

На правах рукописи



Киселев Дмитрий Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГЕОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ТРЕХМЕРНЫХ СРЕД С ИСКРИВЛЕННЫМИ ГРАНИЦАМИ
ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2019

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

Научный руководитель: **Соловейчик Юрий Григорьевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Пушкарев Павел Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, профессор;

Белая Анастасия Александровна, кандидат технических наук, Акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», г. Новосибирск, лаборатория математического моделирования отдела инновационных технологий, заведующий

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

Защита диссертации состоится «24» декабря 2019г. в 14⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

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

Автореферат разослан «___» октября 2019г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.173.06



Андрей Владимирович
Фаддеенков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

При обработке данных электромагнитных зондирований все чаще используется многомерное моделирование. Инверсии, базирующиеся на 2D- или 3D-моделировании, позволяют с гораздо большей степенью адекватности восстанавливать структуру исследуемой среды. Однако такие инверсии требуют очень высоких вычислительных затрат. Поэтому на практике до самого последнего времени гораздо чаще использовались хотя и не всегда адекватные, но зато достаточно простые и малозатратные подходы, базирующиеся на расчетах электромагнитных полей в 1D-средах или на других подходах, использующих упрощенные математические модели электромагнитного поля, как, например, в работах Baasch B., Gehrmann R.A.S., Hendricks S., Hunkeler P.A., Key K., Macnae J. Но при этом многие авторы отмечают, что 1D-подходы нередко дают искаженные или неадекватные результаты, как было показано в работах Allah S. A., Cox L. H., Ley-Cooper A.Y., Ullmann A., Wilson G. A., Жданова М.С., Персовой М.Г., Соловейчика Ю.Г.

В большинстве работ, посвященных реализации и использованию многомерных инверсий для обработки данных электроразведки, используется подход, нацеленный на определение удельной проводимости в ячеистых структурах, как, например, в работах Commer M., Constable S., Cox L. H., Haber E., Hoversten G.M., Key K., Lelievre P.G., G.A. Newman, Oldenburg D.W., Schwarzbach C., Usui Y., Yin C., Yang D., Wilson G.A., Жданова М.С. Однако пока нет примеров успешного применения этих подходов для выделения не слишком контрастных целевых объектов в случаях, когда они перекрыты латерально неоднородными верхними слоями. Как правило, возможности ячеистых инверсий демонстрировались для относительно простых геоэлектрических моделей, включающих обособленные достаточно контрастные целевые объекты, отклики которых значительно проявляются в сигналах.

Следует отметить, что ячеистые инверсии требуют довольно тонкой настройки, что довольно неудобно для автоматической обработки практических данных. Если в этих инверсиях усиливать регуляризирующие добавки, то будут получены более гладкие (считающиеся более реалистичными) модели, но при этом нарастает опасность пропустить локальные целевые объекты. Если же их ослаблять, то картина проводимости будет становиться все более «пестрой», при этом резко растет количество эквивалентных решений и вполне могут быть получены ложные целевые объекты. Также такие инверсии часто требуют необоснованно мелкие ячейки конечноэлементной сетки при решении прямой задачи, что крайне негативно сказывается на вычислительной эффективности.

Как альтернатива, намечается переход к геометрическим инверсиям, рассмотренных в работах таких авторов, как Abubakar A., Dehiya R., Habashy T.M., Li M., McMillan M.S., Schwarzbach C., Singh A., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. Примеры использования геометрической инверсии для решения двумерных задач электроразведки рассматривались в работах Abubakar A., Dehiya R., Habashy T.M., Li M., Singh A., Т. Причем в работе Dehiya R., Singh A. была рассмотрена такая инверсия для модели с несколькими целевыми объектами и было показано преимущество геометрической инверсии перед ячеистой. При реализации

геометрических инверсий используются различные способы параметризации объектов. Так, в работах Abubakar A., Habashy T.M., Li M. границы искомым двумерных аномалий были описаны в виде ломаных, а в работах Dehiya R., Singh A. эти аномалии восстанавливались в виде прямоугольников. В работе McMillan M.S., Schwarzbach C. рассмотрен метод гибридной инверсии, в котором совместно с ячеистой инверсией применялась геометрическая параметризация трехмерного локального тела. Примеры использования геометрических 3D-инверсий рассмотрены также в работах Персовой М.Г., Соловейчика Ю.Г. В целом же проблема восстановления границ геологических объектов, особенно в условиях множества латеральных неоднородностей в верхних слоях среды, крайне актуальной.

Приоритетным на сегодняшний день остается также повышение требований к вычислительной эффективности методов обработки данных. А поскольку вычислительная трудоемкость многомерных инверсий определяется, в основном, трудоемкостью решения соответствующих прямых (многомерных) задач, очень важно максимально снизить затраты на их решение при создании реализующих многомерные инверсии вычислительных процедур, как, например, в работах Персовой М.Г., Соловейчика Ю.Г..

Существенное снижение вычислительных затрат при решении многомерных задач геоэлектромagnetизма с использованием численных методов позволяют получить следующие подходы. Во-первых, это подход, использующий выделение поля горизонтально-слоистой среды (так называемого нормального поля или поля вмещающей среды), рассмотренный в работах Da Silva N.V., Grayver A.V., Morgan J.V., R. Streich, Соловейчика Ю.Г., Персовой М.Г.

Во-вторых, при большом числе положений приемно-генераторной установки (задачи multisource, к которым относятся задачи морской и аэроэлектроразведки) существенно сократить вычислительные затраты можно при использовании прямых методов решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), получаемой в результате аппроксимации трехмерной задачи, как показано в работах Chung Y., Da Silva N.V., Haber E., Morgan J.V., Oldenburg D.W., Schwarzbach C., Соловейчика Ю.Г., Персовой М.Г. Для достижения этой цели предлагается выполнять разложение матрицы конечноэлементной СЛАУ один раз сразу для многих положений приемно-генераторной установки, объединенных в группу. Для еще более эффективности предлагается использовать кусочно-постоянные сетки по времени и группировать задачи во временной области на интервалах постоянного шага по времени. Тогда факторизацию матрицы достаточно будет выполнить один раз для всех временных шагов внутри группы.

В-третьих, существенно снизить вычислительные затраты можно при использовании неструктурированных сетки, как в работах Commer M., Haber E., Lelièvre P.G., Schwarzbach C., Wang W., Yin C., Персовой М.Г., Соловейчика Ю.Г., включая несогласованные сетки с локальными измельчениями ячеек, рассмотренные Bürg M., Grayver A.V., Персовой М.Г., Соловейчиком Ю.Г. В этом случае число ячеек в сетке можно сократить в несколько раз и, тем самым, уменьшить вычислительные затраты примерно на порядок в сравнении с регулярными сетками, которые использовались в работах Andersen K.K., Haber E., Oldenburg D.W., Yang D. В работах Bürg M., Grayver A.V., Haber E., Schwarzbach C. рассматривается довольно ограниченный случай неконформных сеток, когда, во-первых, ребро каждого

элемента может разбиваться только пополам, а во-вторых, используются сетки из прямоугольных параллелепипедов. Для максимального снижения вычислительных затрат и гибкости разрабатываемых методов лучшим решением будет построение конечноэлементных аппроксимаций для общего случая неконформных сеток с ячейками в виде шестигранников.

Существуют также методы построения конечноэлементной аппроксимации с - адаптивным построением сеток, рассмотренные, например, в работах Grayver A.V., Schwarzbach C., Yin C. Эти подходы требуют дополнительных вычислительных затрат, связанных с необходимостью выполнения расчетов на нескольких сетках. Поэтому также актуальной остается разработка методов построения сеток, которые для определенного класса задач позволяют сразу получить конечноэлементную сетку нужного качества.

Основной научной проблемой, решаемой в данной диссертационной работе, является проблема разработки методов многомерной инверсии данных аэро, морской электроразведки и магнитной разведки с учетом градиентометрии и соответствующего программного обеспечения (ПО).

Цели и задачи исследования.

Основной целью исследования является разработка средств описания математических моделей, численных процедур и реализующего их ПО для выполнения многомерной инверсии данных различных технологий электроразведки с учетом изгибов границ между слоями и данных магнитной аэро-разведки с учетом градиентометрии на основе геометрической инверсии и конечноэлементного моделирования. Задачами исследования являлись следующие.

- 1) Разработка методов моделирования электромагнитных полей в средах с 3D объектами сложной формы и искривленными границами латерально-неоднородных слоев
- 2) Разработка методов восстановления объектов сложной формы при инверсии данных магнитной съемки с учетом градиентометрии
- 3) Проведение сравнительного анализа различных методов аппроксимации многомерных задач электроразведки с искривленными границами латерально-неоднородных слоев
- 4) Разработка средств для задания и отображения объектов сложной формы и искривленных границ слоев в трехмерных геологических средах в рамках программного комплекса, реализующего многомерные инверсии данных аэроэлектроразведки, морской электроразведки и аэромагниторазведки с учетом градиентометрии

Научная новизна:

- 1) Предложены новые подходы к описанию математических моделей для расчета геоэлектромагнитных полей в сложных трехмерных средах с изогнутыми границами слоев и множеством различных 3D-неоднородностей
- 2) Предложены новые схемы параметризации обратных задач геоэлектроразведки, ориентированные на восстановление искривленных границ геологических слоев
- 3) Предложен новый вычислительный алгоритм многомерной инверсии данных магнитной аэро-разведки с учетом градиентометрии с использованием точечных "плавающих" источников магнитного поля

объектов сложной формы, построение сплайнов, описывающих рельефы искривленных границ геоэлектрических слоев. Разработаны и программно реализованы модуль загрузки практических данных и препроцессор для решения прямых и обратных задач различных технологий электроразведки и аэромагниторазведки с учетом градиентометрии.

Апробация работы.

Основные результаты работы были представлены и докладывались на научно-практической конференции и выставке «Инженерная и рудная геофизика 2019», (Геленджик, 2019); международной конференции и выставке Saint Petersburg 2018: innovations in geosciences – time for breakthrough (Санкт-Петербург, 2018); 13 и 14 международной научно-технической конференции АПЭП–2016, АПЭП–2018; (Новосибирск, 2016, 2018); 11 международном форуме IFOST-2016 (Новосибирск, 2016); 19 научно-практической конференции Геомодель – 2017 (EAGE) (Геленджик, 2017); международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (Новосибирск, 2016); 53 международной конференции МНСК-2015 (Новосибирск, 2015); конференция молодых ученых: Новосибирск ИВМиМГ СО РАН (Новосибирск, 2015); российской научно-технической конференции "Обработка информации и математическое моделирование" (Новосибирск, 2015); международной конференции "Advanced mathematics, computations and applications" (Новосибирск, 2014); 22nd EM Induction Workshop, (Weimar, Germany 2014).

Работа проводилась в рамках прикладных научных исследований, выполняемых при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №5.978.2017/ПЧ, название проекта: "Создание наукоемкой информационно-программной системы обработки данных для ее промышленного использования в электромагнитных технологиях геологоразведки"; проект №RFMEFI57417X0156, соглашение №14.574.21.0156 от 26.09.2017 г., название проекта: "Разработка наукоемкого программного обеспечения для обработки больших объемов данных аэрогеофизической разведки").

Публикации.

По материалам диссертационного исследования лично и в соавторстве опубликована 22 научные работы, в том числе 3 научные публикации, опубликованные в журналах, входящих в перечень ВАК, 6 научных публикаций, индексируемых в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Web of Science, 12 научных публикаций, индексируемых в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Scopus. Получено 12 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованных источников (123 наименования), приложение. Общий объем диссертации – 186 страниц, в том числе 129 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертационной работы посвящена описанию математического аппарата моделирования электромагнитных полей в задачах морской и аэроэлектроразведки, а также магнитной разведки с учетом градиентометрии. В ней представлены математические модели электромагнитных полей, возбуждаемых контролируемым источником, во временной области для задач электроразведки и магнитных полей, возбуждаемых объектами с измененной магнитной проницаемостью или собственной намагниченностью для задач аэромагниторазведки.

Разработка вычислительных схем и алгоритмов расчета электромагнитных полей в задачах геофизики на современном уровне базируется на использовании технологии выделения поля (в английской литературе «primary-secondary field approach»). Так, для расчета трехмерного электромагнитного поля, возбуждаемого некоторым источником, представим напряженность электрического поля в виде суммы двух составляющих $\vec{E}^t = \vec{E}^p + \vec{E}^s$, где \vec{E}^p – напряженность первичного электрического поля, возбуждаемого источником электромагнитного поля в горизонтально-слоистой (нормальной) среде, а \vec{E}^s – напряженность электрического поля, определяемая влиянием трехмерных неоднородностей, таких как латерально-неоднородная проводимость слоев, другие локальные неоднородности, включая поисковые объекты и геологические объекты-помехи, изменяющийся рельеф дневной поверхности, искривленные границ слоев и т.д.

Поле влияния трехмерных неоднородностей $\vec{E}^s(x, y, z, t)$ без учета токов смещения в трехмерной расчетной области Ω может быть найдено из решения векторного дифференциального уравнения для вектор-потенциала $\vec{A}^s(x, y, z, t)$:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}^s \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}^s}{\partial t} = (\sigma - \sigma^p) \vec{E}^p + \nabla \times \left(\left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu} \right) \nabla \times \vec{A}^p \right). \quad (1)$$

Вектор-потенциал \vec{A}^s связан с \vec{E}^s соотношением $\vec{E}^s = -\frac{\partial \vec{A}^s}{\partial t}$. В уравнении (1)

μ – магнитная проницаемость трехмерной среды, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, σ – удельная электрическая проводимость трехмерной среды, σ^p – удельная электрическая проводимость горизонтально-слоистой среды (для которой рассчитывается первичное поле \vec{E}^p). На удаленных границах $\partial\Omega$ трехмерной расчетной области Ω задаются нулевые касательные составляющие \vec{A}^s :

$$\vec{A}^s \times \vec{n} \Big|_{\partial\Omega} = \vec{0}, \quad (2)$$

где \vec{n} – нормаль к границе $\partial\Omega$.

Математическая модель для расчета магнитного поля в общем случае имеет вид:

$$-\text{div}(\mu \text{grad} u) + \text{div} \vec{B}^{total} = 0, \quad (3)$$

где u – магнитный потенциал, определяющий измеряемое магнитное поле в виде $\vec{B}^u = -\mu \text{grad} u$, $\vec{B}^{total} = (\mu - \mu_0) \vec{H}^E + \vec{B}^M$ – полная намагниченность,

определяемая возможным отличием магнитной проницаемости среды μ от магнитной проницаемости вакуума μ_0 и наличием собственной (остаточной) намагниченности среды $\vec{\mathbf{B}}^M$, $\vec{\mathbf{H}}^E$ – напряженность магнитного поля Земли (определяемая местоположением изучаемого участка).

Математическая модель, основанная на численном интегрировании поля точечных источников имеет вид

$$-\text{div}(\text{grad}\tilde{u}) = \text{div}\left(\frac{\mu - \mu_0}{\mu_0} \text{grad}\tilde{u}\right) - \text{div}(\mu - \mu_0)\vec{\mathbf{H}}^E - \text{div}\vec{\mathbf{B}}^M, \quad (4)$$

где $\tilde{u} = \mu_0 u$.

Если в расчетной области не встречаются техногенные объекты, то для рассматриваемого класса задач аномальные тела имеют очень слабо измененную магнитную проницаемость относительно магнитной проницаемости вакуума, и поэтому соответствующие задачи могут быть решены с помощью интегрирования точечных источников, направленных по полю Земли и расположенных внутри этих тел. Поле точечного источника с мощностью P , расположенного в начале координат и направленного вдоль оси x , определяется соотношением

$$\vec{\mathbf{B}}^P(x, y, z) = \frac{P}{4\pi r^3} \left(3 \left(\frac{x^2}{r^2} \vec{\mathbf{e}}_x + \frac{xy}{r^2} \vec{\mathbf{e}}_y + \frac{xz}{r^2} \vec{\mathbf{e}}_z \right) - \vec{\mathbf{e}}_x \right), \quad (5)$$

где r – это расстояние от центра точечного источника до точки M с координатами (x, y, z) , $\vec{\mathbf{e}}_x$, $\vec{\mathbf{e}}_y$ и $\vec{\mathbf{e}}_z$ – соответствующие орты системы координат.

Во **второй** главе диссертационной работы представлены вариационные постановки и конечноэлементные аппроксимации моделей электромагнитных полей, приведенных в первой главе. Рассмотрены принципы построения неконформных конечноэлементных сеток с шестигранными ячейками и согласования базисных функций.

Формирование согласованного базиса $\{\vec{\psi}_j^c\}$ из несогласованного $\{\vec{\psi}_k^{nc}\}$ осуществляется с помощью матрицы перехода $T = \{T_{jk}\}$, т.е. фактически базисные функции $\vec{\psi}_j^c$ определяются в виде линейных комбинаций базисных функций $\vec{\psi}_k^{nc}$ в виде $\vec{\psi}_j^c = \sum_{k=1}^n T_{jk} \vec{\psi}_k^{nc}$. Тогда элементы матрицы жесткости могут быть вычислены следующим образом:

$$G_{ij} = \int_{\Omega} \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{\psi}_i^c) \cdot (\nabla \times \vec{\psi}_j^c) d\Omega = \sum_e \sum_k \sum_m T_{ik} T_{jm} \int_{\Omega_e} \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{\psi}_k^{nc}) \cdot (\nabla \times \vec{\psi}_m^{nc}) d\Omega. \quad (6)$$

То есть глобальная матрица жесткости может быть собрана из стандартных локальных матриц жесткости конечных элементов Ω_e . Аналогично вычисляются и собираются матрицы массы.

Важной проблемой, связанной с построением конечноэлементных сеток, является учет искривлений границ слоев. Он может быть реализован разными способами.

Одним из способов является использование сеток с конечными элементами в виде шестигранников с наклонными гранями. Однако важнейшим аспектом, обеспечивающим вычислительную эффективность сеточных методов при решении задач геоэлектромagnetизма, является использование технологии выделения поля нормальной среды. При этом повышение вычислительной эффективности за счет выделения поля тем больше, чем ближе (по электромагнитному отклику от нее) среда, выбранная в качестве нормальной, к реальной трехмерной среде.

Использование шестигранных элементов с наклонными гранями создает трудности использования в качестве нормальной горизонтально-слоистой среды, поскольку ее слои могут пересекать наклонные элементы сетки, и аномальное поле внутри них будет разрывным. В этом случае возникает вопрос корректности получаемой конечноэлементной аппроксимации. В качестве нормальной среды можно выбрать, например, проводящее полупространство, но в этом случае нормальная среда будет далека от реальной и преимущества, достигаемые за счет выделения поля, значительно уменьшатся.

Другой способ учета искривлений слоев заключается в использовании "ступенчатой" аппроксимации изогнутых границ с регулируемой подробностью в зависимости от удаления от источника электромагнитного поля. При использовании такого способа учета искривлений в конечноэлементной сетке не возникает особых трудностей при реализации технологии выделения поля.

На рисунке 1 показаны сечения неконформных конечноэлементных сеток при "ступенчатой" аппроксимации изогнутых границ и использовании шестигранных ячеек с наклонными границами.

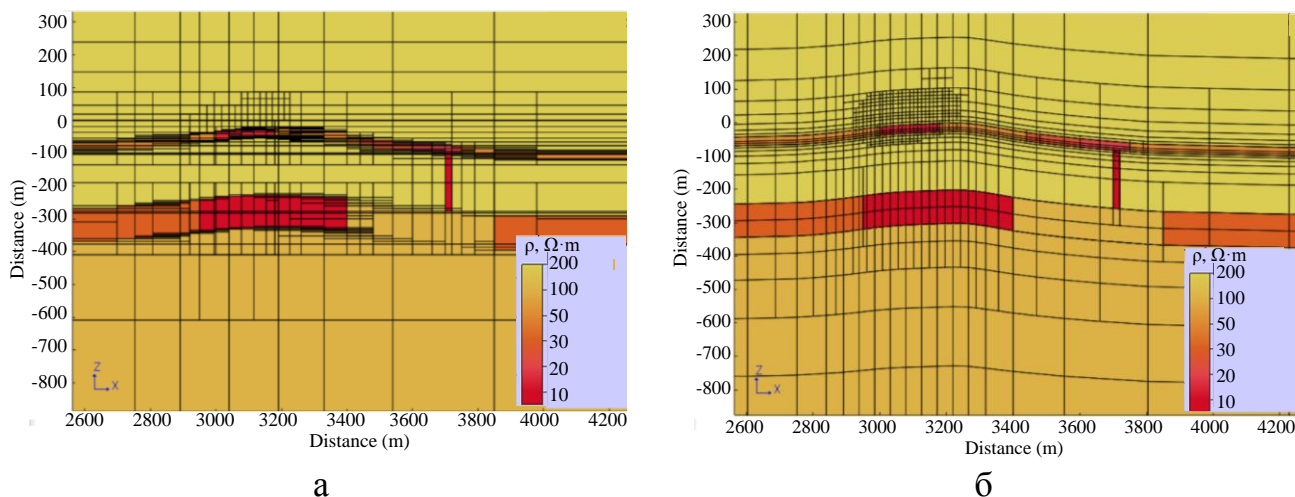


Рисунок 1 – Сечения сеток при "ступенчатой" аппроксимации (а) и при использовании шестигранных ячеек (б)

Третья глава диссертационной работы посвящена описанию математического аппарата многомерной инверсии данных морской и аэроэлектроразведки и магнитной разведки с учетом градиентометрии. В этой главе представлены принципы параметризации геоэлектрической модели, определение параметров регуляризации, а также обоснование выбора модели многомерной инверсии данных магнитной разведки с учетом градиентометрии.

Процедура решения трехмерных обратных задач геоэлектромагнетизма основана на принципе геометрических инверсий. В данном случае этот термин, по сути, определяет параметризацию восстанавливаемой по данным съемки геологической модели.

Геоэлектрическая модель может быть представлена набором слоев, каждый из которых разбивается на ряды блоков. В качестве искоемых параметров в этом случае выступает проводимость внутри блоков, координаты «вертикальных» границ между блоками и координаты «горизонтальных» границ между рядами блоков. Также в вектор искоемых параметров включаются параметры для восстановления искривленных границ геоэлектрических слоев. В этом случае задается начальная форма поверхности и вводится несколько опорных точек, расположенных в плане по некоторой регулярной сетке, с помощью которых форма поверхности будет изменяться.

Компоненты вектора параметров, описывающих геоэлектрическую модель, ищутся путем минимизации следующего функционала

$$\Phi^{\alpha\gamma}(\mathbf{b}) = \sum_{i=1}^K \sum_{l=1}^L (\omega_{il} \delta \mathcal{E}_{il}(\mathbf{b}))^2 + \sum_{m=1}^M \alpha_m (b_m - \bar{b}_m)^2 + \sum_{m=1}^M \gamma_m \sum_{s \in I_m} (b_m - b_s)^2 \rightarrow \min_{b_m}, \quad (7)$$

где K – количество положений приемно-генераторной установки, L – количество временных каналов, $\delta \mathcal{E}_{il}(\mathbf{b})$ – разность теоретических \mathcal{E}_{il} и измеренных $\tilde{\mathcal{E}}_{il}$ значений сигналов в приемнике для i -го положения приемно-генераторной установки в l -й момент времени, M – количество искоемых параметров, \bar{b}_m – значение m -го параметра на предыдущей итерации, I_m – множество номеров параметров, к которым выдвигаются требования поиска близких значений (плавного изменения проводимости или какой-либо границы). При минимизации учитываются ограничения на геоэлектрические параметры, не допускающие вырождение модели.

При решении обратных задач магниторазведки в общем случае восстанавливаемыми параметрами могут быть координаты границ локальных объектов (либо их положение при фиксированном размере) и вектор намагниченности. В последнем случае возможны два варианта инверсии: с восстановлением 3-х компонент вектора намагниченности или с восстановлением модуля вектора намагниченности, когда вектор намагниченности имеет некоторое выбранное направление.

Указанные восстанавливаемые параметры аномальных магнитных объектов определяются на основании минимизации функционала

$$\Phi^{\alpha}(\mathbf{b}) = \sum_{l=1}^L \left((\omega_l^2 \delta I_l^2(\mathbf{b}))^2 + (\omega_l^3 \delta I_l^3(\mathbf{b}))^2 \right) + \sum_{m=1}^M \alpha_m (b_m - \bar{b}_m)^2, \quad (8)$$

где $\delta I_l^k = \tilde{I}_l^k - I_l^k$, I_l^k – значения инвариантов для l -ого приемника, \tilde{I}_l^k – теоретические значения инвариантов тензора магнитного поля в приемнике, полученные в результате решения прямой задачи, b_m – компоненты вектора искоемых параметров \mathbf{b} , \bar{b}_m компоненты вектора $\bar{\mathbf{b}}$ некоторых фиксированных параметров (определяющих регуляризирующую добавку в функционале (8)), α_m –

параметры регуляризации, ω_l^k – некоторые веса, отражающие уровень погрешности при приеме сигнала в l -м приемнике и масштаб изменения принимаемого сигнала.

В четвертой главе диссертационной работы представлены результаты численных экспериментов, среди которых верификация решения прямых задач, анализ влияния кривизны дневной поверхности и латерально переменной толщины слоев, сравнение способов аппроксимации искривлений, анализ эффективности методов группирования по положениям приемно-генераторной установки и во временной области, сравнение производительности разработанного ПО с реализациями других авторов, анализ работоспособности алгоритмов многомерной инверсии данных аэро и морской электроразведки и магниторазведки с учетом градиентометрии на моделях, имитирующих реальные условия и включающих осложняющие факторы.

Проведенный анализ учета влияния рельефа путем коррекции высоты приемно-генераторной установки в задачах аэроэлектроразведки показал, что во многих ситуациях на практике он может оказаться некорректным вплоть до того, что не позволит решить поставленную геологическую задачу поиска целевых объектов: пропустить целевые объекты или обнаружить ложные.

Результаты моделирования электромагнитных полей в средах с искривленными границами слоев при различных способах учета кривизны показали, что при перепадах высот менее 100м при движении на 1км по латерали аппроксимация "ступеньками" более эффективна за счет выделения поля, но при достижении перепадов высот в 100м и более становится предпочтительно использовать аппроксимацию с шестигранными ячейками.

Проведенный анализ эффективности методов группирования задач по положениям источника и во временной области и сравнения результатов с опубликованными другими авторами показали, что при решении прямых трехмерных задач применение неконформных сеток с шестигранными ячейками совместно с пространственно-временным группированием подзадач и использованием прямых решателей СЛАУ позволяет сократить вычислительные затраты более чем на порядок за счет группирования подзадач и почти на порядок за счет использования нерегулярных (неконформных) сеток в сравнении с регулярными.

Анализ возможности восстановления с помощью разработанных методов 3D-инверсии данных аэроэлектроразведки целевых объектов, перекрытых латерально неоднородными слоями с изогнутыми границами, показал следующее.

На рисунке 2 приведены изображения в разрезах истинной геоэлектрической модели, по которой были построены синтетические данные для выполнения 3D-инверсии. На рисунке 3 приведены изображения полученной в результате инверсии восстановленной модели в тех же разрезах. На рисунке 4 представлены электрограммы, рассчитанные для геоэлектрических моделей, полученных после первой итерации 3D-инверсии (светлые линии) и после последней, девятой итерации (темные линии). Точками на этом рисунке показаны «практические» (синтезированные) кривые.

Отклонение практических и расчетных данных (сигналов в приемниках) в среднем не превысило 5%. При инверсии аэроданных центры истинного и восстановленного целевого объектов практически совпали.

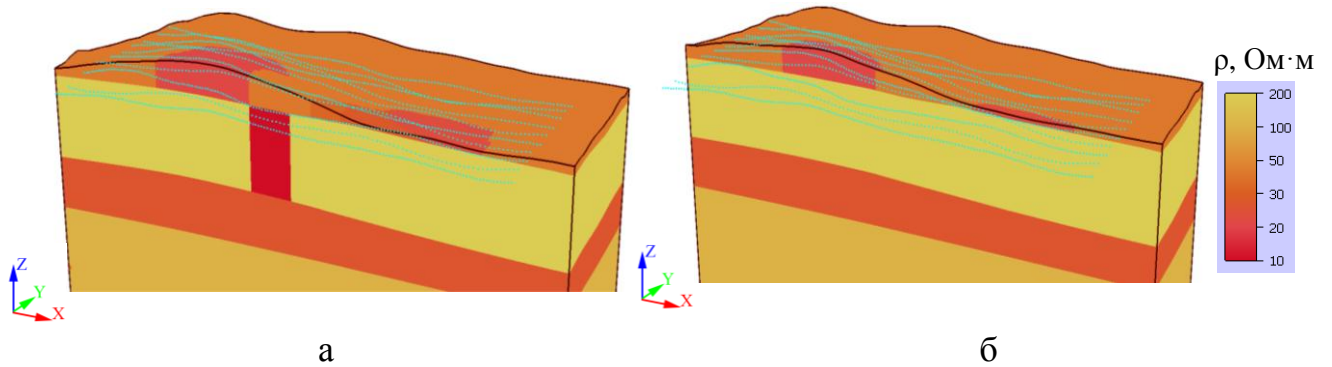


Рисунок 2 – Трехмерный вид истинной геоэлектрической модели, рассеченной вдоль плоскостей $y=-4150$ м (а), $y=-4050$ м (б)

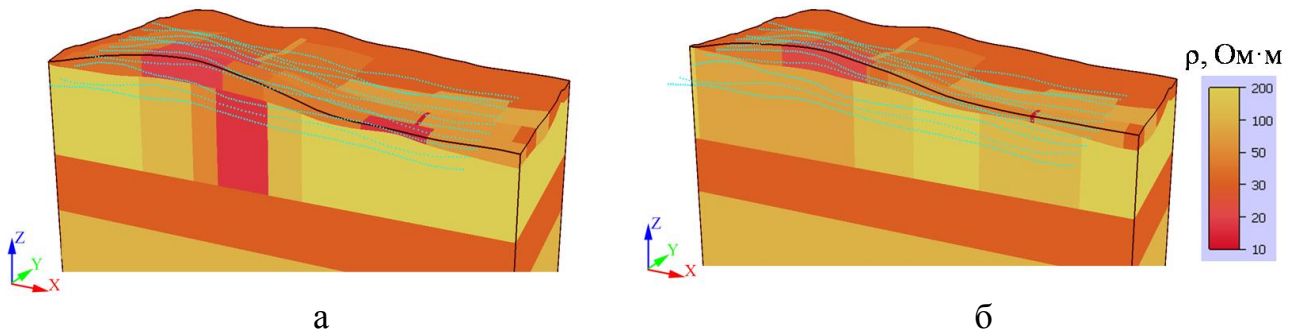


Рисунок 3 – Трехмерный вид полученной после 9-й итерации геоэлектрической модели, рассеченной вдоль плоскостей $y=-4150$ м (а), $y=-4050$ м (б)

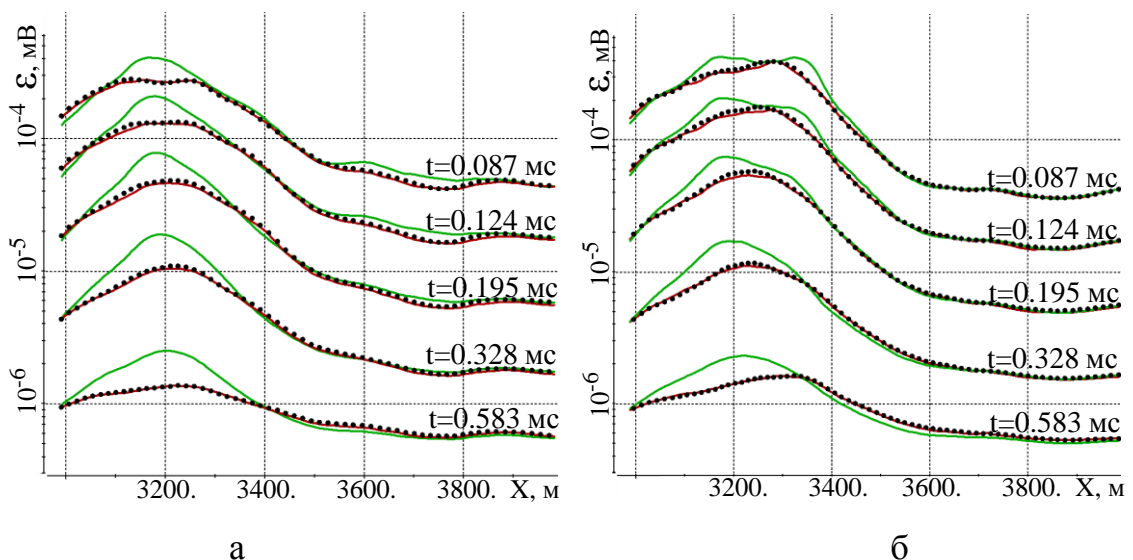


Рисунок 4 – Электрограммы для пяти временных каналов вдоль профиля $y=-4150$ м (а) и $y=-4050$ м (б), для истинной модели (точки), и полученные после первой (светлые линии) и девятой (темные линии) итераций 3D-инверсии

Проведен анализ возможности восстановления целевых объектов с помощью точечных источников в ходе 3D-инверсии данных магнитной съемки с учетом градиентометрии. Кривые приведенного второго и третьего инвариантов вдоль

профилей, полученные в результате инверсии, изображены на рисунках 5а и 5б, соответственно. Вид истинной модели, а также моделей, полученных в результате 3D-инверсии, показан на рисунке 6.

Отклонение расчетных и практических сигналов в приемниках в среднем не превысило 3%. Основные магнитные аномалии выделены и оконтурены с учетом различающихся в них направления вектора собственной намагниченности.

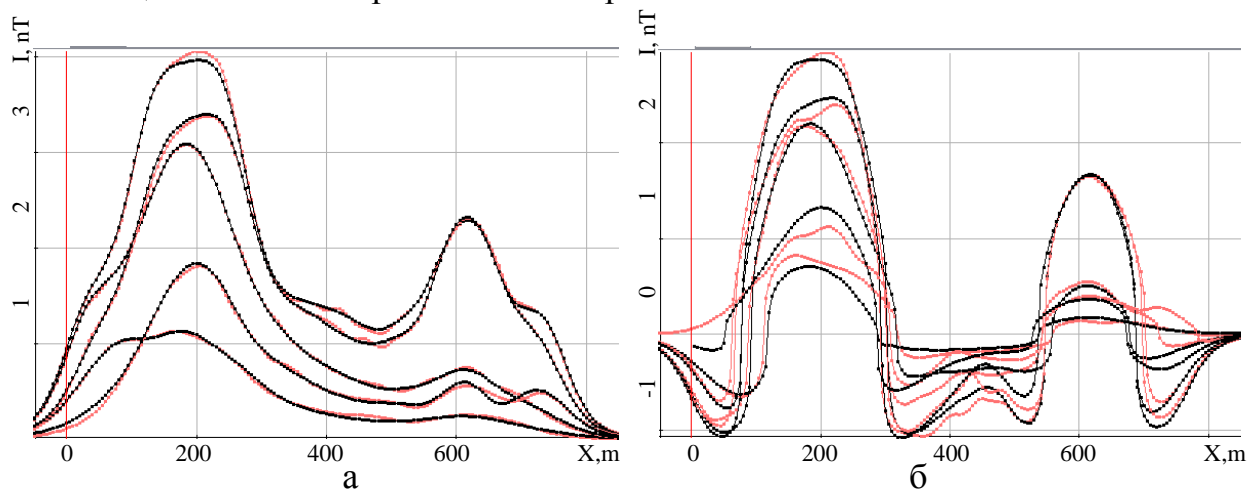


Рисунок 5 – Расчетные (светлые) кривые приведенного второго инварианта (а) и третьего инварианта (б) в сравнении с «практическими» кривыми (темные)

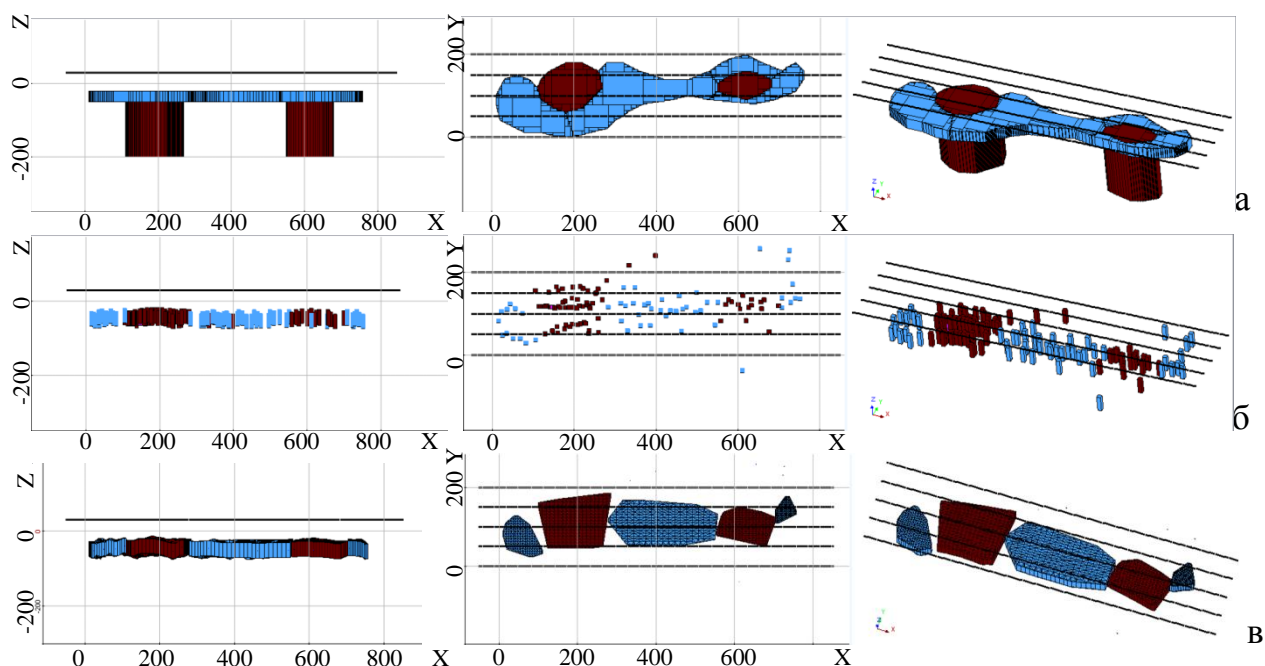


Рисунок 6 – Изображение истинной модели (а), модели точечных источников (б), построенных по точечным источникам тел (в) в разрезе, плане и перспективе

В **пятой главе** представлена общая архитектура программного комплекса, изображенная на рисунке 7, описаны основные используемые средства, приведены алгоритмические особенности некоторых программных средств комплекса, а также описание графического интерфейса. Схема взаимодействия основных логических частей интерфейса приведена на рисунке 8.

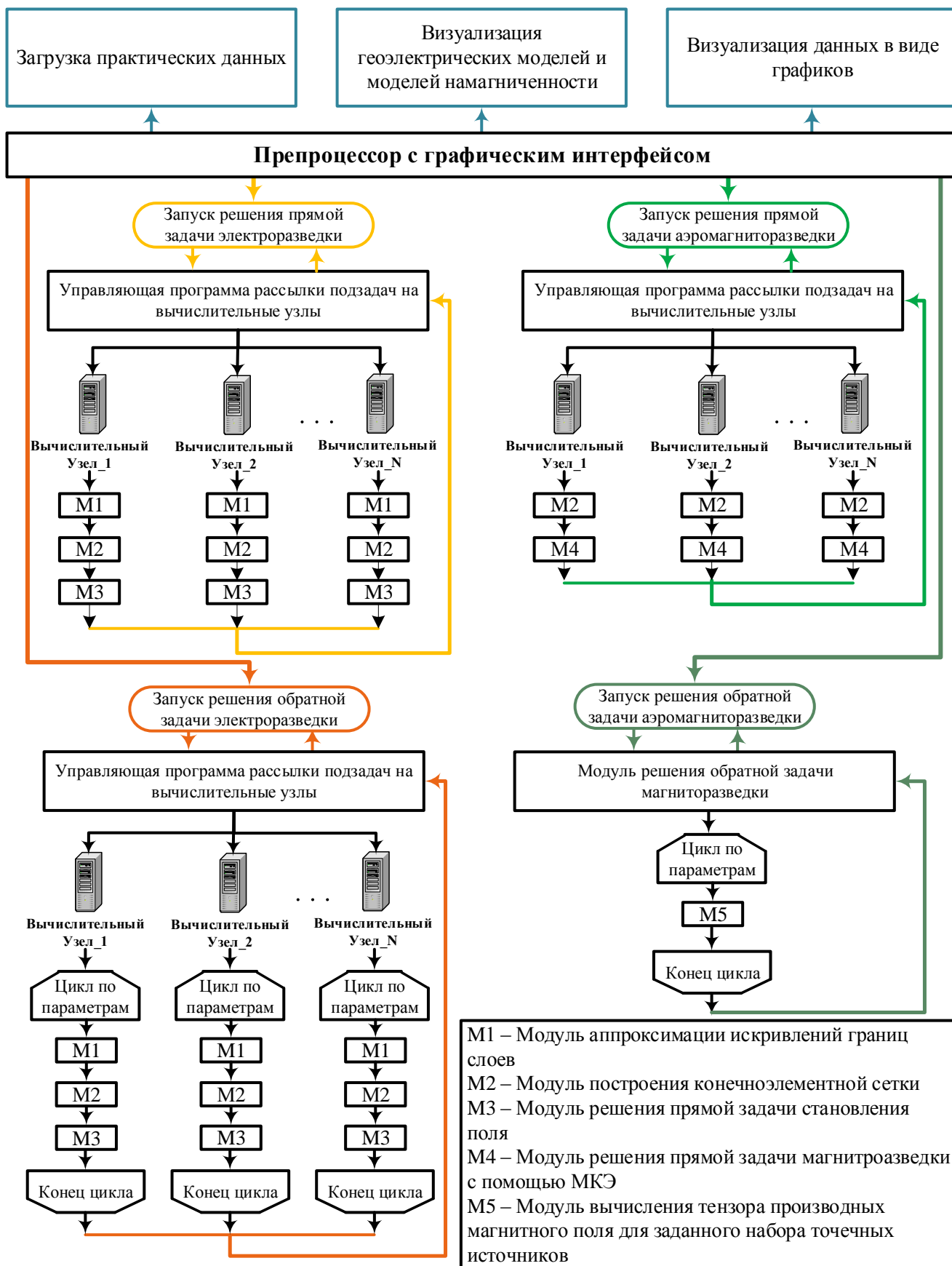


Рисунок 7 – Общая архитектура программного комплекса 3D-обработки данных электро- и магниторазведки

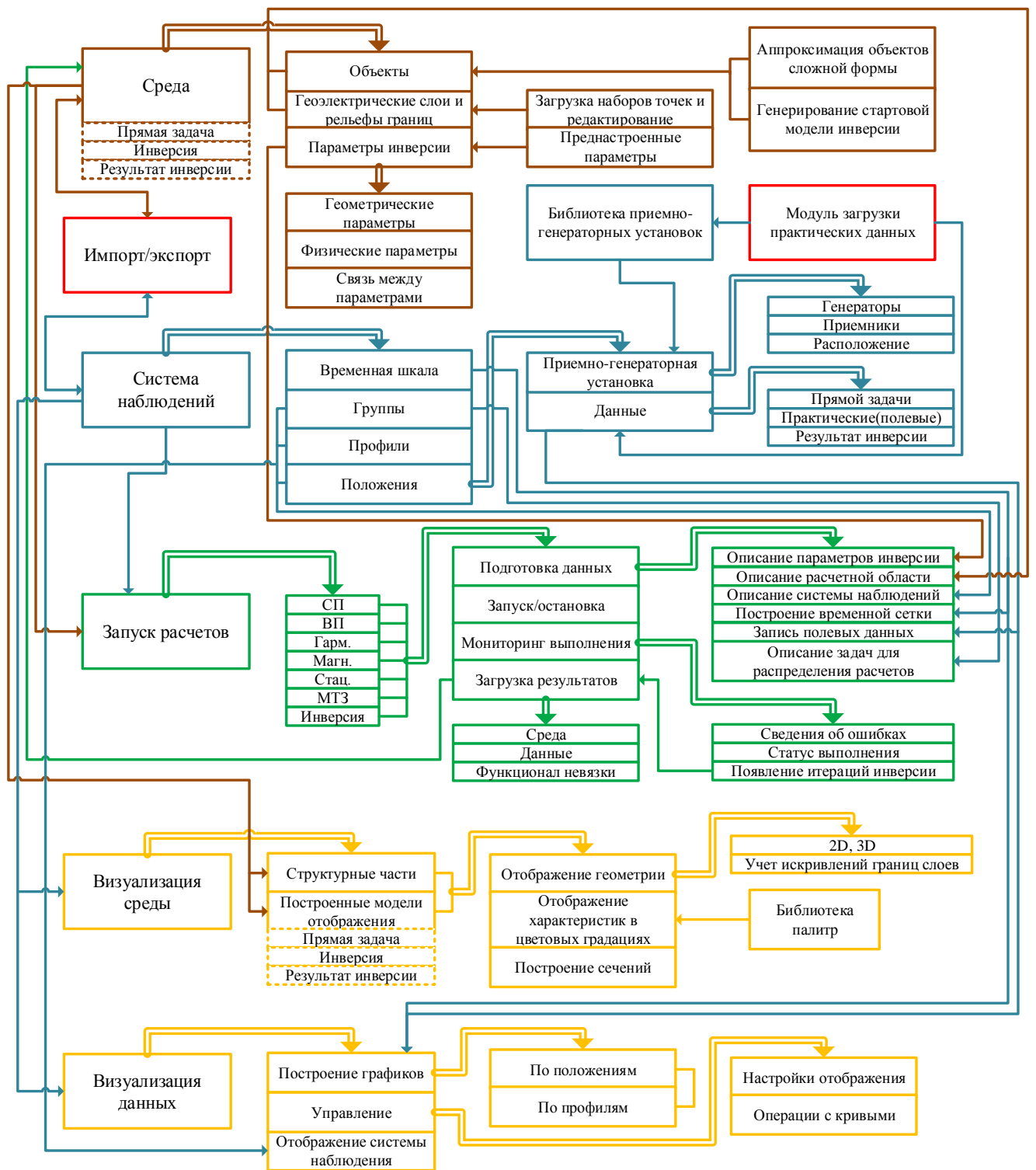


Рисунок 8 - Взаимодействие основных логических частей препроцессора

В разделах 5.1, 5.2 приведены общие сведения о разработанном ПО и программных средствах, использованных в ходе разработки. Графический интерфейс (рис. 9) был разработан средствами WPF (Windows Presentation Foundation). Выбор этой технологии обусловлен многими факторами. Так, например весь программный комплекс предполагалось применять под ОС семейства Windows. Соответственно, для разработки была выбрана платформа .NET и инструментарий WPF, известный как один из наиболее богатых и гибких, позволяющий быстро создавать сложные

элементы работы с данными. Совместимость WPF с WinForms позволяет использовать традиционные элементы управления WinForms. Язык разработки – С#.

Для реализации интерактивной графики были использованы средства OpenGL. Для достижения этой цели стандартные функции OpenGL на С++ были экспортированы в dll библиотеку и подключены к графическому интерфейсу. Язык разработки – С++, С#.

Разделы 5.3 и 5.4 посвящены методам и алгоритмам описания объектов сложной формы. Такие объекты задаются с помощью контуров - замкнутых ломаных линий. Для включения таких объектов в модель выполняется их автоматическая аппроксимация параллелепипедами объектами с заданной дискретой. Построенные аппроксимирующие объекты заносятся в модель и встраиваются в расчетную конечноэлементную сетку. Для уменьшения плотности сетки построение выполняется таким образом, чтобы объектов было как можно меньше, а размер их был как можно больше. Поэтому большая часть контура описывается крупными объектами, а при приближении к границам, размер объектов уменьшается для того чтобы точнее описать границу. Пример построенных аппроксимирующих объектов в окне интерфейса приведен на рисунке 9.

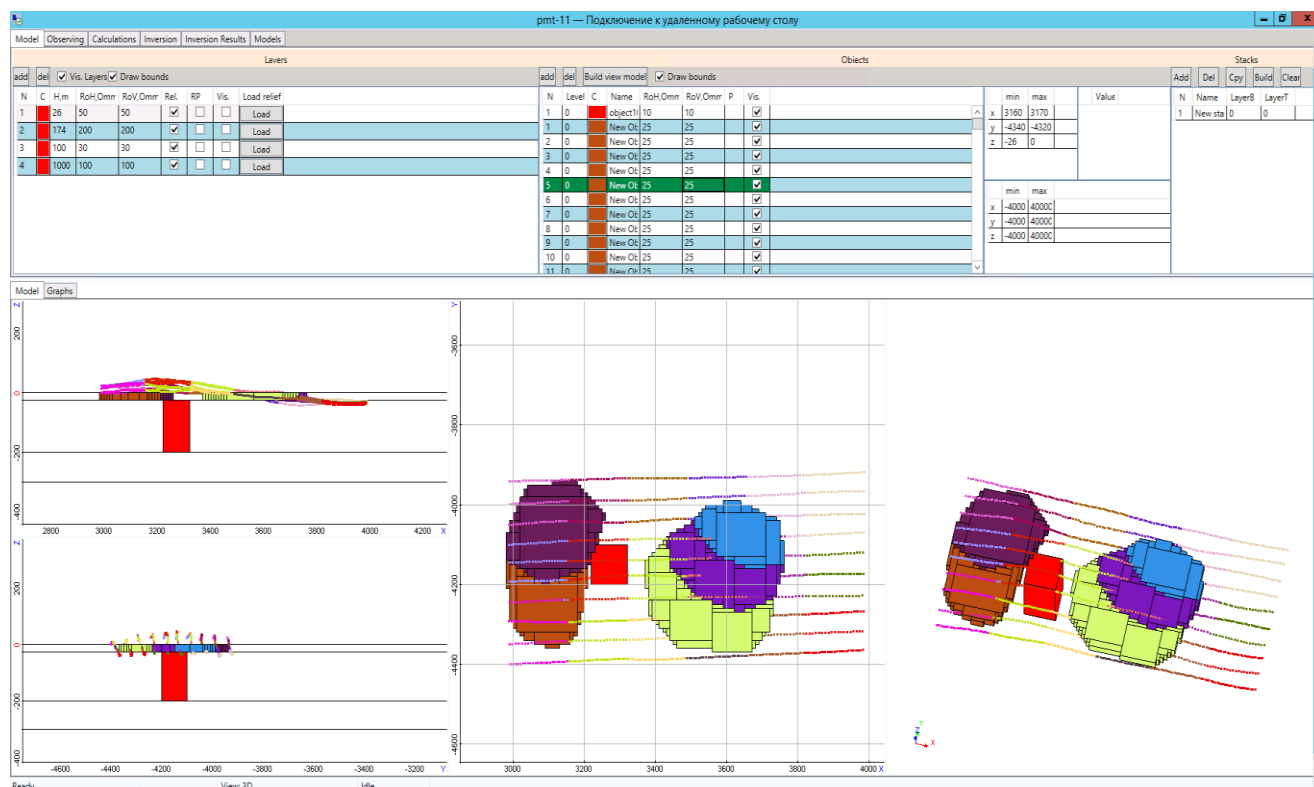


Рисунок 9 – Вид графического интерфейса

Объекты могут иметь сложную форму не только в плане, но и в разрезе за счет искривления границ между слоями. Как говорилось ранее, было реализовано два способа аппроксимации кривизны границ слоев – "ступенчатая" с использованием прямоугольных параллелепипедальных конечноэлементных (КЭ) сеток и криволинейная с использованием шестигранных КЭ сеток.

Реализация первого способа основана на построении дополнительных параллелепипедальных объектов, которые достраивают слои до нужной формы с

заданной дискретизацией. Дискретизация для каждой границы задается с помощью прямоугольной двумерной несогласованной сетки в координатах XY, ячейки которой меняют размер в зависимости от густоты трехмерной КЭ сетки в области соответствующей границы.

Объекты, заданные оператором, деформируются в соответствии с кривизной границ, при этом они разбиваются в плоскости XY с помощью вышеупомянутых двумерных сеток и выстраиваются по координате Z пропорционально границам исходных горизонтальных слоев среди заданных криволинейных границ.

В разделе 5.5 приведены особенности построения сглаживающих сплайнов, используемых при аппроксимации искривлений границ между геоэлектрическими слоями. В разделе 5.6 описаны возможности разработанного для ПК графического интерфейса.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы.

1. Разработаны алгоритмы описания трехмерной расчетной области с объектами сложной формы для автоматической генерации конечноэлементных сеток в задачах с большим числом положений источников поля.

2. Разработаны методы инверсии данных аэромагниторазведки с учетом градиентометрии. Выполнены инверсии данных с восстановлением целевых объектов для моделей, включающих целевые объекты и объекты-помехи со сложной геометрией. Показана возможность восстановления намагниченных трубок в окружении намагниченных объектов-помех.

3. Разработаны алгоритмы, реализующие различные способы аппроксимации искривлений границ геоэлектрических слоев. Сравнительный анализ их вычислительной эффективности показал следующее. При перепадах высот менее 100 м при движении на 1 км по латерали аппроксимация искривлений границ "ступеньками" более эффективна за счет выделения поля в горизонтально-слоистой среде. На модели без искривлений "ступенчатая" аппроксимация в 5-10 раз быстрее. При перепадах же в 100 м на 1 км по латерали время решения становится почти одинаковым, и "ступенчатая" аппроксимация теряет преимущество. При более сильных перепадах высот вычислительные преимущества имеет аппроксимация с шестигранными ячейками.

4. Выполнен анализ влияния искривлений границ геоэлектрических слоев на сигналы в приемниках, по результатам которого обоснована необходимость учета рельефа Земли и искривлений границ между геоэлектрическими слоями при моделировании электромагнитного поля в задачах аэроэлектроразведки при перепадах высот более 30 м при движении на 1 км по латерали. При таких перепадах высот и неучете кривизны слоев ошибка в рассчитанных сигналах может достигать 30%.

5. Рассмотрены способы повышения вычислительной эффективности математического моделирования электромагнитных полей в задачах с большим количеством положений источника за счет группирования задач по положениям источников и по наборам времен. Показано, что при решении прямых трехмерных задач электроразведки в сложных областях с изогнутыми латерально неоднородными слоями применение неконформных сеток с шестигранными ячейками совместно с пространственно-временным группированием подзадач и использованием прямых решателей СЛАУ позволяет сократить вычислительные затраты практически на два

порядка – более чем на порядок за счет группирования подзадач и почти на порядок за счет использования нерегулярных (неконформных) сеток в сравнении с регулярными.

6. Показана возможность корректного восстановления целевых объектов совместно со сложной геометрией изогнутых границ между геоэлектрическими латерально неоднородными слоями в задачах аэро и морской электроразведки с использованием разработанных программных средств. Отклонение расчетных данных для моделей, полученных в ходе многомерной инверсии, от практических, по которым выполнялась инверсия, в среднем не превышало 5%.

7. Показана возможность корректного восстановления целевых объектов сложной формы в задачах аэромагниторазведки с использованием разработанных программных средств. Процентное отклонение практических и расчетных сигналов в приемниках не превышало 3%. Показана возможность выявления техногенных объектов-помех и объектов даечной формы в процессе инверсии.

8. Разработаны программные средства для задания и отображения объектов сложной формы и искривленных границ слоев трехмерных геологических сред. Эти средства разрабатывались в рамках программного комплекса, реализующего многомерные инверсии данных аэроэлектроразведки, морской электроразведки и магнитной аэроэлектроразведки с учетом градиентометрии, и использовались при решении различных практических задач.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ 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. Kondratyev N.V., **Kiselev D.S.**, Vagin D.V., Persova M.G., Soloveichik Yu.G. A study of equivalence of influences of varying thickness and conductivity in 3D-processing of airborne electromagnetic data in complex media. Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university, 2018, no. 4 (73), pp. 59–78. doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-59-78. [Исследование эквивалентности влияний переменной толщины и проводимости при трехмерной обработке данных аэроэлектроразведки в сложных средах / Н.В. Кондратьев, **Д.С. Киселев**, Д.В. Вагин, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 4 (73). – С. 59–78. – Яз. англ. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-59-78.]
2. О параметризации геоэлектрической модели в задачах аэроэлектроразведки в средах с рельефом и слоями переменной толщины / **Д.С. Киселев**, Н.В. Кондратьев, Ю.И. Кошкина, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2018. – № 4 (41). – С. 77-92. – DOI: 10.17212/1727-2769-2018-4-77-92
3. Применение неконформных сеток с шестигранными ячейками для 3D-моделирования технологий аэроэлектроразведки = Application of non-conforming meshes with hexahedral cells for 3D modelling of airborne electromagnetic technologies / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, **Д.С. Киселев**, Н.В. Кондратьев, Ю.И. Кошкина, О.С. Трубачева // Доклады Академии наук высшей

школы Российской Федерации. – 2018. – № 1 (38). – С. 64–79. – DOI: 10.17212/1727-2769-2018-1-64-79.

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

4. Modeling of aerodynamic heat flux and thermoelastic behavior of nose caps of hypersonic vehicles / M. G. Persova, Y. G. Soloveichik, V. K. Belov, **D. S. Kiselev**, D. V. Vagin, P. A. Domnikov, I. I. Patrushev, D. N. Kurskiy // Acta Astronautica. - 2017. – Vol. 136. – P. 312–331. - DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.02.021.
5. Comparison Of Approaches And The Software For 3D Finite Element Modeling Of Harmonic Electromagnetic Fields / **Dmitry S. Kiselev**, Marina G. Persova, Yuri G. Soloveichik, Yulia I. Koshkina, Denis V. Vagin, Evgenia I. Simon // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016) : тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. : в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т.1, ч. 2. – P. 255-258. - ISBN 978-5-7782-2991-4 (IEEE Catalog Number CFP16471-PRT). DOI: 10.1109/APEIE.2016.7806463.
6. Approach to distributed computing system development for three-dimensional geoelectromagnetic problem solving / Nikolay V. Kondratyev, Marina G. Persova, Yulia I. Koshkina, **Dmitry S. Kiselev** // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016) : тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. : в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т.1, ч. 2. – P. 259-262. - ISBN 978-5-7782-2991-4 (IEEE Catalog Number CFP16471-PRT). - DOI: 10.1109/APEIE.2016.7806928.
7. Finite Element Code for 3D Numerical Analysis of Thermoelastic Stresses in Nose Caps of Hypersonic Flight Vehicles / Yuri G. Soloveichik, Marina G. Persova, Tatyana B. Epanchintseva, **Dmitry S. Kiselev**, Denis V. Vagin, Vasilii K. Belov // Proceedings of IFOST-2016 Part 1: 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), June 1-3, 2016 Novosibirsk, Russia. – pp. 359-362 - ISBN 978-1-5090-0853-7. - DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884127.
8. «Floating Dipoles» Method for Magnetic Survey Data Processing / Yuri G. Soloveichik, Marina G. Persova, Denis V. Vagin, **Dmitry S. Kiselev**, Aleksandr G. Zadorozhny // Proceedings of IFOST-2016 Part 1: 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), June 1-3, 2016 Novosibirsk, Russia. – pp. 414-418 - ISBN 978-1-5090-0853-7. - DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884142.
9. Calculating the Stress-Strain Behavior of Composite-made Structures with Cylindrical and Conical Layers Processing / Yuri G. Soloveichik, Tatyana B. Epanchintseva, **Dmitry S. Kiselev**, Yuri V. Trakimus // Proceedings of IFOST-2016 Part 1: 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), June 1-3, 2016 Novosibirsk, Russia. – pp. 419-422. DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884143.

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

10. Робастные методы выделения целевых объектов с использованием блочных структур для обработки данных электромагнитной съемки = Robust methods of determining target objects using block structures for EM data processing / М.Г.

- Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, **Д.С. Киселев**, Ю.И. Кошкина // «Инженерная и рудная геофизика 2019» — Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2019 г.
11. О подходе к геометрической многомерной инверсии данных морской электроразведки с учетом данных батиметрии = The Approach to Parametric Multidimensional Inversion of Marine Electrical Prospecting Data Considering Bathymetry / Д. Н. Курский, **Д. С. Киселев**, Ю. Г. Соловейчик, М. Г. Персова, Д. В. Вагин, Ю. И. Кошкина // Геомодель – 2017 = Geomodel - 2017. (EAGE) : тез. докл. 19 науч.-практ. конф. по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа, Геленджик, 11–14 сент. 2017 г. – Геленджик, 2017. - ISBN 978-946282226-9. DOI: 10.3997/2214-4609.201702249.
 12. Подход к обработке данных индукционного каротажа в горизонтальных скважинах в присутствии разлома = The Approach to Processing the Data of Induction Logging in Horizontal Wells in the Presence of the Fault / И. И. Патрушев, Д. В. Вагин, Ю. Г. Соловейчик, М. Г. Персова, Ю. И. Кошкина, **Д. С. Киселев** // Геомодель – 2017 = Geomodel - 2017. (EAGE) : тез. докл. 19 науч.-практ. конф. по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа, Геленджик, 11–14 сент. 2017 г. – Геленджик, 2017. - ISBN 978-94-6282-226-9. DOI: 10.3997/2214-4609.201702250.
 13. Electromagnetic soundings in the Arctic shelf in conditions of magnetotelluric noise / M. G. Persova, Y. G. Soloveichik, D. V. Vagin, Y. I. Koshkina, **D. S. Kiselev**, M. V. Abramov, A. G. Zadorozhny, M. G. Tokareva // Saint Petersburg 2018 : Saint Petersburg intern. conf. and exhibition: innovations in geosciences – time for breakthrough, Saint Petersburg 9–12 April 2018. – Saint Petersburg : EAGE, 2018. – Art. 44648. - ISBN 978-946282247-4. DOI: 10.3997/2214-4609.201800312.
 14. The Topography Effect on the Airborne EM Data / M. G. Persova, Y. G. Soloveichik, D. V. Vagin, **D. S. Kiselev**, Y. I. Koshkina, I. I. Patrushev, E. I. Simon // Saint Petersburg 2018 : Saint Petersburg intern. conf. and exhibition: innovations in geosciences – time for breakthrough, Saint Petersburg 9–12 April 2018. – Saint Petersburg : EAGE, 2018. – Art. 44652. - ISBN 978-946282247-4. DOI: 10.3997/2214-4609.201800314.
 15. Using HYB sparse matrix storage format for solving linear systems obtained by FEM discretization on GPU / N. V. Kondratyev, M. G. Persova, Y. G. Soloveichik, **D. S. Kiselev** // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018) : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 4. – С. 135–139. - ISBN (NSTU) 978-5-7782-3614-1. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546266.

Работы, опубликованные в других изданиях:

16. Подход к геометрической нелинейной 3D-инверсии данных электроразведки с подбором криволинейных границ между геоэлектрическими слоями = The approach to parametric nonlinear 3D inversion of electrical prospecting data with the recovery of curvilinear boundaries between geoelectrical layers / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, **Д.С. Киселев**, Н.С. Кондратьева, И.И. Патрушев, О.С. Трубачева // Geomodel 2019 = Геомодель 2019: 21st EAGE conference on oil and gas geological exploration and development,

- Gelendzhik, September 9-13, 2019: EAGE Publ., 2019, 6 P. URL: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=99319>
17. Подход к 3D-моделированию и 3D-инверсии данных магнитной градиентометрии = The approach to 3D modeling and 3D inversion of magnetic gradiometry data / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, **Д.С. Киселев**, Н.С. Кондратьева // Geomodel 2019 = Геомодель 2019: 21st EAGE conference on oil and gas geological exploration and development, Gelendzhik, September 9-13, 2019: EAGE Publ., 2019, 6 P. URL: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=99320>
 18. Конечноэлементное моделирование распространения упругой волны применительно к задачам георазведки / **Киселев Д.С.** // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2015. № 1 (79). С. 45-54.
 19. **Киселев Д. С.** Конечноэлементное моделирование процесса распространения упругой волны / Д. С. Киселев ; науч. рук. М. Г. Персова // Обработка информации и математическое моделирование : материалы Рос. науч.-техн. конф. [Новосибирск, 24–25 апр. 2015 г.]. – Новосибирск : СибГУТИ, 2015. – С. 129–131. – 25 экз. – ISBN 978-5-91434-027-5
 20. **Киселев Д. С.** Конечноэлементное моделирование трехмерных гармонических электромагнитных полей с использованием технологии выделения части поля / Д. С. Киселев, А. С. Водостоева ; науч. рук. М. Г. Персова // Обработка информации и математическое моделирование : материалы Рос. науч.-техн. конф. [Новосибирск, 24–25 апр. 2015 г.]. – Новосибирск : СибГУТИ, 2015. – С. 126–128. – 25 экз. – ISBN 978-5-91434-027-5.
 21. An approach to 3D-inversion of the time-domain marine electrical prospecting data [Electronic resource] / M. G. Persova, Y. G. Soloveichik, P. A. Domnikov, D. V. Vagin, **D. S. Kiselev** // Extended Abstract, 22nd EM Induction Workshop, Weimar, Germany, August 24-30, 2014. - 4 P. - 1 electron-optical disc (CD-ROM) 22nd EMIW, Weimar, Germany, 24-30 Aug. 2014. - Title with the label.
 22. Курский Д. Н. Решение прямых и обратных задач геоэлектрики на постоянном токе / Д. Н. Курский, **Д. С. Киселев**, П. А. Домников ; науч. рук. М. Г. Персова // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 5–9 дек. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 2. – С. 110–112. – 100 экз. – ISBN 978-5-7782-3082-8, ISBN 978-5-7782-3084-2.

Программы для ЭВМ, зарегистрированные в ФИПС (Роспатент):

1. Модуль генерации конечноэлементных систем линейных алгебраических уравнений, предназначенный для расчета напряженно-деформированного состояния / Соловейчик Ю.Г., Персова М.Г., Вагин Д.В., **Киселев Д.С.**, Патрушев И.И., Кошкина Ю.И. // Свидетельства о государственной регистрации №2016662863 от 24.11.2016 г. Дата приоритета: 06.10.2016 г. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2016
2. FEMesh_GEO3D / Персова М.Г., **Киселев Д.С.**, Курский Д.Н. // Свидетельства о государственной регистрации №2017661032 от 02.10.2017 г. Дата приоритета: 10.08.2017 г. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2017
3. LogEM3DS-FD / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., **Киселев Д.С.**, Кошкина Ю.И., Гриф А.М., Патрушев И.И. // Свидетельства о государственной

- регистрации №2018619454 от 07.08.2018 г. Дата приоритета: 06.07.2018 г. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2018
4. Управляющая программа для распараллеливания вычислений при многомерной обработке аэрогеофизических данных / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., **Киселев Д.С.**, Кондратьев Н.В. // Свидетельства о государственной регистрации №2018661743 от 14.09.2018 г. Дата приоритета: 06.07.2018 г. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2018
 5. Программный модуль решения прямой задачи аэроэлектроразведки с группированием по положениям приемно-генераторной установки и по временам, с учетом разновысотной съемки и особенностей аппаратуры аэросистемы / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., **Киселев Д.С.**, Кошкина Ю.И. // Свидетельства о государственной регистрации №2018619456 от 07.08.2018 г. Дата приоритета: 06.07.2018 г. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2018
 6. Графический интерфейс программного комплекса для обработки данных на основе 3D-моделирования и 3D-инверсий для сопровождения высокоразрешающих электромагнитных технологий поиска и разведки морских месторождений углеводородов / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., **Киселев Д.С.** // Свидетельства о государственной регистрации №2018619457 от 07.08.2018 г. Дата приоритета: 06.07.2018 г. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2018
 7. Интерфейсная часть информационно-программной системы 3D-обработки данных геологоразведки / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., **Киселев Д.С.**, Кондратьев Н.В., Кошкина Ю.И. // Свидетельства о государственной регистрации №2018661744 от 14.09.2018 г. Дата приоритета: 06.07.2018 г. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2018
 8. GEMIR_CEMIL (Calculation ElectroMagnetic of Induction Loop) / Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г., Вагин Д. В., **Киселев Д. С.**, Кошкина Ю. И. // Свидетельства о государственной регистрации №2018665402 от 04.12.2018 г. Дата приоритета: 23.11.2018 г. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2018
 9. Программный модуль 3D-инверсии для технологии аэроэлектроразведки / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., **Киселев Д.С.** // Свидетельства о государственной регистрации №2019662257 от 19.09.2019 г. Дата приоритета: 12.09.2019 г. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2019
 10. Программный модуль 3D-инверсии для технологии магниторазведки, включая градиентометрию / Соловейчик Ю.Г., Персова М.Г., Вагин Д.В., **Киселев Д.С.**, Гриф А.М. // Свидетельства о государственной регистрации №2019662258 от 19.09.2019 г. Дата приоритета: 12.09.2019 г. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2019
 11. Графический интерфейс к программному комплексу обработки больших объемов данных аэрогеофизической разведки / **Киселев Д.С.**, Гриф А.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. // Свидетельства о государственной регистрации №2019662176 от 18.09.2019 г. Дата приоритета: 12.09.2019 г. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2019

12. Информационно-программная система обработки данных для сопровождения электромагнитных технологий геологоразведки / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., Гриф А.М., **Киселев Д.С.**, Кошкина Ю.И., патрушев И.И., Сивенкова А.П., Симон Е.И., Токарева М.Г. // Свидетельства о государственной регистрации №2019662177 от 18.09.2019 г. Дата приоритета: 12.09.2019 г. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2019

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60x84 1/16. Объем 1,5 п.л., Тираж 100 экз.
Заказ № 1455. Подписано в печать 22.10.2019 г.