

ОТЗЫВ

на диссертацию Хохловой Валерии Васильевны «РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕДУЦИРОВАНИЯ ДАННЫХ ВЫСОКОТОЧНОЙ ГРАВИРАЗВЕДКИ С УЧЕТОМ СФЕРИЧНОСТИ ЗЕМЛИ», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика.

Цель исследований, проведенных диссертантом, – совершенствование методов обработки результатов полевых гравиметрических наблюдений на основе вычислительных процедур, использующих сферическую модель Земли, с целью увеличения точности определения аномалий силы тяжести в редукции Буге и повышения геологической информативности гравиметрической съемки – **безусловно актуальна**.

В рамках реализации поставленной цели диссертантом получены следующие новые научные результаты.

1. Разработан алгоритм для редукцирования данных гравиметрической съемки на шарообразной Земле. Впервые в области гравirazведки использована сфера Каврайского для перехода от геодезических координат к сферическим. Радиус сферы равен 6372.9 км (что обеспечивает минимальные искажения расстояний и углов при вычислении). В диссертации приведены построенные соискателем примеры реализации алгоритма.

2. Выполнена оценка разницы в аномалиях Буге, определенных в рамках плоской и сферической моделей Земли. Показано, что в ряде случаев эта разность заметно превышает точность современных гравиметрических съемок.

3. Разработана новая схема вычисления радиальной составляющей силы тяжести для сферического параллелепипеда. Алгоритм расчета радиальной составляющей силы тяжести, обусловленной влиянием сферического параллелепипеда, создан на основе кубатурных формул Н.С. Бахвалова для вычисления тройного интеграла. Алгоритм обладает относительно высокой точностью и быстродействием и позволяет вычислять радиальную производную гравитационного потенциала для совокупности сферических параллелепипедов.

Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы - 81 наименование. Объем работы - 118 страниц текста, 46 рисунков, 10 таблиц. Оформление работы соответствует предъявляемым требованиям.

Замечания.

1. Основное замечание относится к результатам **Главы 2 диссертационной работы**. Картографическая проекция Гаусса-Крюгера проецирует на плоскость не часть поверхности цилиндра, а часть поверхности эллипсоида вращения (стр. 38). При построении «плоского аналога» модели №1 нельзя было одновременно выполнять проекции «уровенных» поверхностей с точками A_i (граница раздела земля-воздух) и B_i (поверхность залегания источников) на соответствующие плоскости. При таком проецировании заметно искажаются углы между направлениями на разноглубинные точки, именно это и дает наибольший вклад в разность $V_R - V_z$. Например, в «сферической» модели

отрезок A_1B_1 ортогонален поверхности наблюдения, в «плоской» модели – нет. Т.е. источник в точке B_1 имеет максимум поля не в точке A_1 , как было в «сферической» модели, а в точке между A_1 и A_2 . Причем, этот «сдвиг максимума» тем больше, чем дальше удален источник от «центрального меридиана». Это хорошо видно на рисунке 2.4. Кроме того, выбранный способ отображения «сферической» модели в «плоскую» путем проекции «уровенных» поверхностей не подойдет для «эллипсоидальных» моделей: в этом случае «уровенная» поверхность, состоящая из множества точек, удаленных на равную «глубину» от поверхности эллипсоида вращения, НЕ является поверхностью эллипсоида вращения, а значит, к ней нельзя применять проекцию Гаусса-Крюгера.

Перечисленных выше проблем можно избежать, если для перехода от «сферической» модели к «плоской» проецировать на плоскость Гауссом-Крюгером только поверхность относимости (с точками A_i) и сохранять глубины (высоты) всех точек. Да, при этом изменятся расстояния B_iB_{i+1} , но сохранятся расстояния A_iB_i , и не будет сдвигов максимумов в поле. Как показывают расчеты, искажение объемов при отображении, предложенном Диссертантом, увеличивается при удалении от «центрального меридиана» существенно быстрее, чем при отображении, указанном Рецензентом (в этом случае погрешность V_R-V_z меньше на десятичный порядок).

Также заметим, что погрешности V_R-V_z , возникающие при предложенном далее в главе 2 способе оценки погрешности за «сферичность» методом пробных источников, сильно зависят от глубины их залегания, а потому этот способ оценки несостоятелен. При выборе глубины залегания пробных источников равной нулю, погрешность V_R-V_z будет небольшая (в зависимости от геометрической латеральной плотности расположения источников), затем погрешность будет увеличиваться до глубины, на которой влияние «сдвигов максимумов» сравняется с абсолютным уменьшением поля, вызванным удалением источников от точек наблюдения, и затем погрешность будет только уменьшаться. Таким образом, неясно, какая глубина залегания пробных источников соответствует «настоящей» погрешности за «сферичность».

Приведем простой пример. Буровики на месторождении бурят вертикальную скважину и хотят построить «плоскую» модель месторождения. При способе отображения «сферической» модели в «плоскую», предложенном Диссертантом, в «плоской» модели скважина будет отклоняться от вертикали на запад или на восток в зависимости от положения относительно центрального меридиана, причем на угол тем больший, чем дальше скважина расположена от центрального меридиана. При выборе отображения «сферической» модели в «плоскую» ожидается, что произвольные характеристики «сферической» модели будут как можно лучше сохраняться в «плоской», так и происходит при способе отображения, указанном Рецензентом, в сравнении со способом Диссертанта: сохраняются углы между направлениями на разноглубинные точки (в той степени, в которой они сохраняются при проекции Гаусса-Крюгера), и на порядок лучше сохраняется поле модели (т. е. погрешность V_R-V_z на порядок меньше). Как уже упоминалось, вблизи центрального меридиана объемы лучше сохраняет способ Диссертанта, но при удалении от него объемы быстро и **неравномерно** уменьшаются в «плоской» модели, и лучше становится способ Рецензента, при котором ошибка в изменении объемов одинакова по латерали (в той мере, в которой при проекции Гаусса-Крюгера сохраняются площади).

Приведенные выше соображения не позволяют Рецензенту согласиться с утверждением Диссертанта: «Предложенные в диссертационной работе алгоритмы редуцирования гравиметрических данных на поверхности сферической Земли позволяют

перейти на качественно новый уровень обработки, повысить точность построения гравиметрических карт в редукции Буге и цифровых моделей поля, что увеличит вероятность обнаружения слабоконтрастных и глубокозалегающих аномалиеобразующих объектов». Потому что оценки погрешности за сферичность при введении поправок в поле, приведенные Диссертантом, завышены (в силу указанных выше причин). Разработанный Диссертантом компьютерный алгоритм редуцирования гравиметрических данных на поверхности сферической Земли может быть рекомендован для использования в производственных организациях только при внесении изменений в методику его применения (как указано выше).

2. В диссертации описаны разработанные другими авторами 5 методов вычисления радиальной составляющей силы тяжести для сферического параллелепипеда, сравнение проведено только с одним из них (Старостенко В.И., Манукян А.Г., 1983г., т.е., в полной мере не проведен анализ существующих методов – одна из задач исследований). В описании одного из методов допущена существенная неточность: «Аппроксимация тессероида сферическими треугольниками. Фактически интегрирование происходит по треугольным граням и выражается в аналитическом виде. Предложен П.С. Мартышко и др. в 2019 году». На самом деле речь идет об алгоритме вычисления радиальной составляющей силы тяжести для сферического параллелепипеда, результаты применения алгоритма опубликованы в статье П.С. Мартышко с соавторами «Об учёте влияния сферичности Земли при трёхмерном плотностном моделировании». Доклады Академии наук, 2017, том 477, № 2, с. 221–225 DOI: 10.7868/S0869565217320184. (Предложен метод трансформации трёхмерных “региональных” плотностных моделей земной коры и верхней мантии с плоскими границами в “сферические” и наоборот. Также представлен алгоритм вычисления и метод корректного сравнения вертикальной компоненты гравитационного поля обеих моделей). Заметим, что в алгоритме **аппроксимация тела произвольной формы (в т.ч., тессероида) выполняется набором Произвольных многогранников**, для которых выведены явные формулы вычисления поля (путем перехода к интегрированию по граням и триангуляции граней). Очевидно, что такой способ аппроксимации оптимальнее «для создания плотной упаковки сферической поверхности», чем аппроксимация области интегрирования прямоугольными параллелепипедами. Подробно алгоритм параллельных вычислений изложен в статье П.С. Мартышко с соавторами «О решении прямой задачи гравиметрии в криволинейных и декартовых координатах: эллипсоид Красовского и “плоская” модель». ФИЗИКА ЗЕМЛИ, 2018, № 4, с. 31–39. (В данной работе предложен метод трансформации трехмерных “плоских” плотностных моделей в “сферические” и наоборот. Также представлены алгоритмы вычисления вертикальной компоненты гравитационного поля для обоих типов моделей, приведены оценки точности и быстродействия в сравнении с формулами Гаусса-Лежандра. Для двух достаточно протяженных “плоских” региональных плотностных моделей проведено преобразование в “сферические” и сравнение получившихся полей от них. Относительные среднеквадратические невязки полей, вызванные указанной заменой, не превышают 5%.)

3. В диссертации не приведен полный обзор современного состояния исследований по теме диссертации. В частности, нет ссылок на публикации, содержание которых очень тесно связано с темой диссертации:

А) П.С. Мартышко с соавторами «Об Интерпретации гравитационных данных, измеренных на рельефе». Доклады российской академии наук. Науки о Земле, 2020, том 495, № 2, с. 51–55. DOI: 10.31857/S2686739720120075 (Показано, что недостаточно точное приближение рельефа и не учёт сферической формы планеты вносят ошибку, которая на

два десятичных порядка превышает чувствительность современных гравиметров. Предложен универсальный метод интерпретации гравитационных данных. Отметим, что предложенный метод **не имеет никакого отношения к способу вычисления поправки Буге с определением переменной плотности промежуточного слоя**. Метод основан на разработанном авторами алгоритме быстрого вычисления гравитационного поля от плотностных моделей произвольной формы. Алгоритм позволяет вычислять значения аномалий силы тяжести на **реальном рельефе** без дополнительных затрат вычислительных ресурсов -допускает использование **нерегулярных сеток плотностной модели и поля**).

В) Chernoskutov, A. I., and D. D. Byzov, GRAFEN v0.1 –Gravity Field Ellipsoidal Density Model Numerical Computations for CUDA-Enabled Distributed Systems, <https://github.com/charlespwd/project-title>, 2019.

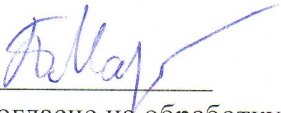
4. Диссертант не использовал возможности современных компьютерных технологий параллельных вычислений, которые позволяют работать с сетками большой размерности (для аппроксимации рельефа с высокой степенью точности это совершенно необходимо). Это замечание можно рассматривать как пожелание на будущее.

Указанные замечания направлены на то, чтобы в дальнейшем Диссертант более тщательно подходил к проводимым исследованиям. Вместе с тем, проделанная Диссертантом работа (разработка алгоритмов; написание программ в среде объектно-ориентированного программирования Delphi 7.0; выполнение вычислительных экспериментов; анализ результатов экспериментов; выполнение полевых работ и полного цикла обработки материалов гравиразведки) и отмеченные выше результаты, представленные в диссертации, позволяют дать в целом положительное заключение.

Все результаты, полученные в диссертации, полностью отражены в опубликованных работах. Основные результаты опубликованы в научных журналах и изданиях из списка ВАК, доложены на конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Хохловой Валерии Васильевны «Разработка методики редуцирования данных высокоточной гравиразведки с учетом сферичности Земли», представленная на соискание степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 – «Геофизика», отвечает критериям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, тема и содержание диссертации полностью соответствуют паспорту специальности, а ее автор, Хохлова Валерия Васильевна, заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Заведующий лабораторией математической геофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук», чл.-корр. РАН, профессор, д.ф.-м.н.


Пetr Сергеевич Мартышко
Даю согласие на обработку персональных данных.

« 09» марта 2023 г.

Адрес места работы: 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100.

тел.: (343)2678883 Электронная почта: pmart3@mail.ru

