

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.051

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-35-46

Структура и особенности программного комплекса для геофизических геометрических 3D-инверсий*

Д.В. ВАГИН

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

vagin@corp.nstu.ru

Рассматриваются структура и особенности программного комплекса для 3D-инверсий геофизических данных. Представленный программный комплекс ориентирован на решение прямых и обратных задач электроразведки и инженерной геофизики. Помимо параметров, определяющих физические свойства среды, программный комплекс позволяет восстанавливать и геометрические параметры геофизической модели: рельефы слоев и границы трехмерных включений. Включения могут иметь форму произвольных шестигранников или призм с основанием в виде многоугольника. Программный комплекс состоит из четырех основных подсистем: графического интерфейса, подсистем решения прямых и обратных задач и клиент-серверной части для выполнения расчетов на удаленных вычислительных узлах. Графический интерфейс состоит из ориентированных на специалиста-геофизика модулей пре- и постпроцессора, позволяющих описать задачу и представить результаты ее решения в удобных для пользователя терминах. Для решения прямых задач используется метод конечных элементов и технология разделения поля на нормальную и аномальную составляющие. При этом используются специальные методы дискретизации расчетной области, позволяющие учесть как сложную трехмерную структуру среды, так и наличие в расчетной области техногенных объектов (скважин). Для увеличения эффективности решения прямых задач используются несогласованные сетки с ячейками в виде произвольных шестигранников. Для геометрических параметров описаны способы эффективного вычисления производных (по этим параметрам), необходимых для решения обратных задач методом Гаусса–Ньютона. Главной идеей для эффективного вычисления производных является выделение влияния изменения значения параметра (используемого для вычисления значения обобщенной производной) на задачу. Описаны основные действия, выполняемые подсистемой решения обратных задач, и особенности, связанные с обработкой геометрических параметров.

* Статья получена 10 декабря 2020 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (НИЛ «Моделирование и обработка данных наукоемких технологий», проект № FSUN-2020-0012).

Ключевые слова: программные комплексы, 3D-инверсия, геометрические параметры, метод Гаусса–Ньютона, адаптивная регуляризация, вычислительная эффективность, обратные задачи геофизики, апробация на практических данных

ВВЕДЕНИЕ

Для решения трехмерных обратных задач геофизики различные исследователи пытаются применять самые разные методы и подходы. Их можно разделить на традиционные, основанные на классических методах минимизации функционалов [1–6], и новые, основанные, например, на использовании нейронных сетей [7]. Всплеск интереса к использованию нейронных сетей обусловлен возросшими вычислительными возможностями и доступностью многопроцессорных систем. Тем не менее пока неизвестно об успешном применении данных методов для решения реальных практических задач.

Таким образом, при выполнении инверсий на практике используются традиционные подходы, в которых исследуемая область обычно разбивается на непересекающиеся подобласти фиксированной геометрии, плотно заполняющие всю исследуемую область. Такие подобласти называют вокселями (voxels) или ячейками, а соответствующие решения обратных задач – воксель-инверсиями (voxel inversion) [3]. Результатом инверсии в этом случае является набор значений восстанавливаемых физических величин (электрическая проводимость, коэффициент поляризации, концентрация некоторого вещества и др.) в этих ячейках. Данный подход очень прост в реализации, но зачастую не позволяет четко определить границы подобластей с разными свойствами. Примером программного комплекса для решения обратных задач на основе воксель-инверсий является MTZ3D [Gribenko A.V., Zhdanov M.S.].

Очевидным решением этой проблемы является параметризация не только физических свойств, но и геометрии исследуемой области (parametric inversion) [3]. Проведенные инверсии показывают, что геометрическая параметризация действительно позволяет находить границы целевых объектов [6]. Это связано с тем, что выбранная параметризация геометрии исследуемой области уже является определенной регуляризацией обратной задачи. Поэтому одной из основных проблем решения обратных задач на основе геометрической параметризации является выбор конкретных геометрических параметров. Очевидный в одномерном случае (например, толщины слоев), уже в двумерном случае он требует достаточного профессионализма от выполняющего данную инверсию специалиста. В трехмерном случае эта задача становится еще более сложной, и при ее решении просто невозможно обойтись без компромиссов между удобством работы с программным комплексом человека, ограничениями, накладываемыми на решение выбранной параметризацией, сложностью программной реализации и ресурсоемкостью реализуемых процедур.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Чтобы программный комплекс, позволяющий выполнять 3D-инверсии на основе геометрической параметризации, мог успешно использоваться для выполнения практических интерпретаций, он должен удовлетворять нескольким требованиям. Первое требование – это наличие удобного и гибкого ин-

терфейса пользователя, позволяющего определять, какие элементы геометрии трехмерной модели будут являться искомыми параметрами обратной задачи. Второе требование – это контроль за тем, чтобы получаемые значения формальных геометрических параметров не приводили к противоречивой физической модели среды. Третьим важным требованием является гибкая и при этом автоматическая регуляризация для восстанавливаемых значений геометрических параметров.

Помимо указанных выше требований, принципиальную практическую применимость программного комплекса 3D-инверсий определяет общее время, затрачиваемое на решение обратной задачи. То есть программный комплекс должен эффективно понижать целевой функционал невязки экспериментальных и подобранных данных. И использование геометрической параметризации не должно значимым образом снижать эту эффективность.

Для того чтобы программный комплекс был удобен для практического применения, он должен описывать трехмерную модель среды в привычных для специалистов-геофизиков терминах. К ним можно отнести «слои» – большие пласты породы (как правило, осадочного происхождения), «объекты» – локальные подобласти со свойствами, отличными от свойств слоев, вмещающих эти подобласти, «рельефы» – трехмерные искривления слоев относительно горизонтальной плоскости, «контуры» – замкнутые границы проекций объектов сложной формы.

2. СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Программный комплекс, реализующий геометрические 3D-инверсии, состоит из четырех основных подсистем.

1. *Интерфейс пользователя (ИП)*. Включает в себя пре- и постпроцессор. Препроцессор позволяет в удобных для специалиста-геофизика терминах задавать модель изучаемой среды и указывать, какие скалярные и геометрические параметры этой модели являются искомыми для обратной задачи. Помимо модели среды, в препроцессоре также задаются тип задачи и связанные с ним параметры генераторных и приемных установок. Соответствующие данные препроцессор выгружает в виде файлов, которые идут на вход подсистем решения прямых и обратных задач. Препроцессор также позволяет загружать и редактировать конфигурационные файлы, содержащие параметры для других подсистем программного комплекса. Постпроцессор, в свою очередь, позволяет загружать результаты решения прямых и обратных задач и отображать их в виде графиков значений измеряемых величин или координаты или в виде распределения по площади в выбранной цветовой шкале. Часть окна препроцессора показана на рис. 1.

2. *Подсистема решения прямых задач (ПРПЗ)*. Включает в себя набор исполняемых программных модулей, позволяющих решать прямые задачи на основе данных от препроцессора или подсистемы решения обратных задач. Для управления этой подсистемой используются соответствующие конфигурационные файлы, определяющие методы, используемые для решения прямых задач, число параллельных потоков и требуемую точность получаемых результатов. Модули подсистемы реализуют высокоэффективные методы моделирования прямых трехмерных задач [8–11].

3. *Подсистема решения обратных задач (ПРОЗ)*. Включает в себя несколько программных модулей. Ядром данной подсистемы является программный модуль, реализующий метод Гаусса–Ньютона (МГН) для минимизации квадратичного функционала невязки экспериментальных и подобранных данных. Другими важными модулями данной подсистемы являются: модуль подготовки прямых задач (МППЗ), переводящий текущие значения искомым в обратной задаче параметров в данные (файлы) модели, идущие на вход подсистемы решения прямых задач; модуль генерации моделей для расчета производных по параметрам (МГМРПП), в зависимости от способа расчета производной для конкретного параметра может использовать либо модуль МППЗ, либо собственные процедуры; модуль адаптивной регуляризации (МАР), контролирующей, чтобы найденные приращения не выводили значения параметров за указанные локальные (на данном шаге инверсии) или глобальные ограничения.

4. *Клиент-серверная часть (КСЧ)*. Включает в себя два исполняемых модуля: модуль клиента – подготавливает и отправляет данные (файлы) на удаленный вычислительный узел, и модуль сервера – передает полученные от клиента данные подсистеме решения прямых задач и после окончания вычислений возвращает клиенту полученные результаты. Сервер следит за работой ПРПЗ и в случае возникновения ошибки передает данные аварийного завершения клиенту. Клиент, в свою очередь, периодически опрашивает серверные модули на вычислительных узлах, на которые были отправлены задачи. Если серверный модуль на удаленном узле не отвечает в течение указанного временного интервала, то соответствующая задача отправляется на другой доступный вычислительный узел. При отправке задач на удаленные узлы клиент учитывает вычислительную мощность доступных узлов (количество вычислительных ядер и объем оперативной памяти) [12, 13].

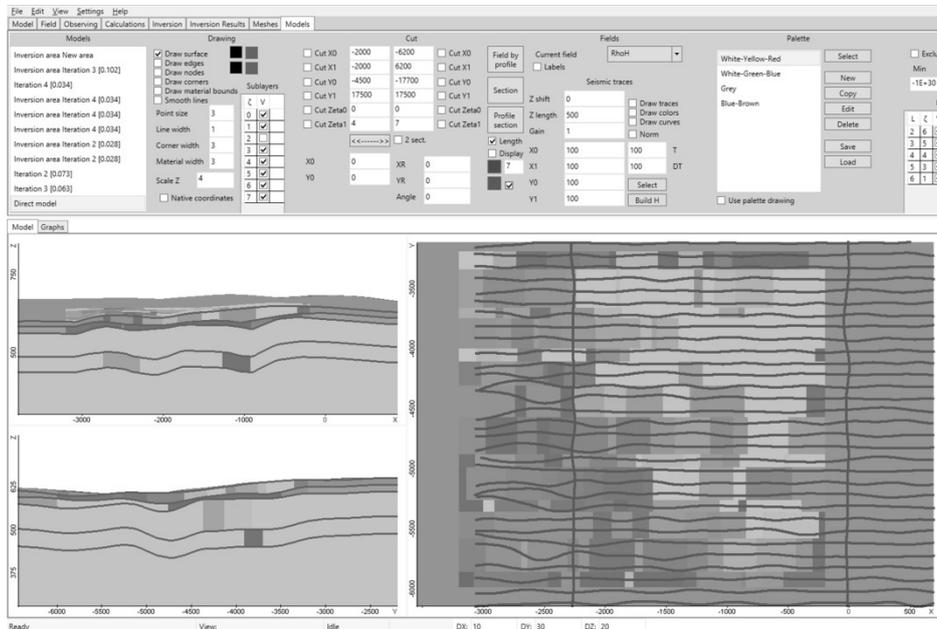


Рис. 1. Часть окна препроцессора

Fig. 1. Part of the preprocessor window

Общая структура описываемого программного комплекса представлена на рис. 2 (ВУ – вычислительный узел). Подсистемы ПРПЗ и ПРОЗ рассмотрим более подробно, так как именно от особенностей их реализации зависит вычислительная эффективность программного комплекса.

Основные вычислительные затраты в методе Гаусса–Ньютона связаны с необходимостью вычисления производных измеряемых величин по искомым параметрам. Для сложной трехмерной среды эти производные можно посчитать лишь численно:

$$\frac{df(p)}{dp_i} \approx \frac{\Delta f(p)_i}{\Delta p_i} = \frac{f(p + \Delta p_i) - f(p)}{\Delta p_i}, \quad i = 1 \dots M. \quad (1)$$

Здесь M – это общее число искомых параметров; p – вектор значений искомых параметров, p_i – i -я компонента вектора p , а запись $p + \Delta p_i$ (вектор плюс скаляр) означает изменение на Δp_i i -й компоненты вектора p . Вычисление $f(p)$ означает решение прямой трехмерной задачи для модели, соответствующей вектору значений искомых параметров p .

Если моделируемый процесс нестационарный или нелинейный, то решение всех задач $f(p + \Delta p_i)$ может занимать много времени. Для эффективного расчета $\Delta f(p)_i$ подсистема ПРПЗ разделяет параметры на две категории.

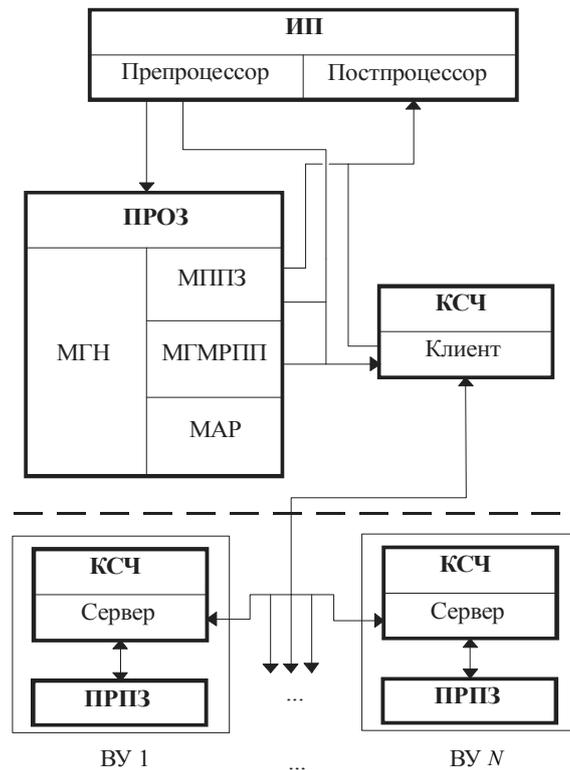


Рис. 2. Общая структура программного комплекса. Стрелками показано направление движения данных

Fig. 2. General structure of the software package. The direction of data flow is shown by arrows

К первой категории относятся параметры, для которых значение $\Delta f(p)_i$ с достаточной точностью можно вычислить путем решения специальной задачи. Такими параметрами являются, например, границы объектов. Приращение Δp_i в этом случае означает изменение сеточного оператора. С учетом того, что Δp_i , как правило, невелико (иначе будет плохой аппроксимация производной в (1)), изменение сеточного оператора может существенным образом сказаться на точности значения $\Delta f(p)_i$, вычисленного как разность задач $f(p + \Delta p_i)$ и $f(p)$.

Для конкретности предположим, что решается нестационарная электромагнитная задача в немагнитной среде в области времен, на которых токи смещения несущественны. Тогда описывающее задачу $f(p)$ уравнение имеет вид

$$\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{A}_p + \sigma_p \frac{d\vec{A}_p}{dt} = \vec{J}. \quad (2)$$

Здесь \vec{A}_p – это векторный электромагнитный потенциал; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; \vec{J} – сторонний ток (связанный с источником ЭМ поля), а функция σ_p описывает распределение удельной электрической проводимости.

В этом случае искомое значение $\Delta f(p)_i$ может быть найдено из решения задачи с уравнением

$$\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{A}_\Delta + \sigma_{\tilde{p}} \frac{d\vec{A}_\Delta}{dt} = (\sigma_p - \sigma_{\tilde{p}}) \frac{d\vec{A}_p}{dt}, \quad (3)$$

где $\tilde{p} = p + \Delta p_i$, $\vec{A}_\Delta = \vec{A}_{\tilde{p}} - \vec{A}_p$. Так как $\Delta f(p)_i$ находится напрямую из \vec{A}_Δ , то на него уже не оказывает влияние различие сеточных операторов для задач $f(\tilde{p})$ и $f(p)$. К тому же в задаче для уравнения (3) нет сторонних токов \vec{J} , что существенно понижает требования к подробности дискретизации расчетной области. Более того, правая часть (3) отлична от нуля только в небольшой (так как Δp_i невелико) подобласти. Таким образом, хотя задача (3) и остается трехмерной, но за счет пониженных требований к ее дискретизации она может быть решена с малыми вычислительными затратами.

Ко второй категории относятся параметры, для которых сложно сформулировать или решить задачу, подобную (3). Такими параметрами являются, например, параметры, определяющие геометрию границ сложных объектов. Например, это объекты, границы которых по латерали (в плане) представляются в виде некоторого многоугольника. В этом случае сетка для задач $f(p)$ и $f(\tilde{p})$ может быть построена без учета границ, определяемых соответствующими геометрическими параметрами [14]. Значения данных границ при этом используются для вычисления эффективных значений физических характеристик соответствующих ячеек сетки. В этом случае для вычисления $f(\tilde{p}) - f(p)$ эти задачи могут решаться при весьма грубой дискретизации,

так как порождаемая этой дискретизацией систематическая ошибка в большой мере взаимовычитается.

Описание методов, используемых подсистемой ПРПЗ для решения различных задач, приведено в работах [8–11, 14].

Теперь рассмотрим подробнее подсистему ПРОЗ. Ее принципиальная схема представлена на рис. 3. Как видно из приведенной схемы, подсистема ПРОЗ выполняет девять основных действий.

1. *Фиксация части параметров.* Для улучшения сходимости инверсии на каждой ее итерации значения некоторых параметров могут быть зафиксированы. К таким параметрам можно отнести, например, границы слабоконтрастного к вмещающей среде объекта. То есть это параметры, значения производных по которым близки к нулю. Другой пример фиксации параметров – это выполнение специальной итерации коррекции значений параметров, определяющих физические свойства объектов и слоев, если в инверсии для этих же объектов и слоев присутствуют и геометрические параметры [15–18].

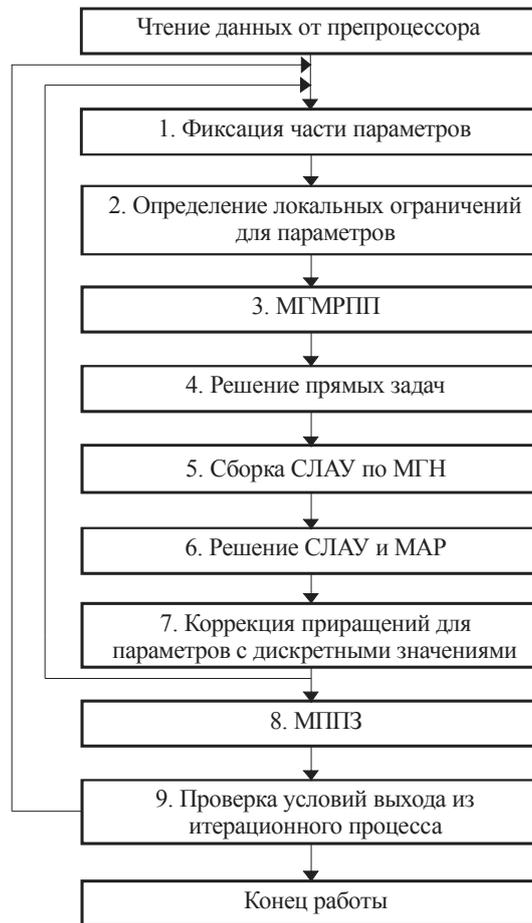


Рис. 3. Принципиальная схема подсистемы решения обратных задач

Fig. 3. Schematic diagram of the subsystem for solving inverse problems

2. *Определение локальных ограничений для параметров.* Помимо глобальных ограничений на возможные значения параметров, связанных с их физическим смыслом, на каждой итерации инверсии применяются дополнительные, более жесткие ограничения. Одной из причин наложения дополнительных ограничений является нелинейность исходного функционала. Более жесткие ограничения уменьшают получаемые на данной итерации значения приращений параметров, что делает сходимость итерационного процесса более равномерной, а получаемое в итоге решение – более регулярным [15–18]. Другой причиной дополнительных ограничений являются особенности используемой параметризации. Например, это требование выпуклости или сохранения подобия контуров, задающих сложные геометрические объекты.

3. *МГМРПП.* Сущность этого модуля в достаточной мере раскрыта выше – в описании общей структуры комплекса.

4. *Решение прямых задач.* Это обращение к подсистеме ПРПЗ для получения решения прямой задачи для данного набора параметров и расчета значений производных по параметрам. При этом если в задаче есть удаленные друг от друга приемно-генераторные установки, то их наборы параметров, для которых в данных установках будут вычисляться производные по параметрам, могут не совпадать. Это связано с тем, что влияние некоторых параметров может быть достаточно локальным и затрагивать только некоторые приемно-генераторные установки. В других установках его можно считать нулевым и не выполнять решение соответствующих прямых задач [6, 15–18].

5. *Сборка СЛАУ по МГН.* Матрица СЛАУ в методе Гаусса–Ньютона имеет плотный формат. Ее размер равен числу подбираемых параметров. При этом для каждого элемента матрицы суммируется множество слагаемых [6]. Для таких технологий, как, например, аэроразведка, число таких слагаемых может достигать миллиона. Поэтому данная процедура распараллеливается и может выполняться на вычислительных узлах.

6. *Решение СЛАУ и МАР.* Метод адаптивной регуляризации подразумевает подбор значений регуляризирующих параметров [6]. Увеличение значений регуляризирующих параметров приводит к уменьшению получаемых приращений по искомым параметрам. Так как текущая модель удовлетворяет всем глобальным и локальным ограничениям (что является обязательным требованием к стартовой модели), то этот процесс гарантированно конечен и на практике занимает порядка 10–30 итераций изменения параметров регуляризации и решения СЛАУ.

7. *Коррекция приращений для параметров с дискретными значениями.* Решение СЛАУ дает вещественные приращения к значениям параметров. Если же область определения параметра состоит из дискретного набора значений, то полученные вещественные значения необходимо округлить до ближайших значений из этого набора. После этих действий в случае наличия связанных физических и геометрических параметров для объектов или слоев можно зафиксировать соответствующие геометрические параметры и выполнить дополнительную итерацию коррекции значений параметров, определяющих физические свойства объектов и слоев (действия 1–6) [6].

8. *МППЗ.* Выполняет перевод значений подобранных параметров в файлы модели, которые могут быть загружены постпроцессором или использованы для решения прямой задачи.

9. *Проверка условий выхода из итерационного процесса.* Окончание итерационного процесса решения обратной задачи осуществляется при выполнении одного из двух условий: первое – достигнут требуемый уровень невязок экспериментальных и подобранных данных, второе – полученные приращения по параметрам близки к нулевым. Если инверсия останавливается по второму условию, то это означает близость полученной модели к оптимуму минимизируемого функционала в рамках заданной параметризации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена структура и особенности программного комплекса для 3D-инверсий геофизических данных. Главной особенностью данного программного комплекса является возможность использовать геометрическую параметризацию трехмерной модели среды. Основные сущности этой модели сформулированы в удобных для конечного пользователя (специалиста-геофизика) терминах и отражены в интерфейсе программного комплекса. Для решения обратных задач используется метод Гаусса–Ньютона. Для расчета производных по искомым параметрам используются специальные эффективные методы решения прямых задач. Эффективность решения обратных задач обеспечивается выбранными способами параметризации модели, использованием специальной регуляризации и применением дополнительной итерации коррекции значений негеометрических параметров.

Описанный в работе программный комплекс за счет используемых высокоэффективных подходов позволяет выполнять трехмерные геофизические инверсии реальных практических данных, что было подтверждено обработкой практических данных, полученных для различных технологий электроразведки в США, Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, в Уральском регионе и в Казахстане, а также обработкой данных нефтедобычи в Республике Татарстан. Эффективность описанного в работе программного комплекса обусловлена использованием геометрической параметризации и высокоэффективными методами решения прямых задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A three-dimensional transient electromagnetic data inversion method based on a time-frequency transformation / Y. Yang, X. Wang, X. Liu, X. Mi, L. Mao // *Applied Geophysics*. – 2020. – Vol. 17, iss. 3. – P. 361–376.
2. Um E., Kim J., Wilt M. 3D borehole-to-surface and surface electromagnetic modeling and inversion in the presence of steel infrastructure // *Geophysics*. – 2020. – Vol. 85, iss. 5. – P. E139–E152.
3. 3D electromagnetic modelling and inversion: a case for open source / D.W. Oldenburg, L.J. Heagy, S. Kang, R. Cockett // *Exploration Geophysics*. – 2020. – Vol. 51, iss. 1. – P. 25–37.
4. Tseng H., Lee K., Becker A. 3D interpretation of electromagnetic data using a modified extended Born approximation // *Geophysics*. – 2003. – Vol. 68, iss. 1. – P. 127–137.
5. Zhang Z. 3D resistivity mapping of airborne EM data // *Geophysics*. – 2003. – Vol. 68, iss. 6. – P. 1896–1905.
6. Three-dimensional inversion of airborne data with applications for detecting elongated sub-vertical bodies overlapped by an inhomogeneous conductive layer with topography / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, A.M. Grif, Y.I. Koshkina, A.P. Sivenkova // *Geophysical Prospecting*. – 2020. – Vol. 68, iss. 7. – P. 2217–2253. – DOI: 10.1111/1365-2478.12979.

7. 3D geological structure inversion from Noddy-generated magnetic data using deep learning methods / J. Guo, Y. Li, M.W. Jessell, J. Giraud, C. Li, L. Wu, F. Li, S. Liu // *Computers and Geosciences*. – 2021. – Vol. 149. – Art. 104701.
8. Finite element solution to 3-D airborne time-domain electromagnetic problems in complex geological media using non-conforming hexahedral meshes / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, Y.I. Koshkina // *Journal of Applied Geophysics*. – 2020. – Vol. 172. – Art. 103911. – DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.103911.
9. Finite-element solution to multidimensional multisource electromagnetic problems in the frequency domain using non-conforming meshes / Y.G. Soloveichik, M.G. Persova, P.A. Domnikov, Y.I. Koshkina, D.V. Vagin // *Geophysical Journal International*. – 2018. – Vol. 212, iss. 3. – P. 2159–2193. – DOI: 10.1093/gji/ggx530.
10. Numerical scheme for modelling the electromagnetic field in airborne electromagnetic survey taking into account follow currents in transmitter loop / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, Y.I. Koshkina, E.I. Simon // *Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018): труды 14 международной конференции, Новосибирск, 2–6 октября 2018 г.* – Новосибирск, 2018. – Т. 1, ч. 4. – С. 216–221.
11. 3-D modelling of marine electromagnetic technologies taking into account induced polarization / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, Y.I. Koshkina, M.G. Tokareva // *Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018): труды 14 международной конференции, Новосибирск, 2–6 октября 2018 г.* – Новосибирск, 2018. – Т. 1, ч. 4. – С. 222–225.
12. Parallel solution of 3D forward and inverse problems of airborne electromagnetic survey / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, O.S. Trubacheva, N.S. Kondratyeva // *14 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019)*. – Tomsk, Russia, 2019. – P. 193–196.
13. Intelligent scheduler for solution of forward and inverse geoelectrical problems / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, Y.I. Koshkina, O.S. Trubacheva, D.V. Vagin, P. Domnikov // *11 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2016)*. – Novosibirsk, Russia, 2016. – Pt. 1. – P. 401–405. – DOI: 14.1109/IFOST.2016.7884139.
14. Oil production optimization based on the finite-element simulation of the multi-phase flow in porous media and inverse problem solution / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, A.M. Grif, I.I. Patrushev, A.S. Ovchinnikova // *GeoBaikal 2020*. – Irkutsk, Russia, 2020. – P. 1–6. – DOI: 10.3997/2214-4609.202052021.
15. An approach to the geometric 3D inversion of airborne EM data for detection and geometrization of local targets overlapped by laterally inhomogeneous layers / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, A.P. Sivenkova, Y.I. Koshkina // *Engineering and Mining Geophysics 2020*. – Perm, Russia, 2020. – P. 90. – DOI: 10.3997/2214-4609.202051090.
16. The approaches to geometric EM 3-D inversion with consideration for IP effect in survey with electric lines / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, O.S. Trubacheva, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, A.P. Sivenkova, Y.I. Koshkina // *GeoBaikal 2020*. – Irkutsk, Russia, 2020. – P. 1–6. – DOI: 10.3997/2214-4609.202052022.
17. Approach to multidimensional geometric inversion of data obtained by multi-spacing TEM soundings / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, Y.I. Koshkina // *GeoBaikal 2016*. – Irkutsk, Russia, 2016. – P. 202–206. – DOI: 10.3997/2214-4609.201601697.
18. Geometrical nonlinear 3D inversion of airborne time domain EM data / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, Y.I. Koshkina, D.V. Vagin, O.S. Trubacheva // *Near Surface Geoscience 2016 – First Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining. Extended abstract*. – Barcelona, 2016. – DOI: 10.3997/2214-4609.201602114.

Вагин Денис Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – численное моделирование задач, описываемых уравнениями математической физики. Имеет более 80 печатных работ и учебных пособий. E-mail: vagin@corp.nstu.ru

Vagin Denis V., PhD (Eng.), associate professor, department of applied mathematics, NSTU. His research interests include numerical modeling of problems described by mathematical physics equations. He has more than 80 publications and teaching manuals. E-mail: vagin@corp.nstu.ru

The structure and features of the software for geophysical geometrical 3D inversions*

D. VAGIN

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

vagin@corp.nstu.ru

Abstract

The structure and features of a software package for 3D inversion of geophysical data are considered. The presented software package is focused on solving direct and inverse problems of electrical exploration and engineering geophysics. In addition to the parameters that determine physical properties of the medium, the software package allows you to restore the geometry parameters of the geophysical model, namely layer reliefs and boundaries of three-dimensional inclusions. The inclusions can be in the form of arbitrary hexagons or prisms with a polygonal base. The software package consists of four main subsystems: an interface, subsystems for solving direct and inverse problems, and a client-server part for performing calculations on remote computing nodes. The graphical interface consists of geophysicist-oriented pre- and postprocessor modules that allow you to describe the problem and present the results of its solution in user-friendly terms. To solve direct problems, the finite element method and the technology for dividing the field into normal and anomalous components are used. At the same time, special methods of discretization of the computational domain are used, which make it possible to take into account both the complex three-dimensional structure of the environment and the presence of man-made objects (wells) in the computational domain. To increase the efficiency of solving direct problems, nonconforming grids with cells in the form of arbitrary hexahedrons are used. Methods for efficient calculation of derivatives (with respect to these parameters) necessary for solving inverse problems by the Gauss-Newton method are also described for the geometry parameters. The main idea for efficient derivatives computation is to identify the effect of changing the value of the parameter (used to compute the value of the generalized derivative) on the problem. The main actions performed by the subsystem for solving inverse problems and the features associated with the processing of geometry parameters are described.

Keywords: geophysics software, parametric inversion, 3D inversion, Gauss-Newton method, adaptive regularization, computational efficiency, inverse problems of geophysics, approbation on practical data

REFERENCES

1. Yang Y., Wang X., Liu X., Mi X., Mao L. A three-dimensional transient electromagnetic data inversion method based on a time-frequency transformation. *Applied Geophysics*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 361–376.
2. Um E., Kim J., Wilt M. 3D borehole-to-surface and surface electromagnetic modeling and inversion in the presence of steel infrastructure. *Geophysics*, 2020, vol. 85, iss. 5, pp. E139–E152.
3. Oldenburg D.W., Heagy L.J., Kang S., Cockett R. 3D electromagnetic modelling and inversion: a case for open source. *Exploration Geophysics*, 2020, vol. 51, iss. 1, pp. 25–37.
4. Tseng H., Lee K., Becker A. 3D interpretation of electromagnetic data using a modified extended Born approximation. *Geophysics*, 2003, vol. 68, iss. 1, pp. 127–137.
5. Zhang Z. 3D resistivity mapping of airborne EM data. *Geophysics*, 2003, vol. 68, iss. 6, pp. 1896–1905.
6. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Kiselev D.S., Grif A.M., Koshkina Y.I., Sivenkova A.P. Three-dimensional inversion of airborne data with applications for detecting elongated subvertical bodies overlapped by an inhomogeneous conductive layer with topography. *Geophysical Prospecting*, 2020, vol. 68, iss. 7, pp. 2217–2253. DOI: 10.1111/1365-2478.12979.

* Received 10 December 2020.

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Research Laboratory "Modeling and data processing of high technologies", the project code is FSUN-2020-0012).

7. Guo J., Li Y., Jessell M.W., Giraud J., Li C., Wu L., Li F., Liu S. 3D geological structure inversion from Noddy-generated magnetic data using deep learning methods. *Computers and Geosciences*, 2021, vol. 149, art. 104701.
8. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Kiselev D.S., Koshkina Y.I. Finite element solution to 3-D airborne time-domain electromagnetic problems in complex geological media using non-conforming hexahedral meshes. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, vol. 172, art. 103911. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.103911.
9. Soloveichik Y.G., Persova M.G., Domnikov P.A., Koshkina Y.I., Vagin D.V. Finite-element solution to multidimensional multisource electromagnetic problems in the frequency domain using non-conforming meshes. *Geophysical Journal International*, 2018, vol. 212, iss. 3, pp. 2159–2193. DOI: 10.1093/gji/ggx530.
10. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Koshkina Y.I., Simon E.I. Numerical scheme for modelling the electromagnetic field in airborne electromagnetic survey taking into account follow currents in transmitter loop. *Aktual'nye problemy elektronnoy priboroostroeniya, APEP-2018: trudy XIV mezhdunarodnoi konferentsii* [14th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2014: Proceedings], Novosibirsk, October 2–6, 2018, vol. 1, pt. 4, pp. 216–221.
11. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Koshkina Y.I., Tokareva M.G. 3-D modelling of marine electromagnetic technologies taking into account induced polarization. *Aktual'nye problemy elektronnoy priboroostroeniya, APEP-2018: trudy XIV mezhdunarodnoi konferentsii* [14th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2014: Proceedings], Novosibirsk, October 2–6, 2018, vol. 1, pt. 4, pp. 222–225.
12. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Kiselev D.S., Trubacheva O.S., Kondratyeva N.S. Parallel solution of 3D forward and inverse problems of airborne electromagnetic survey. *14 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019)*, Tomsk, Russia, 2019, pp. 193–196.
13. Persova M., Soloveichik Y., Koshkina Y., Trubacheva O., Vagin D., Domnikov P. Intelligent scheduler for solution of forward and inverse geoelectrical problems. *11 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2016)*, Novosibirsk, Russia, 2016, pt. 1, pp. 401–405. DOI: 14.1109/IFOST.2016.7884139.
14. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Grif A.M., Patrushev I.I., Ovchinnikova A.S. Oil production optimization based on the finite-element simulation of the multi-phase flow in porous media and inverse problem solution. *GeoBaikal 2020*, Irkutsk, Russia, 2020, pp. 1–6. DOI: 10.3997/2214-4609.202052021.
15. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Kiselev D.S., Sivenkova A.P., Koshkina Y.I. An approach to the geometric 3D inversion of airborne EM data for detection and geometrization of local targets overlapped by laterally inhomogeneous layers. *Engineering and Mining Geophysics 2020*, Perm, Russia, 2020, p. 90. DOI: 10.3997/2214-4609.202051090.
16. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Trubacheva O.S., Vagin D.V., Kiselev D.S., Sivenkova A.P., Koshkina Y.I. The approaches to geometric EM 3-D inversion with consideration for IP effect in survey with electric lines. *GeoBaikal 2020*, Irkutsk, Russia, 2020, pp. 1–6. DOI: 10.3997/2214-4609.202052022.
17. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Koshkina Y.I. Approach to multidimensional geometric inversion of data obtained by multi-spacing TEM soundings. *GeoBaikal 2016*, Irkutsk, Russia, 2016, pp. 202–206. DOI: 10.3997/2214-4609.201601697.
18. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Koshkina Y.I., Vagin D.V., Trubacheva O.S. Geometrical nonlinear 3D inversion of airborne time domain EM data. *Near Surface Geoscience 2016 – First Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining*. Extended abstract, Barcelona, 2016. DOI: 10.3997/2214-4609.201602114.

Для цитирования:

Вагин Д.В. Структура и особенности программного комплекса для геофизических геометрических 3D-инверсий // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 2 (82). – С. 35–46. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-35-46.

For citation:

Vagin D.V. Struktura i osobennosti programmnogo kompleksa dlya geofizicheskikh geometricheskikh 3D-inversii [The structure and features of the software for geophysical geometrical 3D inversions]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 2 (82), pp. 35–46. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-35-46.