Отзыв
официального оппонента на диссертацию Сугаиповой Лейлы Супьяновны
«Разработка и исследование методов
разномасштабного моделирования геопотенциала»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук

Диссертационная работа Сугаиповой Лейлы Супьяновны посвящена проблемам создания современной модели гравитационного поля Земли (ГПЗ). С момента выпуска первых моделей в 60-х годах прошлого столетия эта задача сохраняет свою актуальность. Информация о гравитационном поле Земли – одна из основных задач физической геодезии, позволяющая изучать процессы, происходящие как на поверхности, так и внутри планеты Земля. В наше время изучение гравитационного поля Земли ведется с помощью специальных космических систем, позволяющих получать параметры гравитационного поля с чрезвычайно высоким пространственным разрешением. Поэтому традиционные подходы к моделированию ГПЗ не соответствуют современным требованиям к задачам навигации по гравитационному полю Земли. Для успешного решения этих задач необходима модель, обладающая высокой разрешающей способностью и точностью, что, в свою очередь, требует развития новых методов моделирования. Поставленная в диссертации задача разработки новой технологии моделирования ГПЗ, позволяющей увеличивать разрешающую способность и точность моделирования тонкой структуры гравитационного поля Земли чрезвычайно **актуальна**.

Диссертационная работа Л.С. Сугаиповой состоит из Введения, трех глав, списка основных трудов, опубликованных по теме диссертации, и двух приложений. Отдельно обозначены перспективы дальнейших исследований.

Во **Введении** обоснованы цель и актуальность диссертационной работы, аргументирована научная новизна проведенных исследований, их теоретическая и практическая значимость, обозначены использованные методология и методы исследования, перечислены Положения, выносимые на защиту, отражена степень их достоверности и апробация результатов.

В **первой главе** диссертации автор показывает, что модель геопотенциала, реально обладающая высокой разрешающей способностью и точностью, может быть получена лишь в рамках использования разномасштабного подхода, предполагающего сочетание традиционного Фурье-анализа для описания низкочастотной части поля с вейвлет-анализом его высокочастотной части. Обоснование этого факта является одним из положений, выносимых на защиту, и, по мнению оппонента, очень полезным и крайне своевременным. Приведены необходимые теоретические сведения о разномасштабном анализе и синтезе сигнала на сфере.

Представлена рекомендуемая автором структура модели гравитационного поля Земли, сочетающая в себе использование шаровых функций для описания низких и средних частот ($\approx 2 \le N \le 250$) и Сферических Радиальных Базисных Функций (СРБФ) – для отображения высокочастотной части геопотенциала. Обширный теоретический материал сведен воедино и изложен достаточно полно.

Во **второй главе** рассматриваются проблемы моделирования низкочастотной и среднечастотной частей геопотенциала. Поскольку низкие частоты приближенно до 30-40 степеней могут быть определены кинематическими методами космической геодезии, автор предлагает лишь вывод уравнения баланса энергии системы Земля–спутник в инерциальной и Гринвичской системах координат, позволяющий определить возмущающий потенциал вдоль орбиты любого летящего объекта, снабженного GPS или ГЛОНАСС, акселерометром и датчиками ориентации.

Основное внимание направлено на применение спутниковой градиентометрии для определения (уточнения) потенциала в диапазоне примерно $100 \leq N \leq 250$ степеней разложения по сферическим функциям.

Приведены общие сведения об успешно реализованном Европейским космическим агентством спутниковом проекте GOCE (2009–2013 гг.), целью которого было доставить высокоточную градиентометрическую информацию для определения стационарного во времени Гравитационного Поля Земли. Автором был разработан собственный двухэтапный алгоритм обработки этой информации для осуществления указанной цели. Предложены и исследованы различные способы осуществления каждого из этапов. Получена модель геопотенциала в виде разложения по шаровым функциям до 250-й степени и порядка. Относительные ошибки для каждого вычисленного гармонического коэффициента относительно европейской модели не превышали 1/10000.

Наиболее важным результатом второй главы является разработанный автором алгоритм определения гармонических коэффициентов разложения геопотенциала, опирающийся на применение новых теорем о выборке на сфере. Эта методика – одно из положений, выносимых на защиту. Ее практическая реализация обеспечена пакетом авторских программ и позволила получить модель ГПЗ, по точности не уступающую лучшим зарубежным аналогам.

Третья глава посвящена проблемам моделирования тонкой структуры гравитационного поля Земли. Для этой цели в диссертации предлагается использовать вейвлет–анализ вместо традиционно применяемого Фурье–анализа. Базисными функциями в этом случае служат СРБФ – принципиально отличающиеся от обычно используемых сферических функций возможностью регулировать их пространственную локализацию. Именно эта возможность позволяет автору обоснованно утверждать, что отсутствуют теоретические препятствия для неограниченного улучшения разрешающей способности и точности создаваемой модели ГПЗ. Нужны лишь соответствующие исходные данные.

Естественно, что при этом приходится иметь дело с иными задачами, чем при работе с рядами Фурье. Это касается вопросов разбиения области моделирования на подобласти в зависимости от сложности поля и имеющейся гравиметрической информации, оптимального расположения полюсов СРБФ в них, выбора вида и масштабов СРБФ, определения СРБФ – коэффициентов и др. Все эти вопросы достаточно подробно исследованы в диссертации и предложены обоснованные решения. Предложен эффективный алгоритм, позволяющий составить оптимальное подмножество полюсов из всех имеющихся возможностей.

Научная новизна диссертационной работы определяется следующими двумя основными результатами.

1. Алгоритм и соответствующее программное обеспечение гармонического анализа по результатам спутниковой градиентометрии, опирающиеся на использование новейших теорем о выборке на сфере, что позволяет ограничиться регулярной сеткой с минимальным количеством узлов. Большой интерес представляют и сопутствующие исследования, в частности, сравнительный анализ методов Гаусса–Лежандра, Дрисколла–Хили, Макюэна–Вью, Халида–Кеннеди–Макюэна.

2. Общая методика и соответствующее программное обеспечение регионального моделирования тонкой структуры ГПЗ с помощью СРБФ и результат ее практической реализации на части территории РФ.

Кроме того:

3. Разработаны новые модификации ядра Абеля–Пуассона и ядра Стокса, которые успешно использованы в качестве масштабирующих функций и вейвлетов при решении задач, связанных с различными трансформантами геопотенциала, и введено новое продуктивное понятие – частотная характеристика оператора усечения ядра Стокса на внутреннюю и внешнюю стороны определенного радиуса;

4. Предложены новые пространственно-локализованные функции с метрикой Махаланобиса, позволяющие учитывать неоднородность моделируемого ГПЗ и успешно решить трудную проблему согласования региональных моделей на границах областей;

5. Выполнены новое теоретическое обоснование и программная реализация метода подбора оптимальных полюсов СРБФ, позволяющего при локальном моделировании повысить точность результата и уменьшить количество необходимых вычислений; следует заметить, что использованную при этом идею ортогонализации можно с успехом применять при решении и других оптимизационных задач геодезии;

6. Предложена и практически протестирована быстро сходящаяся итерационная методика уточнения нормального поля геопотенциала, которая рекомендуется для использования при решении задач теории Молоденского, основанных на предположениях о малом отличии в физическом и геометрическом смыслах реального поля от нормального.

Обоснованность полученных результатов подтверждается корректным использованием методов и понятий физической геодезии, геостатистики, вейвлет–анализа, численного интегрирования, линейной алгебры, теории случайных функций. Во всех затронутых вопросах Лейла Супьяновна является профессионалом высокого уровня.

Достоверность научных и практических результатов проведенных исследований подтверждает большое количество численных экспериментов, включающих сравнения с измеренными значениями (при их наличии), либо со значениями, полученными с использованием лучших зарубежных аналогов. Результаты диссертации доложены на различных научно-технических конференциях и опубликованы в 26 работах. Из них – 18 статей в изданиях из списка ВАК и 1 монографии.

Базовым положением диссертации, определяющим ее **теоретическую значимость**, является обоснование того, что улучшение модели ГПЗ путем увеличения длины ряда по шаровым функциям на данный момент времени исчерпало свои возможности. Убедительно показано, что шаровые функции не способны отражать локальные особенности поля. Для дальнейшего развития этого направления определяющее значение имеет исследование существующих и разработка новых методов разномасштабного моделирования в приложении к задачам геодезии. Разработанные в рамках диссертационного исследования модификации существующих СРБФ и введенные в рассмотрение новые СРБФ, использующие метрику Махаланобиса, новое понятие “частотная характеристика оператора усечения ядра Стокса на внутреннюю и внешнюю зоны определенного радиуса” обогащают теорию пространственно локализованных функций и расширяют их практические возможности при моделировании ГПЗ. Теоретическое и практическое значение имеет исследование возможности применения для целей гармонического анализа ГПЗ по результатам спутниковой градиентометрии новейших достижений математики в области выборок наивысшей алгебраической точности теоремы Макюэна–Вью и теоремы об оптимальной выборке на сфере.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в том, что разработанный (в нашей стране – впервые!) алгоритм гармонического анализа ГПЗ по результатам спутниковой градиентометрии и соответствующий пакет программ могут быть использованы для практического построения глобальной модели геопотенциала в виде ряда по шаровым функциям до 250-й степени и порядка. Программный пакет внедрен в АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» в ходе выполнения СЧ ОКР «Изготовление автоматизированного комплекса программ из состава АПК ГГСК первого этапа», что подтверждается Актом о реализации. Разработанные алгоритмы и программы разномасштабного анализа и синтеза сигналов могут быть использованы для высокоточного локального моделирования гравитационного поля Земли, рельефа и других скалярных полей сложной структуры, заданных на поверхности Земли (сферы). Указанные результаты внедрены в ИФЗ РАН при выполнении НИР «Рельеф СПП-С» по Государственному оборонному заказу по разработке аналитических моделей рельефа Земли с улучшенными характеристиками, что подтверждается справкой о внедрении.

Отметим также еще раз разработанные алгоритм и программу подбора оптимальных полюсов СРБФ, поскольку они могут быть использованы и для решения других задач геодезии, связанных с оптимизацией различного рода сетей.

Немаловажно, что автор ставит еще и задачи на перспективу: стандартизовать технологии выделения пространственно стационарных регионов и их моделирования, осуществить практически сегментацию поверхности планеты на основе единых алгоритмов (хотя бы для РФ) и др.

Отметим некоторые недостатки, замеченные в процессе изучения диссертационной работы:

1. Не затронуты вопросы моделирования временных изменений геопотенциала.
2. Нет объяснения, почему стоит отдавать предпочтение масштабирующим функциям неограниченного спектра (стр.30 диссертации).
3. Нет объяснения того, что собой представляют сетки Галтона и решетчатая (стр. 70 диссертации).
4. Формула, связывающая гармонические коэффициенты вторых производных геопотенциала на высоте и на земле (стр.238 диссертации) возможно, содержит опечатку.
5. На стр. 307-308 имеется некоторая путаница в списке литературы.

Опираясь на результаты изучения диссертации Сугаиповой Л.С., можно заключить, что рассматриваемая работа выполнена на высоком научном уровне, обладает новизной, теоретической и практической значимостью. Выявленные недостатки не имеют принципиального характера и ни в коей мере не снижают высокого уровня выполненной работы.

Автореферат соответствует основным положениям диссертации и правильно отражает ее содержание.

Диссертация Сугаиповой Л.С. «Разработка и исследование методов разномасштабного моделирования геопотенциала» является научно–квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные теоретические и технологические решения, позволяющие повышать разрешающую способность и точность модели гравитационного поля Земли в соответствии с улучшением состава исходных данных.

Результаты диссертационной работы «Разработка и исследование методов разномасштабного моделирования геопотенциала» соответствуют требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, пункту П. «Определение параметров земного эллипсоида, геоида и гравитационного поля Земли, изменение их в пространстве и во времени» паспорта научной специальности, а ее автор Сугаипова Лейла Супьяновна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.32 – Геодезия.

Главный научный сотрудник Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института астрономии
Российской академии наук,
доктор физико-математических наук Рыхлова Лидия Васильевна

119017, Россия, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48
Тел.: 8 (495) 951-54-61
e-mail: rykhlova@inasan.ru
01.03.01 – Астрометрия и небесная механика

Подпись Рыхловой Л.В. заверяю,
заместитель директора по научной работе ФГБУН Института астрономии РАН
д.ф.–м.н. Сачков М.Е.
30.08.2018