

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе Вязьмина Вадима Сергеевича
«Локальное определение аномалии силы тяжести по данным аэрогравиметрии с использованием сферического вейвлет-разложения», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 — «Теоретическая механика»

Диссертационная работа Вязьмина В.С. посвящена исследованию и разработке методов и алгоритмов локального определения аномалии удельной силы тяжести при совместной обработке данных авиационной гравиметрии и глобальной модели гравитационного потенциала Земли с использованием сферического вейвлет-разложения, получаемого на основе имеющихся массивов данных. Результатом работы алгоритмов является уточнённая в локальной зоне модель гравитационного поля. Задача определения аномалии решается в три этапа. Первый — аппроксимация данных авиационной гравиметрии скейлинг-функциями Абеля-Пуассона некоторого (максимального) уровня детализации. Второй — определение коэффициентов сферического разложения для полученной на первом этапе аппроксимации с использованием вейвлетов Абеля-Пуассона разного уровня детализации. Третий — уточнение вейвлет-коэффициентов разложения при совместной обработке данных авиационной гравиметрии и одной из глобальных моделей гравитационного потенциала на общих уровнях детализации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Во введении определяются направление и цель работы, приводится структура работы и краткое содержание основных разделов.

В первой главе «Задача обработки данных аэрогравиметрии» описывается история задачи измерения поля силы тяжести Земли, основные этапы развития и современное состояние авиационной гравиметрии. Приводятся возникающие модели гравитационного потенциала, способы представления его нормальной и аномальной составляющих. Обсуждаются задачи вычисления трансформант гравитационного поля по данным съёмки. Отмечается, что дальнейшая интерпретация полученных данных требует решения обратной задачи, которая, как и все обратные задачи в геофизике, относится к классу некорректно поставленных.

Далее описывается схема выполнения и обработки данных скалярной аэрогравиметрической съёмки, реализованная, в частности, при работе с

гравиметрами GT-1A и GT-2A. Выделяется заключительный этап, связанный с вычислением трансформант, на котором для обеспечения корректности решения предлагается комбинировать детальные данные авиационной гравиметрии с параметрами имеющихся глобальных моделей гравитационного поля Земли, получаемых, как правило, в результате обработки спутниковых измерений существенно меньшего разрешения. В завершение первой главы приводится обзор различных методик комбинирования локальных и глобальных данных, обосновывается выбор метода сферического вейвлет-разложения с использованием гармонических вейвлетов Абеля-Пуассона, который позволяет регуляризовать некорректно поставленные задачи трансформации и, при этом, благодаря локализации в пространственной и в частотной области, удобен в работе с локальными данными авиационной гравиметрии.

Вторая глава «Многомасштабное представление аномалии силы тяжести на основе сферического вейвлет-разложения» посвящена подробному описанию выбранного метода разложения. Она содержит справочную часть, описывающую понятия скейлинг и вейвлет символов и функций, их основные свойства, метод вейвлет-восстановления функции на определённом уровне детализации. Особое внимание уделяется скейлинг-функциям и вейвлетам Абеля-Пуассона, которые могут быть записаны в виде элементарных функций, что значительно уменьшает вычислительную сложность алгоритмов аппроксимации и разложения.

Описывается метод сферического вейвлет-разложения гармонических функций в непрерывной и в дискретной форме, даётся оценка погрешности при вейвлет-разложении на основе вейвлетов и скейлинг-функции Абеля-Пуассона не на всей сфере, а в локальной зоне. Доказывается, что многомасштабное представление в случае выбранных вейвлетов не является ни прямым, ни ортогональным. Предлагается подход к выбору максимального уровня детализации вейвлет-разложения с учётом заданной полосы пропускания. В случае авиационной гравиметрии он определяется масштабом съёмки и полосой пропускания применённого к данным измерений фильтра. Показывается, как описанная методика позволяет получать приближённое решение для возмущающего гравитационного потенциала на сфере Бьерхаммера.

Третья глава «Оценивание аномалии силы тяжести по данным аэрогравиметрии с использованием многомасштабного представления» является основной и содержит теоретическое описание разработанной методики локального оценивания аномалии удельной силы тяжести по данным авиационной гравиметрии и глобальной модели

гравитационного поля Земли с помощью многомасштабного представления на сфере. Методика основана на сферическом вейвлет-разложении до определённого уровня детализации, которое позволяет работать с локальными аэрогравиметрическими данными и регуляризует обратные задачи трансформаций за счёт ограничения спектра аномалии.

Последовательно рассматриваются три этапа решения задачи. Первый — получение аппроксимации аномалии удельной силы тяжести свёрткой скейлинг-функции Абеля-Пуассона с набором скейлинг-коэффициентов на максимальном уровне детализации. Ставится задача минимизации расхождения результата аппроксимации и данных аэрогравиметрии в узлах эквиангулярной сетки по набору скейлинг-коэффициентов, которая решается с помощью алгоритмов рекуррентного метода наименьших квадратов с шагом рекурсии по номеру галсов — последовательно пройденных параллельных маршрутов съёмки. Погрешности измерений на соседних галсах считаются некоррелированными. Поставленная задача является плохо обусловленной, и для неё предложен метод регуляризации, в котором сначала малозначимые элементы информационной матрицы зануляются, а затем добавляется такая диагональная матрица, что полученные малодостоверные оценки коэффициентов могут быть уточнены в дальнейшем по данным глобальной модели.

Второй этап — вычисление вейвлет-коэффициентов разложения. В результате работы описанного алгоритма измеренная аномалия аппроксимируется суммой гладкой компоненты, выраженной свёрткой со скейлинг-функцией некоего низкого уровня детализации, определяемого размерами участка съёмки, и компонент разной детальности, вплоть до максимальной, выраженных свётками с соответствующими вейвлетами. Также после двух этапов получается ковариационная матрица ошибок оценок коэффициентов разложения, вычисленная с учётом априорной информации об инструментальных погрешностях измерения аномалии на галсах.

Третий этап — уточнение вейвлет-коэффициентов данных аэрогравиметрии с использованием параметров глобальной модели на общих уровнях детализации. Задача решается двумя методами. Первый, в предположении о некоррелированности ошибок определения коэффициентов вейвлет-разложения на разных уровнях детализации, сводится к методу наименьших квадратов, в котором учитывается информация как об ошибках, полученных при обработке авиационных данных, так и об ошибках глобальной модели. Во втором методе коэффициенты корреляции и дисперсии и тех, и других ошибок считаются неизвестными, но

ограниченными. В этом случае строится линейный гарантирующий оценитель, обеспечивающий минимальную дисперсию ошибки оценки коэффициентов разложения при наихудших значениях погрешностей как в данных авиационной гравиметрии, так и в данных глобальной модели. Получен общий вид оценителя и соотношения для ошибок авиационных и глобальных данных, при которых комбинирование нецелесообразно.

Четвёртая глава «Обработка данных» содержит результаты применения описанной методики к модельным данным и к аэрогравиметрическим измерениям, выполненным на борту самолета комплексом GT-1A в районе Новой Земли. В последнем случае вейвлет-коэффициенты глобальной модели были получены на основе данных модели EGM2008. Показано, что возникающая в результате применения описанных алгоритмов методическая погрешность составляет величину порядка 0,1 мГал.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Актуальность темы. Решение задачи измерения аномалий силы тяжести на борту летательного аппарата имеет огромное научно-практическое значение. Оно позволяет получать необходимые для дальнейшего анализа данные в труднодоступных районах, например над шельфовой зоной или в полярных широтах. При анализе данных аэросъёмки возникает необходимость решения некорректных задач, связанных с вычислением тех или иных трансформант поля. Рассматриваемый в данной работе метод многомасштабного представления гармонической функции на основе сферического вейвлет-разложения, позволяющий регуляризовать решение обратной задачи, может быть использован не только в задаче авиационной гравиметрии, но и в других задачах аэрогеофизических исследований.

Научная новизна. В работе впервые применён метод локального многомасштабного представления на сфере аномалии удельной силы тяжести на основе гармонических вейвлетов Абея-Пуассона. Получены соотношения для характеристик погрешностей данных аэрогравиметрии и глобальной модели гравитационного поля Земли, определяющие целесообразность выполнения комбинирования указанных данных.

Обоснованность научных положений. Работа содержит полное и ясно

изложенное обоснование всех полученных результатов, сделанных выводов и заключений, с достоверными ссылками на литературу, приведены необходимые для проверки выкладки и доказательства. Все полученные автором алгоритмы испробованы на модельных и экспериментальных данных, продемонстрирована эффективность использованного подхода.

Практическая значимость работы не вызывает сомнений. Результаты, полученные в диссертации, могут составить основу программного обеспечения авиационных гравиметрических комплексов и в конечном счете повысить точность определения гравитационных аномалий. Разработанные алгоритмы комбинирования данных в локальной зоне могут использоваться как при получении трансформант гравитационного поля, так и для уточнения глобальной модели гравитационного поля Земли.

Диссертацию Вязьмина В.С. выгодно отличает сочетание хороших научных результатов, корректного применения формальных методов, строгих математических построений с практической и методологической направленностью работы. Положительной особенностью является также то, что все полученные результаты снабжены содержательными примерами обработки экспериментальных данных, подтверждающих справедливость выводов и иллюстрирующих работоспособность приведенных алгоритмов. Необходимо также отметить завершенность, полноту и практическую направленность представленных в диссертации исследований, логичность построения и чёткость изложения материала. Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание автореферата полностью отражает основные результаты работы.

По теме диссертации соискателем опубликовано пять работ, в том числе три работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК для представления работ по данному научному направлению.

Замечания по диссертации. По работе могут быть высказаны следующие замечания:

1. Утверждение на стр. 4 о том, что точность и пространственное разрешение

данных о силе тяжести, достигаемые в воздухе и на земле, близки, не корректно. В реальности точность измерений в наземной гравиметрии порядка 10 мкГал, а пространственное разрешение — порядка 100 м. Т. е. расхождение в сравнении с параметрами авиационной гравиметрии составляет 2 порядка.

2. В формуле (26) участвует вторая производная координаты h , тогда как в тексте пояснения к ней стоит первая производная.

3. На стр. 26 утверждается, что компоненты, входящие в формулу (26), вычисляются по данным только спутниковой навигационной системы, а ниже на той же странице говорится, что координаты и скорости, необходимые для их вычисления, определяются по совместно обработанным измерениям спутниковой и инерциальной систем.

4. Утверждение 2 на стр. 45 сформулировано не вполне корректно. При его доказательстве переход к максимуму в формуле (74) не гарантирует сохранение неравенства.

5. Работа содержит некоторое количество опечаток. Так, на стр. 49 используется ссылка на условие (85), хотя само условие не пронумеровано, а номер 85 относится уже к следующей формуле; в последней формуле на стр. 59 все нижние индексы должны быть равны 2; в формулах (152), (169), (171) параметр p должен входить во второй степени; на стр. 85 неверная ссылка на формулу (183) — должна стоять ссылка на (182).

6. Следовало полностью привести доказательство Утверждения 5, а не ограничиваться фразой «нетрудно проверить» на стр. 76.

7. Хотелось бы видеть более подробный анализ результатов обработки данных. В частности, представляет интерес степень расхождения комбинированных и авиационных данных в зависимости от удаления от края съёмочного участка.

Заключение. Указанные замечания отнюдь не снижают достоинств диссертационной работы, которая представляет собой законченное научное исследование на актуальную тему, обладающее научной новизной и практической значимостью. Считаю, что диссертация Вязьмина В.С. «Локальное определение

аномалии силы тяжести по данным аэрогравиметрии с использованием сферического вейвлет-разложения» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям и соответствует профилю специальности 01.02.01 — «Теоретическая механика», а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент



Каршаков Евгений Владимирович, кандидат физико-математических наук,
Старший научный сотрудник Лаборатории №1 «Динамических информационно-
управляющих систем» Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, тел. +7 495 334 90 80,
эл. адрес: karshak@mail.ru

05.08.2014

