градиента.

Опираясь на результаты работ отечественных и зарубежных исследователей (Горбунов, 2001; Модин, 2006; Varga, и др., 2008) соискателем с помощью численного моделирования и практических работ проведен анализ различных вариантов традиционной и тензорной методик наблюдения с учетом их результативности и экономической эффективности.

На основе численного моделирования соискателем на модели типа «Стена» был проведен расчет аномальных эффектов от высокоомных линейных объектов, в результате которого подтверждена зависимость поляризации линейно протяженных аномальных объектов от азимута питающей линии и получен важный вывод об однозначности выделения пространственного расположения объекта в однородной изотропной среде при выполнении съемки с двумя ортогонально расположенными питающими линиями. Кроме этого, показано, что использование инвариантов позволяет не только отражать реальную геометрию аномальных объектов на картах, но и находить аномалии, которые ранее обычными методами выделить было сложно.

Сравнительный анализ традиционной (приемная линия MN параллельна питающей АВ) и предложенной венгерскими геофизиками тензорной (двойная ориентация MN - параллельно и перпендикулярно АВ) методик привел соискателя к заключению о том, что обе методики дают практически идентичные результаты, отличающиеся в пределах погрешностей наблюдения. А поскольку тензорная методика почти в два раза более трудоемка по сравнению с традиционной и не дает ощутимого выигрыша в точности и детальности, применение ее в настоящее время не оправдано. Да, с этим можно согласиться, но не с полной уверенностью. Для более убедительной заверки данного вывода, на мой взгляд, следовало бы выполнить сопоставление использованной модификации метода ЭП-СГ с результатами близкого к ней по физической сути метода двух составляющих (МДС).

В целом, материалы исследований, представленные в третьей главе, опираются на численное моделирование и показавший хорошую согласованность с ними успешный опыт практических работ, проведенных при обследовании участка «Семеновское» (с. Бородино), и, тем самым, заверяют и обосновывают третье защищаемое положение.

В **четвертой** главе рассматривается формирование и обоснование новой методики электротомографии, нацеленной на сочетание достоинств традиционной площадной 2D-съемки, проводимой по сети двумерных профилей и обеспечивающей упрощение и оперативность выполнения полевых работ, и использования двумерного расположения питающей линии, повышающего надежность выделения линейных объектов разной ориентации. Материал этой главы является логическим продолжением экспериментальных исследований, рассмотренных в предыдущих главах.

При формировании новой методики – псевдо-3D-электротомографии – и технологии ее реализации соискателем с помощью численного моделирования детально проанализированы основные элементы, включающие как оптимизацию параметров системы наблюдений, так и обоснование информационных возможностей способов обработки и интерпретации измеренных величин.

Расчет эффектов от трехмерного объекта выполнен для моделей одиночных линейных объектов и объектов со сложной геометрической конфигурацией, представленных совокупностью линейных объектов различной ориентации типа «Стена-Ров». Численное моделирование проводилось с варьированием параметров анализируемой модели: толщины стен, глубины их залегания, контрастности по значениям электрического сопротивления.

По результатам моделирования выявлен один важный эффект. Он связан с особенностями поляризации линейных объектов и проявляется в следующем: по результатам 2D-инверсии и высокоомный, и проводящий линейный объект, лучше проявляется в данных, если он перпендикулярен направлению профилей, и хуже, если параллелен, а по результатам

3D-инверсии в случае высокоомного объекта закономерность сохраняется, а в случае низкоомного объекта наблюдается обратная закономерность – лучше проявляется линейный объект, расположенный вдоль профилей.

Сравнительный анализ возможностей разработанной методики псевдо-3D-электротомографии и традиционной площадной 2D-электротомографии с позиции детальности, контрастности, наличия проявлений артефактов инверсии, степени их подавления и т.д., выполненный по результатам численного моделирования, убедительно показал преимущества созданной методики как при выделении трехмерного объекта произвольной конфигурации, так и при восстановлении его контрастности.

По совокупности результатов проведенных исследований и накопленного опыта практических работ соискателем сформирован общий граф методики сбора, обработки и интерпретации данных с получением и визуализацией завершающей геолого-геофизической модели среды.

Приведенные в работе многочисленные практические примеры отличаются геоморфологическими условиями и видом решаемых задач. Результаты проведенного детального анализа с использованием заверочных материалов свидетельствуют о высокой эффективности применения созданной новой методики малоуглубинной электроразведки для изучения трехмерных сред.

Если обратиться к замечаниям, то я отметил бы следующее.

При интерпретации материалов по пойме р. Воря на горизонтальных срезах геоэлектрической модели (рис. 4.22) не дано объяснение небольшой аномальной зоны пониженных сопротивлений, расположенной в пределах восточной окраины участка, близкой по конфигурации и пространственному расположению к поведению целевого объекта - проводящего палеорусла реки. Если это влияние краевого эффекта инверсии, то каковы критерии его наличия и область возможного влияния?

Приведенные в работе искажения результатов инверсии, возникающие в процессе численного моделирования, вызывают вопрос о возможных ограничениях возможностей программных средств, использованных при оценке расхождения результатов 2D-электротомографии и 3D-инверсии. Непонятно, какой вклад вносит влияние таких ограничений при оценке искажений. Впрочем, этот весьма непростой вопрос, без выраженного влияния данного фактора на основную часть результатов проведенных исследований, может рассматриваться, скорее, в качестве пожелания при дальнейшем ведении данных работ.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера, а раскрывают широту и объективность представленных соискателем результатов исследований. Достоверность полученных материалов не вызывает у меня сомнений. В целом, в главе достаточно полно и обоснованно раскрывается и доказывает четвертое защищаемое положение.

В **заключении** соискателем в обобщенном виде приводятся наиболее важные результаты проведенных исследований и излагаются пути дальнейшего развития этого направления.

В итоге анализа диссертации, автореферата и знакомствами с публикациями соискателя по теме диссертации я пришел к следующим заключениям:

1. Представленная работа логично и содержательно раскрывает реализацию поставленных целей и задач. Основные ее результаты достаточно полно раскрыты в автореферате и опубликованных работах соискателя. Высказанные по ходу рассмотрения диссертации замечания ни в коей мере не снижают ее теоретической и практической значимости.

2. Каждое из защищаемых положений является результатом проведения оригинальных экспериментальных исследований, сопровождаемых сравнительным анализом разработок соискателя с их аналогами, выявлением достоинств и недостатков, оценкой достоверности

получаемых результатов, проводимых на основе использования современных методов решения прямых и обратных задач для двух и трехмерных сред, не вызывая сомнений в достоверности полученных выводов и заключений.

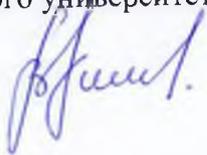
3. Наиболее весомая значимость работы определяется тем, что на основе всестороннего комплексного анализа существующих подходов к изучению сложнопостроенных сред и экспериментальных исследований, выполненных с использованием современных средств двух- и трехмерного численного моделирования электрических полей, создана новая, ранее не использованная методика электротомографии, являющаяся логическим продолжением многочисленных исследований в данном направлении, обеспечивающая повышение информативности, технологичности и экономической эффективности процесса изучения трехмерных сред.

4. Многочисленные примеры применения созданной методики электротомографии, приведенные в работе, показывают ее результативность и востребованность при проведении различного рода малоглубинных инженерно-геологических изысканий, решении археологических и других задач. Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах, а также докладывались на научных конференциях и семинарах.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа А.М. Павловой удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам диссертант заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых.

Профессор кафедры геофизики Пермского государственного национального исследовательского университета, доктор технических наук

В.П. Колесников



26.11. 2014 г.

«Подпись В.П. Колесникова заверяю»

Проректор по научной работе и инновациям ПГНИУ



В.Н. Катаев