

УДК 519.63

Применение программных комплексов GeoEM и WebGEM для решения научных и практических задач геоэлектроразведки*

**М.Г. ПЕРСОВА, Ю.Г. СОЛОВЕЙЧИК, М.Г. ТОКАРЕВА, Е.Д. АЛЕКСАНОВА, М.Е. БЛИНОВА,
Р.Г. ГУСЕЙНОВ, М.А. ДАВЫДЕНКО, И.В. ЕГОРОВ, А.А. ЕРПУЛЕВ, Т.А. КАНДАКОВА,
И.К. СЕМИНСКИЙ, А.А. ТРУСОВ, С.В. ЯКОВЛЕВ**

Рассматриваются программные комплексы, предназначенные для моделирования геоэлектромагнитных полей, способы организации и проведения расчетов в вычислительном кластере, пример решения задачи для сложной геоэлектрической модели.

Ключевые слова: 3D-моделирование, электромагнитное поле, электроразведка.

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение трехмерных подходов в практику интерпретации данных и проектирования электроразведочных исследований требует использования высокоточного и вычислительно эффективного программного обеспечения 3D-моделирования геоэлектромагнитных полей, функционирующего в многоядерных вычислительных системах.

В данной работе будут рассмотрены программные комплексы WebGEM и GeoEM [1], предназначенные для решения задач проектирования электроразведочных работ и интерпретации получаемых данных и установленные на платформе «Web-ориентированный производственно-исследовательский центр для решения научных и практических задач геологоразведки электромагнитными методами».

1. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТРЕХМЕРНЫХ ГЕОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Доступ к программным комплексам WebGEM и GeoEM [1] осуществляется через web-сервис, с помощью которого с главной страницы платформы посредством вызова удаленного рабочего стола запускается графический интерфейс программных комплексов.

Основными принципами при создании программных комплексов WebGEM и GeoEM [1] были их максимальная ориентированность на пользователя-геофизика, т. е. удобство запуска геофизической задачи – формирование геоэлектрической модели в терминах, привычных для геофизика, и автоматизация алгоритмов построения конечноэлементных сеток, не требующих участия пользователя и обеспечивающих необходимую точность решения задачи.

В окне графического интерфейса пользователю предоставляется возможность задания геоэлектрических моделей, определяемых набором слоев вмещающей горизонтально-слоистой среды в виде значений их толщин и удельных сопротивлений и набором трехмерных объектов в виде параллелепипедов, приемно-генераторной установки и системы наблюдений. Пользователю также предоставляется возможность запуска расчетов, визуализации результатов и их сохранения в базе данных.

* Статья получена 17 декабря 2012 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

В программном комплексе предусмотрена возможность выполнения 3D-моделирования для четырех типов контролируемых источников: индукционной петли различной формы, горизонтальной электрической линии (ГЭЛ), вертикальной электрической линии (ВЭЛ), кругового электрического диполя (КЭД) в любом из трех режимов – стационарном, нестационарном и гармоническом, а также возможность 3D-моделирования при решении задач магнитотеллурических зондирований (МТЗ).

Запуск и выполнение расчетов реализуется в концепции «облачных вычислений», система сама определяет свободные ресурсы, выделяет их в зависимости от запускаемой задачи и выполняет расчет. При этом распараллеливание по свободным ядрам и процессорам выполняется в зависимости от условий решаемой задачи. Например, если моделируется нестационарный режим с контролируемым источником, то распараллеливание ведется по положениям приемно-генераторной установки. Если же рассчитывается гармонический процесс, то в случае моделирования электромагнитного поля от контролируемого источника выполняется распараллеливание по положениям и по частотам, а в случае решения задач МТЗ – по частотам и по направлению токов.

Аппаратная часть, на которой может функционировать рассматриваемое программное обеспечение (ПО), включает в себя главный сервер для управления web-частью, сервер, на котором осуществляется работа пользователей с графическим интерфейсом, а также набор вычислительных серверов, на которых непосредственно выполняются расчеты. Для управления свободными ресурсами на главном сервере хранится таблица, в которой перечислены все серверы, доступные для расчетов, с соответствующими установленными на них модулями ПО. При запуске подзадач очередной задачи соответствующие ресурсы в таблице помечаются как занятые, а после завершения подзадач помечаются как освободившиеся.

Реализующее 3D-моделирование ПО основано на методе конечных элементов (МКЭ). В процессе его создания были исследованы различные математические постановки, конечноэлементные аппроксимации и методы решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), и на данном этапе в ПО включены те, которые показали наибольшую эффективность при решении заданного класса задач. Соответствующие математические модели и вычислительные схемы, основанные на использовании МКЭ и технологии выделения поля вмещающей горизонтально-слоистой среды, рассмотрены в работе [1].

При расчете гармонических полей для подавляющего большинства задач как с естественными источниками электромагнитного поля (задачи магнитотеллурических зондирований), так и с контролируемыми источниками наиболее эффективной оказалась векторно-скалярная постановка [2–4], для которой полученная в результате конечноэлементной аппроксимации [5, 6] СЛАУ решалась с использованием комплексной модификации метода сопряженных невязок (СОСР) [7]:

$$\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{A}^a) + i\omega \sigma (\mathbf{A}^a + \operatorname{grad} V^a) = (\sigma - \sigma^n) \mathbf{E}^n, \quad (1)$$

$$-i\omega \operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} V^a) - i\omega \operatorname{div}(\sigma \mathbf{A}^a) = -\operatorname{div}((\sigma - \sigma^n) \mathbf{E}^n), \quad (2)$$

где \mathbf{A}^a – вектор-потенциал (его разложение при построении дискретного аналога выполняется по векторным базисным функциям) и V^a – скалярный электрический потенциал (его разложение при построении дискретного аналога выполняется по скалярным базисным функциям) аномального поля (определяемого трехмерными неоднородностями удельной проводимости); σ^n – проводимость вмещающей горизонтально-слоистой среды; \mathbf{E}^n – вектор напряженности электрического поля в горизонтально-слоистой среде (нормальное поле), а функция σ характеризует проводимость трехмерной среды.

Процедура построения оптимизированной трехмерной конечноэлементной сетки состоит из двух основных этапов:

1) построение базовой регулярной (параллелепипедальной) трехмерной сетки, обеспечивающей необходимую точность решения для конкретной геоэлектрической модели;

2) построение на базе регулярной нерегулярной трехмерной сетки, существенно меньшего размера, но обеспечивающей точность решения не хуже, чем на регулярной сетке.

При построении базовой регулярной трехмерной сетки учитывается тот факт, что при расчете полей влияния трехмерных объектов роль источников играют сами объекты, поэтому сгущение трехмерной сетки осуществляется именно к ним. При этом соблюдается требование плавных изменений шагов по сетке и учитываются следующие факторы: близость трехмерного объекта к источнику электромагнитного поля, контраст проводимости этого объекта по отношению к вмещающей среде и его размер, расположение приемников. Для построения регулярной трехмерной сетки используется структура данных для хранения геоэлектрической модели, в которой объекты задаются номерами границ по x , y и z , а сами границы задаются отдельными массивами по x , y и z [5]. Кроме того, для настройки сетки используется файл опций, который содержит основные параметры сетки, позволяющие перестраивать ее в зависимости от типа задачи. В целом, сетка строится так, чтобы в промежутках между выделенными границами, являющимися, как правило, границами горизонтальных слоев или трехмерных неоднородностей, выполнялись определенные требования к ее шагам. При этом в сетке не должно быть резкой смены шага, а к 3D-объектам должно быть выполнено ее сгущение с учетом свойств объекта.

Нерегулярная сетка строится путем удаления из регулярной сетки «лишних» узлов, которые появляются в тех местах регулярной сетки, где шаг по одному из направлений существенно больше шагов по другим направлениям. Алгоритм построения такой сетки подробно описан в работе [8].

Ниже приведем и кратко опишем структуру части ПО, реализующей трехмерное моделирование геоэлектромагнитных полей для контролируемых источников (попутно будет сделано несколько замечаний и относительно задач МТЗ). Эта структура показана на рис. 1.

Процесс расчета начинается с задания геоэлектрической модели и определения типа задачи. После этого выполняется расчет нормального поля (переходы Д1) и ряд операций по подготовке к расчету аномального поля (переход Д1_3D – это построение 3D-сетки). Расчет нормального поля выполняется по одной из пяти веток (переходы Д1_П, Д1_Г, Д1_К, Д1_В и Д1_МТ1D) в зависимости от типа источника поля (петля, ГЭЛ, КЭД, ВЭЛ и МТЗ соответственно). На первом уровне в схеме ПО во всех ветках (включая ветки решения трехмерных задач) обозначены модули построения сеток, обозначенные идентификаторами ПС_тип источника.

Внутренняя структура данных для хранения геоэлектрической модели, которая заполняется в результате работы препроцессора, содержит информацию о слоях, объектах, приемно-генераторной установке, диапазоне времен (или частотах), уровне точности. Параметры вмещающей среды хранятся в виде координат границ слоев и значений удельной проводимости, параметры источника в виде координат расположения и размера. Также в этой структуре хранятся параметры всех трехмерных неоднородностей (3D-объектов), координаты приемников, диапазон времени (начальное и конечное время) и параметры, являющиеся множителями к решению: величина тока в источнике, момент приемника и др. в зависимости от типа задачи. Временная сетка является единой для расчета нормальной и аномальной составляющей поля и строится с учетом характера изменения поля в процессе его становления – начальные шаги могут на несколько порядков отличаться от конечных.

В результате исполнения модуля ПС_3DКИ формируется структура данных, содержащая информацию о трехмерной сетке для расчета полей от контролируемых источников.

Аналогично, в результате исполнения модуля ПС_3DMТ формируется структура данных, содержащая информацию о трехмерной сетке для расчета полей в задачах МТЗ.

Рассмотрим, как выполняется расчет нормального поля. Для петлевого источника по связи Д1_П первым исполняется модуль ПС_П, где происходит построение двумерной сетки со сгущением к сосредоточенному источнику, расположенному на расстоянии R (радиус петли) от начала координат по оси r и на уровне Z (расположение петли относительно земной поверхности) по оси z (петля при обычной наземной съемке расположена на уровне нуля – дневная поверхность, в аэроварианте она зависит, например, от высоты полета, а в задачах инженерной геофизики и вовсе может находиться ниже уровня дневной поверхности, например, при проведении исследований в тоннелях). Если петля не круглая, то выполняется расчет поля точечного источника, из которого формируется поле петли заданной конфигурации.

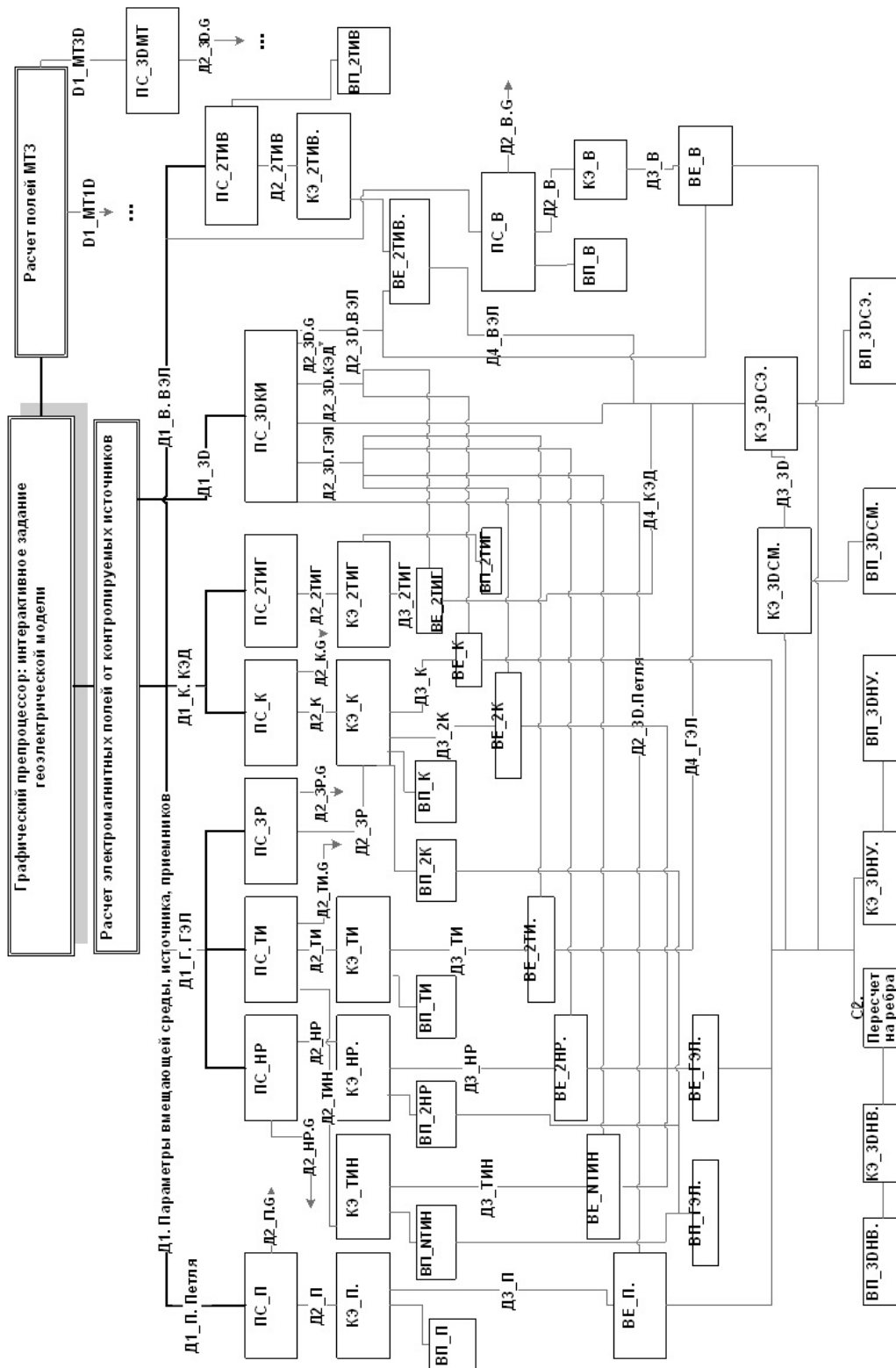


Рис. 1. Структура части ПО, реализующей трехмерное моделирование геоэлектromагнитных полей для контролируемых источников

Для КЭДа (переход Д1_К) расчет идет по двум относительно независимым веткам, поскольку КЭД является гальваническим источником, для которого может быть ненулевым начальное распределение вектор-потенциала A^a и, кроме того, может потребоваться выдача характеристик поля на постоянном токе. Поэтому независимо друг от друга выполняются программные модули с идентификаторами ПС_К и ПС_2ТИГ. Модуль ПС_К обеспечивает построение сетки со сгущением по z к поверхности Z расположения КЭД (как правило, это дневная поверхность, за исключением морских работ, где КЭД может быть помещен на дно) и равномерным шагом от начала координат до координаты R (радиуса КЭД). Модуль ПС_2ТИГ выполняет построение сетки, сгущающейся к каждому из двух сосредоточенных источников, один из которых расположен в начале координат по r , а второй – на удалении R (по z эти источники расположены на одном уровне, равном Z).

Для ГЭЛа (переход Д1_Г) вычисление нормального поля выполняется с использованием нескольких осесимметричных источников [1], и поэтому расчет идет по нескольким относительно независимым веткам. Эти ветки соответствуют вычислению полей от следующих источников: незаземленного радиального (НР), заземленного радиального (ЗР) и двух типов точечного источника (один тип используется для расчета стационарного поля, другой – для нестационарного). При расчете поля точечного источника сетка (в модуле ПС_ТИ) строится со сгущением к началу координат по r и к поверхности $z = Z$ расположения ГЭЛ. Нестационарное поле точечного источника используется для расчета третьей составляющей поля ГЭЛ – поля незаземленной токовой линии, которое вычисляется как сумма полей от точечных источников, расставленных вдоль провода ГЭЛ. Затем вызываются модули ПС_НР и ПС_ЗР, обеспечивающие построение сетки для источников НР и ЗР. Сетка строится со сгущением к началу координат по r и к поверхности $z = Z$ расположения ГЭЛ. Несмотря на то, что источник ЗР является аналогом КЭД с бесконечным радиусом R , модуль ПС_К для ЗР не подходит, поскольку обеспечивает построение практически равномерной сетки между внутренним и внешним радиусами КЭД. Сетки для НР и ЗР различаются лишь тем, что для ЗР сетка в воздухе не строится.

Поскольку ГЭЛ так же, как и КЭД, является гальваническим источником, для него тоже необходимо вычислять начальное распределение вектор-потенциала A^a . Может также потребоваться и выдача значений поля ГЭЛ на постоянном токе, которое в горизонтально-слоистой среде является суммой осесимметричных полей двух точечных источников. Поэтому требуется решение одной стационарной осесимметричной задачи, а построение соответствующей сетки, как уже говорилось, обеспечивает модуль ПС_ТИ.

При расчете поля ВЭЛ так же, как и для КЭД и ГЭЛ, требуется вычислить распределение стационарного электрического поля, которое будет использоваться для расчета начального распределения A^a (ВЭЛ тоже гальванический источник, и следовательно, поле A^a в режиме постоянного тока при наличии трехмерных неоднородностей будет ненулевым), а также для выдачи характеристик поля на постоянном токе. Построение сетки для расчета стационарного электрического поля реализует модуль ПС_2ТИВ – он выполняет построение двумерной сетки для задачи с двумя сосредоточенными на окружностях с радиусом r_0 источниками и помещенными по z на уровни Z_A и Z_B , которые соответствуют глубинам точек заземления ВЭЛ. Построение сетки для расчета нестационарного осесимметричного поля ВЭЛ реализует модуль ПС_В. Он обеспечивает построение сетки с очень сильным сгущением по r к r_0 и гораздо более крупными шагами по z с некоторым сгущением к области между Z_A и Z_B , где сетка строится с почти постоянным шагом.

В результате выполнения модулей ПС_тип_источника в соответствующих структурах данных формируются двумерные прямоугольные сетки, которые затем используются в модулях с идентификаторами КЭ_тип_источника, выполняющими конечноэлементные расчеты (связи Д2_тип_источника). Структуры данных для хранения прямоугольных несогласованных сеток содержат координаты всех узлов, информацию о конечных элементах (глобальные номера узлов), номера в каталоге материалов (определяющих номер подобласти, по которому

определяются значения удельной проводимости и магнитной проницаемости), значения удельной проводимости в различных подобластях.

Таким образом, расчет нормальной составляющей поля от петлевого источника выполняет модуль ПС_П, реализующий построение сетки, и модуль КЭ_П, реализующий конечноэлементный расчет осесимметричного поля. В результате формируется распределение $A_{\phi}^{2D}(r, z, t)$ [1] в узлах двумерной конечноэлементной сетки.

Расчет нормальной составляющей нестационарного поля для источника типа КЭД обеспечивают модуль ПС_К, реализующий построение двумерной сетки, и модуль КЭ_К, реализующий конечноэлементный расчет ϕ -компоненты напряженности магнитного поля $H_{\phi}^{2D}(r, z, t)$ [1]. Расчет стационарного электрического осесимметричного поля $V^{2D}(r, z)$ выполняется с использованием модулей ПС_2ТИГ (построение сетки) и КЭ_2ТИГ (построение конечноэлементного решения).

Расчет нормальной составляющей поля для источника типа ГЭЛ выполняется следующим образом. С помощью модулей ПС_ТИ и КЭ_ТИН вычисляется поле $A_x(x, y, z, t)$ от токовой линии АВ [1]. Модуль ПС_НР и КЭ_НР выполняют расчет осесимметричного нестационарного поля $A_r^{2D}(r, z, t)$, а модули ПС_ЗР и КЭ_К выполняют расчет нестационарного осесимметричного поля $H_{\phi}^{2D}(r, z, t)$. Расчет стационарного электрического осесимметричного поля $V^{2D}(r, z)$ выполняют модули ПС_ТИ и КЭ_ТИ.

Вычисление поля от источника типа ВЭЛ осуществляется следующим образом. Модули ПС_2ТИВ и КЭ_2ТИВ выполняют расчет стационарного электрического осесимметричного поля $V^{2D}(r, z)$. Модули ПС_В и КЭ_В реализуют конечноэлементный расчет нестационарного осесимметричного поля $H_{\phi}^{2D}(r, z, t)$ [1].

Таким образом, модули с идентификаторами КЭ_тип_источника обеспечивают конечноэлементный расчет, в результате которого в соответствующие структуры данных заносятся значения потенциалов или некоторых компонент напряженностей нормальных полей в узлах двумерных сеток, доступ к которым осуществляется по связям ДЗ_тип источника.

Обработку конечноэлементных решений двумерных (осесимметричных) задач осуществляют модули типа ВП_тип_источника, которые вычисляют необходимые значения поля в приемниках (ЭДС в индукционных приемниках, напряжение на линиях MN, значения компонент магнитного поля \mathbf{B} или \mathbf{H}), а также модули типа ВЕ_тип_источника, обеспечивающие формирование значений \mathbf{E}^n и V^n , необходимые для расчета трехмерных аномальных полей. Точки для расчета \mathbf{E}^n и V^n внутри (и на границах) трехмерных неоднородностей формируются модулем ПС_3ДКИ (и модулем ПС_3ДМТ при решении задач МТЗ) совместно с генерацией конечноэлементной сетки и затем (связи Д2_3Д.тип_источника) используются в модулях ВЕ_тип_источника, где также происходит обращение (связи Д3_тип_источника) к структурам данных, в которых хранятся распределения потенциалов нормальных полей в узлах двумерных сеток и характеристики основного источника (положение его центра в плане, а для ГЭЛ координаты точек заземления и информация о системе точечных источников, расставленных вдоль токовой линии ГЭЛ).

Точки для расчета \mathbf{E}^n представлены в структуре данных своими координатами и номером материала. В ситуации, если точка расположена на границе нескольких материалов, то вычисляются и хранятся, соответственно, несколько значений $\mathbf{E}^n(x, y, z, t)$ (в этом случае в массиве точек, соответствующих аномальным трехмерным неоднородностям, хранятся несколько точек с одинаковыми координатами, но с различающимися номерами материалов).

Расчет стационарного поля E^n в приемниках выполняется модулями ВП_2ТИ (для ГЭЛ), ВП_2ТИГ (для КЭД) и ВП_2ТИВ (для ВЭЛ). Пересчеты потенциала V^n в точки, расположенные в трехмерных неоднородностях, в зависимости от источника обеспечиваются модулями ВЕ_2ТИ (для ГЭЛ), ВЕ_2ТИГ (для КЭД) и ВЕ_2ТИВ (для ВЭЛ). Вычисленные значения V^n в точках, соответствующих трехмерным объектам, используются (связь Д4_тип_источника) в модуле КЭ_3DCE, где выполняется конечноэлементный расчет аномальной составляющей стационарного электрического поля, в результате которого формируется поле V^a во всех узлах трехмерной сетки. Значения V^n и V^a (связь Д3_3DV) используются в модуле КЭ_3DCM, где выполняется конечноэлементный расчет аномальной составляющей стационарного магнитного поля, в результате которого формируется стационарное поле A^a [1]. После этого управление передается модулю ВП_3DCЭ, который обеспечивает выдачу в приемниках значений аномальной составляющей поля E^a на постоянном токе. Модуль ВП_3DCM обеспечивает выдачу в приемниках значений магнитной индукции стационарного аномального поля.

Для расчета трехмерного нестационарного поля необходимы начальные значения потенциала A^a в узлах трехмерной сетки. Вычисление этого начального поля выполняется после работы модулей ПС_3DKI и КЭ_3DCE только для гальванических источников типа ГЭЛ, КЭД и ВЭЛ модулем КЭ_3DCM. Для петлевого источника после исполнения модуля ПС_3DKI и вычисления нормального поля управление сразу передается (связь Д2_3D.петля) модулям, предназначенным для расчета нестационарного аномального поля, при этом из структуры данных берется только трехмерная сетка, а значения A^a принимаются равными нулю.

Программные модули, обеспечивающие выдачу нестационарного поля в соответствующих (в зависимости от типа источника) приемниках и значений E^n в точках трехмерных объектов с аномальной проводимостью, работают и взаимодействуют следующим образом.

При работе ветки, обеспечивающей расчет поля от петлевого источника, из соответствующих структур данных берутся (связь Д3_П) двумерная конечноэлементная сетка, значения на ней потенциала $A_\phi^{2D}(r, z, t)$ и положение центра петли в плане, и управление от модуля КЭ_П передается модулю ВП_П, где происходит выдача значений ЭДС нормального поля и, при необходимости, значений E^n в приемниках, а также модулю ВЕ_П, где происходит формирование $E^n(x, y, z, t)$.

В случае прохода по ветке, обеспечивающей расчет поля от источника типа КЭД, от модуля КЭ_К управление передается модулям ВП_К, где происходит выдача значений нормального поля в приемниках, и ВЕ_К, где происходит формирование поля $E^n(x, y, z, t)$. В случае же, когда модулю КЭ_К управление было передано от ПС_НР (т. е. процесс шел по ветке, обеспечивающей вычисление нормального поля от ГЭЛ), от КЭ_К управление передается модулям ВП_2К и ВЕ_2К, где с учетом координат ГЭЛ (связь Д3_2К) вычисляются значения $E^n(x, y, z, t)$.

Аналогично и в случае прохода по ветке, обеспечивающей расчет поля от источника типа ВЭЛ, управление от модуля КЭ_В передается модулям ВП_В и ВЕ_В, где вычисляются значения $E^n(x, y, z, t)$.

В случае, когда выполняется расчет поля от ГЭЛ, помимо уже описанной выше ветки вычислительный процесс идет еще и по веткам ПС_НР \rightarrow КЭ_НР и ПС_ТИ \rightarrow КЭ_ТИН. Расчет значений $E^n(x, y, z, t)$ в этом случае осуществляется модулями ВП_2НР и ВЕ_2НР и ВП_НТИН и ВЕ_НТИН. Затем управление передается модулям ВП_ГЭЛ и ВЕ_ГЭЛ, где происходит суммирование всех составляющих поля ГЭЛ для формирования итогового нормального поля.

Таким образом, в соответствующей структуре данных формируются значения $E^n(x, y, z, t)$ в точках трехмерных объектов, а в случае гальванических источников и начальные значения вектор-потенциала $A^a(x, y, z)$.

Для расчета трехмерного нестационарного электромагнитного поля реализовано две математические постановки и, соответственно, две вычислительные схемы с использованием узлового и векторного МКЭ. При использовании векторной постановки (это устанавливается в опциях при настройке параметров программы) вначале управление передается модулю C2, где формируются веса разложений $E^n(x, y, z, t)$ и $A^a(x, y, z)$ по векторным базисным функциям, а затем – модулю КЭ_3DНВ, который выполняет конечноэлементный расчет трехмерного нестационарного поля и после этого передает управление модулю ВП_3DНВ, где с использованием процедур сглаживания происходит выдача необходимых характеристик в приемниках. В случае выбора узловой постановки управление сразу передается модулю КЭ_3DНУ, который выполняет конечноэлементный расчет трехмерного нестационарного поля и передает управление модулю ВП_3DНУ, где также с использованием процедур сглаживания происходит выдача необходимых характеристик в приемниках.

Мы достаточно подробно описали взаимодействие модулей при расчете нестационарных процессов в соответствии со структурой, приведенной на рис. 1. Для расчета гармонических процессов взаимодействие модулей происходит аналогично (за исключением того, что там, естественно, не требуется расчет стационарных полей).

2. ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

В качестве примера использования программного комплекса приведем расчет магнитотеллурического поля для трехмерной геоэлектрической модели, которая была получена как результат интерпретации данных на одной из площадей Восточной Сибири, расположенной в зоне сочленения Присаяно-Енисейской синеклизы с Ангаро-Ленской ступенью. Общий вид геоэлектрической модели в главном окне программного комплекса приведен на рис. 2. На правой панели представлена информация о слоях вмещающей горизонтально-слоистой среды (в ней H – толщины слоев, R_o – их удельные сопротивления) и об объектах. Рассматриваемая геоэлектрическая модель включала в себя 52 трехмерных объекта в виде параллелепипедов, их координаты и удельное сопротивление представлены на рис. 3 в виде фрагмента базы данных, в которую данная модель была сохранена.

В центральной части главного окна на рис. 2 также представлено окно, которое появляется при запуске параллельного расчета. Оно содержит следующую информацию. В первом столбце указан номер подзадачи, во втором – имя компьютера, в третьем – значение частоты (в данном случае определяющее подзадачу), в остальных столбцах содержится информация о процессе решения конечноэлементной СЛАУ. Эта информация включает в себя название решателя, уровень требуемой невязки, уровень текущей невязки, номер текущей итерации.

При расчете электромагнитных полей с контролируемыми источниками номер подзадачи может определяться также положением приемно-генераторной установки, в этом случае в третьем столбце внутреннего окна указываются координаты ее центра. При этом если моделируется нестационарный процесс, то в четвертом столбце внутреннего окна указываются текущий номер временного слоя и общее количество временных слоев.

На рис. 3 представлена информация о всех трехмерных объектах рассматриваемой модели, хранящейся в базе данных геоэлектрических моделей, на нем g_o – удельные сопротивления объектов, а X_{\min} , X_{\max} , Y_{\min} , Y_{\max} , Z_{\min} , Z_{\max} – границы объектов по соответствующим осям.

На рис. 4 приведены фрагменты сечений нерегулярной трехмерной сетки, используемой при расчете магнитотеллурического поля для рассматриваемой геоэлектрической модели. Данная конечноэлементная сетка содержала порядка 95000 узлов, а время счета (с учетом распараллеливания на 42 ядрах) составило порядка 30 мин.

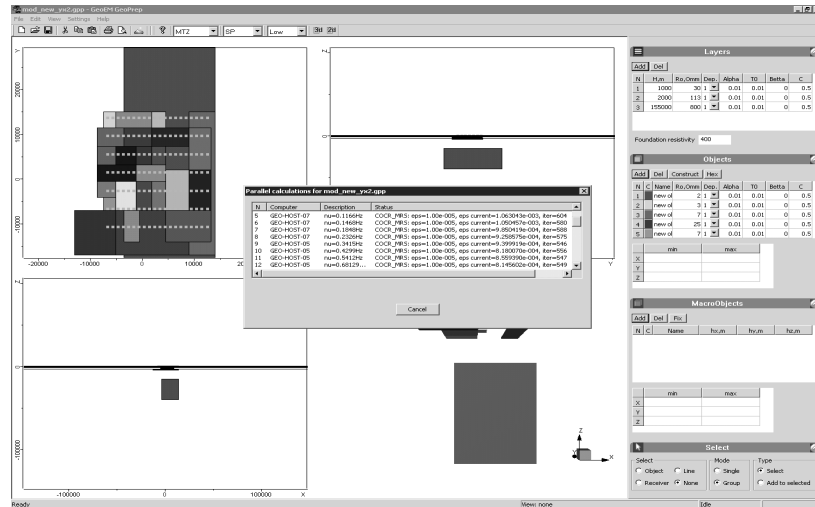


Рис. 2. Главное окно интерфейса программного комплекса с визуализацией геoeлектрической модели и процесс параллельного расчета

Xmin	Xmax	Ymin	Ymax	Zmin	Zmax	hex_id	ro
-3500	14000	-25000	35000	-4000	-15000	0	2
-7500	1800	7300	15000	-4500	-3500	0	3
9000	14000	-17000	15000	-4500	-4000	0	7
-5150	1800	-7000	3200	-2500	-2000	0	25
-7500	1800	-7000	7300	-4500	-4000	0	7
-13000	1800	-17000	-7000	-4500	-4000	0	17
-5150	9000	-17000	-7000	-2500	-2000	0	50
-5150	1800	3200	15000	-2500	-2000	0	25
-1200	1800	3200	7300	-50	-20	0	11
-1200	1800	3200	7300	-900	-200	0	50
-1200	1800	-4100	7300	-1250	-1000	0	30
-1200	4500	-500	3200	-130	-80	0	8
-1200	4500	-500	3200	-1000	-350	0	17
-1200	1800	-7000	-500	-60	-10	0	120
-1200	1800	-7000	-500	-150	-60	0	12
-1200	1800	-7000	-500	-900	-300	0	20
-1200	1800	-500	3200	-2000	-1250	0	25
-3500	1800	7300	11500	-130	-20	0	20
-3500	1800	7300	11500	-900	-250	0	120
-3500	-500	-14000	-7000	-70	-20	0	15
-3500	-500	-14000	-7000	-1100	-400	0	80
-8700	-3500	7300	11500	-800	-400	0	120
-8700	-5150	3200	7300	-150	-10	0	19
-8700	-5150	3200	7300	-1000	-250	0	41
-8700	-1200	-4100	7300	-1500	-1000	0	30
-5150	-1200	3200	7300	-100	-10	0	17
-5150	-1200	3200	7300	-450	-300	0	20
-8700	-1200	-500	3200	-100	-10	0	17
-8700	-1200	-500	3200	-450	-300	0	20
-5150	-1200	-7000	-500	-250	-60	0	17

Xmin	Xmax	Ymin	Ymax	Zmin	Zmax	hex_id	ro
-5150	-1200	-7000	-500	-450	-250	0	20
-5150	-1200	-7000	-500	-840	-650	0	14
-1200	1800	3200	7300	-1500	-1250	0	25
1800	9000	7300	11500	-150	-10	0	70
1800	9000	7300	11500	-500	-230	0	16
4500	9000	2000	7300	-150	-30	0	40
4500	9000	2000	7300	-700	-200	0	12
4500	9000	-7000	2000	-400	-10	0	45
4500	9000	-7000	2000	-1000	-400	0	35
4500	13200	-14000	-7000	-50	-10	0	16
4500	13200	-14000	-7000	-1000	-300	0	50
4500	9000	2000	7300	-1500	-1000	0	30
9000	13200	2000	11500	-150	-20	0	20
9000	13200	2000	11500	-300	-150	0	120
9000	13200	2000	11500	-900	-500	0	120
9000	13200	2000	11500	-1500	-1300	0	30
9000	13200	-7000	2000	-150	-10	0	21
9000	13200	-7000	2000	-900	-250	0	120
1800	4500	-7000	-500	-400	-70	0	40
1800	4500	-7000	-500	-1000	-600	0	25
1800	4500	7300	15000	-2500	-2000	0	25
1800	9000	-17000	-14000	-4500	-4000	0	10

Рис. 3. Фрагмент базы данных, содержащий информацию о трехмерных объектах геoeлектрической модели, представленной на рис. 2

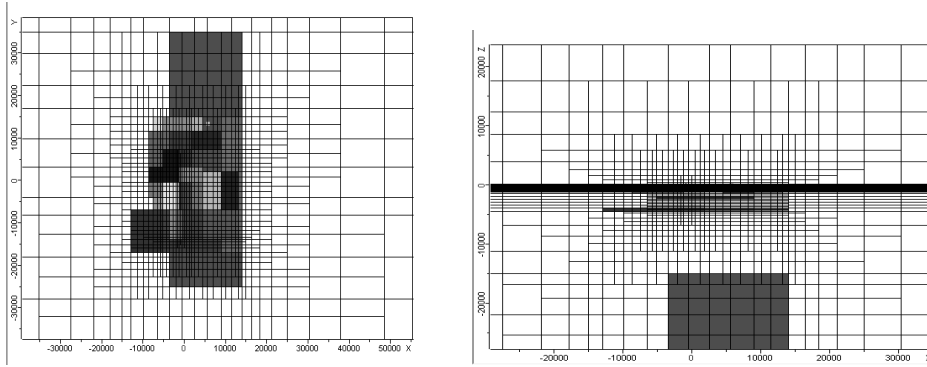


Рис. 4. Фрагменты сечений нерегулярной трехмерной сетки, используемой для расчета

На рис. 5 приведены графики фаз φ_{xy} , φ_{yx} [9] в точках первого и девятнадцатого вертикальных профилей, представленных на рис. 2 (обозначения от 1 до 7 соответствуют расположению точек снизу вверх).

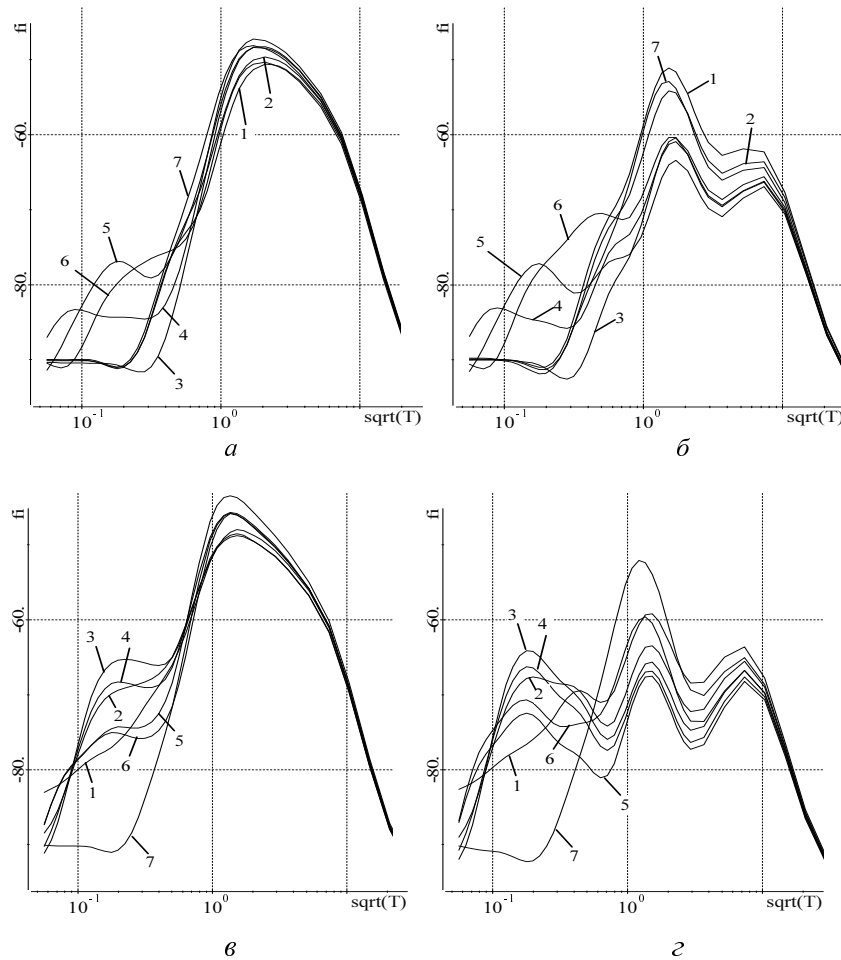


Рис. 5. Графики φ_{xy} (а, в), φ_{yx} (б, г) для геоэлектрической модели, представленной на рис. 2 для первого (а, б) и девятнадцатого (в, г) вертикальных профилей. Индекс кривых – номер точки на соответствующем профиле при нумерации снизу-вверх

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программные комплексы WebGEM и GeoEM позволяют выполнять 3D-моделирование геоэлектromагнитных полей при различных способах их возбуждения контролируемые источниками и при возбуждении естественными источниками (задачи МТЗ) в многоядерных вычислительных системах, причем распараллеливание и распределение подзадач по ядрам вычислительной системы выполняется автоматически с помощью системного ПО программного комплекса WebGEM. Интерфейс программных комплексов учитывает специфику геофизических задач и позволяет пользователю-геофизику формировать интересующую его задачу и получать результаты в привычных для него терминах, что существенно облегчает использование рассмотренного ПО с его возможностями учета сложной трехмерной структуры исследуемой среды для проектирования работ и проведения интерпретаций практических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Персова М.Г. Компьютерное моделирование геоэлектromагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Г.М. Тригубович // Физика Земли, 2011. – № 2. – С. 3–14.
- [2] Edlinger R. A joint vector and scalar potential formulation for driven high-frequency problems using hybrid edge and nodal finite elements / R. Edlinger, O. Biro // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – Vol. 44. – Jan. 1996. – Pp. 15–23.
- [3] Mukherjee S. 3D controlled-source electromagnetic edge-based finite element modeling of conductive and permeable heterogeneities / S. Mukherjee, M.E. Everett // Geophysics, 2011. – Vol. 76. – № 4. – F215–F226.
- [4] Домников П.А. Конечноэлементное моделирование трехмерных магнитотеллурических полей с применением технологии деревьев-кодереьев и постановки с совместным использованием векторного и скалярного потенциалов / П.А. Домников, С.В. Киреева, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 3. – С. 43–52.
- [5] Соловейчик Ю.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: учеб. пособие / Ю.Г. Соловейчик, М.Э. Рояк, М.Г. Персова. – Новосибирск: НГТУ, 2007. – 896 с. Сер. «Учебники НГТУ».
- [6] Ильин В.П. Методы и технологии конечных элементов / В.П. Ильин. – Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ, 2007. – 371 с.
- [7] Sogabe T. A COCR method for solving complex symmetric linear systems / T. Sogabe, S.-L. Zhang // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2007. – № 199. – Pp. 297–303.
- [8] Соловейчик Ю.Г. Решение трехмерных стационарных задач электроразведки на нерегулярных параллелепипедальных сетках / Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Токарева, М.Г. Персова // Вестник ИрГТУ. Иркутск. – 2004. – № 1. – С. 22–33.
- [9] Бердичевский М.Н. Модели и методы магнитотеллурики / М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев. – М.: Научный мир, 2009. – 780 с.

REFERENCES

- [1] Persova M.G., Solovejchik Ju.G., Trigubovich G.M. Komp'yuternoe modelirovanie geojelektromagnitnyh polej v trehmernyh sredah metodom konechnykh jelementov // Fizika Zemli, 2011. – № 2. – S. 3–14.
- [2] Edlinger R., Biro O. A joint vector and scalar potential formulation for driven high-frequency problems using hybrid edge and nodal finite elements // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – vol. 44. – Jan. 1996. – pp. 15–23.
- [3] Mukherjee S., Everett M.E. 3D controlled-source electromagnetic edge-based finite element modeling of conductive and permeable heterogeneities // Geophysics, 2011. – vol. 76. – no. 4. – F215–F226.
- [4] Domnikov P.A., Kireeva S.V., Persova M.G., Solovejchik Ju.G. Konechnojelementnoe modelirovanie trehmernyh magnitotelluricheskikh polej s primeneniem tehnologii derev'ev-koderev'ev i postanovki s sovmesnym ispol'zovaniem vektor-nogo i skal'jarnogo potencialov // Nauchnyj vestnik NGTU. – 2011. – № 3. – S. 43–52.
- [5] Solovejchik Ju.G., Rojak M.Je., Persova M.G. Metod konechnykh jelementov dlja reshenija skal'jarnykh i vektornykh zadach // Uchebnoe posobie. Ser. «Uchebniki NGTU». – Novosibirsk: NGTU, 2007. – 896 s.
- [6] Il'in V.P. Metody i tehnologii konechnykh jelementov – Novosibirsk: Izd. IVMiMG, 2007. – 371 s.
- [7] Sogabe T., S.-L. Zhang. A COCR method for solving complex symmetric linear systems // Journal of Computational and Applied Mathematics, 199(2007), pp. 297–303.
- [8] Solovejchik Ju.G., Tokareva M.G., Persova M.G. Reshenie trehmernyh stacionarnykh zadach jelektrozrazvedki na neregul'jarnykh paralelepipedal'nykh setkah // Vestnik IrGTU. Irkutsk. – 2004 g. – № 1. – S. 22–33.
- [9] Berdichevskij M.N., Dmitriev V.I. Modeli i metody magnitotelluriki. M.: Nauchnyj mir, 2009. – 780 s.

Персова Марина Геннадьевна, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – конечноэлементное моделирование электромагнитных полей в задачах геоэлектрики и электромеханики. Имеет более 100 публикаций, в том числе 2 монографии. E-mail: persova@fpm.ami.nstu.ru

Соловейчик Юрий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – конечноэлементное моделирование электромагнитных и тепловых полей. Имеет более 130 публикаций, в том числе 2 монографии. E-mail: kpmt@fpm.ami.nstu.ru

Токарева Марина Георгиевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – конечноэлементное моделирование электромагнитных полей и полей вызванной поляризации в задачах геоэлектрики. Имеет 28 публикаций. E-mail: tokarevamg@mail.ru

Алексанова Елена Дмитриевна, старший геофизик ООО «Северо-Запад». Основное направление научных исследований – обработка и интерпретация больших объемов данных магнитотеллурического зондирования. Имеет 10 публикаций. E-mail: alex-len@inbox.ru

Блинова Мария Евгеньевна, геофизик ООО «Северо-Запад». Основное направление научных исследований – обработка и интерпретация геофизических данных. Имеет 1 публикацию. E-mail: blinova_maria@mail.ru

Гусейнов Роман Гасымович, геофизик ЗАО «Иркутское электроразведочное предприятие». Основное направление научных исследований – обработка и интерпретация геофизических данных. Имеет 1 публикацию. E-mail: grg@ierp.ru

Давыденко Михаил Александрович, ведущий радиофизик ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания». Основное направление научных исследований – моделирование электромагнитных полей над проводящими поляризующимися средами. E-mail: rukolom@mail.ru

Егоров Илья Владимирович, геофизик ЗАО «Иркутское электроразведочное предприятие». Основное направление научных исследований – моделирование электромагнитных сигналов для сложно построенных сред, качественная 3D-интерпретация практических данных. Имеет 2 публикации. E-mail: eiv@ierp.ru

Ерпулев Антон Андреевич, геофизик ООО «Северо-Запад». Основное направление научных исследований – обработка и интерпретация геофизических данных. E-mail: erpulev@gmail.com

Кандакова Татьяна Александровна, геофизик ООО «Северо-Запад». Основное направление научных исследований – обработка и интерпретация геофизических данных. E-mail: medvedevatan@gmail.com

Семинский Игорь Константинович, старший-техник геофизик ЗАО «Иркутское электроразведочное предприятие». Основное направление научных исследований – моделирование электромагнитных сигналов для сложно построенных сред, интерпретация практических данных. E-mail: Sik@ierp.ru

Трусов Алексей Андреевич, главный геофизик отдела геолого-геофизических технологий ЗАО «Геофизическое научно-производственное предприятие Аэрогеофизика». Основное направление научных исследований – обработка и интерпретация геофизических данных. Имеет 15 публикаций. E-mail: trusov@aerogeo.ru

Яковлев Сергей Владимирович, ведущий геофизик ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания». Основное направление научных исследований – моделирование электромагнитных полей над проводящими поляризующимися средами. E-mail: s.yakovlev@hotmail.com

M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, M.G. Tokareva, E.D. Alexanova, M.E. Blinova, R.G. Guseinov, M.A. Davidenko, I.V. Egorov, A.A. Erpulev, T.A. Kandakova, I.K. Seminski, A.A. Trusov, S.V. Yakovlev
Application of GeoEM and WebEM Software Systems for Solving Scientific and Practical Tasks of Geoelectrical Survey

Software complexes developed for solving the electrical survey planning problems and interpreting the data obtained are studied in this paper. They make it possible to model 3D-geoelectromagnetic fields induced by controlled sources in different modes: direct current, time-harmonic and transient modes as well as when solving magnetotelluric sounding problems. The software complexes under consideration are based on the finite element method. Nodal and scalar basis functions were used for approximation. The graphical user interface of software complexes is accessed through a web service. This graphical user interface is user-friendly; it is specially designed for geophysicists. It serves to easily initiate a geophysical task, i.e. to form a geoelectrical model in the terms the geophysicists are used to. Finite element meshing is automated, and it doesn't involve any user's actions, but provides the necessary task solution accuracy. The examples of such meshes constructed for complex geoelectrical models are presented. The distributed computer system is used to calculate 3D electromagnetic fields, its balanced load being ensured when possible. The structure of software complexes is given in the article. The essential modules and the links between them, the function of these modules as well as the main data structures are described. The example of solving the problem for a complex geoelectrical model is given.

Key words: 3D-modeling, electromagnetic field, electrical survey, software, finite element method, distributed computing, web service, magnetotelluric sounding, controlled-source electromagnetics.