

**ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук *Андреева Алексея Олеговича*  
на тему: «Создание селеноцентрической опорной системы координат  
на основе синтетического гармонического метода и спутниковых  
наблюдений» по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия**

Для успешного выполнения планирующихся российских миссий к нашему естественному спутнику, в рамках которых предусмотрена отработка мягкой посадки, забор грунта, орбитальная съемка, а в перспективе – создание лунной базы, необходима реализация системы точного координатно-временного позиционирования. В этом отношении созданная автором селеноцентрическая опорная система координат будет способствовать решению одной из самых актуальных проблем современной космической навигации. Выполненный дополнительный анализ структурных особенностей лунной поверхности направлен на решение другой важнейшей задачи по установлению факторов, влияющих на распределение ресурсов, появление которых на Луне связано с падением «медленных» астероидов.

Диссертационная работа Андреева А.О. включает введение, четыре главы, заключение, список обозначений и сокращений, список литературы и два приложения. Объем диссертации составляет 159 страниц. В диссертации приводятся 189 рисунков и 20 таблиц, включая приложения. В списке литературы содержатся 105 наименований.

Во **введении** доказываемся высокая степень актуальности исследования, обозначаются объект и предмет исследования, формулируются цель и задачи работы и приводятся основные положения, выносимые на защиту. Также во введении показана теоретическая и практическая значимость и научная новизна диссертационного исследования, описаны применяемые подходы к решению поставленных задач, приведены аргументы, подтверждающие достоверность представленных результатов. В заключительной части введения описан личный вклад автора, перечислены его публикации по теме

диссертации, конференции и семинары, на которых им сделаны доклады, свидетельства о регистрации результатов интеллектуальной деятельности, представлен список наград автора за достижения в научной деятельности, а также дано краткое содержание работы.

**В первой главе** описан метод создания динамической системы координат. Ее важность и необходимость обосновываются отсутствием привязки измерений, выполненных современными космическими миссиями, к небесной системе координат. Как следствие, остается неопределенной поверхность отсчета, относительно которой ориентированы селенографические данные. Также автором подчеркивается важность развития гравиметрических моделей для нахождения параметров орбиты КА при съемке лунной поверхности. Кроме того, в данной главе проведен анализ влияния физической либрации Луны на положения объектов, находящихся на лунной поверхности. Установлено, что вклад либрационных эффектов имеет порядок нескольких сантиметров. В заключительной части первой главы приведено описание метода, с помощью которого выполняются сгущение и увеличение площади покрытия опорной системы координат включением современных спутниковых измерений.

**Во второй главе** приведены основные этапы создания цифровой базы динамических селенографических координат опорных объектов. Вначале на основе обзора современной литературы были оценены ошибки, возникающие при определении как плановых координат, так и радиус-векторов объектов с помощью бортового оборудования миссий NASA “Apollo”, “Clementine”, “Lunar Reconnaissance Orbiter”, JAXA “Kaguya”. Полученные данные легли в основу цифровой базы данных селенографических координат лунных опорных объектов. Автором приведен фрагмент этой базы данных со среднеквадратическими ошибками для прямоугольных координат в долях среднего радиуса Луны. Подчеркивается, что плотность объектов базы данных неоднородна, с этой целью приведены усредненные диаграммы,

демонстрирующие распределение объектов по участкам поверхности размером  $10^\circ$ . Далее автор исследует систему координат, относительно которой даны положения объектов базы данных, и доказывает, что использованная система координат является динамической и селеноцентрической.

**Третья глава** посвящена анализу результатов, полученных с использованием созданной лунной опорной системы координат, которая реализована в программном виде как селеноцентрическая многопараметрическая модель. Модель включает несколько модулей, приведено описание каждого из них. С использованием данной модели решена имитационная задача по определению высоты исследуемой точки, широта и долгота которой задается. Для этого применяется авторский метод взвешенных расстояний. Вводятся весовые коэффициенты, чтобы учесть степень удаленности опорных объектов, входящих в цифровую базу, от исследуемой точки. Далее проводится тестирование модели на заданной выборке областей поверхности Луны. Достоверность полученных результатов оценивается на основании сравнения высоты исследуемой точки с данными топографической карты NASA LRO.

В **четвертой главе** представлены результаты исследования поверхности Луны с использованием синтетического метода. Вначале строятся топографические модели поверхности Луны на основании классического метода разложения высот в ряд по сферическим функциям. Далее эти модели исследовались с использованием методов фрактальной геометрии: были вычислены фрактальные размерности для лунной поверхности, что позволило выявить самоподобные области. Было предположено, что данные области образовались при схожих эволюционных процессах. Если значения цветового фрактального параметра значительно выше средней величины, это свидетельствует о значительных перепадах высот, причинами чего обычно является падение плотных металлических астероидов. В заключительной

части четвертой главы автором анализируются корреляционные связи фрактальных моделей и цветовых кодов, зашифрованных в геологической карте Луны. Установлено, что коэффициент корреляции имеет наибольшее значение на широтах от  $0^\circ$  до  $15^\circ$ .

В **заключении** автор формулирует основные выводы по проведенному исследованию, перечисляет публикации, в которых каждый из конкретных результатов работы опубликован, обсуждает перспективы дальнейшей работы, а также приносит благодарности за помощь при проведении данного исследования.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Все полученные при выполнении работ методы, научные положения, выводы и рекомендации полностью обоснованы и соответствуют высокому уровню исследований в данной области. Подтверждением данного факта служит то, что использовались современные селенодезические теории и подходы, основанные на апробированных математических методах при создании, как цифровой базы, так и многопараметрической селеноцентрической модели. Диссертация написана понятным языком, все выводы и рекомендации проанализированы и доказаны. Особое внимание необходимо обратить на подробность изложения разработанных автором математических выкладок и их практическое применение при выполнении работы. Все разделы диссертации взаимосвязаны и логически обоснованы.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются достоверными, поскольку: I) использованные автором исходные данные были получены в процессе выполнения космических миссий NASA и JAXA; II) применяемые в работе методы апробированы, что

подтверждается публикациями автора в журналах, научный уровень которых не подлежит сомнениям. Основные выводы и рекомендации представлялись автором в ходе устных докладов на всероссийских и международных конференциях, проводимых в том числе ГАИШ МГУ.

**Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Полученные результаты характеризуются высокой степенью научной новизны, что подтверждается свидетельствами о регистрации разработанных для решения задач диссертационного исследования программных комплексов и базы данных в Роспатенте. Практическая же значимость проведенного исследования подтверждается фактом внедрения результатов, а именно системы для осуществления привязки российских космических аппаратов к объектам с известными селеноцентрическими координатами, как элемента навигационных проектов Госкорпорации РОСКОСМОС.

Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации.

**Замечания по диссертационной работе**

1. На стр. 23 автор отмечает вклад в развитие картирования Луны космические миссии «Clementine», «Kaguya» и «LRO», однако не упоминаются миссии «Smart-1», «Chandrayaan-1, -2».
2. На стр. 26 автор пишет о световых лазерных маяках, которые должны стать реперами, положение которых известно с высокой точностью. Однако не обсуждается вопрос о необходимом количестве данных приборов и способах их доставки на поверхность Луны.
3. На стр. 34 автор пишет о точности на уровне нескольких метров при определении координат на Луне, однако общеизвестным является тот факт, что в данный момент даже область прилунения задается с ошибками порядка нескольких километров, достижение метровых точностей в текущих условиях крайне маловероятно.

4. На стр. 39 после определений 1.32 автор пишет о процедуре численной оптимизации, позволяющей «... **достигать точности преобразования не менее, чем разница между СК X и Y.**» Не вполне понятно, как определяется эта разница и как она влияет на точность преобразования чего-либо.
5. На стр. 58-60 исследуется смещение центра масс Луны относительно центра фигуры для различных каталогов, в том числе созданных по данным спутниковых наблюдений «Clementine» и «Kaguya», но при этом отсутствует каталог LRO. Интересно было бы увидеть и результат для LRO.
6. На стр. 70 при описании метода WAP автор пишет, что возможно использование цифровых карт не только в цилиндрической проекции, но и в других. Следовало бы упомянуть другие возможные проекции.
7. На стр. 84 уравнение 4.1 описывает разложение альтиметрических данных в ряд, и ниже дается описание входящих в это выражение компонент. Согласно данному описанию, «**j, k – параметры, определяющие степень разложения.**» Обычно один из этих параметров определяет *порядок*, а другой – *степень* разложения.
8. На стр. 89 в последнем предложении параграфа 4.2 речь идет об определении площади некоторого треугольника, в вершинах которого находятся величины цветовой фрактальной размерности, однако неясно, в каких единицах эта площадь измеряется.
9. На стр. 95 приводится рис. 23 (Трехмерное представление распределения ЦФП по лунной поверхности), однако автор не проводит его анализ.

Помимо замечаний 1–9 встречаются опечатки и другие технические ошибки. Например:

1. на стр. 25 в первом абзаце параграфа 1.2 в предложении «... **проблема разработки высокоточного навигационного**

**ориентирования»**, по-видимому, пропущено слово **«системы»** после **«разработки»**;

2. на стр. 50 автор пишет **«...ваДность структуры»** вместо **«важность»**;

3. на стр. 56 текст в ячейках таблицы 2.5 следовало бы выровнять по правому краю.

Вместе с тем, все указанные замечания не носят принципиального характера и не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертация оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Андреев Алексей Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, Отдел исследования Луны и планет, заведующий отделом

Шевченко Владислав Владимирович

1.03.2023

Контактные данные:

тел. +7 (499) 131-96-54, e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.03.02 астрофизика и радиоастрономия.

Адрес места работы:

119899, г. Москва, Университетский просп. 13, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, Отдел исследований Луны и планет

тел. +7 (495) 939-10-29, e-mail: [shev@sai.msu.ru](mailto:shev@sai.msu.ru)

Подпись сотрудника ГАИШ МГУ

В.В. Шевченко удостоверяю: