

Монтажный метод в ГИС INTEGRО и его использование для решения обратной гравитационной задачи

© 2021 г. — С.В. Мицын, Е.М. Большаков

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт»; Россия, Москва; smitsyn@yandex.ru, bolshakov.e.m@yandex.ru

Поступила 16.08.2021 г.

Принята к печати 05.09.2021 г.

Ключевые слова: *обратная задача гравиразведки, монтажный метод, плотностные модели.*

Аннотация: В последнее время монтажный метод привлекает всё больше внимания в контексте решения обратных гравитационных задач. Для ГИС INTEGRО разработан вариант метода в оригинальной формулировке, на произвольное количество возмущающих тел, инкорпорированных в среде с неоднородной плотностью, и в абсолютных плотностях, которые, однако, задаются заранее пользователем. Такая формулировка позволила создать реализацию монтажного метода, пригодного для моделирования территории на региональном масштабе. Для решения проблем, связанных с нестабильностью метода, предлагается оригинальный подход, основанный на введении приоритетов над атомарными модификациями и очереди над ними, а также на оценке процесса эволюции модели, а не только конечного результата. Разработанное программное обеспечение позволяет на компьютерах даже 5–8-летней давности обрабатывать большие сетки (десятки миллионов элементов замощения). На основе опыта апробации метода приведены некоторые соображения и приёмы для работы с ним. Приведён пример применения монтажного метода в рамках работ по трёхмерному моделированию территории на базе Енисей-Хатангского регионального прогиба.

Для цитирования: Мицын С.В., Большаков Е.М. Монтажный метод в ГИС INTEGRО и его использование для решения обратной гравитационной задачи // Геоинформатика. – 2021. – № 3. – С. 36–47. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-3-36-47.

Assembly method in GIS INTEGRО and its usage for solving of gravitational inverse problem

© 2021 — S.V. Mitsyn, E.M. Bolshakov

Federal State Budgetary Institution "All-Russian Research Geological Oil Institute", Geoinformatics Division; Moscow, Russia; smitsyn@yandex.ru, bolshakov.e.m@yandex.ru

Received 16.08.2021

Accepted for publication 05.09.2021

Key words: *inverse gravimetric problem, assembly method, density models.*

Abstract: Various methods based on growing bodies are lately gaining attention in a context of inverse gravity problem that we call a family of "assembly methods". A variant of method was adopted for GIS INTEGRО in original formulation that is fit for the problem of multiple bodies incorporated in an environment of varying density, in absolute densities (not density contrasts) that are however have to be a priori specified. Such formulation allowed the implementation of the method that is suitable for territory modeling in the regional scale. To workaround method's instability a number of changes are proposed that consist of introduction of priority on atomic modifications, modification queue and assessment of model evolution instead of just the final result. The developed software allows processing of large grids (tens of millions of tiling elements) even on 5–8 year old desktops. Based on method approbation experience some insights and practice methods are presented. An application example is presented as part of work on modeling of Enisei-Khatanga regional depression territory.

For citation: Mitsyn S.V., Bolshakov E.M. Assembly method in GIS INTEGRО and its usage for solving of gravitational inverse problem *Geoinformatika*. 2021;(3):36–47. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-3-36-47. In Russ.

Введение

Измерения геопотенциальных полей (гравитационных и геомагнитных) — один из самых распространённых видов геофизических съёмок, и поэтому эти данные находят широкое применение при трёхмерном моделировании территорий, в рамках которого решаются обратные задачи на такие поля. В общей постановке обратные задачи на сеточных моделях некорректны, что сильно ограничивает по-

лезность результатов моделирования; приёмы регуляризации недостаточны для обхода этой проблемы [7], а дополнительную априорную информацию трудно включить в обычные постановки обратных задач (например, в математическом программировании — как ограничения типа неравенств [1]).

Монтажный метод [1, 3], имеющий в своей основе метод кристаллизации Страхова, обладает свойствами регуляризации, исходящими из его

особенностей. Метод заключается в итеративном процессе последовательного приближения решения (квази-решения) обратной задачи с помощью модификаций плотностей отдельных элементов модели, которые осуществляются с учётом исходящих из априорной информации ограничений на возможные модификации и значения плотностей. Процесс решения просто интерпретируется исследователем, например, как заполнение пространства телами или вмещающей средой.

Богатство возможностей монтажного метода [1] ограничивается обнаруженными проблемами с его применением в более сложных постановках, например, при разнознаковых избыточных плотностях [4]. На основе практики работы с монтажным методом разработано алгоритмическое и программное обеспечение для ГИС INTEGR0, разрешающее трёхмерное моделирование как отдельно стоящих тел (рудный тип задач), так и комплексное моделирование сложной территории, выражающееся в виде задачи со сложным распределением масс [6]. Хотя в такой постановке монтажный метод является в некотором смысле нестабильным, авторы предлагают работать с ней, рассматривая решения в виде цепочки этапов эволюции состояния системы в процессе моделирования монтажным методом.

Другим способом борьбы с нестабильностью является контроль эволюции модели, состоящий в системе приоритетов в выборе направления эволюции, и, как это ни парадоксально, *неоптимальные* множественные модификации модели за одну итерацию монтажного метода. Таким образом вместо прямой минимизации функционала — невязки или более сложного вида — эволюция трёхмерной модели направляется по другому маршруту. Основная авторская идея состоит в том, что решающим фактором в построении «хорошей» модели является не минимизация функционала, определяющая направление эволюции модели, а само направление. Контроль направления эволюции модели вместо минимизации функционала жадным алгоритмом [8], позволил достичь интересных результатов в рамках монтажного метода. Этот контроль осуществлён с помощью набора правил эволюции, для которых, как полагают авторы, невозможно или очень трудно создать эквивалентный минимизируемый функционал, но так как каждый шаг эволюции всё-таки уменьшает функционал (в данном случае — невязку), то условие сходимости не нарушается.

Отдельная особенность состоит в том, что разработанное программное обеспечение не требует наличия вычислительного кластера для адекватной (по объёму затрачиваемого времени на получение решения) работы на больших сетках (десятки миллионов ячеек). Множественность модификаций модели за одну итерацию метода позволяет значительно ускорить исполнение монтажного метода на компьютере.

Модель территории

Авторы воспользовались наиболее простым типом моделируемой среды: пусть моделируемый объём (моделируемая территория) — прямоугольная призма $\Omega = \cup \omega$, ω — элементы замощения (ячейки), когерентные прямоугольные призмы со сторонами длиной b_x, b_y, b_z ; ячейки касаются друг друга только целыми сторонами. Ячейки — атомарные единицы модели, каждой точке ячейки ставится в соответствие одно и то же значение плотности. Назначим ячейкам индексы и будем в дальнейшем использовать индексы как основной способ обозначения этих ячеек: $V = \{v\}$ — множество всех трёхмерных индексов ячеек, $v = (v_x, v_y, v_z) \in 1..n_x \times 1..n_y \times 1..n_z = V$.

Для задания плотностей в данной формулировке метода используется специальная классово-плотностная модель $M(v)$, состоящая из композиции классовой модели и плотностных функций, определяемых ниже. Классовая модель $L(v)$ соотносит каждый элемент к классу (каждому элементу ставит в соответствие метку класса): $L: V \rightarrow \mathbb{L}$, где $\mathbb{L} \subset \mathbb{Z}_0$ — множество меток классов. Сам класс соотносит каждой ячейке, потенциально способной иметь соответствующую метку, значение физического параметра через плотностную функцию $D_i: V \rightarrow \mathbb{R}$. Для удобства определим комбинированную плотностную функцию $D: \mathbb{L} \times V \rightarrow \mathbb{R}, D(l, v) = D_i(v)$. Наконец, определим *классово-плотностную модель* $M = M_{L,D}: V \rightarrow \mathbb{R}, M(v) = D(L(v), v)$, которая соотносит каждой ячейке конкретное значение плотности.

Классы могут иметь предметное (например, геологическое) содержание. Так, классом может быть рудное тело, интрузия или вмещающая среда — например, слоистая или градиентная модель. Разные тела одной природы и генеза могут иметь как разные, так и одинаковые метки: в первом случае подразумевается важность разделения однородных тел в рамках решаемой задачи.

Определим две функции окрестности: окрестность модификаций $\eta_{\pm}(v) = \{u: u \in V \wedge |vx - ux| + |vy - uy| + |vz - uz| = 1\}$ и окрестность приоритета $\eta(v) = \{u: u \in V \wedge \max(|vx - ux|, |vy - uy|, |vz - uz|) \leq L_{\eta}\}$, где L_{η} — радиус окрестности — параметр, фиксируемый перед началом оптимизации.

Оптимизация

В монтажном методе построение модели состоит в итеративной эволюции модели через малые изменения классовой модели L : модель L_{i+1} получается из модели L_i переназначением значения метки для одной ячейки v , где новое значение берётся из множества значений меток ячеек из окрестности $\eta_{\pm}(v)$. Тогда разница между двумя соседними классовыми моделями определяется через ячейку, меняющую метку класса, и соседнюю ячейку, имеющую новое значение метки. Назовём *модификацией* пару ячеек $\mu = (v, u) \in \mathbb{W} \subset V^2$, таких что $u \in \eta_{\pm}(v)$; *доступной модификацией* — такую $\mu^* \in \mathcal{W}(L) \subset \mathbb{W}$, что $L(v) \neq L(u)$.

Договоримся, что если две классовые модели L_i и L_{i+1} (на шаге i) различаются переназначением метки у одной ячейки, то была совершена (применена) модификация $\mu = (v, u)$, если метка переназначена у ячейки v , а новое значение её метки — это значение метки ячейки u . Обозначим классовую модель с совершённой модификацией как $L_{i+1} = L_i + \mu$. Оптимизация заключается в итеративном выборе модификаций μ и их применении.

Из такого определения процесса оптимизации вытекает важное ограничение классово-плотностной модели, заключающееся в независимости плотности ячейки от меток других ячеек. Например, область дробления может моделироваться пониженной плотностью в центре с плавным переходом к плотности вмещающей среды по её краям. Модель с изменёнными границами простираения области дробления получается через изменение меток у некоторых ячеек модели, но тогда плотность должна меняться не только у них, но и у тех ячеек, которые находятся во всей области дробления, что запрещено классово-плотностной моделью — плотностные функции $D_i(v)$ не меняются в течение всего процесса оптимизации. Однако область дробления с переменной плотностью можно включить в модель, если её построение не является целью моделирования монтажным методом: она должна быть задана заранее и зафиксирована. По этой же причине недоступны некоторые приёмы монтажного метода — например, корректировка избыточных плотностей решением линейных задач на каждой итерации [1]. Более того, другими авторами указывается, что условием остановки в монтажном методе является именно достижение значения избыточной плотности заранее заданного интервала [4], что в общем случае невозможно в рамках выбранного модельного класса.

В разных типах монтажного метода используются разные функционалы, в том числе не использующие невязку поля прямо. В ГИС INTEGR0 же минимизируется напрямую невязка по полю, что и делает процесс оптимизацией.

Пусть линейный оператор A связывает модель с полем (вертикальная производная гравитационного потенциала для оси oZ , направленной вверх): $u_M = AM_{L,D}$. Под такой записью мы понимаем то, что классово-плотностная модель M , задаваемая классовой моделью L и комбинированной плотностной функцией D , полностью определяет сеточную плотностную модель, а для неё хорошо известен оператор прямой задачи [10].

Определим поле от модификации: $u_L(\mu) = AM_{L+\mu,D} - AM_{L,D}$. То есть, поле от модификации — эффект при применении модификации, который отразится на расчётном поле. В отдельных случаях имеется некоторая свобода по отношению к трансформациям и редукам поля. Так, если производится комплексное моделирование территории,

то можно работать с редуцированными моделями полей, для которых первый начальный момент приведён к 0. Более общий случай такой трансформации — удаление линейного тренда [9]

Пусть целевое поле $u_0 = u_0(x_i, y_i)$ задано в точках $\{(x_i, y_i)\}$, $i=1..n_u$. Обозначим невязку модели $r(M) = r_M = u_M - u_0$, норму невязки $|r|_p = (\sum_i |r_i|^p)^{1/p}$ ($p = 1$ или 2) и разницу норм невязок $r(\mu) = r_M(\mu) = |r_{M|L+\mu,D}|_p - |r_{M|L,D}|_p = |AM_{L+\mu,D} - u_0|_p - |AM_{L,D} - u_0|_p$ — эффект от применения модификации на норму невязки. Чем сильнее применение модификации уменьшает невязку модели, тем меньше $r(\mu)$; если применение модификации уменьшает невязку модели, то $r(\mu) < 0$.

Приоритет

Часто в качестве критерия оптимальности модификации используется минимизация невязки ($r(\mu) \rightarrow \min_\mu$) жадным алгоритмом, но на практике этот подход даёт плохие результаты. В некоторых работах предлагается регуляризованный функционал [9, 11]. Авторы предлагают использовать приоритеты над модификациями для контроля эволюции модели.

Определим функцию приоритета $P^*: W \rightarrow \mathbb{R}$, задающую приоритет для модификаций при текущей классовой модели (на текущей итерации); выбор модификации осуществляется на основе величины её приоритета. Пусть $\mu = (v, u)$ — допустимая модификация. Обозначим разницу плотностей ячейки до применения модификации и после как $D(\mu) = D(L(u), v) - D(L(v), v)$.

Авторы определили приоритет следующим образом:

$$P^*(\mu) = P^*(v, u) = r(\mu) |D(\mu)|^{-\gamma} |z_v|^\beta \left(\sum_{w \in \eta(v)} \delta_{L(u), L(w)} \right)^\alpha \quad (1)$$

В формуле (1) δ_{ij} — дельта Кронекера, z_v — глубина центра ячейки v . Приоритет управляется следующими коэффициентами:

- $\gamma \in \{0; 1\}$ контролирует зависимость приоритета от изменения плотности элемента при применении μ : большая разница плотностей продуцирует большой эффект на невязку, а установка $\gamma = 1$ позволяет уравновесить приоритет модификаций с различной разностью плотности. Когда $D(\mu) = 0$, полагается $|D(\mu)|^{-\gamma} = 0$.
- β контролирует приоритет по глубине: чем он больше, тем приоритетнее изменения на большей глубине; при малых значениях $\beta < 0.5$ приоритет отдаётся изменениям на малой глубине.
- Положительный параметр α (приоритет окрестности) позволяет отдавать приоритет таким модификациям, для которых у целевой вершины

v метки классов её окружения равны метке источника u : в ходе эволюции классовой модели классы составляются в группы из большого количества «компактно» расположенных ячеек; при $\alpha = 0$ неопределённость 0^0 разрешается как равная 1.

Приоритет задаёт порядок на модификациях: чем меньше приоритет, тем приоритетнее (предпочтительнее) модификация.

Ограничения

Кроме полей, обычно у исследователей имеются в наличии другие данные — например, сейсмические, скважинные. Их трудно включить в минимизируемый функционал или приоритет, но можно учесть в виде ограничений на возможные пути эволюции или допустимые конфигурации (классовые модели). Функция ограничений на модели $\mathcal{C}(L) = \prod_i \mathcal{C}_i(L)$, где $\mathcal{C}_i: \mathbb{V}^N \rightarrow \{0;1\}$ — функции, задающие отдельные более простые ограничения.

Определим ограничения на модификациях как $\mathcal{C}(\mu) = \prod_i \mathcal{C}_i(\mu)$, где $\mathcal{C}_i(\mu)$ — отдельные ограничения: $\mathcal{C}_i(\mu) = 1$, если классовая модель $L + \mu$ не противоречит i -му ограничению, и $\mathcal{C}_i(\mu) = 0$, если $L + \mu$ ему противоречит. Интересным примером является ограничение на «выпуклость» конфигураций (тел) [4]. Важным условием на возможность реализации ограничения является малая (желательно $O(1)$) вычислительная сложность функций $\mathcal{C}_i(\mu)$ по множеству ячеек модели среды и/или поля. С учётом ограничений приоритет определяется как $P(\mu) = P^*(\mu)\mathcal{C}(\mu)$. В программе имеет смысл сначала рассчитывать $\mathcal{C}(\mu)$, и если $\mathcal{C}(\mu) = 0$, то не рассчитывать $P^*(\mu)$. Если $P(\mu) < 0$, то μ назовём допустимой модификацией: $\mathcal{W}^* = \{\mu \in \mathbb{W} \mid P(\mu) < 0\}$.

Очередь модификаций

Обычно итерация монтажного метода выглядит следующим образом: из всех допустимых модификаций выбираем наилучшую (с наименьшим значением приоритета) и применяем её [3, 9]. В работе П.И. Балка и А. Йёске [1] указывается, что вообще возможно применение бóльшего количества модификаций за итерацию, но приводятся два алгоритма — Регулируемая Направленная Кристаллизация (РНК) и Раскристаллизация (РНР), в каждом из которых также применяется по одной. Для больших (мелкоячеистых) моделей оптимизация осуществляется очень медленно. Взамен была реализована процедура, основанная на очереди модификаций: на каждой итерации допустимые модификации по одной помещаются в max-heap очередь с приоритетом с фиксированным ограничением сверху на кол-во модификаций; при превышении ограничения на длину очереди модификации с наивысшим приоритетом удаляются из неё. После прохода по всем допустимым модификациям на втором этапе

все модификации из очереди проверяются в порядке возрастания значения приоритета и применяются (в случае отрицательного значения приоритета). Таким способом осуществляется намного бóльшее количество модификаций за итерацию, и это сильно ускоряет процесс исполнения метода на вычислительной машине.

При использовании слишком маленького или слишком большого ограничения на длину очереди уменьшается производительность. В предельном случае при $n_c = 1$ алгоритм сводится к обычному алгоритму без очереди — регулируемой направленной перекристаллизации. При слишком большой длине очереди ($n_c \sim |\mathcal{W}^*|$) страдает параллелизм: так как второй этап выполняется однопоточно, то можно дать оценку для числа Амдала, равную 2, что очень мало. С другой стороны, высокая параллелизация вовсе не эквивалентна высокой производительности, и именно при больших значениях n_c может находиться пик скорости построения аппроксимирующих моделей. Также при выборе длины очереди надо исходить из того, что эта величина качественно влияет на получаемое решение. В итоге, заранее вывести оптимальную или рациональную формулу расчёта n_c достаточно сложно.

Обсуждение особенностей монтажного метода на примерах

Проиллюстрируем некоторые особенности реализованных алгоритмов на модельных примерах. Сначала рассмотрим для примера простую модель — эллипсоид равномерной плотности в гомогенной вмещающей среде. Было синтезировано два эллипсоида — один большой и один малый внутри большого (рис. 1а). От эллипсоидов было рассчитано поле решением прямой задачи, и в различных вариантах модельных примеров либо малый эллипсоид будет использоваться как начальное приближение, а большой — как целевая модель (обозначим как $\epsilon \rightarrow E$), либо большой — как начальное приближение, а малый — как целевая модель ($E \rightarrow \epsilon$); получаемое решение должно быть похоже на целевую модель.

Монтажный метод был применён (рис. 1–7) несколько раз в семи вариантах с различными параметрами:

1. $\epsilon \rightarrow E$; приоритет по глубине $\beta = 0,25$.
2. $\epsilon \rightarrow E$; $\beta = 0,5$.
3. $\epsilon \rightarrow E$; $\beta = 1$.
4. $\epsilon \rightarrow E$; $\beta = 1$; добавлено ограничение — тело не должно быть ниже большого эллипсоида.
5. $E \rightarrow \epsilon$; $\beta = 0,5$, приоритет окрестности $\alpha = 0,05$.
6. $E \rightarrow \epsilon$; $\beta = 0,5$, $\alpha = 0,25$.
7. $E \rightarrow \epsilon$; $\beta = 0,5$, $\alpha = 0,05$, радиус окрестности $L_\eta = 2$ (во всех остальных вариантах $L_\eta = 1$).

Как видно из рисунка 1, на эволюцию модели сильно влияют параметры, задающие характер

Рис. 1. Начальное приближение и эволюция модели, вариант 1

Fig. 1. Initial approximation and model evolution, variant 1

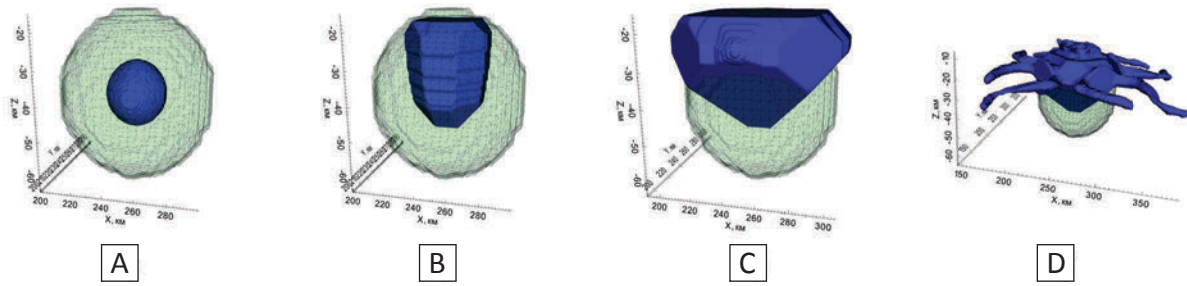


Рис. 2. Эволюция модели, вариант 2

Fig. 2. Model evolution, variant 2

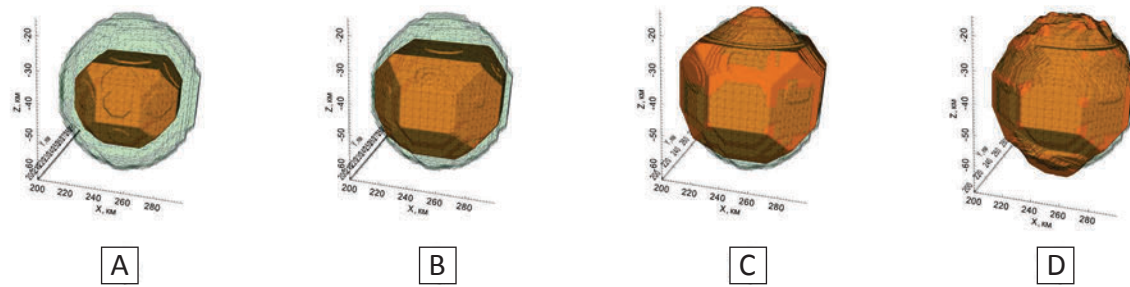


Рис. 3. Эволюция модели, вариант 3

Fig. 3. Model evolution, variant 3

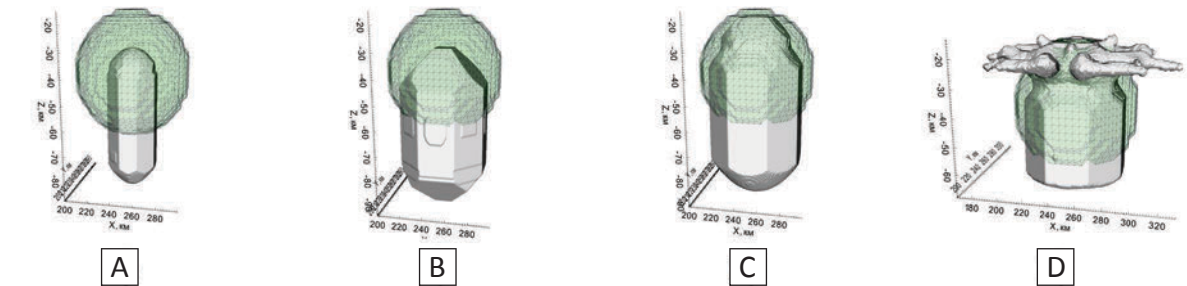


Рис. 4. Эволюция модели, вариант 4

Fig. 4. Model evolution, variant 4

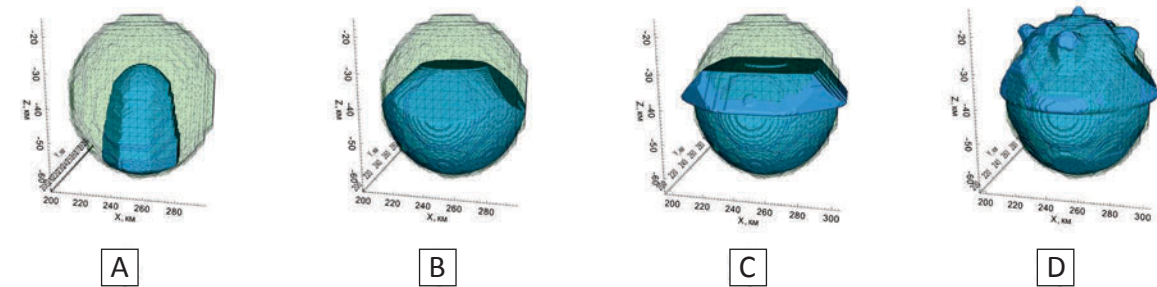


Рис. 5. Эволюция модели, вариант 5

Fig. 5. Model evolution, variant 5

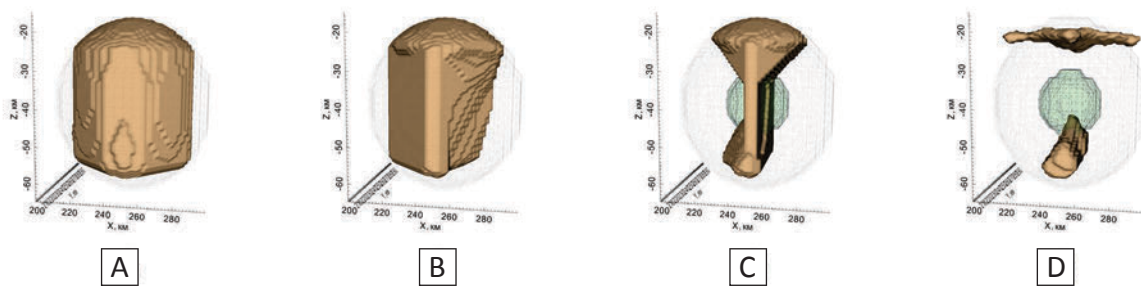


Рис. 6. Эволюция модели, вариант 6

Fig. 6. Model evolution, variant 6

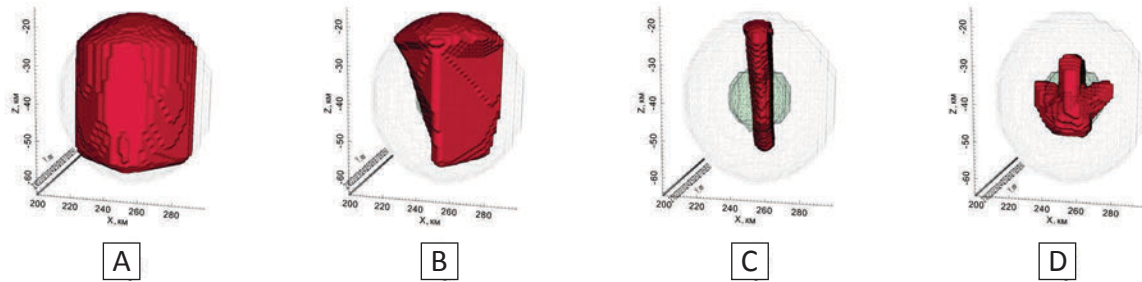
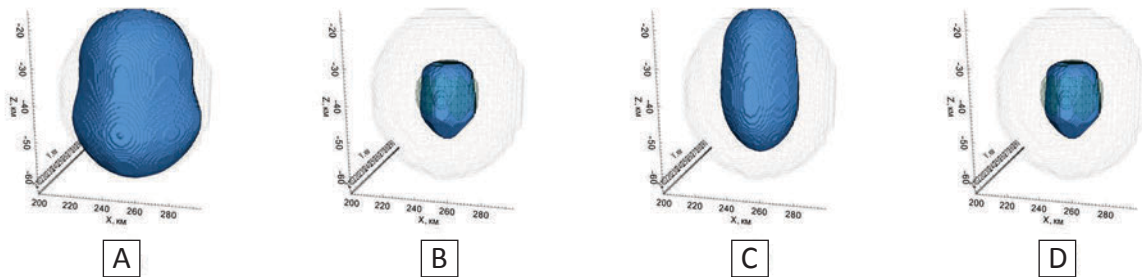


Рис. 7. Эволюция модели, вариант 7

Fig. 7. Model evolution, variant 7



эволюции. Так, при сравнении рисунков 1(C), 2(C) и 3(C) видно, что параметр приоритета кардинально «меняет» ориентированность эволюции — тело «растёт» вверх, вниз или вокруг малого эллипса. Чем больше приоритет у глубоких модификаций, тем больше модификаций совершается именно на глубине тела.

Влияние введённых ограничений на эволюцию демонстрирует модель варианта 4 (рис. 4): в ходе своей эволюции в монтажном методе тело так же «пошло» вниз, как и в случае варианта 3, но, дойдя до заданной границы, начало «растекаться» в стороны. Начиная с 400 итерации, тело «переливается» за границы целевого тела — большого эллипса (рис. 4B, C), но спустя некоторое время «заполняет» целевой объём с некоторыми дефектами (рис. 4D).

Можно заметить явление, заключающееся в том, что, начиная с некоторого шага, решение «разваливается»: в ходе эволюции монтажный метод продуцирует модельные тела, совершенно не похожие на целевые, хотя при этом невязка убывает с каждой новой итерацией (рис. 1D, 3D). С одной стороны, это — проявление известного свойства скрытой эквивалентности [5], когда одно и то же поле хорошо аппроксимируется различными вариантами распределения плотностей. В случае монтажного метода, где на процедуру построения решения можно смотреть как на вычислительную динамическую систему, явление имеет сходство с другим явлением из области машинного обучения, называемым «переобучением» — с какого-то момента невязка ещё формально убывает, но при этом «качество» решения «ухудшается». Похоже, что это — естественно сопутствующее монтажному методу явление в слу-

чаях, когда модель среды становится достаточно сложной. Например, исследователями обнаружены проблемы, сопутствующие моделям с положительными и отрицательными плотностями тел [4]. В данном случае используется редуцированное поле, что, похоже, достаточно усложняет моделирование, чтобы также вызвать этот эффект. Авторы называют его «нестабильностью» метода или «неустойчивостью», хотя под устойчивостью обычно понимается зависимость величины ошибки результата от ошибок в исходных данных или округлений [2].

Как область для дальнейших исследований можно было бы рассмотреть попытки адаптации методов борьбы с переобучением из области машинного обучения. Пока же можно предложить останавливать процедуру монтажного метода при начале переобучения, но неясно, как определять момент начала переобучения. Авторы видят потенциал в рассмотрении корреляций, например, качества эволюции с увеличением отвергнутых модификаций на втором этапе каждой итерации, а также скорости убывания невязки, хотя при этом трудно дать строгое определение собственно качеству эволюции. На практике в ГИС INTEGR0 осуществляется запись промежуточных состояний классовой модели, а авторами предлагается оценивать сразу множество «снимков» моделей в контексте их эволюции — так, можно записывать текущую классовую модель каждые 10 итераций, определять итерацию N, с которой начинается переобучение, и отбрасывать все дальнейшие модели.

Варианты 5–7 модельных примеров показывают важность параметра окрестности в приоритете. Так, в случае варианта 5 (рис. 5C) видно, что с ма-

лым параметром приоритета тело «обтачивается» в центре и далее окончательно разделяется на 2 части (рис. 5D). Такое действие с точки зрения метода интуитивно понятно — поле от текущего приближения намного больше целевого поля, с целевым полем лучше всего коррелируют поля элементов, находящихся в центре тела, и можно ожидать, что именно они быстрее всего уменьшают невязку. При этом сама модель заходит в локальный минимум, глобально непохожий на целевую модель.

Интереснее ведёт себя эволюция на варианте 6: больший, чем в варианте 5, приоритет окрестности увеличивает приоритет у модификаций, относящихся к выступающим частям вверху и внизу. Таким образом, создаётся модель, которая представляет собой некоторый «столб», но затем столб «скашивается» и разрастается как раз в области, занимаемой целевой моделью. Увеличение радиуса окрестности L_n , как в случае варианта 7, позволяет создать более гладкую модель, чем в варианте 6. Надо учитывать, что увеличение радиуса окрестности автоматически увеличивает приоритет окрестности: у одной ячейки теперь суммарно не 26 «соседей», а 124 — то есть можно сказать, что «эквивалентный» приоритет окрестности $\alpha \approx 0,238$. Но при этом модель получается намного более гладкой. Действительно, в случае $L_n = 1$ на приоритет влияют ячейки, находящиеся непосредственно в кубе 3×3 , а их центры располагаются строго по осям или под углами в 45 градусов к осям, что отражается на промежуточных моделях: хорошо заметно, например, на рисунках 1(B, C), 2(A-D), 3(A-C) промежуточные (и иногда финальные) модели имеют участки поверхности, близкие к плоскостям, находящимся под углом в 45 или 90 градусов к осям.

Важным индуктивным выводом является то, что модели с важными характеристиками — в частности, гладкостью, — удаётся получить не с помощью введения ограничений, а с помощью установки приоритетов. Так, иногда [3] предлагается реализовывать гладкость модели через запрет на «отростки» радиуса в 1 ячейку (при этом вводятся понятия ядра и оболочки тела). Хотя при использовании предлагаемого метода в модельном примере «1» имеются отростки (рис. 1D), благодаря приоритету окрестности они намного шире одной ячейки, и описанное ограничение не нарушается (часто — даже в нача-

ле переобучения). Преимуществом же приоритета окрестности является то, что в начале эволюции отростки любой толщины вообще отсутствуют — в конкретных примерах при изменении метки приоритет имеют ячейки, окружённые ячейками, уже имеющими новую метку. Учитывая это, появление отростков авторы предлагают связывать с переобучением.

Следствием вышесказанного является то, что метод, предоставленный сам себе, остановится на неадекватной, «нежелательной» модели, однако можно использовать различные варианты промежуточных моделей. На практике работа с монтажным методом в ГИС INTEGRO уже осуществляется именно таким образом. Но работать с большим количеством моделей затруднительно. Здесь встаёт другая проблема, связанная с облегчением работы с рядом промежуточных моделей. Например, интересным полем для изучения может являться упрощение когнитивной нагрузки через анализ этого ряда. Таковым может быть классификация моделей: по обобщённому диаметру классов, по количеству связанных компонент и его динамике, по связности классов и компонент (минимальное множество ячеек, которых достаточно удалить из класса, чтобы изменилось количество связанных компонент) и др.; по геофизическим признакам: средней плотности модели, суммарной массе или средней плотности классов или связанных компонент и др.

Эффект от взятия различных значений ограничения на максимальную длину очереди продемонстрирован на следующем примере (рис. 8). В качестве начального приближения взята прямоугольная призма, целевая модель — объединение трёх пересекающихся прямоугольных призм (рис. 8A). Параметр n_c установлен согласно описанию рисунка. Так как цель примера — показать эффекты от различной длины очереди модификаций, то, чтобы избежать проблем с переобучением на результирующей модели, были специально подобраны параметры приоритета методом подбора ($\beta = 0,25$, $\alpha = 0,4$), а оптимизация проводилась с нередуцированным полем. Во всех четырёх случаях результирующие модели являются локальным оптимумом (то есть, любая разрешённая модификация увеличивает невязку), и они получились похожими (рис. 8B–D), но с небольшими отличиями: действительно, выбор n_c

Рис. 8. Эффект от различных значений ограничения n_c : A) начальное приближение и целевая модель; B) $n_c=1$; C) $n_c=5$; D) $n_c=25$; E) $n_c=125$
Fig. 8. Outcome of the choice of various values for n_c : A) initial approximation and target model; B) $n_c=1$; C) $n_c=5$; D) $n_c=25$; E) $n_c=125$

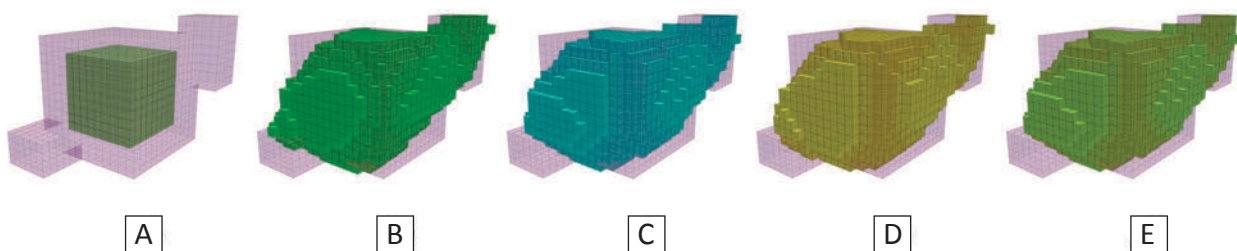


Табл. 1. Характеристики процесса оптимизации монтажным методом на модельном примере при различных значениях n_c
 Tab. 1. Characteristics of assembly method optimization process on the example model with different values of n_c

n_c	m			d	Кол-во итераций n	Суммарное время заполнения очереди, с	Суммарное время применения очереди, с	$r(M^{(n)})/ r(M^{(0)})$
	max	Σ	\bar{m}					
1	1	4080	1	2202	4079	139,26	0,263611	0,00310
5	5	4153	1,983	2201	2093	73,46778	0,259994	0,00412
25	25	4158	6,466	2202	642	22,94783	0,421208	0,00375
125	125	4193	12,90	2203	324	13,04659	1,154342	0,00276

влияет не только на скорость оптимизации, но и на её результат.

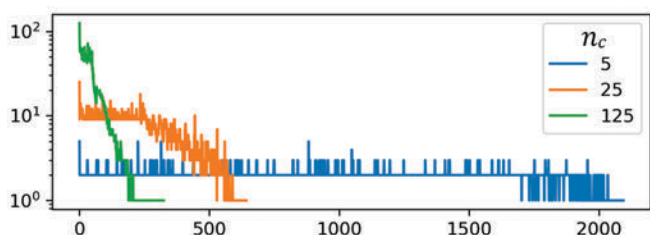
Отдельные характеристики процессов оптимизации представлены в таблице 1. Здесь m — количество принятых модификаций за одну итерацию, \bar{m} — среднее количество модификаций за итерацию, $M^{(0)}$ и $M^{(n)}$ — начальная и результирующая модель, d — количество ячеек результирующей модели с меткой, отличающейся от метки в исходной модели. Приведено время заполнения очереди модификаций и применения модификаций из очереди (с повторной проверкой на удовлетворение ограничениям), указанное в секундах. Процесс модификации целиком занимает большее время, включая время на инициализацию и запись результата, но он не включён в таблицу, так как в реальных условиях большую часть времени занимает исполнение двух изложенных выше задач.

Как видно из полученных статистических результатов, общее количество принятых модификаций оказывается примерно одинаково, хотя при большей длине очереди их количество оказывается чуть больше. Количество отличающихся ячеек намного меньше модификаций, и это говорит о том, что большое количество модификаций не только увеличивало, но и уменьшало аппроксимирующее тело. Суммарное время исполнения значительно меньше для больших n_c ; время заполнения очереди уменьшается вместе с уменьшением n_c , так как уменьшается количество итераций, а время применения очереди растёт, так как растёт количество отвергнутых кандидатов по невязке.

Для больших n_c наблюдается явление, когда со временем количество применённых кандидатов резко снижается, и, начиная с некоторой итерации,

Рис. 9. Количество применённых кандидатов в зависимости от номера итерации

Fig. 9. Number of applied candidates versus current iteration number



применяется только один кандидат за итерацию, и общее количество применённых кандидатов после этого момента мало (рис. 9). В соответствии с обсуждениями выше авторы пришли к выводу, что следует прекращать оптимизацию, когда количество применённых модификаций становится ниже некоторого предела в течение одной или нескольких итераций подряд.

Практическое применение при изучении южного борта Енисей-Хатангского регионального прогиба, в районе Гулинского массива

Монтажный метод в реализации ГИС INTEGRO был применён при исследовании южного борта Енисей-Хатангского регионального прогиба, в районе Гулинского массива. Основными объектами изучения были магматические образования пермотриасовой активизации. Такие объекты, как правило, хорошо запечатлеваются в геофизических полях.

Стартовая модель территории построена на основе сейсморазведочных профильных данных МОГТ, данных МТЗ, корреляции горизонтов и их стратификации на основе имеющихся скважинных данных, анализа пространственных распределений и спектральных инверсий гравитационных и магнитных аномалий геопотенциальных полей, геологической информации, полученной из записок к изданным Госгеолкартам и научных публикаций разных лет по этому региону.

В результате изучения исходных данных было сформировано начальное представление о предполагаемом положении и плотностных характеристиках объектов. Эти объекты были сгруппированы в классы по плотностным характеристикам и инкорпорированы во вмещающую среду, представляющую из себя градиентно-слоистую модель, построенную на основе вышеперечисленных данных.

Основной интерес для моделирования представляли именно интрузивные тела: собственно класс 1 описывал в первом приближении сам Гулинский массив и схожие по плотностям интрузии с заданной плотностью 3,1 г/см³. Класс 2 был присвоен объектам, залегающим на большей глубине, им была задана избыточная плотность +0,2 г/см³ по отношению к вмещающей среде. Классу 3 присвоена плотность 2,9 г/см³ как относящемуся предположительно к менее плотной интрузии, находящейся на небольшой глубине к Ю-З от Гулинского массива. Класс 4

с заданной относительной плотностью $-0,08 \text{ г/см}^3$ добавлен для грубого описания областей разуплотнения, таких как разломные зоны и пр. Более формально, D_0 задаёт слоистую градиентную вмещающую среду, $D_1(v) = 3,1$; $D_2(v) = D_0(v) + 0,2$ и т.д.

Начальное приближение, описывающее состояние классовой модели в начале моделирования монтажным методом, было задано как множество тел, где каждое тело задано одним или несколькими перекрывающимися эллипсоидами.

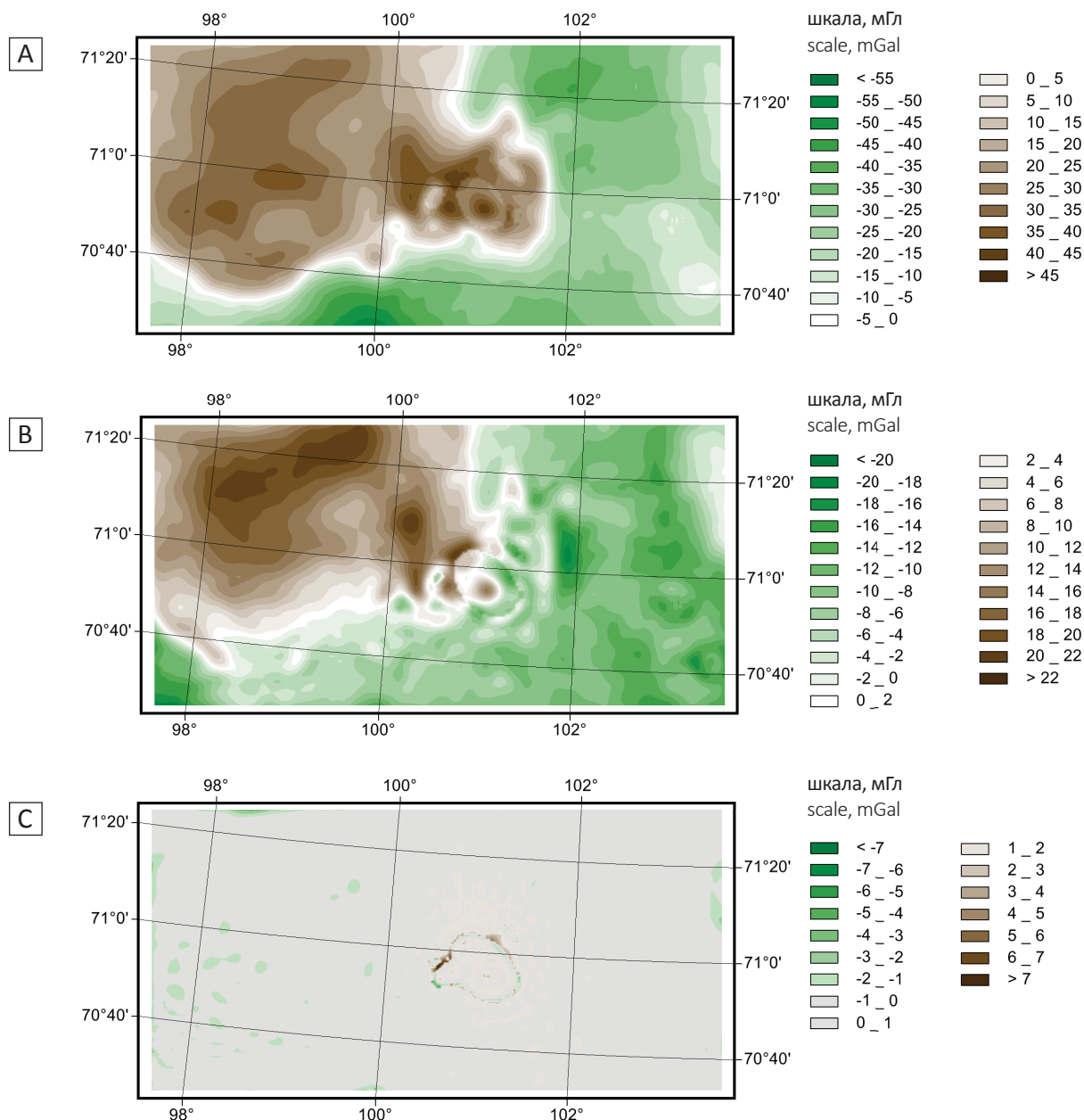
Из анализа опорных данных вытекает, что объекты, дающие положительный эффект, (интрузии)

не должны быть выше одной из структурных поверхностей. Для таких классов в конфигурацию монтажного метода было введено ограничение на положение.

В ходе подбора геометрии тел была многократно осуществлена процедура монтажного метода в виде этапов, результаты которых интерактивно сопоставлялись с различными опорными данными, в частности с глубинными разрезами. Помимо контроля геометрии в процессе моделирования, проводился подсчет и анализ карты невязки наблюдаемого поля и поля от промежуточной модели; после этого стало очевидно необходимость добавления нового клас-

Рис. 10. Карты невязок между наблюдаемым полем и полем от модели на разных этапах моделирования: А – стартовая модель, ср. квадратичная невязка равна 25,11 мГал; В – промежуточный результат, ср. квадратичная невязка равна 10,83 мГал; С – итоговая модель, ср. квадратичная невязка равна 0,68 мГал

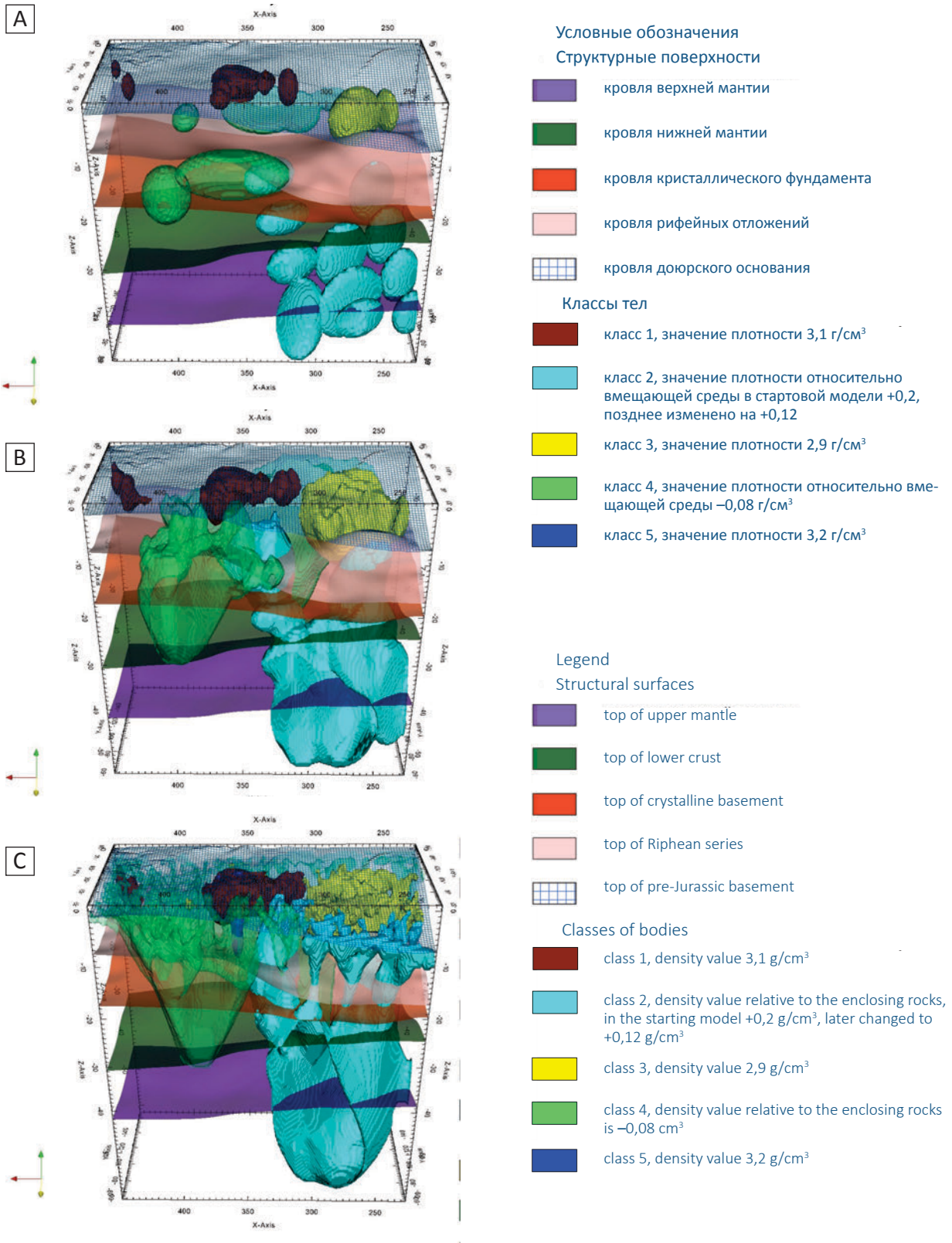
Fig. 10. Maps of the residuals between the observed and the field from the model at different stages: A - the initial model, the RMSR is 25,11 mGal; B - intermediate result, the RMSR is 10,83 mGal; C - the final model, the RMSR is 0,68 mGal



са с плотностью $3,2 \text{ г/см}^3$ и коррекции параметров плотности у класса 2 (снижения его относительной плотности с $+0,2$ до $+0,12 \text{ г/см}^3$ (Рис. 10)).

Процесс моделирования позволил подтвердить некоторые представления о магматизме на изучаемой территории, а часть из них скорректировать, что является важнейшей задачей, так как магматические образования являются одним из важнейших

Рис. 11. Эволюция плотностной модели в 3Д: А — стартовая модель; В — промежуточный вариант; С — итоговая модель.
Fig. 11. The evolution of the density model in 3D: A — the initial model; B — the intermediate version; C — the final model.



критериев при поиске месторождений полезных ископаемых. Полученная трехмерная плотностная модель (рис. 11) не противоречит опорным данным и описывает с достаточной точностью наблюдаемое поле.

Заключение

На основе прежних наработок в области монтажного метода был разработан с нуля новый вариант монтажного метода, алгоритмы для него и их программная реализация для ГИС INTEGRIO. Важной отличительной особенностью разработки является то, что она подходит для комплексного моделирования территории, включающего сложную среду, множественность размещённых в ней тел, различные ограничения, поддержку редуцированных полей. Полезность разработок продемонстрирована на реальном примере моделирования сложной территории Енисей-Хатангского регионального прогиба в виде выделения интрузии Гулинского массива.

В качестве развития изложенных исследований авторы видят следующие направления: исследование возможностей задания ограничений на гладкость (компактность расположенности) тел при поддержании низкой асимптотической вычисли-

тельной сложности за счёт алгоритмической декомпозиции и построения разномасштабной иерархии моделей; исследование эффектов на эволюцию, продуцируемых изложенными приоритетами, а также поиск новых вариантов модификаторов приоритетов; поиск критериев качества эволюции и моделей, а также способов их быстрого вычисления.

На достаточно простых модельных примерах показано, что модификация монтажного метода склонна к переобучению. В рамках использования метода предлагается работать с предположением, что, начиная с какой-то итерации, решение неизбежно «развалится», а результирующая модель получится «переобученной». Однако именно в таком виде метод показал значимость и применимость на практике. Размерность моделей монтажного метода равна количеству ячеек (то есть, в трёхмерном варианте — десятки миллионов), хотя спасает тот факт, что оптимизация идёт по очень малому подмножеству параметров (по оболочке и границе тел). Быть может, монтажный метод, хоть и разработанный в 2D виде в 1970-е годы, в его 3D воплощении следует перевести в класс современных сложных алгоритмов и инкорпорировать в рамки современных методов обработки данных, в частности машинного обучения.

Литература

1. Балк П.И., Йеске А. Монтажный подход В.Н. Страхова к решению обратных задач гравиразведки: современное состояние и реальные возможности // Геофизический журнал. – 2013. – Т. 35. – № 1 – С. 12-26.
2. Баквалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 639 с.
3. Долгаль А.С., Балк П.И., Деменев А.Г., Мичурин А.В., Новикова П.Н., Рашидов В.А., Христенко Л.А., Шархимуллин А.Ф. Использование метода конечных элементов при интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр (КРАУНЦ). – Сер.: Науки о Земле. – 2012. – № 1. – Вып. 19. – С. 108–127.
4. Долгаль А.С. Декомпозиция решения обратной задачи гравиразведки рудного типа монтажным методом // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр (КРАУНЦ). – Сер.: Науки о Земле. – 2019. – № 1. – Вып. 41. – С. 25–36. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-1-41-25-36.
5. Кобрунов А.И. Математические основы теории интерпретации геофизических данных. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. – 286 с.
6. Мудрецова Е.А., Веселов К.Е. Гравиразведка: справочник геофизика. – М.: Недра, 1990. – 607 с.
7. Петрищевский А.М. Три образа мышления и три подхода к интерпретации гравитационных аномалий // Региональные проблемы – 2014. – Т. 17. – № 2. – С. 5–17.
8. Black P.E. Greedy algorithm [Электронный ресурс] // Dictionary of Algorithms and Data Structures. – Ed. 2. – 2005. – Режим доступа: <https://www.nist.gov/dads/HTML/greedyalgo.html> (дата обращения 26.07.2021).
9. Camacho A.G., Montesinos F.G., Vieira R. Gravity inversion by means of growing bodies // Geophysics. – 2000. – Vol. 65. – Iss. 1. – P. 5–101. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1444729>.
10. Nagy D., Papp G., Benedek J. The gravitational potential and its derivatives for the prism // Journal of Geodesy. – 2000. – Vol. 74. – Iss. 7–8. – pp. 552–560. DOI: <https://doi.org/10.1007/s001900000116>.
11. Uieda L., Barbosa V.C.F. 3D gravity inversion by planting anomalous densities // 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF. (Rio de Janeiro, Brazil, 15–18 August 2011). – Rio de Janeiro: Brazilian Geophysical Society, 2011. – pp. 867–871. DOI: <https://doi.org/10.1190/sbgf2011-179>

References

1. Balk P.I., Yeske A. V.N. Strakhov's mounting approach to solving inverse problems of gravity prospecting: the current state and real possibilities. *Geophysical Journal*. 2013;35(1):12–26.
2. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. Chislennye metody [Numeric methods]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znanii; 2015. 639 p.

3. Dolgal A.S., Balk P.I., Demenev A.G., Michurin A.V., Novikova P.N., Rashidov V.A., Christenko L.A., Sharkhimullin A.F. The finite-element method application for interpretation of gravity and magnetic data. *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth sciences.* 2012;19(1):108–127.
4. Dolgal A.S. Decomposition of the gravitational field inversion using the assembly method for the ore model. *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth sciences.* 2019;41(1):25–36. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-1-41-25-36.
5. Kobrunov A.I. Matematicheskie osnovy teorii interpretatsii geofizicheskikh dannykh [Mathematical foundations of theory of geophysical data interpretation]. Moscow: CnetrLitNefteGaz; 2008. 286 p.
6. Mudretsova E.A., Veselov K.E. Gravirazvedka: spravochnik geofizika [Gravity survey: geophysicist's reference]. Moscow: Nedra; 1990. 607 p.
7. Petrishevskii A.M. Tri obraza myshleniya i tri podkhoda k interpretatsii gravitatsionnykh anomalii [Three ways of thinking and three approaches to interpretation of gravity anomalies]. *Regional'nye problemy.* 2014;14(2):5–17.
8. Black P.E. Greedy algorithm. In: Dictionary of Algorithms and Data Structures. Ed. 2. 2005. Available at: <https://www.nist.gov/dads/HTML/greedyalgo.html> (accessed 26.07.2021).
9. Camacho A.G., Montesinos F.G., Vieira R. Gravity inversion by means of growing bodies. *Geophysics.* 2000;65(1): 95–101. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1444729>.
10. Nagy D., Papp G., Benedek J. The gravitational potential and its derivatives for the prism. *Journal of Geodesy.* 2000;74(7–8): 552–560. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190000116>.
11. Uieda L., Barbosa V.C.F. 3D gravity inversion by planting anomalous densities. In: 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF. (Rio de Janeiro, Brazil, 15–18 August 2011). Rio de Janeiro: Brazilian Geophysical Society; 2011. pp. 867–871. DOI: <https://doi.org/10.1190/sbgf2011-179>

Информация об авторах

Мицын Сергей Валерьевич

Научный сотрудник отделения Геоинформатики
ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский
геологический нефтяной институт»
117105, Москва, Варшавское ш., д. 8
e-mail: smitsyn@yandex.ru

Большаков Егор Максимович

Научный сотрудник отделения Геоинформатики
ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский
геологический нефтяной институт»
117105, Москва, Варшавское ш., д. 8
e-mail: bolshakov.e.m@yandex.ru

Information about authors

Sergey V. Mitsyn

Researcher of Geoinformatics Division of All-Russian
Research Geological Oil Institute
8 Varshavskoye sh., Moscow, 117105, Russia
e-mail: smitsyn@yandex.ru

Egor M. Bolshakov

Researcher of Geoinformatics Division of All-Russian
Research Geological Oil Institute
8 Varshavskoye sh., Moscow, 117105, Russia
e-mail: bolshakov.e.m@yandex.ru