

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

В диссертационной работе Андреева А. О. представлены результаты работ по созданию селеноцентрической опорной системы координат на основе синтетического гармонического метода и спутниковых наблюдений. Исследования Луны на протяжении многих десятилетий остаются актуальными. Это подтверждается реализацией ведущими космическими державами лунных миссий, в том числе на ближайшее время запланировано осуществление космических проектов Российской лунной программы, в рамках которой, помимо орбитальных научных экспериментов, планируется и отработка мягкой посадки на поверхность Луны вблизи Южного полюса. В условиях существующего координатно-временного обеспечения прилунение осуществляется с точностью порядка десятка километров. Выполненное диссертационное исследование позволяет осуществить привязку российских космических аппаратов к объектам, положения которых достоверно известны, что должно обеспечить увеличение точности прилунения до величин порядка 1–1,5 км.

Диссертация Андреева А.О. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка обозначений и сокращений, списка литературы, приложения А и приложения В. Общий объем диссертации составляет 159 страниц со 189 рисунками и 20 таблицами. Список литературы содержит 105 наименований.

Во введении сформулирована основная цель работы, перечислены решаемые в работе задачи, приведена теоретическая и практическая значимость

выполненного исследования, показана его — научная — новизна, — описаны используемые методы, обоснована достоверность представленных результатов, даны основные положения, выносимые на защиту, подробно описан личный вклад автора. Также во введении приведен список публикаций автора по теме диссертации, перечислены конференции и семинары, на которых докладывались результаты работы, и представлено ее краткое содержание.

Первая глава посвящена методу создания динамической системы координат. Автором проводится анализ актуальных проблем современной селенодезии. В данной главе обсуждаются недостатки существующих систем координат, которые по существу являются квазидинамическими СК, и подчеркивается необходимость создания селеноцентрической динамической системы координат с целью привязки к ней космических аппаратов и, как следствие, увеличение точности при посадке КА. Весьма перспективным с точки зрения создания селеноцентрической системы координат по мнению диссертанта является использование световых лазерных маяков, как реперных объектов. Установлено влияние либрационных эффектов на определение селенографических координат. В последнем параграфе представлен математические методы, с помощью которых разнородные наблюдения сводятся к единой системе отсчета.

Вторая глава посвящена созданию цифровой базы динамических селенографических координат. Приводятся результаты анализа ошибок альтиметрических измерений, выполненных космическими миссиями «Apollo», «Clementine», «Kaguya», «LRO». На основе результатов лунных миссий была построена цифровая база данных, включающая селенографические прямоугольные и сферические координаты более 279 тыс. объектов. С помощью двух- и трехмерной диаграмм продемонстрировано распределение объектов этой базы данных по различным областям лунной поверхности. Автором отмечается, что распределение неравномерное: количество идентифицированных объектов в

полярных областях — в несколько раз меньше — по сравнению с экваториальными. Для подтверждения того, что созданная цифровая база данных реализует динамическую селеноцентрическую систему координат, определено положение центра масс относительно центра фигуры Луны. Рассчитанный сдвиг хорошо согласуется с данными космических миссий «Clementine» и «Kaguya» и системы ULCN-2005.

В третьей главе обсуждаются результаты построения селеноцентрической опорной системы координат, которая реализована в виде программной селеноцентрической многопараметрической модели. В первую очередь данная модель позволяет исследовать некоторую искомую точку на поверхности Луны и выделить объекты из созданной цифровой базы данных, которые находятся в непосредственной близости от нее. При этом возможно получение выборки объектов, попадающих в куб или сферу задаваемого размера. Одной из возможностей селеноцентрической многопараметрической модели является решение имитационной задачи, которая заключается в том, что на основании известных координат объектов, окружающих некоторую искомую точку, интерполяционно определяется ее высота. Неравномерность расстояний между окружающими объектами и искомой точкой учитывается через систему весовых коэффициентов. Селеноцентрическая многопараметрическая модель была протестирована на 8 октантах и в 6 областях, характеризующихся повышенной плотностью объектов цифровой базы данных. Точность полученных результатов оценивалась на основании разницы высот, полученных с помощью модели и на основе цифровой альтиметрической карты миссии LRO. Среди 8 октантов лучшее соответствие найдено для октанта №3 с координатами $\lambda = [0^\circ, -90^\circ]$, $\beta = [0^\circ, -90^\circ]$. В областях с высокой плотностью объектов модель имеет самую высокую точность на уровне 1 км. В октантах средняя точность варьируется от 1,25 км до 1,48 км в зависимости от того, рассматриваются ли приполярные зоны.

В четвертой главе представлены результаты исследования поверхности Луны с использованием синтетического метода, суть которого заключается в формировании гармонических моделей, построенных с помощью разложения альтиметрии в ряд сферических функций, и их анализ с помощью цветовых фрактальных размерностей. Фрактальные размерности для каждой исследуемой области рассматриваются как вершины некоторого треугольника, имеющего высокую чувствительность к изменениям лунного рельефа и названного автором «цветовой фрактальный параметр». Получены и проанализированы 162 диаграммы его распределения по областям лунной поверхности. Выявлены области, являющиеся самоподобными. Автором выдвигается гипотеза о схожих эволюционных механизмах их формирования. Для подтверждения физического смысла полученных результатов выполнялся поиск корреляционных связей между параметром самоподобия и данными селенологической карты. Наибольшее значение коэффициента корреляции найдено в широтном интервале от 0° до 15° , а самые значительные перепады температуры, способные проводить к структурным изменениям поверхности, фиксируются на широтном интервале от 0° до 7° .

В заключении приведены основные выводы по диссертационной работе, обсуждаются дальнейшие перспективы исследования, а также перечисляются организации, в которых представленные результаты могут быть использованы.

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

Все решенные в диссертационном исследовании задачи четко сформулированы, а выносимые на защиту положения обоснованы. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается применением современных астрономических методов и концепций, апробированного

математического аппарата при анализе и обработке цифровых данных и при выводе окончательных результатов в рамках поставленных перед диссертантом задач. Диссертация написана логически последовательно, используется понятный математический аппарат, все выводы и положения, сделанные в диссертационной работе, проанализированы и обоснованы.

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

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается тем, что:

- 1) результаты соответствуют данным, опубликованным другими исследователями по данной тематике в высокорейтинговых рецензируемых журналах;
- 2) в расчетах используются альтиметрические данные, полученные в лунных миссиях ведущими мировыми космическими агентствами.

Основные научные положения, выводы и рекомендации опубликованы автором в научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.013.1 по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия, а именно: «Астрономический журнал», «Advances in Space Research», «Astronomische Nachrichten», «Meteoritics & Planetary Science», «Nonlinear Phenomena in Complex Systems». По материалам диссертации Андреевым А.О. были сделаны устные доклады на многих всероссийских и международных конференциях, включая Всероссийскую астрономическую конференцию 2021 года (ГАИШ МГУ), третью астрометрическую конференцию-школу «Астрометрия вчера, сегодня, завтра», Всероссийскую астрометрическую конференцию «Пулково-2018» (Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН), вторую астрометрическую конференцию-школу «Астрометрия вчера, сегодня, завтра» (ГАИШ МГУ). Для всех разработанных для решения задач диссертационного исследования программ получены свидетельства о регистрации в Роспатенте.

Новизна и практическая значимость — полученных результатов подтверждается тем, что они были внедрены при выполнении государственного оборонного заказа для Роскосмоса. Планируется применение селеноцентрической многопараметрической модели при выполнении будущих космических миссий к нашему естественному спутнику.

Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации.

Замечания по диссертационной работе:

1. На стр. 23 автор пишет о том, что по результатам лунной миссии «Луна-10» было показано, что центры масс и фигуры Луны не совпадают, однако не приводит более подробные сведения о том, вдоль каких осей и как сильно центры масс и фигуры разнесены друг относительно друга. Кроме того, рекомендуется добавить ссылку на статью, в которой данная особенность обсуждается.
2. На стр. 24 автор пишет о гравитационных аномалиях под поверхностью лунных морей. Более распространенным термином является «маскон».
3. На стр. 25 в первом предложении параграфа 1.2 автор упоминает «значительные результаты, достигнутые в области установления селенофизических параметров с использованием наблюдений космических зондов», однако не приводит ссылки на литературу.
4. На стр. 34 на рис. 3 отсутствуют единицы измерения для Δr , они приведены в подписи к рисунку, что неудобно для читателя.
5. На стр. 35 либрация в долготе обозначена как τ_m , хотя на стр. 32 она же обозначена без нижнего индекса. Возникает вопрос – речь идет об одном и том же параметре или о разных? Аналогичная ситуация с другими параметрами либрации – ρ_m и σ_m .

6. На стр. 36 в первом предложении параграфа 1.3 автор пишет о подходах, которые применяются для обеспечения прямой привязки кратеров к звездам, однако не приводит сами методы.
7. На стр. 39 автор пишет о «разных подходах» при аппроксимированных и детерминированных преобразованиях координатных систем, но не детализирует их.
8. На стр. 44 во втором абзаце автор пишет о том, что топографические исследования «Clementine» позволили расширить «геодезические знания о видимой стороне Луне...». По всей видимости, имелись в виду **селенодезические знания**.
9. На стр. 74 автор отмечает, что для использования интерполяционной процедуры следует ограничиться областью $\pm 177^\circ$ по долготе и $\pm 84^\circ$ по широте. По какой причине были выбраны именно такие диапазоны широт и долгот? Что происходит в случае полного диапазона углов?
10. На стр. 86 автор пишет о диаграмме Хассе, но подробно не описывает ее построение.
11. На стр. 94 автор пишет: «... наибольшие значения параметра самоподобия, с высокой степенью вероятности формировались при аналогичных условиях и в результате идентичных эволюционных процессов». Данное утверждение следовало бы обосновать более развернуто.
12. На стр. 98 автор пишет о преимуществах использования распределенного пространства объектов, однако не приводит описание этого пространства и его основных свойств и особенностей.

Кроме того, встречаются орфографические, пунктуационные и технические ошибки. Например:

1. Стр. 55 -- «Метод и практика сведения селенографических данных в единую систему с помощью регрессионного моделирования **описан** в параграфе №1.3.». Следует использовать множественное число «**описаны**».
2. Стр. 66 -- «Точность высот – не менее 0,5 **метров**». Следовало бы писать «**метра**».

3. Стр. 66 -- «... меняются со временем незначительно и **периодично**». Следовало бы писать «**периодически**».
4. Стр. 67 -- «Введенные значения долготы и широты **в** появляются в меню». Лишний предлог «в».
5. Стр. 71 -- «... по известным высотам h_i окружающих пикселей и перебор разных значений параметра k_i ...». По всей видимости, пропущено слово «**осуществляя**» перед «**перебор**».
6. Стр. 88 -- «... цифровая структура поверхности **описывается** следующими...».

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:

доктор физико-математических наук,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук, Отдел исследований Солнечной системы, заведующий отделом

Шематович Валерий Иванович

06 марта 2023 года.

Контактные данные:

тел. +7 (495) 951-07-30, e-mail: shematov@inasan.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 05.13.18 – теоретические основы математического моделирования, численные методы и комплексы программ

Адрес места работы:

119017, г. Москва, ул. Пятницкая 48, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук, Отдел исследований Солнечной системы

тел. +7 (495) 951-54-61, e-mail: admin@inasan.ru

Подпись сотрудника ИНАСАН

В.И. Шематовича удостоверяю

Ученый секретарь ИНАСАН

А.М. Фатеева

