

**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**

Диссертационная работа Андреева А.О. представляет собой важное фундаментальное исследование, результаты которого опубликованы в ведущих журналах. Актуальность работы подтверждается вновь возросшим интересом к Луне со стороны ведущих космических держав: в 2019 г. китайской АМС «Chang'e 4» была совершена первая в истории мягкая посадка а обратной стороне Луны, в конце 2020 г. АМС «Chang'e 5» осуществила забор грунта, а в декабре 2022 г. в рамках тестирования всех необходимых систем для подготовки пилотируемого полета реализована миссия Artemis I (NASA). Российская лунная программа, в рамках которой на ближайшие годы запланированы несколько миссий, включает съемку лунной поверхности с окололунной орбиты, отработку мягкой посадки и, как результат, выбор участка поверхности для спускаемых аппаратов. Таким образом, диссертационное исследование Андреева А.О., позволяющее значительно увеличить точность посадки космических аппаратов на поверхность Луны за счет их привязки к объектам созданной в работе базы опорных кратеров и сократить количество маневров, выполняемых лунными аппаратами, в трудно моделируемых условиях, способно внести серьезный вклад в успешное выполнение российской лунной программы.

Диссертационная работа состоит из следующих разделов: введение, глава I, глава II, глава III, глава IV, заключение, список обозначений и сокращений, список литературы, приложение А и приложение В. Общий

объем диссертации составляет 159 страниц. Работа содержит 189 рисунков, 20 таблиц. В списке литературы фигурируют 105 наименований.

Во **введении** автор обосновывает актуальность выбранной темы, формулирует цель и задачи работы, показывает теоретическую и практическую значимость проведенных исследований, подчеркивает научную новизну работы, определяет методы исследования, доказывает, что полученные результаты являются достоверными, перечисляет основные положения, выносимые на защиту, описывает личный вклад в проведенном исследовании, приводит список своих публикаций по теме диссертации, а также научные конференции и семинары, на которых докладывались результаты. Во введении также приведены описание структуры и объем диссертации, и представлено краткое содержание работы.

В **первой главе** представлен метод создания динамической системы координат. В **параграфе 1.1** перечислены современные проблемы селенодезических исследований и рассмотрены основные результаты, полученные в данной области. В **параграфе 1.2** автор приходит к выводу, что наблюдательные спутниковые данные имеют существенный недостаток – отсутствие привязки к небесной системе координат, и, как следствие, отсутствует возможность считать их динамическими. Более правильным подходом, по мнению автора, является создание такой системы, в которой спутниковые данные после преобразований были бы приведены к системе динамических координат. Автор также проводит анализ существующих систем селенографических координат, поскольку имеются некоторые теоретические разногласия по данному вопросу. В последней части параграфа обсуждается проблема выбора теории физической либрации Луны (ФЛЛ) при определении положений объектов на поверхности Луны; автор показывает, что используемая в работе теория ФЛЛ в пределах ошибок измерений имеет достаточную точность. В **параграфе 1.3** представлено

подробное описание метода для приведения разнородных наблюдений, в том числе спутниковых, к единой системе отсчета.

**Вторая глава** посвящена построению цифровой базы данных (ЦБД) динамических селенографических координат. В **параграфе 2.1** анализируются данные современных космических миссий для их использования при построении ЦБД, в частности, приводятся ошибки, возникающие при определении местоположений опорных объектов, в качестве которых в большинстве случаев выступают кратеры. В **параграфе 2.2** представлены результаты построения ЦБД. Отмечается, что в базу данных включены прямоугольные и сферические координаты более 270 тыс. опорных объектов, что достаточно для осуществления координатной привязки к лунной системе координат для всей сферы Луны. Приведены усредненные среднеквадратические ошибки для прямоугольных координат. Получено свидетельство о регистрации ЦБД в Роспатенте. Автор акцентирует внимание на том, что ЦБД имеет особенность, которая заключается в неравномерном распределении объектов по участкам поверхности. Для наглядности приведены две диаграммы распределения объектов ЦБД. В **параграфе 2.3** проводится исследование ЦБД. С этой целью сначала сравнивается положение центра масс Луны относительно центра ее сравниваемых селенографических систем. Было проведено сравнение с каталогами ULCN 2005 и Киев-4900, а также с данными космических миссий Clementine и Kaguya. Было проведено исследование ориентации ЦБД в сравнении с 3 каталогами. Как результат, показано, что используемая в ЦБД система координат является селеноцентрической и динамической.

В **третьей главе** представлены результаты построения селеноцентрической опорной системы координат, программной реализацией которой является селеноцентрическая многопараметрическая модель (СММ). В **параграфе 3.1** автор описывает возможности СММ. С ее помощью можно

получить список объектов ЦБД, находящихся в окрестности некоторой точки, плановые координаты которой задает пользователь. В дальнейшем данная функция используется для решения задачи по имитации лунной навигационной системы: высота задаваемой пользователем точки на поверхности Луны вычисляется через координаты соседних объектов, представленных в ЦБД, с учетом весовых коэффициентов. **Параграф 3.2** посвящен результатам тестирования СММ. Для проверки адекватности получаемых результатов исследования проводились в восьми координатных октантах и, дополнительно, в шести областях с повышенной плотностью опорных объектов. Точность результатов оценивалась согласно сравнению высот СММ и топографической карты NASA LRO. Установлено, что максимальное расхождение в радиус-векторе составляет  $\approx 1,48$  км, а минимальное  $\approx 1,03$  км.

В **четвертой главе** с помощью синтетического метода исследуется лунная поверхность. В **параграфе 4.1** представлена методика построения и анализа цифровых спутниковых карт поверхности Луны; отмечается, что используемое программное обеспечение успешно прошло регистрацию в Роспатенте. В **параграфе 4.2** модель поверхности, созданная по данным японской миссии Kaguya, исследуется с помощью авторского метода, основанного на теории множеств и фрактальной геометрии, структура поверхности при этом описывается с помощью цветового фрактального параметра (ЦФП) – площади треугольника, в вершинах которого располагаются цветовые фрактальные размерности. В **параграфе 4.3** обсуждаются результаты определения самоподобных лунных областей. Отмечается, что современный вид данных областей связан с идентичными эволюционными условиями, например, более интенсивной метеоритной бомбардировкой плотными металлическими астероидами. Предполагается, что значения концентрации лунных ресурсов в самоподобных областях могут быть близкими. В **параграфе 4.4** автор показывает, что существует значительная корреляция между параметром самоподобия, определенным

ранее, и селенологическими данными. В частности, установлено, что коэффициент корреляции принимает наибольшие значения в том широтном интервале, где фиксируются наибольшие изменения температуры, приводящие к структурным изменениям поверхности.

В **заключении** автор делает подробные выводы по каждой главе диссертации, отмечает, в каких научных изданиях опубликованы результаты, приводит возможные области применения полученных данных и приносит благодарности научному руководителю и другим исследователям, оказавшим помощь и поддержку при написании диссертации.

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

Научные положения, выводы и рекомендации, которые сформулированы в диссертации, являются полностью обоснованными. Подтверждением этого служит то, что они были опубликованы в научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

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

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений, поскольку:

I) при решении поставленных в диссертации задач автор использовал данные, полученные в процессе выполнения лунных миссий Clementine, Kaguya, LRO, точность и надежность которых признана мировым научным сообществом;

II) проводился сравнительный анализ полученных результатов с выводами других авторов, опубликованными в высокорейтинговых научных журналах;

III) применялись корректные и апробированные методы редукции и анализа значительных объемов наблюдательных данных;

IV) по полученным результатам автором сделаны устные доклады на конференциях ВАК-2021, Третьей астрометрической конференции-школе «Астрометрия вчера, сегодня, завтра», Всероссийской астрометрической конференции «Пулково-2018» и семинарах, проводимых на базе ГАИШ МГУ, ИНАСАН и КФУ.

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

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются новыми и оригинальными. Безусловным преимуществом является то, что разработанные автором теоретические подходы, описанные в диссертации, имеют существенное прикладное значение для космонавтики и уже используются в навигационном оборудовании для планирующихся российских лунных миссий. Соискателем создана селеноцентрическая опорная система координат, реализованная в программном виде как селеноцентрическая многопараметрическая модель, позволяющая как находить с достаточно высокой точностью высоту любой точки на поверхности Луны, так и осуществлять привязку космических аппаратов к опорным кратерам, что крайне важно при выборе места посадки и непосредственно в процессе прилунения. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается полученными автором свидетельствами о регистрации в Роспатенте программ для ЭВМ и базы данных, созданных в процессе выполнения диссертационного исследования. Основные результаты работы опубликованы в авторитетных рецензируемых научных изданиях, таких как «Астрономический журнал», «Advances in Space Research», «Meteoritics and Planetary Science».

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

## Замечания по диссертационной работе

1. На стр. 32 автор пишет о теориях физической либрации Луны, которые используются на практике, однако не приводит названия этих теорий. Единственный способ понять о каких теориях идет речь – обратиться к приведенным ссылкам на литературу. С моей точки зрения, необходимо было написать названия этих теорий.
2. На стр. 32 приводятся обозначения параметров физической либрации Луны, однако не описывается, что представляет собой каждый из этих параметров.
3. На стр. 37 автор пишет о трансформации одной системы координат в другую. Очевидно, что имеется в виду трансформация *координат объектов* из одной системы в другую.
4. На стр. 38 при описании компонентов уравнения 1.30 пропущено обозначение матрицы поворота координатной системы.
5. На стр. 40 при описании этапов привязки лунных объектов к небесной системе координат автор пишет: «При этом для того, чтобы выполнить задачу более эффективно, необходимо определить, какими вычислительными процедурами можно пренебречь с сохранением достаточного уровня точности.» Мне непонятно, с какой целью необходимо пренебрегать вычислительными процедурами. Если это нужно для экономии времени расчетов, то следовало бы показать, насколько это эффективнее.
6. На стр. 55 в последнем предложении первого абзаца пропущено слово «приводится», когда автор дает ссылку на результаты космической миссии «Clementine».
7. В таблицах 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 выделяется более крупный шрифт относительно остального текста. На мой взгляд, более правильно было бы использовать единый стиль в каждой таблице.
8. На стр. 85 разрешение рис. 16 слишком низкое, что затрудняет его анализ. Следовало бы заменить данный рисунок на более четкий.

9. На стр. 89 в п.1 списка автор пишет о том, что другие диаграммы распределения ЦФП находятся в Приложениях к диссертации. В рассматриваемой диссертации 2 Приложения (Приложение А и Приложение В), следовало бы конкретизировать, к какому именно приложению нужно обращаться.
10. На стр. 93 на первой строке автор пишет: «Впрочем, удастся выявить некоторые участки, структуры которых *подобны*, результаты приведены в таблице 4.2». Как следует из вышеприведенного описания, выполнялось определение *самоподобных* областей.
11. На стр. 106 в п.7 автор пишет о проведенном анализе корреляционных связей полученных результатов с данными «селено-химической» карты, однако данная карта является селенологической.

Вместе с тем, указанные замечания 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, а также 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:**

кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник лаборатории геохимии углерода,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина  
и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической  
химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук

Воропаев Сергей Александрович

Контактные данные:

тел. \_\_\_\_\_, e-mail: \_\_\_\_\_

Шифр специальности ВАК, по которой защищена кандидатская диссертация:

01.04.02 Теоретическая физика

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ул. Косыгина, д.19,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина  
и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической  
химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, Лаборатория  
геохимии углерода

тел. +7 (499) 939 1905, e-mail: voropaev@geokhi.ru

Подпись сотрудника ГЕОХИ РАН

С.А. Воропаева удостоверяю: