

ОТЗЫВ

официального оппонента Лукина Дмитрия Сергеевича

на диссертационную работу Дарьи Александровны Ореховой «Исследование структур литосферы в высоких широтах по данным естественных и мощных искусственных источников электромагнитного поля», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Активное продвижение электромагнитных исследований литосферы в высокие широты в России и других странах обуславливает необходимость совершенствования методической базы подобных измерений. Стандартные способы таких исследований зачастую не позволяют эффективно выполнять на широтах полярного электроджета и выше. Кроме того, большая часть северной полярной области покрыта океаном. Морские электромагнитные исследования вообще значительно труднее наземных из-за экранирующего влияния мощного высокопроводящего водного слоя, наличия специфических магнитогидродинамических помех и очевидных технических трудностей. На ледовых акваториях эти трудности усугубляются невозможностью использования имеющейся стандартной глубоководной аппаратуры. В то же время вышедшие на передний план фундаментальные проблемы, связанные с особенностями строения литосферы Северного Ледовитого океана и его обрамления, прикладные задачи трассирования геологической границы шельфа и поиска морских месторождений углеводородов требуют получения данных о глубинном распределении электропроводности, построения трехмерных геоэлектрических моделей и их интерпретации совместно с данными других геофизических методов (прежде всего с сейсмической разведкой). Таким образом, тема диссертационной работы Д.А. Ореховой, которая посвящена развитию новых перспективных направлений в высокоширотной и, в особенности, морской геоэлектрики, представляется весьма **актуальной**.

Рецензируемая работа общим объемом 131 страница (в том числе 61 рисунок и 4 таблицы), сопровождается списком литературы из 77 наименований и состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во **введении** соискателем показаны актуальность и новизна работы, поставлены цели и задачи, приводятся сведения об использованном фактическом материале и апробации работы и сформулированы защищаемые положения. В диссертации Ореховой О.А. выдвигаются две идеи преодоления основной трудности высокоширотного электромагнитного зондирования литосферы, вызванной сильным и неоднородным полем близкого и сложного ионосферного источника: отказ от приближения плоской волны при зондировании с помощью естественного поля и применение мощных (протяженных) источников при зондировании с искусственным полем.

В **первой главе** соискатель определяет ограничения электромагнитных исследований в высоких широтах, связанные с близостью к источнику магнитотеллурического поля – ионосферной токовой системе. Приводится обзор работ по учету неоднородностей первичного естественного поля в высоких широтах и обзор ранее выполненных геоэлектрических исследований с естественными и искусственными источниками в двух регионах, на которых в следующих главах сосредоточено собственное исследование диссертанта – Кольском полуострове и Северном Ледовитом океане.

Анализируются достижения в рамках имеющихся подходов по преодолению основной трудности магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в

высоких широтах, связанной с невыполнением гипотезы плоской волны. Отмечается ограниченность имеющихся модельных подходов и недостаточная эффективность эмпирических.

Далее автор суммирует позитивные результаты большого числа наземных и морских региональных геоэлектрических исследований с естественными и искусственными источниками поля, которые служат далее основой (априорной информацией) при его дальнейших региональных модельных исследованиях на новом экспериментальном материале, а также для модельного исследования сравнительных возможностей различных вариантов будущих морских электромагнитных зондирований в Северном ледовитом океане. При этом акцентируется внимание на тех геологических задачах, где, на фоне общего геофизического комплекса, именно электромагнитные методы могут представлять особую ценность.

Следующие четыре главы являются основными и в них раскрываются и обосновываются защищаемые положения.

Во **второй главе** анализируются и интерпретируются результаты двух экспериментов (наземного и морского), выполненных с помощью стационарного мощного протяженного искусственного источника поля КНЧ-диапазона, расположенного на Кольском полуострове. В результате построены трехмерные геоэлектрические модели средней части полуострова и района Кольского залива.

Для моделирования использовался метод интегральных уравнений. При этом задача решалась в общем виде без использования асимптотических приближений ближней или дальней зоны. Поскольку диссертанту пришлось пользоваться результатами экспериментов, исходной целью которых было испытание новой аппаратуры, и соответственно, с относительно небольшим числом точек наблюдений, для формальной интерпретации использовалась следующая вполне оптимальная стратегия. Вначале на основании многократного решения прямой задачи осуществлялся подбор модели, в которой все компоненты поля наилучшим образом приближаются к наблюдаемым. В процессе подбора (каждый шаг которого делался на основе физических и геологических соображений) выделялось небольшое число параметров наиболее критично влияющих на поле в точках наблюдений. По этим параметрам рассчитывалось большое число моделей для обучения нейросети, затем с ее помощью вычислялись оптимальные значения этих параметров.

Следует отметить проделанный диссертантом объем вычислительной работы, необходимый для решения задачи. Крайне высокие контрасты проводимости, характерные для разломных и морских структур Кольского полуострова, делают процесс сходимости в решении интегральных уравнений весьма медленным. Узкая локализация проводящих структур, необходимость тщательного учета рельефа дна и учета дальнего влияния проводников потребовали использования сеток, содержащих несколько миллионов ячеек. Даже при использовании диссертантом мощных компьютерных кластеров Курчатовского института и МГУ, решение задачи потребовало значительных усилий.

Эти усилия вполне оправданы полученными результатами. В частности, обнаружен физически прозрачный, но ранее не описанный в литературе береговой эффект. В модели района Кольского залива удалось разделить по сопротивлению два высокоомных блока земной коры, что в электроразведке считалось почти невыполнимой задачей. Наконец, известные, но геологически не дифференцированные разломы были дифференцированы по их проводимости, что позволяет судить об их относительной активности или возрасте. Кроме того, по результатам эксперимента в Кольском заливе получено убедительное

свидетельство важности измерений вертикальной компоненты электрического поля (не измеряемой в стандартной практике) – именно эти измерения позволили разделить по сопротивлению высокоомные блоки коры. Конечно, точность полученных трехмерных моделей не может быть высокой из-за вынужденного использования весьма ограниченных профильных данных. Но достоверность и важность главных выводов не вызывает сомнений.

Из материалов второй главы логично следуют формулировка и доказательство первого защищаемого положения.

В **третьей главе** излагается результаты моделирования поисков углеводородов на шельфе. Автор, хорошо понимая как сильные, так и слабые стороны электроразведки по сравнению с сейсморазведкой, ставит задачу следующим практическим образом. По сейсмическим данным хорошо определена перспективная структура, но неизвестно содержит ли коллектор залежь углеводородов или он пуст. Диагностика физически основана на повышенном сопротивлении продуктивного слоя небольшой толщины.

Задача решается на примере хорошо изученного Штокмановского газоконденсатного месторождения. Автор описывает геологическую структуру, строит ее трехмерную геоэлектрическую модель в вариантах присутствия и отсутствия газоконденсата, рассчитывая удельные сопротивления по известным эмпирическим формулам. Далее предполагается, что измерения поля проводятся сетью шестикомпонентных донных станций, а поле возбуждается низкочастотным электрическим биполем различных ориентаций, включая вертикальную. При этом предполагается, что измерения ведутся аппаратурой со свойственной современным образцам чувствительностью, источник тока мощный, но соответствует вполне стандартным в морской практике генераторам, так что высокий момент биполя легче достигается за счет его длины, если при съемке он неподвижен. Такая методика сравнивается со стандартной, когда буксируется горизонтальный биполь небольшой длины, а измерения проводятся сетью донных станций, регистрирующих только горизонтальные компоненты поля.

Результаты моделирования показывают, что наилучшие результаты по диагностике наличия/отсутствия углеводородной залежи дают измерения вертикальной компоненты электрического поля при возбуждении горизонтальным радиально-ориентированным биполем, находящимся вблизи исследуемой структуры (но вне ее). Стандартный метод исследования также позволяет диагностировать наличие/отсутствие залежи, но величина аномалии, создаваемой залежью оказывается слабее, а оконтуривание залежи становится менее определенным.

Некоторым недостатком, возможно, следует считать тот факт, что автор рассматривает только вариант генерации поля в виде длительного синусоидального сигнала, не рассматривая вариантов импульсного сигнала. Однако вполне очевидно, что принципиальные выводы проведенного исследования останутся верны при любой форме сигнала.

Второе защищаемое положение доказано достаточно убедительно.

В **четвёртой главе** соискатель исследует возможности магнитотеллурических зондирований в Северном Ледовитом океане с поверхности льда и со дна для задач определения типов литосферы, а также соответствующие возможности зондирований с искусственными источниками. Вначале анализ ведется на элементарных трехмерных моделях типа горст-грабен в глубоком океане над литосферой океанического и континентального типа. Затем моделируются реальные макроструктуры – хребет Гаккеля, представляющий типичный срединно-океанический рифтовый хребет, и система хребет

Менделеева – поднятие Альфа, расположенные предположительно над субконтинентальной литосферой.

В итоге делается вывод о пригодности для картирования локальных структур только донного варианта магнитотеллурического зондирования. Но для определения типа литосферы и, соответственно, для определения границ блоков океанического и субконтинентального типа пригоден и традиционный для центральной Арктики ледовый вариант, более того он оказывается даже лучше из-за подавления водной толщей всех эффектов локальных структур.

Применение искусственных источников по результатам трехмерного моделирования позволяет картировать локальные структуры, причем наиболее эффективными вновь оказываются измерения вертикальной компоненты электрического поля и применение горизонтального питающего диполя, ориентированного ортогонально к направлению протяженной аномалии. Однако пространственное затухание поля в глубоком океане велико, и автор пессимистически оценивает сегодняшние возможности таких исследований, исходя из реального отсутствия достаточно мощных, но легких для доставки авиацией на лед, источников.

Таким образом, из результатов главы четко следует обоснование стратегии будущих крупномасштабных электромагнитных экспериментов в Северном Ледовитом океане, составляющих суть третьего защищаемого положения.

Пятая глава посвящена интерпретации магнитовариационных наблюдений, накопленных за годы дрейфов станций «Северный полюс». Эта часть диссертации мне представляется важнейшей и во многих отношениях пионерской. Во-первых, соискатель впервые сумел использовать для геоэлектрических целей массовый, но сложный экспериментальный материал по центральной Арктике, собранный с другими целями (изучение пространственно-временной структуры ионосферных источников переменного магнитного поля). Во-вторых, соискатель впервые реализовал в эксперименте новую идею применения эллиптических (четырёхкомпонентных) магнитных индукционных векторов. В-третьих, соискатель первым обратил внимание на различную чувствительность различных компонент этих векторов к структуре внешних источников поля и структуре геоэлектрического разреза и доказал это численными экспериментами. В-четвертых, конечным результатом оказалось построение первой трехмерной геоэлектрической модели приполюсной части Северного Ледовитого океана, имеющей принципиальное геофизическое значение.

В главе последовательно и достаточно детально описываются теоретические и экспериментальные аспекты решаемой задачи и последовательные этапы ее решения. Вначале показывается, что наблюдаемые большие полуоси эллиптических векторов (близкие к обычным типперам) не могут быть объяснены никакими геоэлектрическими неоднородностями при моделировании первичного поля плоской волной и обусловлены именно неприменимостью этого стандартного приближения. Из четырех компонент эллиптических векторов отбираются две (большие и малые полуоси), которые отличаются резко различной чувствительностью к источникам и разрезу и, вместе с тем, определяются в данном эксперименте минимальной погрешностью. Из принципа минимальной погрешности выбирается также суточный период анализируемых вариаций поля. Далее над разрезом, учитывающим реальную батиметрию, но не содержащим никаких предположений о глубинных горизонтальных неоднородностях, нейросетевым методом решается обратная задача о положении эквивалентных источников (источников, создающих на ограниченной акватории ту же осредненную по времени структуру поля, что и реальные источники). Источники ищутся решения в виде двух (минимальное число,

позволяющее решить задачу) вертикальных магнитных диполей в ионосфере. При этом априорно эти диполи могут равновероятно находиться над любым местом океана. Примечательно, что оба найденных диполя, образующих эквивалентный источник, оказались в зоне электроджета. Далее строилась геоэлектрическая модель. При этом особое внимание уделялось корректности задания граничных условий. Для этого приполюсная область интерпретации отделялась от нормального разреза обширной буферной зоны с заданием неоднородностей по априорным данным и тестировалась малая чувствительность результатов к погрешностям задания удаленного нормального разреза. В области интерпретации модель создавалась путем подбора глубинного распределения проводимости, дающего оптимальное совпадение всех экспериментальных и модельных малых полуосей.

Полученная модель вызывает доверие, поскольку в хорошо изученной части приполюсной области она полностью соответствует современным представлениям. В менее изученной части, в районе хребта Менделеева и поднятия Альфа она несет новую информацию, важную как с фундаментально-тектонической точки зрения, так и с точки зрения практического определения геологической границы шельфа.

Хотя в этой главе можно отметить недостатки, они являются, очевидно, неизбежными при решении столь новой задачи. Так, можно упрекнуть автора в использовании лишь одного периода, однако в работе справедливо отмечено, что главной причиной остающихся невязок является отнюдь не отсутствие информации на более коротких периодах, а ограничение представления эквивалентного источника всего двумя диполями. С другой стороны увеличение числа диполей привело бы к экспоненциальному возрастанию и без того большого объема вычислений, что не оправдано принципиальной целью работы.

В целом, защищаемое положение 4 является подробно обоснованным.

В **заключении** кратко суммируются результаты работы.

На основании анализа диссертации и автореферата, а также на основании знакомства с публикациями соискателя по теме диссертации, я пришел к следующим заключениям:

1. Диссертация логично построена, её структура и содержание соответствуют цели и задачам исследования. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание представленной диссертации. Сделанные замечания не снижают теоретической и практической ценности полученных результатов этого научного исследования.

2. Научные положения и выводы, сформулированные соискателем, логично вытекают из результатов выполненных им исследований, и, таким образом, являются вполне обоснованными.

3. Достоверность сформулированных положений и выводов не вызывает сомнения. Научные положения доказываются соискателем преимущественно экспериментально (включая численные эксперименты на моделях). Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах, а также докладывались на многих научных конференциях и семинарах.

4. Научная новизна защищаемых положений определяется тем, что автор впервые с единых позиций оценил как трудности, так и новые возможности морских электромагнитных зондирований в высоких широтах, применил новые оригинальные подходы к интерпретации данных экспериментов и получил ряд принципиально новых результатов о глубинном строении литосферы в арктических регионах.

Таким образом, диссертация Дарьи Александровны Ореховой является научно-квалификационной работой, в которой получен ряд принципиально новых результатов о

глубинном строении литосферы в арктических регионах, имеющих важное значение для трассирования геологической границы шельфа и поиска морских месторождений углеводородов, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, – а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Д.ф.-м.н. профессор МФТИ,
Лауреат государственной премии СССР,
Заслуженный деятель науки РФ


Д.С. Лукин

Лукин Дмитрий Сергеевич, профессор кафедры радиотехники и систем управления Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Тел. – 8-495-408-51-44, E-mail – lukin@mail.mipt.ru

Реквизиты МФТИ

Адрес – Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл., 141700, Россия,

Сайт – <http://mipt.ru/>,

Тел. – +7 (495) 408-45-54, info@mipt.ru

ЗАВЕРЯЮ
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
МФТИ
Ю. И. Скалько

