

На правах рукописи



Кошкина Юлия Игоревна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ, АЛГОРИТМОВ И РЕАЛИЗУЮЩЕГО ИХ
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ
МНОГОМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ИНДУКЦИОННОГО
КАРОТАЖА**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Персова Марина Геннадьевна

Официальные оппоненты: Городилов Леонид Владимирович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория моделирования импульсных систем, заведующий

Никитенко Марина Николаевна, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник

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

Защита состоится «01» июня 2017 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте <http://www.nstu.ru/>.

Автореферат разослан «___» апреля 2017 года

Ученый секретарь

диссертационного совета

Фаддеенков Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Электромагнитные зондирования околоскважинного пространства являются важнейшей составляющей многих современных технологий бурения. Разработка методов математического моделирования и программного обеспечения для сопровождения этих технологий в части проектирования приборов и обработки получаемых данных является важнейшей составляющей этих технологий и отражена в работах многих авторов, например, И.Н. Ельцова, М.Н. Никитенко, М.И. Эпова, А. Abubakar, D. Avdeev, S. Davydicheva, Т.М. Nabashy, М. Rabinovich, С. Torres-Verdin, G.L. Wang и др.

В настоящее время для обработки получаемых в процессе бурения данных применяются, как правило, программы, в основе которых лежат одномерные подходы, например, программное обеспечение MCWD (Baker Hughes). Однако, для высококачественной обработки полученных данных с построением геологических моделей во многих случаях требуется применение подходов, базирующихся на решении многомерных обратных задач. Эти задачи являются некорректными. Существенному продвижению теории решения некорректных задач способствовал метод регуляризации, предложенный А.Н. Тихоновым.

При решении задач обработки данных наиболее важными для практики являются два аспекта: качество восстановления геологической модели и вычислительная эффективность используемых процедур. Основные вычислительные затраты при этом приходятся на расчеты электромагнитных полей, поскольку многомерная инверсия – это по сути решение многомерных обратных задач, в процессе которого требуется решение большого количества прямых задач как при вычислении поля для полученного очередного приближения геологической модели, так и для расчета полей влияния параметров этой модели. Поэтому на первый план выступает требование максимального повышения вычислительной эффективности методов и алгоритмов расчета электромагнитных полей. При этом важно, чтобы снижение вычислительных затрат при моделировании геоэлектромагнитных полей не ухудшало точность получаемого решения, поскольку снижение точности решения прямой задачи может крайне негативно сказаться как на устойчивости процесса нелинейной многомерной инверсии, так и на качестве восстановленной геологической модели.

Кроме вычислительной эффективности и точности решения прямой задачи, адекватность и вычислительная эффективность решения обратной задачи существенно зависит и от способов параметризации геологической модели, позволяющих не только существенно сократить число искомых параметров в обратной задаче без ущерба качеству описания геологической модели, но и сде-

лать процедуру нелинейной многомерной инверсии более устойчиво и быстро сходящейся.

Наиболее распространенными подходами к решению многомерных обратных задач электромагнетизма являются подходы, основанные на использовании так называемых «ячеистых» структур. Они основаны на разбиении изучаемого объема среды на подобъемы (ячейки), в каждой из которых ищется значение удельной проводимости. Эти подходы развиваются в работах L.H. Cox, G.D. Egbert, C.G. Farquharson, E. Haber, G.A. Newman, D.W. Oldenburg, R. Shekhtman, M.S. Zhdanov и др. Основной проблемой этих подходов является большая зона эквивалентности, вызванная наличием большого числа слабо-влияющих параметров, и сильная зависимость от субъективного выбора параметров регуляризации из-за трудностей применения более объективных способов адаптивной регуляризации.

В данной работе будет предложен другой подход к решению обратной задачи индукционного каротажа, основанный на так называемой *геометрической* инверсии. Различные модификации этого подхода для различных технологий электроразведки представлены в работах A. Abubakar, T.M. Nabashy, M. Li, A. Singh, M.Г. Персовой, Ю.Г. Соловейчика и др. Принципиальными преимуществами геометрической инверсии перед «ячеистыми» подходами являются существенное снижение области эквивалентности и возможность использования более строгих алгоритмов подбора оптимальных параметров регуляризации, что в конечном итоге приводит к получению гораздо более адекватных геоэлектрических моделей окологлавиного пространства.

В большинстве работ, связанных с разработкой программно-математического аппарата для многомерной обработки данных индукционного каротажа, для расчета полей влияния параметров геоэлектрической модели (а зачастую и самих сигналов для очередного приближения) предлагается использовать упрощенные подходы. В ряде случаев это может существенно замедлять сходимость итерационного процесса, а иногда приводить к получению некорректной геоэлектрической модели. В любом случае при применении этих подходов сигналы от полученной в результате инверсии геоэлектрической модели должны быть рассчитаны с использованием программного обеспечения, реализующего точное (т.е. без существенных упрощений) многомерное моделирование, и лишь после этого сопоставлены с практическими данными для определения уровня невязки.

Принципиальным отличием предлагаемых в данной работе подходов является использование точных (без существенных упрощений) математических моделей как для решения прямой задачи на очередной итерации инверсии, так

и для расчета полей влияния с использованием метода конечных элементов, что при достижении необходимого уровня невязки позволяет гарантировать корректность полученного результата без дополнительных проверок. При этом будет обеспечиваться вычислительная эффективность, позволяющая использовать эти подходы на практике.

Основной научной проблемой, решаемой в данной диссертационной работе, является проблема разработки методов многомерной инверсии данных индукционного каротажа и соответствующего программного обеспечения (ПО), которое будет обладать возможностью получать адекватные геоэлектрические модели околоскважинного пространства с вычислительной эффективностью, достаточной для использования этого ПО при обработке практических данных, получаемых в процессе бурения скважин.

Цели и задачи исследования

Основной целью исследования является разработка методов, численных процедур и реализующего их ПО для выполнения многомерной инверсии данных индукционного каротажа на основе геометрической инверсии и конечно-элементного моделирования и обоснование возможности их применения для обработки практических данных, получаемых в процессе бурения скважин. Для достижения этой цели были решены следующие задачи.

1) Разработаны методы геометрической многомерной инверсии данных индукционного каротажа с перемещаемым вдоль скважины источником.

2) Разработаны алгоритмы, реализующие решение обратных задач с группированием прямых задач для различных положений источника и использованием прямых решателей для конечноэлементных расчетов электромагнитных полей в выделенных группах.

3) Разработаны методы адаптивной регуляризации при выполнении геометрической инверсии.

4) Подтверждена вычислительная эффективность разработанных методов и ПО и на основе этого обоснована возможность применения многомерной инверсии для обработки практических данных, получаемых в процессе бурения скважин.

5) Разработан программный комплекс, реализующий многомерные инверсии данных индукционного каротажа.

Научная новизна:

1) Предложен новый вычислительный алгоритм многомерной инверсии, основанный на параметризации с совместным использованием геометрических и электрофизических характеристик и конечноэлементном моделировании с группированием прямых задач для различных положений источника и использованием прямых решателей.

2) Предложены новые методы адаптивной регуляризации для геометрической инверсии и способы параметризации геологической модели.

3) Впервые с использованием программы многомерной инверсии проведены исследования, позволившие разработать методику многомерной геометрической инверсии для обработки данных, получаемых в процессе бурения скважин.

На защиту выносятся:

1) Вычислительные схемы выполнения геометрической 2D-инверсии данных индукционного каротажа с перемещаемым вдоль вертикальной скважины источником.

2) Алгоритмы, реализующие решение обратных задач с группированием прямых задач для различных положений источника и использованием прямых решателей для конечноэлементных расчетов электромагнитных полей в выделенных группах.

3) Методы адаптивной регуляризации при выполнении геометрической инверсии.

4) Программный комплекс, реализующий методы геометрической инверсии для решения задач индукционного каротажа.

5) Результаты сравнительного анализа разработанной геометрической инверсии с «ячеистой» 2D-инверсией и 1D-инверсией для модели сложнопостроенного коллектора.

6) Обоснование вычислительной эффективности и обусловленной ей возможности практического применения разработанных алгоритмов и программного обеспечения многомерной геометрической инверсии данных индукционного каротажа.

Достоверность результатов

Процедуры решения прямых задач протестированы путем сравнения с результатами, полученными с помощью программных комплексов, разработанных другими авторами. Разработанные процедуры многомерной геометрической инверсии протестированы на синтетических данных, полученных с использованием конечноэлементного моделирования для геоэлектрических моделей различной сложности.

Практическая значимость работы

Разработанное программное обеспечение, реализующее многомерную геометрическую инверсию данных индукционного каротажа, включая методику

ее применения для длинных участков скважин, может применяться для обработки практических данных, получаемых в процессе бурения скважин.

Личный вклад

Лично автором разработаны и программно реализованы в виде программного комплекса методы выполнения нелинейной геометрической 2D-инверсии данных индукционного каротажа, основанные на специальной параметризации обратной задачи с использованием геометрических и электрофизических характеристик и конечноэлементном моделировании с группированием прямых задач для различных положений источника и с использованием прямых решателей. Предложена и обоснована методика применения многомерной геометрической инверсии для обработки практических данных индукционного каротажа. Проведены исследования работоспособности разработанного программного обеспечения с использованием синтетических данных, полученных с использованием конечноэлементного моделирования для геоэлектрических моделей различной сложности. Проведен анализ работоспособности методов 2D-инверсии, построенных на принципе использования ячеистых структур, и анализ работоспособности методов 1D-инверсии, построенных на основе цилиндрически-слоистой модели, для сложной геоэлектрической модели. Проведен анализ возможности совместного восстановления радиально- и вертикально-неоднородных распределений удельной электрической проводимости и относительной диэлектрической проницаемости. Проведен анализ влияния различного уровня зашумления на результаты восстановления параметров геоэлектрической модели.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены и докладывались на зарубежной конференции EAGE: 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Near Surface Geoscience 2016 (First Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining) (Barcelona, Spain, 2016); международной научно-практической конференции "ГеоБайкал 2016" (Иркутск, 2016); международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (Новосибирск, 2012, 2014, 2016); 11-м международном форуме по стратегическим технологиям IFOST-2016 (Новосибирск, 2016); VII Всероссийской школе-семинаре имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли (ЭМЗ-2015) (Иркутск, 2015); 12-й международной конференции и выставке по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ RAO / CIS Offshore 2015 (Санкт-Петербург, 2015); XIX международном симпозиуме имени академика М.А.

Усова студентов и молодых ученых "Проблемы геологии и освоения недр" (Томск, 2015); 11-й научно-практической конференции и выставке "Инженерная геофизика 2015" (Геленджик, 2015); Российской научно-технической конференции "Инновации и научно-техническое творчество молодежи" (Новосибирск, 2014); Российской научно-технической конференции "Обработка информационных сигналов и математическое моделирование" (Новосибирск, 2013); Всероссийской научной конференции молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (Новосибирск, 2013); международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики" (Новосибирск, Академгородок, 2014, 2015).

Работа проводилась в рамках прикладных научных исследований, выполняемых при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Публикации

По материалам диссертационного исследования лично и в соавторстве опубликовано 26 научных работ, в том числе 4 научные публикации, опубликованные в журналах, входящих в перечень ВАК, 2 научные публикации, индексируемые в международных информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science, 3 научные публикации, индексируемые в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Scopus, а также 11 работ, опубликованных в других изданиях и в сборниках трудов конференций, получено 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованных источников (152 наименования), приложения. Общий объем диссертации – 165 страниц, в том числе 54 рисунка и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертационной работы посвящена описанию математического аппарата нелинейной геометрической многомерной инверсии и конечноэлементным схемам моделирования электромагнитных полей в задачах индукционного каротажа. В ней представлены принципы параметризации геоэлектрической модели, алгоритмы адаптивного выбора параметров регуляризации, а также математические модели для решения прямой задачи, эквивалентные вариационные постановки для прямых задач и дискретные аналоги.

Типовой геологической моделью в рассматриваемом случае является скважина с буровым раствором, набор слоев (пластов) с параллельными горизонтальными границами, внутри которых могут быть радиальные границы, соответствующие зоне проникновения и окаймляющей зоне. Искомыми параметрами при решении обратной задачи являются z -координаты границ между слоями, r -координаты радиальных границ внутри каждого слоя, а также значения удельной электрической проводимости и диэлектрической проницаемости внутри блоков, ограниченных вертикальными и горизонтальными линиями.

Значения искомых параметров будут определяться на основе минимизации функционала вида

$$\Phi^\alpha(\mathbf{b}) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K (v_{lk} \delta \mathcal{E}_{lk}(\mathbf{b}))^2 + \sum_{m=1}^M \alpha_m (\Delta b_m)^2, \quad (1)$$

где первое слагаемое $\Phi(\mathbf{b})$ соответствует невязке между практическими и расчетными данными, а второе – регуляризирующей добавке.

В формуле (1) приняты следующие обозначения: $\delta \mathcal{E}_{lk} = \tilde{\mathcal{E}}_{lk} - \mathcal{E}_{lk}$ – ошибки (невязки) в сигналах, \mathcal{E}_{lk} – сигналы, зарегистрированные с помощью l -го зонда каротажного прибора для его k -го положения на траектории, $\tilde{\mathcal{E}}_{lk}$ – соответствующие теоретические сигналы, полученные в результате решения прямой задачи; \mathbf{b} – вектор искомых параметров b_m ; \mathbf{b}^0 – вектор параметров b_m^0 , полученных на предыдущей итерации процедуры нелинейной инверсии; $\Delta b_m = b_m - b_m^0$; α_m – параметры регуляризации; v_{lk} – некоторые веса, отражающие уровень погрешности при приеме сигнала в k -м положении l -го зонда и масштаб изменения принимаемого сигнала.

Вектор искомых параметров \mathbf{b} , как уже говорилось выше, включает в себя значения удельной проводимости и относительной диэлектрической проницаемости блоков, а также варьируемые координаты границ между этими блоками (примеры параметризации будут представлены в следующих разделах).

Процедура минимизации функционала (1) строится на основе линеаризации теоретических сигналов $\tilde{\mathcal{E}}_{lk}$ по параметрам b_m в окрестности значений b_m^0 . В результате отклонения $\delta\mathcal{E}_{lk}$ между теоретическими $\tilde{\mathcal{E}}_{lk}$ и практическими \mathcal{E}_{lk} сигналами представляются в виде

$$\delta\mathcal{E}_{lk}(\mathbf{b}) \approx \delta\mathcal{E}_{lk}(\mathbf{b}^0) + \sum_{m=1}^M \frac{\partial(\delta\mathcal{E}_{lk})}{\partial b_m} \Delta b_m, \quad (2)$$

где $\frac{\partial(\delta\mathcal{E}_{lk})}{\partial b_m}$ – производные, отражающие влияние изменения m -го параметра в

l -м зонде для положения на траектории с номером k .

В результате, минимизируемый функционал (1) принимает вид:

$$\tilde{\Phi}^\alpha(\mathbf{b}) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \left(v_{lk} \delta\mathcal{E}_{lk}(\mathbf{b}^0) + v_{lk} \sum_{m=1}^M \frac{\partial(\delta\mathcal{E}_{lk})}{\partial b_m} \Delta b_m \right)^2 + \sum_{m=1}^M \alpha_m (\Delta b_m)^2. \quad (3)$$

В результате минимизации функционала (3) по Δb_m получается СЛАУ вида

$$(\mathbf{C} + \mathbf{A})\Delta\mathbf{b} = \mathbf{d}, \quad (4)$$

где \mathbf{A} – диагональная матрица с компонентами α_m на главной диагонали, а элементы матрицы \mathbf{C} и вектора правой части \mathbf{d} определяются соотношениями

$$C_{ij} = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K (v_{lk})^2 \frac{\partial(\delta\mathcal{E}_{lk})}{\partial b_i} \frac{\partial(\delta\mathcal{E}_{lk})}{\partial b_j}, \quad (5)$$

$$d_i = -\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K (v_{lk})^2 \delta\mathcal{E}_{lk}(\mathbf{b}^0) \frac{\partial(\delta\mathcal{E}_{lk})}{\partial b_i}, \quad i, j = 1 \dots M. \quad (6)$$

Используемая геометрическая параметризация восстанавливаемой геоэлектрической модели позволяет сделать выбор параметров регуляризации адаптивным и благодаря этому улучшить сходимость процедуры нелинейной инверсии.

Определение параметров регуляризации α_m на каждой итерации нелинейной инверсии осуществляется следующим образом. Сначала берутся некоторые (достаточно малые) начальные значения α_m (они промасштабированы соответствующим образом для геометрических параметров и для проводимостей) и определяются значения приращений Δb_m из решения системы (4).

Далее проверяется, чтобы каждое из значений $b_m = b_m^0 + \Delta b_m$ не выходило за границы, установленные для данного параметра. Кроме того, для геометрических параметров контролируется, чтобы значения координат левых (нижних)

границ блоков не превышали значений координат правых (верхних) и не чрезмерно приближались к ним. Для тех параметров b_m , для которых это условие нарушается, соответствующие параметры регуляризации увеличиваются в χ раз и решение системы (4) повторяется. Поскольку размер системы (4) очень мал, эта процедура практически не требует вычислительных затрат (вычислительно малозатратна), но позволяет получить новые параметры b_m , как минимизирующие линейризованный функционал $\tilde{\Phi}(\mathbf{b})$, так и удовлетворяющие наложенным на b_m ограничениям. В результате сходимость процедуры нелинейной инверсии значительно улучшается.

Как для расчета прямой задачи на очередной итерации нелинейной инверсии, так и для расчета полей влияния используется метод конечных элементов. Если электромагнитное поле в вертикальной скважине возбуждается катушкой, ось которой совпадает с осью скважины (т.е. ее ось, очевидно, перпендикулярна границам слоев и параллельна радиальным границам внутри них), то напряженность электрического поля в цилиндрических координатах $\{r, \varphi, z\}$ полностью описывается единственной ненулевой компонентой $E_\varphi(r, z)$, которая может быть найдена из решения уравнения

$$-\nabla\left(\frac{1}{\mu}\nabla E_\varphi\right) + \frac{1}{\mu r^2}E_\varphi - \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\mu}\right)\frac{E_\varphi}{r} + i\omega\sigma E_\varphi - \omega^2\varepsilon E_\varphi = -i\omega I\delta^{E_\varphi},$$

где σ – удельная электрическая проводимость, $\mu = \tilde{\mu}\mu_0$ – магнитная проницаемость, $\varepsilon = \tilde{\varepsilon}\varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость, I – величина тока в катушке, а δ^{E_φ} – дельта-функция, сосредоточенная на окружности $r = r_\delta$, $z = z_\delta$, соответствующей контуру катушки. По значениям E_φ вычисляются сигналы, измеряемые на приемных катушках.

В случае горизонтальной скважины, а также в случаях, когда возбуждающая поле катушка имеет другую ориентацию, для реализации метода конечных элементов используются более сложные математические модели, которые представлены в основном тексте диссертации.

Для повышения вычислительной эффективности решения прямой задачи и расчета полей влияния используется следующий подход. Специфика рассматриваемого класса задач такова, что для расчета всех положений прибора на траектории (а, точнее, на ее участке) удобно использовать одну и ту же конечно-элементную сетку. Если среда не изменяется, а меняется только положение источника поля, то для всех таких задач при использовании одной и той же сетки матрица конечноэлементной СЛАУ будет одна и та же, а различаться будут

только векторы правой части (в соответствии с положением источника). Тогда при использовании прямого метода решения разложение матрицы СЛАУ на треугольные сомножители можно сделать только один раз для всех положений источника, а при вычислении решения для каждого положения источника решать системы только с треугольными матрицами (являющимися сомножителями матрицы конечноэлементной СЛАУ).

Таким образом, поскольку для расчета сигналов вдоль траектории от геоэлектрической модели, полученной на текущей итерации нелинейной инверсии, так и для расчета полей влияния для каждого из параметров используется одна и та же конечноэлементная сетка, то использование прямых решателей позволяет более чем на два порядка уменьшить вычислительное время.

Заметим также, что как при расчете полей влияния, так и при расчете откликов от геоэлектрической модели, получаемой на очередной итерации, поскольку границы блоков смещаются, требуется перестроение конечноэлементной сетки, которое выполняется автоматически с учетом изменения геометрии расчетной области.

Во **второй главе** диссертационной работы представлены результаты верификации решения прямой задачи путем сравнения с полуаналитическим методом, реализованным в программе Dipole1D (К.Кей), и обратной задачи с использованием синтетических данных, полученных с использованием конечноэлементного моделирования данных индукционного каротажа для модели сложнопостроенного коллектора. Результаты верификации подтвердили правильность реализации численных процедур и вычислительную эффективность их реализации.

Третья глава диссертационной работы посвящена анализу работоспособности методов 2D-инверсии, построенных на принципе использования ячеистых структур, и анализу работоспособности методов 1D-инверсии, построенных на основе цилиндрически-слоистой модели, для сложной геоэлектрической модели. Анализ показал, что при использовании ячеистой 2D-инверсии с определенными параметрами сглаживания можно восстановить геоэлектрическую модель, в которой, в принципе, можно выделить отдельные слои с высоким контрастом сопротивления, при этом практически невозможно корректно выделить зоны проникновения и окаймляющие зоны. В целом, получаемое качество результата (соответствие параметров подобранной модели истинной) несопоставимо хуже по сравнению с результатами геометрической инверсии, и кроме того, данный способ инверсии в ячеистых структурах является намного более вычислительно затратным. Что же касается результатов 1D-инверсии, то было

получено, что даже в идеальной ситуации (когда в данных отсутствует шум) 1D-инверсия не позволяет корректно восстановить тонкослоистую геоэлектрическую модель в рамках многослойной цилиндрической модели.

В четвертой главе диссертационной работы представлено обоснование возможности применения разработанных алгоритмов и ПО для выполнения многомерной инверсии данных индукционного каротажа.

В разделе 4.1 представлены результаты анализа возможности совместного восстановления радиально- и вертикально-неоднородных распределений удельной электрической проводимости и относительной диэлектрической проницаемости.

В качестве геоэлектрической модели, для которой путем конечноэлементного моделирования были синтезированы аналоги практических данных («практические» данные), была взята типичная для сложнопостроенных коллекторов Западной Сибири модель¹, содержащая пять слоев. В трех из них: нефтенасыщенном, нефтеводонасыщенном и водонасыщенном пластах присутствует зона проникновения радиусом 0.3-0.4 м. Кроме того, в нефтеводонасыщенном пласте присутствует еще так называемая окаймляющая зона. Перекрывающие глинистый и карбонатный прослои, а также вмещающая среда являются однородными вдоль оси r . Эта модель представлена на рисунке 1 (слева). При получении «практических» данных использовались параметры каротажного прибора ВИКИЗ². Стартовая модель формируется на основе анализа каротажных диаграмм, при этом количество границ по z определяется количеством относительно резких изменений сигнала, а количество границ по r задается равным двум, исходя из описанных выше геологических представлений.

Стартовая модель и модель, полученная на 11-й (последней) итерации нелинейной инверсии, представлены на рисунке 1 (по центру и справа). Светлым пунктиром показаны границы истинной модели.

На рисунке 2 представлены графики отношений амплитуд и разностей фаз для зондов с частотами 875 кГц и 14 МГц, рассчитанные на различных итерациях нелинейной геометрической инверсии (показаны сплошными линиями) в сравнении с «практическими» (показаны точками).

Полученные результаты показали, что восстановленная геоэлектрическая модель практически полностью соответствует истинной как по значениям

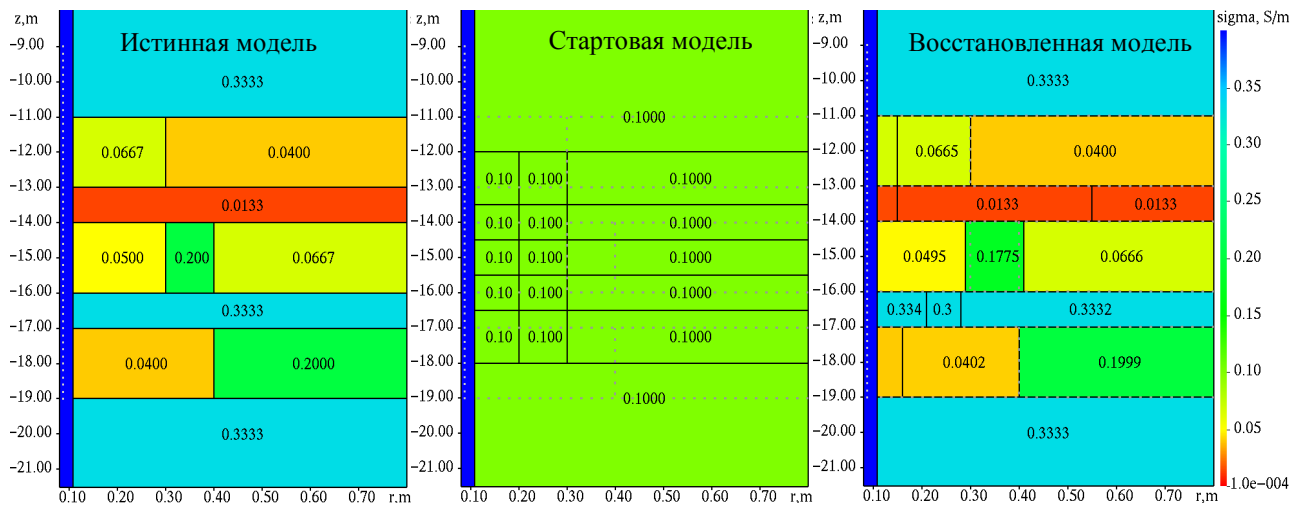
¹ Геоэлектрическая модель и ее описание представлены в работе: В.Н. Глинских, М.Н. Никитенко, М.И. Эпов. Линеаризованные решения прямых и обратных двумерных задач высокочастотного электромагнитного каротажа в проводящих средах с учетом токов смещения // Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 12, с. 1942—1951.

² Описание ВИКИЗ представлено в работе: Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство / Ред. Эпов М.И., Антонов Ю.М. – Новосибирск: НИЦ ОИГТМ СО РАН Изд-во СО РАН, 2000. – 121 с.

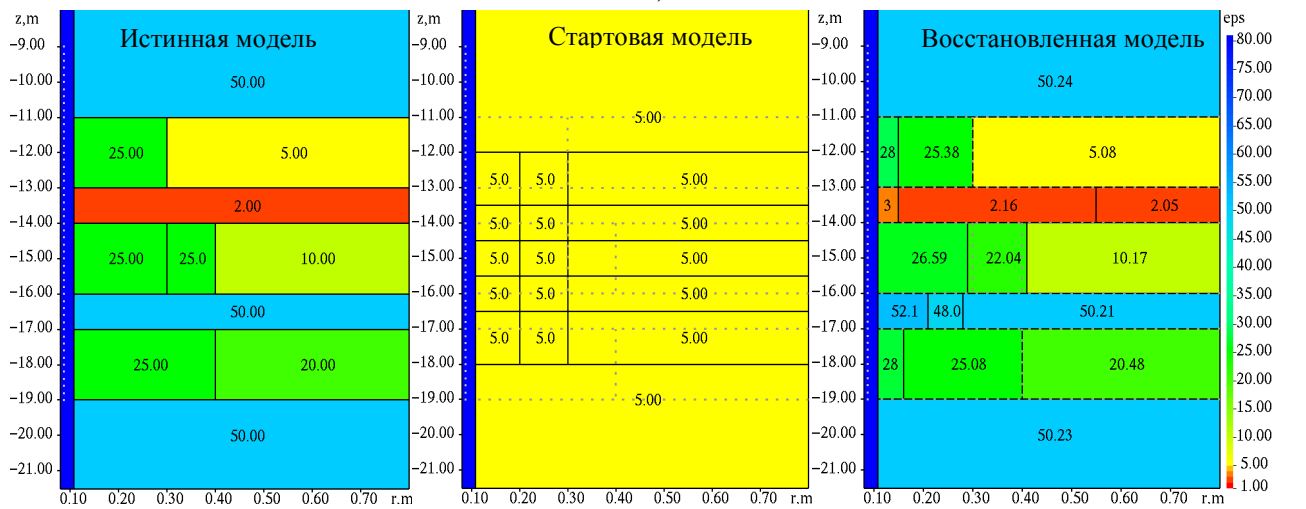
удельной электрической проводимости, так и по значениям относительной диэлектрической проницаемости. Подобранные границы (показанные черным цветом), разбивающие блоки, в которых были подобраны разные значения удельной электрической проводимости и/или относительной диэлектрической проницаемости, практически полностью совпадают с границами истинной модели. Остальные же границы были фактически подобраны как фиктивные (т.е. по результатам подбора эти границы разделяют блоки с очень близкими значениям проводимости и относительной диэлектрической проницаемости), что также соответствует истинной модели, в которой эти границы фактически отсутствуют.

В разделе 4.1 также представлены результаты инверсии, когда по данным, синтезированным для модели с неоднородной диэлектрической проницаемостью, в качестве неизвестных параметров в 2D-инверсии брались только значения проводимости и координат границ блоков, а относительная диэлектрическая проницаемость у всех блоков была зафиксирована равной $\tilde{\epsilon} = 1$. Восстановленная в результате геоэлектрическая модель проводимости была достаточно близка к истинной модели. Это свидетельствует о том, что при использовании рассматриваемого диапазона частот и ниже принципиально можно восстанавливать среду в околоскважинном пространстве только по параметру удельной электрической проводимости (даже в случае неоднородной диэлектрической проницаемости).

В разделе 4.2 представлено обоснование возможности поинтервальной обработки данных индукционного каротажа в вертикальной скважине. Возможность выполнения 2D-инверсии по участкам является важным в двух аспектах. Во-первых, хотелось бы обеспечить получение оперативных данных об околоскважинной структуре среды в процессе бурения, а, во-вторых, с уменьшением размера обрабатываемого участка существенно сокращается время на выполнение процедуры 2D-инверсии. Последнее является очень важным фактором применимости этого программного обеспечения на практике.

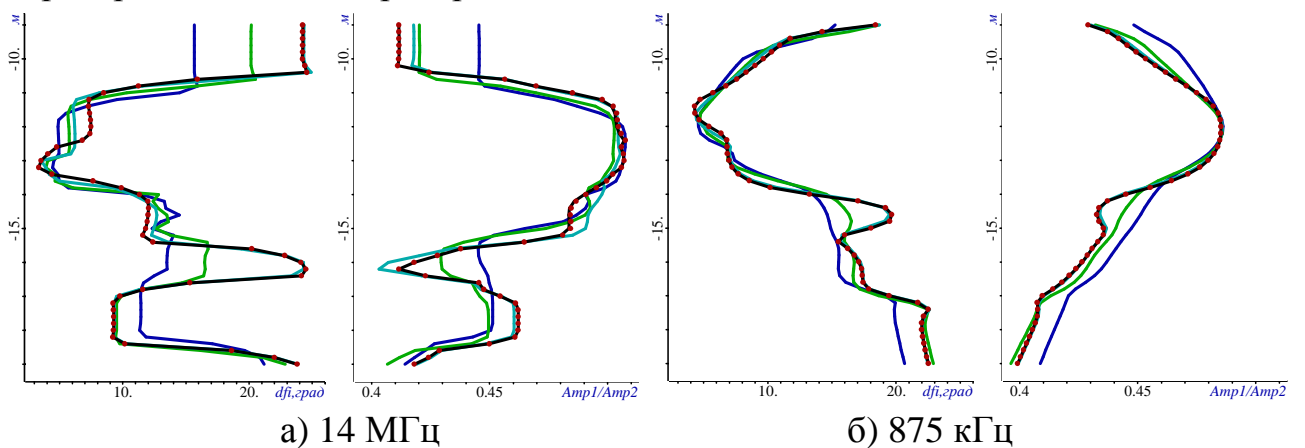


а)



б)

Рисунок 1 - Анализ возможности совместного подбора σ и $\tilde{\epsilon}$. Разрезы истинной, стартовой и восстановленной геоэлектрической моделей: а) распределение σ ; б) распределение $\tilde{\epsilon}$



а) 14 МГц

б) 875 кГц

Рисунок 2 - Графики отношений амплитуд и разностей фаз на различных итерациях (сплошные линии) в сравнении с «практическими» данными (показаны точками)

Усложненная геоэлектрическая модель, для которой были синтезированы данные для проведения этого обоснования, представлена на рисунке 3 (слева). Стартовая модель (показана на рисунке 3 в центре) формировалась аналогично тому, как это было описано выше. Поскольку в кривых появилось больше относительно резких изменений сигнала, слоев в стартовой модели было задано больше. Кроме того, с учетом того, что это участок траектории, вверх и вниз добавлено еще по одному слою.

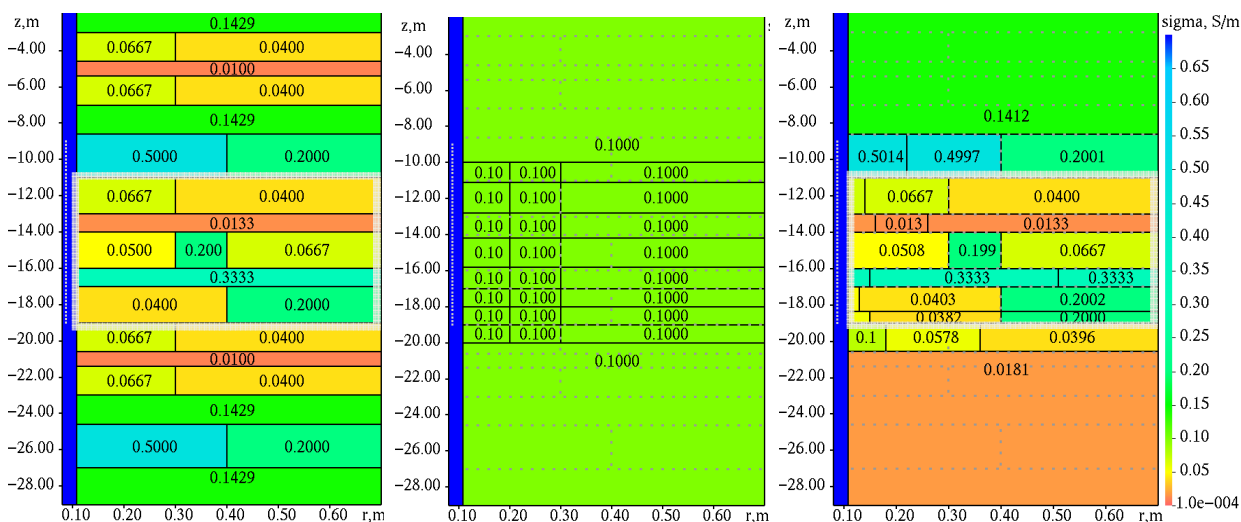
На рисунке 3 (справа) представлена геоэлектрическая модель, полученная на последней (12-й) итерации нелинейной инверсии. Белым сплошным контуром обведен блок, внутри которого, судя по полученным результатам, геоэлектрическая модель гарантированно восстанавливается с хорошей точностью по данным с участка траектории.

Необходимо также отметить, что электрофизические параметры слоев, один из которых расположен выше, а другой – ниже контура, также были восстановлены достаточно корректно. Это обеспечивает возможность дополнительного контроля корректного восстановления геоэлектрических моделей на соседних участках.

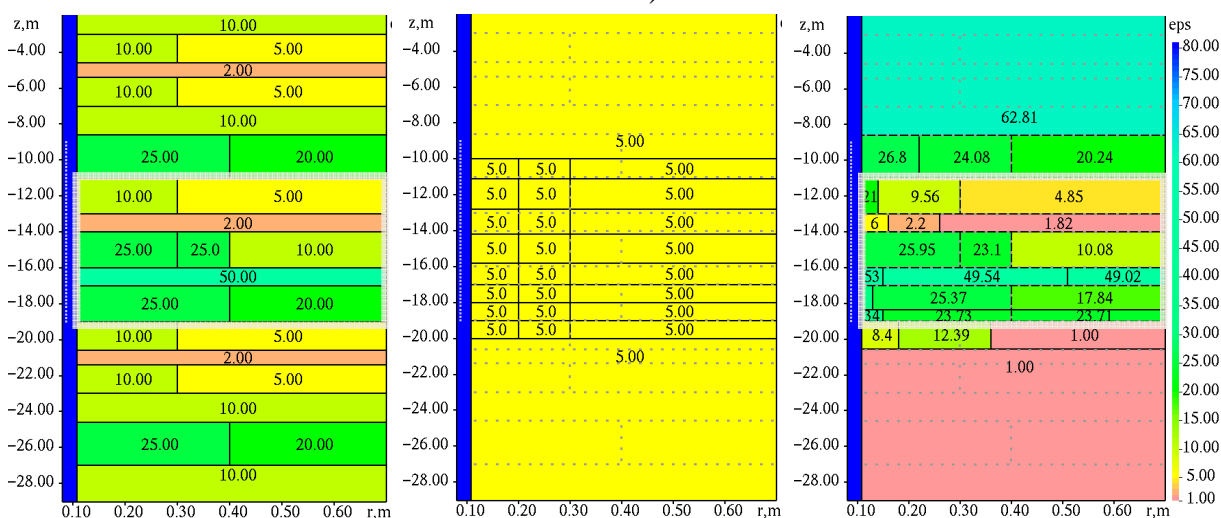
Заметим также, что в стартовой модели (даже не считая дополнительно введенных слоев) было задано больше слоев, чем в истинной модели. Полученные результаты показывают, что и в этом случае геоэлектрическая модель будет восстановлена корректно – одному слою истинной модели будет соответствовать два слоя в восстановленной модели с очень близкими электрофизическими параметрами.

В целом, полученные результаты дают обоснование возможности проведения корректной многомерной инверсии по участкам с восстановлением адекватной геоэлектрической модели околоскважинного пространства.

В разделе 4.3 исследования влияния различного уровня зашумления на результаты восстановления параметров геоэлектрической модели. Данные зашумлялись по нормальному закону, при этом максимальное отклонение для разности фаз составило 1.6 градуса, а в отношении амплитуд – 7.5 % относительно их максимального различия. На рисунке 4 (слева) представлена геоэлектрическая модель проводимости, полученная в результате инверсии, по зашумленным данным, синтезированным для модели, представленной на рисунке 1 (слева). Рассчитанные для этой модели графики разности фаз и отношения амплитуд показаны темной сплошной линией на рисунке 4 (справа). На этом же рисунке точками показаны «практические» данные, а светлой сплошной линией «практические» данные без зашумления.



a)



б)

Рисунок 3 - Анализ возможности выполнения инверсии независимо по отдельным участкам. Разрезы истинной, стартовой и восстановленной геоэлектрических моделей: а) распределение σ ; б) распределение ϵ

Было получено, что даже с довольно большим уровнем зашумления данных удельная электрическая проводимость и горизонтальные границы пластов восстановились достаточно хорошо за исключением небольшого участка в при-скважинной зоне. Значения же диэлектрической проницаемости в изучаемой области можно получить лишь оценочно как среднее по слоям, поскольку уровень шума (особенно с понижением частоты) превышает уровень влияния относительной диэлектрической проницаемости на измеряемый сигнал и чувствительность к радиальному изменению этого параметра падает.

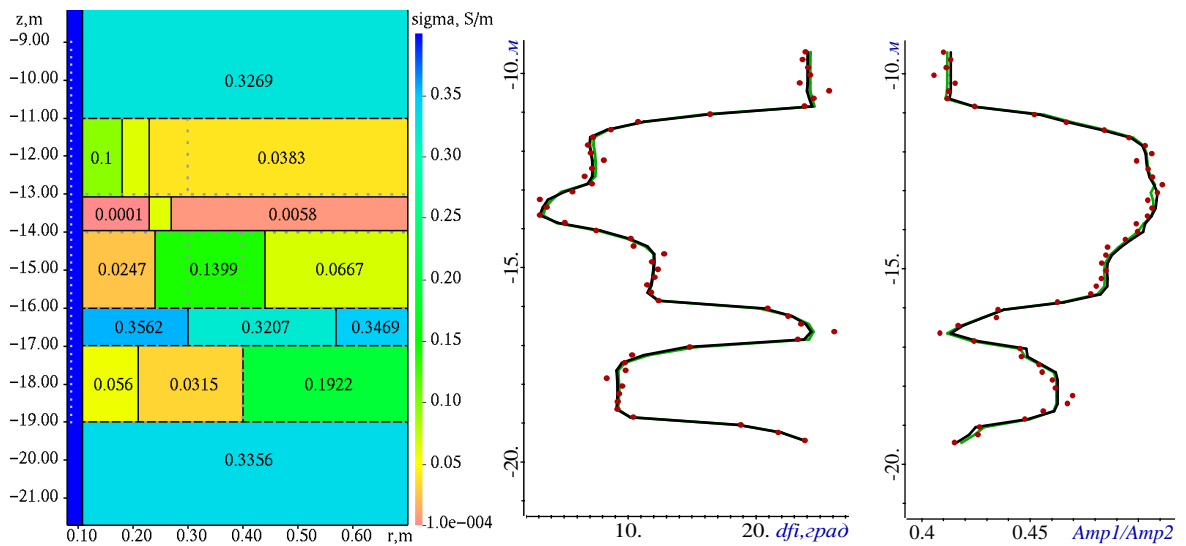


Рисунок 4 - Геоэлектрическая модель, полученная по зашумленным данным, синтезированным для модели на рисунке 1 (слева), «практические» (показаны точками) и расчетные данные для восстановленной модели (показаны темной сплошной линией). Светлой (зеленой) линией представлены незашумленные «практические» данные

В разделе 4.4 описана и обоснована методика применения геометрических многомерных нелинейных инверсий для обработки данных индукционного каротажа в горизонтальной скважине в присутствии разлома. Для пятислойной геоэлектрической модели со сдвигом слоев с помощью 3D-моделирования были синтезированы «практические» данные для горизонтальной скважины, пересекающей разлом. В результате проведенных исследований показана адекватность 1D-моделей на некотором расстоянии от разлома, при этом участок «неоднородности» довольно уверенно определяется на качественном уровне. Предложен двухэтапный алгоритм, позволяющий быстро и адекватно восстанавливать геоэлектрическую модель в районе разлома с определением его положения на траектории и с уточнением значимо влияющих горизонтальных границ соседних слоев.

В **пятой главе** представлена общая архитектура программного комплекса LogAx, описаны основные взаимосвязи модулей и формируемые структуры данных. Общая архитектура этого программного комплекса в виде схемы представлена на рисунке 5. Модули, выполняемые в цикле последовательно (но принципиально могут выполняться параллельно), оконтурены красной линией (сплошной толстой линией), модули, выполняемые в цикле параллельно – синим пунктиром (утолщенная штриховая линия), а модули, выполняемые в цикле последовательно – зеленой линией (светлой сплошной линией). Черными квадратными контурами обозначены модули, а черными сплошными линиями –

последовательность их выполнения. Синими квадратными контурами (квадраты оконтурены точками) обозначены структуры данных, а черными пунктирными линиями – их связи с модулями.

Разработан программный комплекс LogAx, который предоставляет возможность многомерной обработки данных индукционного каротажа в вертикальных скважинах с восстановлением геоэлектрических моделей околоскважинного пространства с радиально- и вертикально-неоднородным распределением электрической проводимости и диэлектрической проницаемости. В ходе выполнения многомерной нелинейной инверсии предоставляется возможность визуального контроля получаемых геоэлектрических моделей, а также значитель функционала невязки и расчетных каротажных диаграмм.

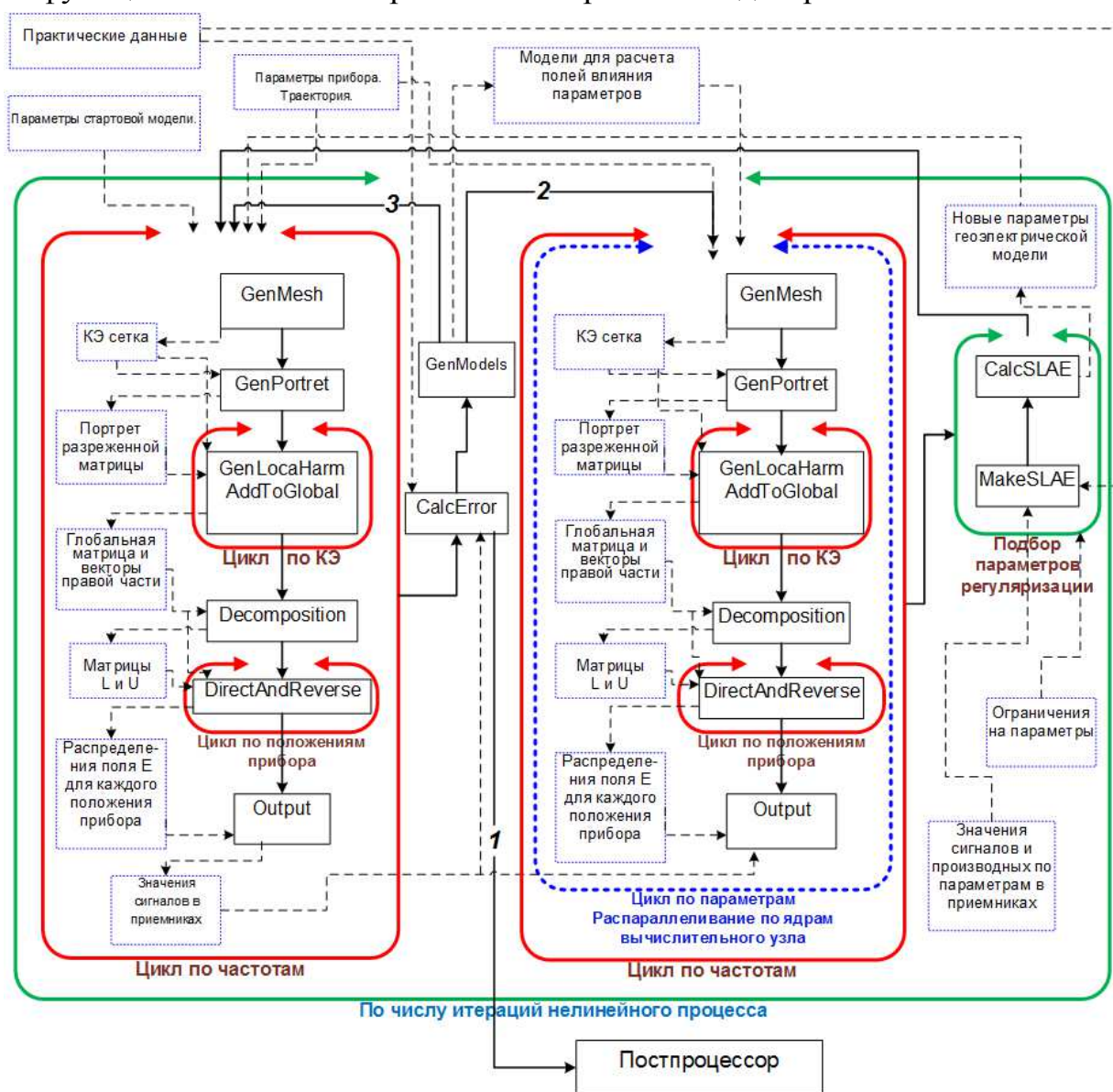


Рисунок 5 - Общая архитектура программного комплекса LogAx
В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

1. Разработан математический аппарат выполнения геометрической нелинейной многомерной инверсии для выполнения обработки данных индукционного каротажа. Расчеты сигналов для геоэлектрических моделей, получаемых на очередной итерации нелинейной инверсии, и расчеты полей влияния каждого из восстанавливаемых параметров геоэлектрической модели выполнялись с использованием конечноэлементных аппроксимаций с автоматическим перестроением сеток с учетом положения каротажного прибора и изменений границ подобластей расчетной области.

2. Разработан алгоритм конечноэлементного моделирования электромагнитных полей в задачах индукционного каротажа с группированием положений прибора в скважине и использовании прямых решателей конечноэлементных СЛАУ. Разработаны методы адаптивной регуляризации, обеспечивающие устойчивую сходимость нелинейной инверсии, основанной на использовании метода Гаусса-Ньютона при решении многомерной обратной задачи.

3. Разработанный математический аппарат и алгоритмы реализованы в программном комплексе LogAx, который предоставляет возможность многомерной обработки данных индукционного каротажа в вертикальных скважинах с восстановлением геоэлектрических моделей околоскважинного пространства с радиально- и вертикально-неоднородным распределением электрической проводимости и диэлектрической проницаемости.

4. Проведенные исследования в условиях различного уровня шума, а также неучета неоднородного распределения относительной диэлектрической проницаемости показали возможность корректного восстановления геометрических границ и значений проводимости с использованием разработанных методов многомерной геометрической инверсии.

5. Показана возможность корректного совместного восстановления радиально- и вертикально-неоднородных распределений электрической проводимости и диэлектрической проницаемости с использованием разработанного программного комплекса. При этом показано, что в условиях зашумления возможно получить лишь среднее по слоям оценочное значение диэлектрической проницаемости для приборов, работающих на частотах до 14 МГц.

6. С помощью разработанного программного комплекса обоснована методика выполнения обработки данных индукционного каротажа по участкам вертикальной скважины. Полученные вычислительные характеристики позволяют говорить о возможности многомерной обработки данных электромагнитного каротажа участка траектории длиной 100 м за 3 часа с использованием 10-ти четырехядерных персональных компьютеров с процессором Intel i7.

7. Предложена и обоснована методика применения многомерной геометрической инверсии при выполнении индукционного каротажа в горизонтальных скважинах при пересечении скважиной разлома. Показана возможность корректного определения линии разлома при обработке на одном компьютере в пределах нескольких минут.

Наиболее значимые работы, в которых **опубликованы** материалы диссертации.

Работы, опубликованные в журналах из перечня ВАК ведущих рецензируемых научных изданий для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук:

1. Персова, М.Г. Исследование возможностей технологий морской электроразведки с использованием программного обеспечения 3D-моделирования геоэлектромагнитных полей / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, **Ю.И. Кошкина** // Доклады Академии Наук Высшей Школы. — 2013. — №1(20). — С. 109-118.

2. Персова, М.Г. Решение трехмерных задач магнитотеллурики в сложных средах с использованием метода конечных элементов / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, П.А. Домников, Т.Г. Шашкова, М.В. Абрамов, **Ю.И. Кошкина** // Научный вестник НГТУ. — 2013. — №1(50) — С. 74-82

3. Персова, М.Г. Алгоритмы 3D-инверсии данных зондирований становлением поля с использованием борновских приближений / М.Г. Персова, Е.И. Симон, Ю.Г. Соловейчик, **Ю.И. Кошкина** // Научный вестник НГТУ. — 2013. — №2(51). — С. 62-72.

4. Персова, М.Г. Методы и алгоритмы конечноэлементного моделирования геоэлектромагнитных полей от произвольно ориентированных катушек / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, П.А. Домников, **Ю.И. Кошкина** // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. — 2014. — №1(22). — С. 123-134.

Работы, опубликованные в журналах, индексируемых в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Web of Science:

5. Persova, Marina G. Electromagnetic field analysis in the marine CSEM detection of homogeneous and inhomogeneous hydrocarbon 3D reservoirs / Marina G. Persova, Yuri G. Soloveichik, Petr A. Domnikov, Denis V. Vagin, **Yulia I. Koshkina** // Journal of Applied Geophysics. — 2015. — Vol. 119. — pp. 147–155.

6. Mogilatov, V. Application of the marine circular electric dipole method in high latitude Arctic regions using drifting ice floes / Vladimir Mogilatov, Mark Goldman, Marina Persova, Yury Soloveichik, **Yulia Koshkina**, Olga Trubacheva, Arkadiy Zlobinskiy // Journal of Applied Geophysics. — 2016. — Vol. 135. - pp. 17-31.

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Scopus:

7. Persova, M.G. Approach to multidimensional geometric inversion of data obtained by multi-spacing TEM soundings / M.G. Persova, Yu.G. Soloveichik, D.V. Vagin, **Yu.I. Koshkina** // 4 International Research and Application Conference on Electromagnetic Research Methods and Integrated Geophysical Data Interpretation, Geobaikal 2016; Irkutsk; Russian Federation; 22 August 2016 through 26 August 2016.

8. **Koshkina, Yu. I.** The modeling of elastic waves propagation in an axisymmetric medium / **Yu. I. Koshkina** // 2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2012 - Proceedings 6629059, pp. 89-93.

9. Персова, М.Г. Методы и программное обеспечение для выполнения 3D-инверсий данных аэроэлектроразведки во временной области = Methods and software to perform 3D-inversion of the airborne electrical prospecting data in time domain: препринт / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Е.И. Симон, **Ю.И. Кошкина**, Т.Б. Епанчинцева // Инженерная геофизика 2015. 11th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2015, Геленджик, 20–24 апр. 2015 г. – 7 с.

Работы, опубликованные в других изданиях:

10. Персова, М.Г. О новом подходе к геометрической 3D-инверсии данных электроразведки с восстановлением параметров сопротивления и поляризуемости во временной области в проводящих средах / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, **Ю.И. Кошкина**, О.С. Трубачева // Вопросы естествознания. – 2016. – №2(10). – С. 62-67.

11. Persova, M.G. Geometrical nonlinear 3D inversion of airborne time domain EM data / M.G. Persova, Yu.G. Soloveichik, **Yu.I. Koshkina**, D.V. Vagin, O.S. Trubacheva // EAGE: 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Near Surface Geoscience 2016 (First Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining, 5 - 6 September 2016), Barcelona, Spain.

12. Персова, М.Г. Группирование положений приемно-генераторной установки при использовании прямых методов решения систем конечноэлементных уравнений в задачах индукционного каротажа / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, **Ю.И. Кошкина** // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016): тр. 13 междунар. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. : в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 8. – С. 137–140.

13. Киселев, Д.С. Сравнение подходов к конечноэлементному 3d-моделированию гармонических электромагнитных полей и реализующего их программного обеспечения / Д.С. Киселев, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, **Ю.И. Кошкина**, Д.В. Вагин, Е.И. Симон // Актуальные проблемы электронного

приборостроения (АПЭП-2016) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2016) : тр. 13 междунар. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. : в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 8. – С. 86–89.

14. **Кошкина, Ю.И.** Разработка и исследование метода геометрической инверсии данных индукционного каротажа в вертикальных скважинах / **Ю.И. Кошкина**, Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Персова, И.И. Патрушев // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016): тр. 13 междунар. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. : в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 8. – С. 108–112.

15. Persova, Marina G. Software and Its New Possibilities for 3D Processing of Marine Electrical Survey Data / Marina G. Persova, Yuri G. Soloveichik, Denis V. Vagin, **Yulia I. Koshkina**, Evgenia I. Simon // Proceedings of IFOST-2016 Part 1: 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), June 1-3, 2016 Novosibirsk, Russia. – pp. 366-370;

16. Persova, Marina G. Intelligent Scheduler for Solution of Forward and Inverse Geoelectrical Problems / Marina G. Persova, Yuri G. Soloveichik, **Yulia I. Koshkina**, Olga S. Trubacheva, Denis V. Vagin, Petr A. Domnikov // Proceedings of IFOST-2016 Part 1: 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), June 1-3, 2016 Novosibirsk, Russia. – pp. 401-405;

17. Персова, М.Г. Методы и программное обеспечение 3D-обработки данных морской электроразведки / М.Г. Персова, Д.В. Вагин, П.А. Домников, **Ю.И. Кошкина**, Т.Б. Епанчинцева // Труды 12-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO / CIS Offshore 2015). 15-18 сентября 2015 года, Санкт-Петербург - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2015. – С. 49-54

18. Персова, М.Г. Методы и программное обеспечение для выполнения 3D-инверсий данных аэроэлектроразведки во временной области = Methods and software to perform 3D-inversion of the airborne electrical prospecting data in time domain : препринт / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Е.И. Симон, **Ю.И. Кошкина**, Т.Б. Епанчинцева // Инженерная геофизика 2015. 11th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2015, Геленджик, 20–24 апр. 2015 г. – 7 с.

19. **Кошкина Ю.И.** Автоматизация процесса интерпретации данных электромагнитного каротажа на основе конечноэлементного моделирования / **Ю.И. Кошкина** // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014): тр. 12 междунар. конф., Новосибирск, 2–4 окт. 2014 г. : в 7 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 6. – С. 170–173.

20. **Кошкина Ю.И.** Разработка и реализация алгоритмов 2D-инверсии данных электромагнитного каротажа / **Ю.И. Кошкина** // Российская научно-техническая конференция "Обработка информационных сигналов и математи-

ческое моделирование": материалы конференции, Новосибирск, 23-24 мая 2013. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ. – 2013. – С. 59-62.

Программы для ЭВМ, зарегистрированные в ФИПС (Роспатент):

21. **Кошкина, Ю.И.** LogAx / **Ю.И Кошкина**, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик // Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016619388 от 18.08.2016 – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2016.

22. Соловейчик, Ю.Г. GEMIR-air / Ю.Г.Соловейчик, М.Г. Персова, Д.В. Вагин, М.В. Абрамов, П.А. Домников, **Ю.И. Кошкина**, Т.Б. Епанчинцева // Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616607 от 16.06.2015 – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2015.

23. Соловейчик, Ю.Г. MeNoCa / Соловейчик Ю.Г., Персова М.Г., Вагин Д.В, Дундукова К.В., Абрамов М.В., Епанчинцева Т.Б., **Кошкина Ю.И.** // Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015661962 от 13.11.2015 – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2015.

24. Соловейчик, Ю.Г. NoCa / Соловейчик Ю.Г., Персова М.Г., Вагин Д.В., Абрамов М.В., Домников П.А., **Кошкина Ю.И.**, Епанчинцева Т.Б. // Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015660157 от 23.09.2015 – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2015.

25. Соловейчик, Ю.Г. CEDAR (Circular Electric Dipole for Arctic Research) / Соловейчик Ю.Г., Персова М.Г., Вагин Д.В., Домников П.А., Кондратьев Н.В., **Кошкина Ю.И.** // Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013619254 от 30.09.2013 – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2013.

26. Персова, М.Г. CITEM-3D – 3D-инверсии данных технологии TEM с использованием ячеистых структур (Cell-Inversion-of-Transient-ElectroMagnetic-data – 3Dimensional) / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Симон Е.И., **Кошкина Ю.И.** // Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013612529 от 28.02.2013 – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2013.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,
тел./факс (383) 346-08-57

формат 60 X 84/16 объем 1.5 п.л., тираж 100 экз.

Заказ № 452 подписано в печать 20.03.2017 г.