

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Андреев Алексей Олегович

**Создание селеноцентрической опорной системы координат на
основе синтетического гармонического метода и спутниковых
наблюдений**

1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Диссертация выполнена на кафедре Астрономии и космической геодезии Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета.

Научный руководитель — *Нефедьев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент*

Официальные оппоненты — *Шевченко Владислав Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Отдел исследования Луны и планет, заведующий отделом*

Шематович Валерий Иванович, доктор физико-математических наук, Институт астрономии РАН, Отдел исследований Солнечной системы, заведующий отделом

Воропаев Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, лаборатория геохимии углерода, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится 16 марта 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: belova.oksana@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.1/2369>

Автореферат разослан . февраля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

О.М. Белова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В последние десятилетия Луна является самым интенсивно изучаемым небесным телом как наземным оборудованием, где особая роль в настоящее время отводится лазерной локации Луны [1], так и спутниковыми миссиями NASA (Clementine [2], Lunar Prospector [3], LRO [4], GRAIL [5]), ESA (SMART-1 [6]), JAXA (Kaguya [7]), CNSA (Chang'e 1 – Chang'e 5 [8, 9, 10]) и ISRO (Chandrayaan-1 [11], Chandrayaan-2 [12]). В ближайшее время также планируется осуществление российских лунных миссий (Луна-25, -26, -27, -28), к научным задачам которых относится высокоточная привязка снимков поверхности нашего естественного спутника к селеноцентрической системе координат (СК) [13]. Это позволит достичь сопоставимой дистанционному зондированию Земли точности при решении селенографических задач. Очевидно, что при выполнении таких работ существуют повышенные требования к координатно-временной поддержке КА в окололунном пространстве [14].

Недостаточная степень покрытия лунной поверхности является фундаментальным минусом тех опорных сетей, которые существуют в настоящий момент. Особенно ярко этот недостаток проявляется в полярных областях, куда планируется осуществить прилунение в рамках реализации российской лунной программы [13, 15, 16]. Так для каталога, созданного по наблюдениям серии космических миссий NASA Apollo, и для данных эталонных сетей, полученных путем обработки снимков Луны космических миссий «Зонд-6» и «Зонд-8» для западного полушария Луны, полное покрытие лунной поверхности отсутствует и ограничено лишь несколькими небольшими зонами.

Измерения, выполненные дальномерами, установленными на бортах окололунных КА, позволяют описать с высокой точностью особенности лунного рельефа [17], однако отсутствует возможность привязки этих наблюдений к какой-либо СК.

В ином случае при выполнении наблюдений определяют точные положения референционных объектов на основе абсолютной привязки к звездам, но при этом лунный рельеф не моделируется достаточно подробно.

Для обоих случаев можно отметить, что их системы отсчета координат отличаются как положением начал, так и их осями [18].

Координаты объектов, полученные с борта окололунных КА относятся к квазидинамической СК [19], т.к. положения КА привязаны к лунному центру масс (ЦМ), но не к направлению осей инерции.

Т.к. современные цифровые базы данных (ЦБД) лунных объектов построены на спутниковых измерениях, СК этих ЦБД по вышеописанной при-

чине также являются квазидинамическими [20]. Следовательно, существующие картографические и селенографические модели не следует считать удовлетворяющими динамическим критериям. Учитывая последнее, в результате реализации этапов настоящего диссертационного исследования построена высокоточная навигационная селенографическая сеть, призванная исправить вышеупомянутые проблемы.

Следует отметить, что данные наблюдений, выполненных различными спутниковыми миссиями, являются разрозненными, и для их приведения в единую СК должны применяться робастные методы, в данном случае – регрессионное моделирование.

Все вышесказанное предполагает решение ряда взаимосвязанных конкретных задач: а) Приведение разнородных спутниковых наблюдений к единой системе, адаптированной для высокоточного численного интегрирования; б) Разработку метода анализа стохастических и динамических особенностей селенографических систем; в) Построение опорной системы селеноцентрических координат; г) Разработку селеноцентрической многопараметрической модели; д) Исследование точности созданной селеноцентрической системы; е) Создание синтетического метода для анализа поверхности Луны; ж) Анализ селенофизических характеристик с помощью корреляционного метода.

В ходе реализации диссертационного исследования была создана и исследована селеноцентрическая многопараметрическая модель. Обработка экспериментальных данных выполнялась при помощи оригинальных численных алгоритмов и компьютерных программ, включающих в себя вычисление и анализ динамических характеристик селеноцентрических систем.

Повышение точности моделей селенографических систем и координатного описания элементов лунного рельефа позволит получить более высокий уровень точности определения координат точки посадки на поверхность Луны в будущих российских миссиях с сокращением эллипса прилунения до метровых значений [21, 14].

Осуществление планируемых в ближайшее время российских лунных миссий является одним из основных направлений развития космической отрасли России, которое должно вывести ее на лидирующие мировые позиции. Это предполагает построение высокоточной системы координатно-временного обеспечения на Луне и создание селеноцентрических навигационных систем.

Объект и предмет исследования.

В настоящей диссертации выполняется построение селеноцентрической опорной системы, которая включает цифровую базу данных, селеноцентрическую многопараметрическую модель, синтетический метод для

анализа лунной поверхности. **Предметом** исследования является селенографическое координатно-временное обеспечение для решения задач лунной навигации. **Объектом** исследования является система Луна – окололунные космические аппараты, новые характеристики лунной структуры, связанные с эволюционными процессами, и гармонический анализ данных наблюдений спутниковых миссий.

Целью работы является создание селеноцентрической опорной системы координат на основе синтетического гармонического метода и спутниковых наблюдений, выполненных КА «Clementine», «Kaguya», «LRO».

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Анализ современных спутниковых оптических наблюдений Луны, выполненных космическими миссиями с помощью альтиметрических измерений и методов дистанционного зондирования Луны;
2. Разработка метода построения динамической селеноцентрической системы с использованием регрессионного моделирования и многопараметрического анализа;
3. Создание единой системы селеноцентрических координат с целью ее использования совместно с современными методами позиционирования;
4. Построение селеноцентрической многопараметрической модели в виде программной системы, включающей цифровую карту Луны, базу данных опорных точек на Луне в системе центра масс и осей инерции и программного комплекса для определения и анализа координат точек на лунной поверхности, наблюдаемых различными методами, в том числе навигационным оборудованием, установленным на космических аппаратах;
5. Анализ точности определения координат объектов на лунной поверхности и сравнение с альтиметрическими данными космических миссий;
6. Разработка синтетического метода для исследования параметров макрофигуры небесных тел и моделирование фрактальных карт лунной поверхности;
7. Выполнение корреляционного анализа полученных в работе данных с селенофизическими характеристиками с целью определения достоверности результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ методов и результатов по дистанционному зондированию Луны требуется для разработки подходов к созданию селеноцентрической опорной системы координат;
2. Цифровая база селеноцентрических координат опорных объектов в динамической системе отсчета данных позволяет выполнить привязку космических аппаратов к лунной системе координат и установить связи между селеноцентрической и небесной системами координат;
3. Селеноцентрическая опорная система координат, представленная в программном виде как селеноцентрическая многопараметрическая модель для спутникового позиционирования, требуется для создания систем навигации и, в частности, моделирования имитационных процессов по определению положений анализируемых объектов в лунной системе координат;
4. Синтетический метод для исследования физических свойств лунной поверхности и определения самоподобных областей позволяет выявить участки на Луне, которые были сформированы в результате аналогичных эволюционных процессов, и требуется для создания фрактальных карт, описывающих лунную структуру;
5. Результаты анализа корреляционных связей селенологических свойств с фрактальными моделями поверхности Луны позволяют определить физический смысл параметров, полученных на основе синтетического метода, и выявить селенодезические процессы, связанные с температурными градиентами и распределением химических элементов.

Научная новизна:

1. Впервые разработан метод для определения положений искомых точек на Луне с использованием цифровых баз данных опорных точек и высотных карт Луны, построенных на основе оптических спутниковых наблюдений;
2. Впервые построена селеноцентрическая многопараметрическая модель для решения задач зондирования Луны с использованием электронных баз данных опорных точек и цифровых карт поверхности Луны;
3. Создан цифровой каталог опорных кратеров на основе современных космических миссий в единой системе динамических координат;

4. Созданная селеноцентрическая многопараметрическая модель позволяет определять положения объектов на Луне в селеноцентрической системе координат как непосредственно на лунной поверхности, так и с использованием бортовых спутниковых систем навигации;
5. С целью оценки достоверности полученных результатов разработана методика использования робастных процедур непосредственно для решаемых в диссертационном исследовании задач.

Практическая значимость результатов настоящей работы заключается в возможности их использования для многих современных задач селенодезии и космической навигации:

1. Селеноцентрическая многопараметрическая модель была внедрена при выполнении Государственного оборонного заказа СЧ НИР «Вызов-Перспектива-3-КФУ» (Роскосмос), и планируется ее применение для навигационной привязки российских окололунных КА и создания высокоточной системы для их прилунения;
2. Результаты анализа современных спутниковых наблюдений в дальнейшем будут использованы для создания цифровых баз данных селеноцентрических положений опорных объектов;
3. Метод построения цифровой базы данных динамических селеноцентрических опорных точек СК можно использовать в организациях, в которых ведутся исследования по навигационному сопровождению лунных миссий;
4. Единая цифровая база селеноцентрических координат будет входить в системы спутникового позиционирования как с борта окололунного КА, так и с лунной поверхности;
5. Селеноцентрическая многопараметрическая модель будет применяться для навигационной привязки окололунных КА и создания высокоточной системы для их прилунения при осуществлении российских лунных миссий;
6. Синтетический метод для исследования параметров небесных тел и фрактальных карт самоподобных областей будет применяться при изучении физических свойств тел Солнечной системы и даст возможность определять наиболее важные районы по химическим и эволюционным параметрам;

7. Выполненный корреляционный анализ полученных в работе данных с геологическими характеристиками лунной поверхности позволит производить выбор наиболее востребованных с научной и экономической точек зрения областей для будущих прилунений и выбора места для роботизированных и обитаемых лунных баз;
8. Все полученные в диссертационном исследовании результаты могут быть применены при проведении селенодезических исследований в ИКИ РАН, ГАИШ МГУ, ИНАСАН, ГЕОХИ, ИПА РАН, ГАО РАН, КФУ, МИИГАиК и других институтах в России и в зарубежных организациях.

Методология и методы исследования. Для исследования построенной в работе цифровой базы данных (ЦБД) использовался многопараметрический гармонический анализ (МГА), суть которого заключается в представлении высот лунных объектов, включенных в ЦБД и различные селенографические каталоги, в виде рядов сферических функций [22]. Значения гармонических амплитуд первого порядка определяют сдвиг центра отсчета (ЦО) СК относительно центра масс Луны. По величине смещения ЦО относительно центра масс для разных систем была оценена возможность отнести СК ЦБД к классу динамических систем.

Для исследования структурных особенностей поверхности Луны использовался синтетический метод, включающий создание топографических моделей с помощью описанного выше МГА и определение их фрактальных характеристик. К последним относятся фрактальная размерность (ФР) по характеристическим параметрам, в качестве которых использовались цвета пикселей на цифровых альтиметрических картах, и параметр самоподобия – отношение данной ФР к ФР самоподобного множества. Подробно синтетический метод описан в **параграфе 4.2** диссертации.

Достоверность полученных результатов обеспечена:

1. Высокой степенью согласованности полученных в работе результатов с данными, опубликованными в рецензируемых высокорейтинговых научных журналах;
2. Использованием точных и апробированных в статьях автора методов анализа спутниковых космических измерений;
3. Использованием в расчетах наблюдений, выполненных NASA, JAXA и ESA и приведенных к единой системе отсчета;
4. Осуществлением анализа точности данных, обработанных в рамках диссертационного исследования.

Апробация работы. По основным результатам диссертационного исследования были сделаны доклады на заседании Кафедры астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета, на объединенном семинаре «Проблемы происхождения и эволюции кометно-астероидного вещества в Солнечной системе и околоземная астрономия» в ИНАСАН, на Координационном совете по небесной механике ГАИШ МГУ, а также следующих научных конференциях:

1. Всероссийская астрономическая конференция 2021 года (ГАИШ МГУ), 23–28 августа 2021 г., Москва, Россия.
2. Третья астрометрическая конференция-школа «Астрометрия вчера, сегодня, завтра» (ГАИШ МГУ), 14–16 октября 2019 г., Москва, Россия.
3. Всероссийская астрометрическая конференция «Пулково-2018» (Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН), 1–5 октября 2018 г., Санкт-Петербург, Россия.
4. Вторая астрометрическая конференция-школа «Астрометрия вчера, сегодня, завтра» (ГАИШ МГУ), 23-25 октября 2017 г. Москва, Россия.
5. Международная конференция «ФизикА.СПб/2022» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), 17–21 октября 2022 г., Санкт-Петербург, Россия.
6. Международная конференция «ФизикА.СПб/2021» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), 18-22 октября 2021 г., Санкт-Петербург, Россия.
7. Международная конференция «84th annual meeting of the Meteoritical Society», 15–21 августа 2021 г., Чикаго, США.
8. Международная конференция «ФизикА.СПб/2020» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), 20-22 октября 2020 г., Санкт-Петербург, Россия.
9. XXXIII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-33» (Казанский национальный исследовательский технологический университет), 14-18 сентября 2020 г., Казань, Россия.
10. Международная конференция «ФизикА.СПб/2019» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), 22-24 октября 2019 г., Санкт-Петербург, Россия.
11. Международная конференция «The 82nd annual meeting of the Meteoritical Society» (Университет Хоккайдо), 7-12 июля 2019 г., Саппоро, Япония.

12. Международная конференция «16th INTEGRAL/BART Workshop (IBWS 2019)», 20-24 мая 2019 г., Карловы Вары, Чехия.

13. Международная конференция «2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition», 17-19 сентября 2018 г., Орландо, США.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ [18-32-00895 мол_а (А.О. Андреев – руководитель); 19-32-90024 Аспиранты (А.О. Андреев – исполнитель); 19-32-50071 мол_нр (А.О. Андреев – исполнитель)], «PhD-Student» Фонда развития теоретической физики и математики «Базис» (А.О. Андреев – руководитель), РФФ [22-72-10059 (А.О. Андреев – исполнитель); 20-12-00105 (А.О. Андреев – исполнитель)].

Личный вклад. Выполнен анализ исследований в области дистанционного зондирования Луны современными космическими миссиями. Личный вклад автора составил 80%, результаты автора содержатся в 3 статьях (номера 1, 8, 9 из списка на стр. 11), по полученным результатам сделано 2 доклада на международных конференциях.

Разработан метод построения динамической селеноцентрической системы с использованием регрессионного моделирования и многопараметрического анализа. Личный вклад автора составил 90%, результаты автора содержатся в 2 статьях (номера 6 и 11 из списка на стр. 11), по полученным результатам сделано 2 доклада на международных конференциях.

Создана единая система селеноцентрических координат с целью ее использования совместно с современными методами позиционирования. Личный вклад автора составил 80%, результаты автора содержатся в 2 статьях (номера 4 и 13 из списка на стр. 11), по полученным результатам сделано 2 доклада на международных конференциях. Получено свидетельство о регистрации базы данных «База данных оптических наблюдений Луны» (RU 2019620426 от 18.03.2019, авторы: Нефедьев Ю. А., Андреев А. О. и др.)

Построена селеноцентрическая многопараметрическая модель для определения и анализа координат точек на лунной поверхности, наблюдаемых различными методами, в том числе навигационным оборудованием, установленным на космических аппаратах. Личный вклад автора составил 90%, результаты автора содержатся в 1 статье (номер 3 из списка на стр. 11), по полученным результатам сделано 2 доклада на международных конференциях. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа построения имитационной модели отдельных элементов ЛНСС в части картографического обеспечения» (RU 2020619719 от 21.08.2020, авторы: Нефедьев Ю. А., Андреев А. О. и др.)

Проведены анализ точности определения координат объектов на лунной поверхности и сравнение с альтиметрическими данными космических миссий. Личный вклад автора составил 90%, результаты автора содержатся в 1 статье (номер 3 из списка на стр. 11), по полученным результатам сделано 2 доклада на международных конференциях.

Разработан синтетический метод для исследования параметров макрофигуры небесных тел и выполнено моделирование фрактальных карт лунной поверхности. Личный вклад автора составил 80%, результаты автора содержатся в 3 статьях (номера 2, 5, 12 из списка на стр. 11), по полученным результатам сделано 3 доклада на международных конференциях. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Комплекс трансформации картографических проекций в цифровую форму» (RU 2021614328 от 23.03.2021, авторы: Нефедьев Ю. А., Андреев А. О. и др.)

Выполнен корреляционный анализ полученных в работе данных с селенофизическими характеристиками с целью определения достоверности результатов. Личный вклад автора составил 75%.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации представлены в 13 печатных изданиях, из которых 1 монография и 12 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия:

Монографии:

Демина Н.Ю., **Андреев А.О.**, Нефедьев Ю.А., Боровских В.С. Создание системы обработки и анализа селенографических данных космических миссий и станций наземного базирования // Монография Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. – 108 с.

Статьи в журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ:

1. **Андреев А.О.**, Ахмедшина Е.Н., Нефедьев Л.А., Нефедьев Ю.А., Демина Н.Ю. Анализ цифровой модели физической поверхности Луны, построенной на основе спутниковых альтиметрических измерений. *Астрономический журнал*. 2021. т. 98. № 10. с. 431-440 (пятилетний импакт-фактор РИНЦ 2021: 1.369) // Переводная версия: **Andreev A.O.**, Akhmedshina E. N., Nefediev L. A., Nefedyev Y. A., Demina N. Y. The Physical Surface of the Moon: A Digital Model Based on Satellite

Altimetry. Astronomy Reports. 2021. vol. 65. is. 5. p. 435-444 (impact-factor WoS: 1.172).

2. **Андреев А.О.**, Нефедьев Ю. А., Демина Н.Ю., Петрова Н.К., Загидуллин А.А. Разработка методов навигационной привязки окололунных космических аппаратов к селеноцентрической динамической системе координат. *Астрономический журнал*. 2020. т. 97. №. 9. с. 765-775 (пятилетний импакт-фактор РИНЦ 2021: 1.369) // Переводная версия: **Andreev A.O.**, Nefedyev Y.A., Demina N.Y., Nefediev L.A., Petrova N.K., Zagidullin A.A. Development of methods for navigational referencing of circumlunar spacecrafts to the selenocentric dynamic coordinate system. *Astronomy Reports*. 2020. vol. 64. is. 9. p. 795-803 (impact-factor WoS: 1.172).

3. Нефедьев Ю.А., **Андреев А.О.**, Петрова Н.К., Демина Н.Ю., Загидуллин А.А. Создание глобальной селеноцентрической опорной системы координат. *Астрономический журнал*. 2018. т. 95. №. 12. с. 915-919 (пятилетний импакт-фактор РИНЦ 2021: 1.369) // Переводная версия: Nefedyev Y. A., **Andreev A.O.**, Petrova N.K., Demina N.Y., Zagidullin A.A. Creation of a global selenocentric coordinate reference frame. *Astronomy Reports*. 2018. vol. 62. is. 12. p. 1016-1020 (impact-factor WoS: 1.172).

4. **Андреев А.О.**, Нефедьев Ю.А., Нефедьев Л.А., Ахмедшина Е.Н., Демина Н.Ю., Загидуллин А.А. Использование многопараметрического анализа и фрактальной геометрии для исследования структуры лунной поверхности. *Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки*. 2020. т. 162, кн. 2. с. 223-236 (пятилетний импакт-фактор РИНЦ 2021: 0.265) // Переводная версия: **Andreev A.O.**, Nefedyev Y.A., Nefed'ev L.A., Akhmedshina E.N., Demina N.Y., Zagidullin A.A. The use of multi-parameter analysis and fractal geometry for investigating the structure of the lunar surface. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*. 2020. vol. 162. is. 2. p. 223-236 (impact factor Scopus: 0.333).

5. **Andreev A.O.**, Korchagina E.P., Demina N.Y., Nefedyev Y.A. Construction of a System of Selenocentric Coordinates Based on the Results of the Lunar Space Missions “Apollo”, “Zond”, “Clementine”, “Kaguya”, “LRO”, and “GRAIL”. *Meteoritics & Planetary Science*. 2022. vol. 57. is. 1. p. 6326 (impact-factor WoS: 2.890).

6. Nefedyev Y., **Andreev A.**, Hudec R. Isodensity analysis of comets using the collection of digitized Engelhardt Astronomical Observatory

photographic plates. *Astronomische Nachrichten*. 2019. vol. 340. is. 7. p. 698-704 (impact-factor WoS: 0.676).

7. Чуркин К.О., **Андреев А.О.**, Нефедьев Ю.А., Петрова Н.К., Демина Н.Ю. Исследование современных звездных каталогов на основе фотоэлектрических покрытий звезд Луной. *Астрономический журнал*. 2018. т. 95. №. 12. с. 943-950 (пятилетний импакт-фактор РИНЦ 2021: 1.369) // Переводная версия: Churkin K. O., **Andreev A.O.**, Nefedyev Y.A., Petrova N.K., Demina N.Y. Studies of Modern Star Catalogs Based on Photoelectric Observations of Lunar Occultations of Stars. *Astronomy Reports*. 2018. vol. 62. is. 12. p. 1042-1049 (impact-factor WoS: 1.172).

8. Петрова Н.К., Нефедьев Ю.А., Загидуллин А.А., **Андреев А.О.** Использование аналитической теории физической либрации Луны для обнаружения свободных нутаций лунного ядра. *Астрономический журнал*. 2018. т. 95. №. 12. с. 920-925 (пятилетний импакт-фактор РИНЦ 2021: 1.369) // Переводная версия: N.K. Petrova, Nefedyev Y.A., Zagidullin A.A., **Andreev A.O.** Use of an analytical theory for the physical libration of the Moon to detect free nutation of the lunar core. *Astronomy Reports*. 2018. vol. 62. is. 12. p. 1021-1025 (impact-factor WoS: 1.172)

9. Petrova N., Zagidullin A., Nefedyev Y., Kosulin V., **Andreev A.** The analytical and numerical approaches to the theory of the Moon's librations: Modern analysis and results. *Advances in Space Research*. 2017. vol. 60. is. 10. p. 2303-2313 (impact-factor WoS: 2.152).

10. Nefedyev Y.A. , V.M. Bezmenov, Demin S.A., **Andreev A.O.**, Demina N.Y. Application of antijamming robust analysis method for selenocentric reference net building. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2016. vol. 19. is. 1. p. 102-106 (impact factor Scopus: 0.468).

11. **Andreev A.O.**, Demina N.Y. , Demin S.A., Nefedyev Y.A., Churkin K.O. The fractal method for analysis of macro models of the celestial bodies surface. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2016. vol. 19. is. 3. p. 271-277 (impact factor Scopus: 0.468).

12. Nefedyev Y.A., Valeev S.G., Mikeev R.R., **Andreev A.O.**, Varaksina N.Y. Analysis of data of "Clementine" and "KAGUYA" missions and "ULCN" and "KSC-1162" catalogues. *Advances in Space Research*. 2012. vol. 50. is. 11. p. 1564-1569 (impact-factor WoS: 2.152).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Полный объем диссертации состав-

ляет 159 страниц (приложения составляют 37 страниц) со 190 рисунками и 29 таблицами. Список литературы содержит 105 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность проведенного диссертационного исследования, формулируются его цель и основные задачи, описываются научная ценность и практическая значимость научной работы, приводятся аргументы, подтверждающие достоверность полученных в диссертации результатов, а также определяются основные положения, выносимые на защиту. Также в заключении приводятся основные публикации по теме диссертационного исследования, перечисляются всероссийские и международные конференции, на которых апробировались полученные в работе результаты. Кроме того, введение содержит информацию об использованных в диссертационном исследовании программных пакетах, разработанных автором совместно с коллегами и успешно прошедших регистрацию в Роспатенте, а также данные о полученных при подготовке научной работы грантах.

Первая глава посвящена анализу методов создания динамической системы координат. В **параграфе 1.1** речь идет об основных этапах развития методов, используемых для исследования поверхности Луны, – от получения 1-дюймовых фотопластинок с изображением рельефа до современных спутниковых съемок. Анализируются недостатки существующих гравиметрических моделей, и подчеркивается важность их развития для обеспечения достоверности и точности снимков, сделанных с борта космических аппаратов. В **параграфе 1.2** приводятся результаты анализа селеноцентрических систем координат. В частности, по результатам современных исследований отмечается основной недостаток спутниковых измерений [23, 24], а именно – отсутствие привязки наблюдений к небесной системе координат. В качестве решения данной проблемы автором предлагается расширение наземного опорного каталога за счет включения данных современных космических миссий [25, 26, 27]. В данном параграфе приводятся характеристики селеноцентрической динамической системы координат и математический аппарат для учета либрационных эффектов. В **параграфе 1.3** рассматривается метод построения динамической селеноцентрической системы [28], соответственно, дается описание регрессионного метода для приведения разнородных наблюдений в единую систему, отмечаются основные проблемы таких процедур.

Во **второй главе** обсуждается построение цифровой базы селенографических динамических опорных объектов. В **параграфе 2.1** выполнен анализ наблюдательных параметров современных спутниковых миссий, произ-

ведена оценка ошибок, которые присутствовали в наблюдениях лунных миссий «Apollo», «Clementine», «Lunar Reconnaissance Orbiter» (все – NASA), «Kaguya» (JAXA) и «Chandrayaan-1» (ISRO). В параграфе 2.2 описывается созданная в рамках диссертационного исследования цифровая база данных (ЦБД), включающая в себя значения селенографических прямоугольных координат опорных точек на лунной поверхности, полученных на основе разнородных спутниковых наблюдений и приведенных с помощью робастного моделирования в единую селеноцентрическую динамическую систему отсчета. Всего ЦБД содержит информацию о 279507 лунных объектах. Распределение объектов ЦБД по селенографическим широте и долготе в трехмерном виде показано на рис. 1.

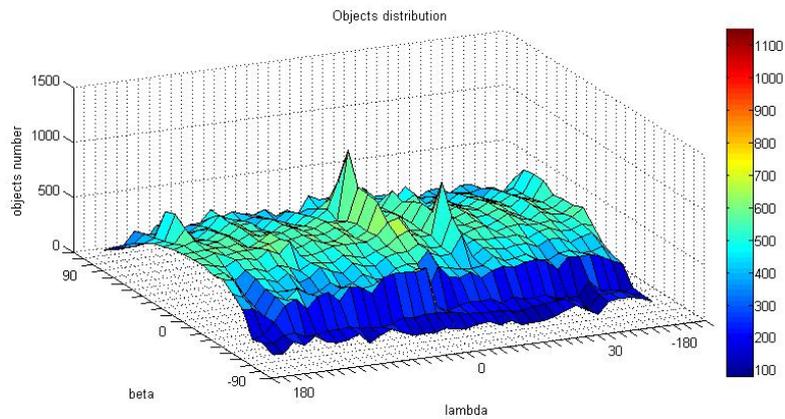


Рис. 1: Распределение объектов базы данных в виде 3D-модели.

В параграфе 2.3 представлены результаты исследования созданной в работе цифровой базы данных. Возможность считать использованную в ЦБД систему координат динамической оценена на основе близости расположения центр отсчета (ЦО) данной системы к центру масс (ЦМ) Луны. Суть исследования заключалась в представлении высот лунных объектов, включенных в ЦБД, в виде ряда сферических функций:

$$h(\lambda, \beta) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm} \cos \varphi + \varepsilon, \quad (1)$$

где λ, β – долгота и широта объекта ЦБД; $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ – нормированные гармонические коэффициенты (ГК); \bar{P}_{nm} – нормированные присоединенные функции Лежандра; ε – случайные погрешности регрессии.

Отклонение ЦО относительно ЦМ главным образом определяется ГК 1-го порядка:

$$\Delta\xi = \sqrt{3\bar{C}_{11}}, \Delta\eta = \sqrt{3\bar{S}_{11}}, \Delta\zeta = \sqrt{3\bar{C}_{10}}. \quad (2)$$

В уравнениях (2) $\Delta\xi$, $\Delta\eta$, $\Delta\zeta$ представляют собой смещения ЦО относительно ЦМ Луны вдоль осей инерции, а \bar{C}_{11} , \bar{S}_{11} , \bar{C}_{10} – гармонические коэффициенты 1-го порядка в разложении (1).

С помощью описанной выше методики были рассчитаны положения ЦО относительно ЦМ для ЦБД и систем, в которых получены альтиметрические данные миссий Kaguya и Clementine, а также построены каталоги ULCN 2005 и Киев-4900. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1: Координаты ЦО систем ЦБД, Clementine, Kaguya, ULCN 2005 и Киев-4900 относительно ЦМЛ, км

	ЦБД	Clementine	Kaguya	ULCN 2005	Киев-4900
$\Delta\xi$	1,59	1,82	1,78	1,71	-0,14
$\Delta\eta$	0,79	0,74	0,76	0,73	-0,47
$\Delta\zeta$	-0,43	0,64	-0,25	-0,26	-0,17

Было проведено сравнение ориентации ЦБД (в уравнении 3 обозначена верхним индексом DDB) с перечисленными системами (в уравнениях 4 и 5 обозначены нижним индексом Cat). Для этого использовался следующий метод. Рассмотрим выражение:

$$\begin{pmatrix} A & B & C \\ E & F & G \\ M & N & L \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \xi_i^{DDB} \\ \eta_i^{DDB} \\ \zeta_i^{DDB} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D \\ H \\ K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\xi_i \\ \Delta\eta_i \\ \Delta\zeta_i \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где A, F, L – масштабные коэффициенты, определяющие различия двух координатных систем по осям ξ, η, ζ ;

B, C, E, G, M, N – используются для вычисления углов ориентации (π, ν, μ) сравниваемых координатных систем между осями ξ, η, ζ ;

D, H, K – свободные члены, характеризующие различие положений начал координат сравниваемых систем.

$$\xi_{Cat} = (1 - A)\xi_{DDB}, \quad \eta_{Cat} = (1 - F)\eta_{DDB}, \quad \zeta_{Cat} = (1 - L)\zeta_{DDB}, \quad (4)$$

$$\Delta\xi_i = \xi_i^{Cat} - \xi_i^{DDB}, \quad \Delta\eta_i = \eta_i^{Cat} - \eta_i^{DDB}, \quad \Delta\zeta_i = \zeta_i^{Cat} - \zeta_i^{DDB}, \quad (5)$$

где $\xi_i^{DDB}, \eta_i^{DDB}, \zeta_i^{DDB}$ – координаты точек, входящих и в ЦБД, и в каталоги; $\xi_i^{Cat}, \eta_i^{Cat}, \zeta_i^{Cat}$ – координаты кратеров, входящих в разные каталоги и, соответственно, полученные в разных СК.

$$\pi = \frac{N - G}{2}, \quad \nu = \frac{C - M}{2}, \quad \mu = \frac{E - B}{2}. \quad (6)$$

Согласно полученным данным, можно сделать основной вывод, что в пределах точности ЦБД наиболее близко соответствует по ориентации к селеноцентрической динамической системе координат.

В **третьей главе** рассматриваются этапы построения селеноцентрической опорной системы координат, которая в программном виде представлена как селеноцентрическая многопараметрическая модель (СММ). В частности, в **параграфе 3.1** описываются общая структура модели (СММ состоит из отдельных модулей, блок-схема изображена на рис. 2), процесс получения выборки данных (предусмотрено осуществление выборки объектов, попадающих в сферический или кубический объемы), а также приводится подробное описание работы модуля, отвечающего за получение данных из альтиметрических цифровых карт.

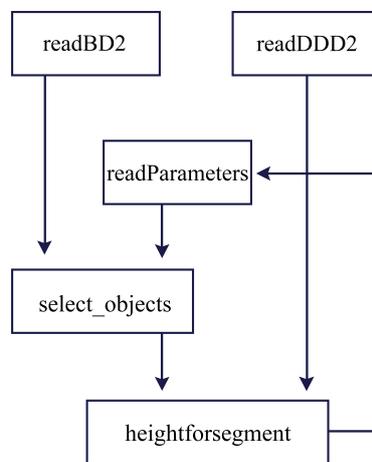


Рис. 2: Блок-схема функциональных модулей СММ

В **параграфе 3.2** с использованием разработанной в диссертационном исследовании цифровой базы данных решается имитационная задача. Суть последней заключается в определении высоты некоторой выбранной пользователем точки (отождествляемой точки – ОТ; на рис. 3 – красная точка) лунной поверхности на основании известных координат объектов ЦБД (на рис. 3 – синие точки), находящихся в окрестности ОТ.

Для учета различной удаленности опорных объектов от ОТ используются весовые коэффициенты: близким к ОТ опорным объектам присваиваются большие весовые коэффициенты, а более удаленным – меньшие [20]. Основное уравнение используемого подхода – следующее:

$$\hat{H}(O_0) = \sum_{i=1}^N P_i H(O_i), \quad (7)$$

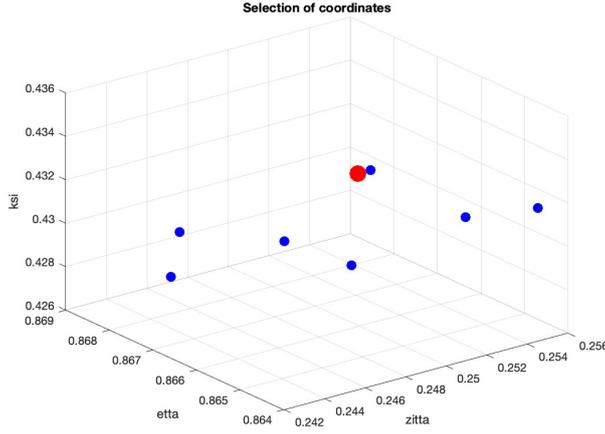


Рис. 3: Объекты ЦБД, находящиеся в окрестности заданной точки

где $\hat{H}(O_0)$ представляет собой отождествляемый (неизвестный) высотный компонент для объекта O_0 ; P_i – задаваемые значения веса для каждого опорного объекта, который будет использоваться в исследованиях. Величина веса изменяется в зависимости от расстояния до ОТ; $H(O_i)$ – известное значение высотного компонента для объекта O_i , представленное в созданной ЦБД; N – число опорных объектов найденных в окрестности ОТ, задействованных в интерполяционных процедурах.

Величины весовых коэффициентов вычисляются согласно следующему выражению:

$$P_i = \frac{D_{i0}^{-k}}{\sum_{i=1}^N D_{i0}^{-k}}, \quad (8)$$

где D_{i0} представляет собой расстояние между i -ым опорным объектом O_i и отождествляемым объектом O_0 .

В параграфе 3.3 представлены результаты тестирования созданной СММ. Определялась разность высот точек, представленных в ЦБД, (H_{BD}) и высот на электронной карте (H_{Map}) для различных областей лунной поверхности: $\Delta = H_{BD} - H_{Map}$. Как следует из анализа рис. 1, в приполярных областях (ППО) концентрация объектов ЦБД ниже, чем в более умеренных широтах, соответственно, точность определения координат методом WAP уменьшается. По этой причине средняя абсолютная разница ($\bar{\Delta}$) была рассчитана для восьми октантов с учетом полярных областей и без их учета. Также, согласно рис. 1, есть несколько областей с повышенной концентрацией кратеров (ПКК), для которых, как и ожидалось, точность определения координат оказалась самой высокой среди всех рассматриваемых участков поверхности Луны. Результаты проведенного сравнительного анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2: Результаты тестирования точности СММ

	Октанты		Области с ПКК
	С учетом ППО	Без учета ППО	
Среднее $\bar{\Delta}$, км	1,4813	1,2485	1,0340

В **четвертой главе** рассматривается исследование поверхности Луны с использованием синтетического метода. В **параграфе 4.1** описывается создание цифровых спутниковых карт поверхности Луны. Для этого были сформированы и проанализированы ряды сферических функций, полученные в результате разложения альтиметрических компонент [29]. Анализ производился с помощью разработанного в рамках диссертационного исследования ПО «Программа построения имитационной модели отдельных элементов ЛНСС в части картографического обеспечения» (получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020619719 от 21 августа 2020 г.). Как результат, была построена глобальная 3D-модель поверхности Луны.

В **параграфе 4.2** приведено описание синтетического метода, основанного на многопараметрическом анализе разложения высотных данных в ряды сферических функций и определении фрактальных размерностей участков лунной поверхности и параметров самоподобия [30]. С этой целью структура исследуемых моделей представлялась с помощью частично упорядоченного множества $S(K^2)[K^2 - \text{количество элементов } s_{nm} \text{ в } S(K^2)]$, элементы которого отличаются по характерному лишь для рассматриваемого множества параметру $P_\eta(s)$, в качестве которого выступил цвет пиксела на цифровой селенографической карте. Фрактальная размерность F_η для рассматриваемого множества $S(K^2)$ по характеристическому параметру $P_\eta(s)$ определяется согласно следующему выражению:

$$F_\eta = \sum_{\theta} \frac{\log Z_\eta(k_{\theta+1}^2) - \log Z_\eta(k_\theta^2)}{|\log T_\eta(k_{\theta+1}^2)| - |\log T_\eta(k_\theta^2)|} \times \frac{\delta_{\theta+1} - \delta_\theta}{K - 1}, \quad (9)$$

Уравнение (9) представляет собой тангенс угла наклона зависимости $\log Z_\eta(k^2)$ от $\log t_{k^2}$, в нем $\log Z_\eta(k^2)$ обозначено количество несоприкасающихся граней кубических структур, которыми покрыто подмножество $L^{(n)}(k^2)$.

Тогда параметром самоподобия R_η будет являться следующее отношение

$$R_\eta = \frac{F_\eta^0}{F_\eta}, \quad (10)$$

при условии, что F_η^0 – фрактальная размерность самоподобного множества

$$F_\eta^0 = \frac{\log Z_\eta(K^2) - \log Z_\eta(1)}{|\log T_\eta(K^2)| - |\log T_\eta(1)|}. \quad (11)$$

В диссертационном исследовании с помощью вышеописанного метода исследовалась топографическая модель, созданная по результатам измерений спутника «Kaguya» (JAXA) [25]. При этом в качестве характеристических параметров $P_\eta(s)$ выступили цвета пикселей – красный ($\eta \equiv R$), синий ($\eta \equiv B$), зеленый ($\eta \equiv G$) – соответствующие альтиметрическим данным областей. В результате цифровая структура поверхности описывается фрактальными размерностями: F_R, F_G, F_B . С использованием этих величин в качестве вершин треугольников, вычислены их площади (S_{RGB}), с высокой точностью описывающие вариации высотных составляющих.

Площадь треугольника, образованного F_R, F_G и F_B , или цветовой фрактальный параметр (ЦФП) определяется как

$$S_{RGB} = \begin{pmatrix} x_R & F_R & 1 \\ x_G & F_G & 1 \\ x_B & F_B & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

В параграфе 4.3 представлены результаты исследования структуры поверхности Луны с помощью синтетического метода анализа [31]. В частности, были построены и исследованы 162 диаграммы распределения площади ЦФП по селенографическим долготам и широтам. Выявлены участки поверхности, идентичные по структуре. Для выборки из более чем 250 участков поверхности были установлены наибольшие значения показателя самоподобия. Физический смысл параметра самоподобия заключается в том, что участки с высокими показателями в наибольшей степени соотносятся с фрактальной логарифмической зависимостью. Что касается участков поверхности, характеризующихся близкими значениями ЦФП, то они подобны структурно. Участки же, у которых и ЦФП одинаковые, и показатели самоподобия максимальны, имеют свойства самоподобия и остаются неизменными в случае масштабирования. С большой долей уверенности можно утверждать, что они имеют либо общее, либо аналогичное эволюционное происхождение. Ниже приведен пример зависимости ЦФП от селенографической долготы при зафиксированной широте (рис. 4).

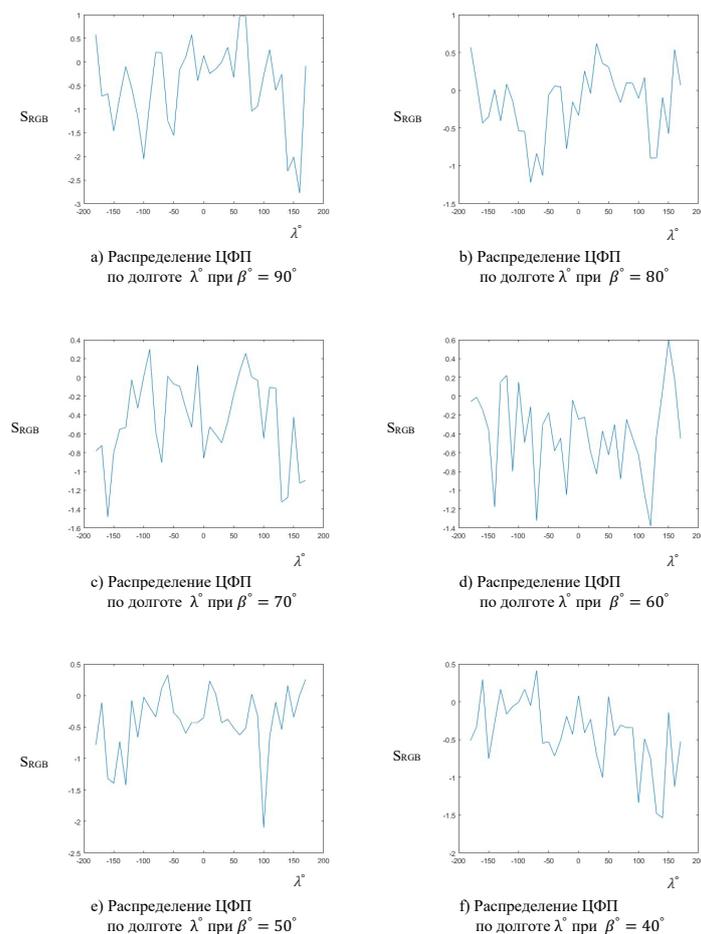


Рис. 4: Примеры графиков зависимости ЦФП от селенографической широты, ось S_{RGB} нормирована (нормировочный коэффициент = 0,01)

При исследовании распределения площади ЦФП по участкам поверхности Луны установлено, что их структуры в значительной степени зависят от перепадов высот. Следует отметить, что это – следствие того, что ЦФП вычисляется в соответствии с альтиметрической информацией, заложенной в цветовых параметрах пикселей, описывающих определенный участок поверхности. По этой причине наименьшие значения ЦФП наблюдаются на участках, характеризующихся минимальными вариациями рельефа. Комплексная структура лунного рельефа, по всей видимости, связана с неодинаковыми условиями, при которых различные области поверхности формировались. Несмотря на это, можно выявить некоторые участки, структуры которых являются подобными.

В таблице 3 содержатся результаты выделения самоподобных участков поверхности Луны. Необходимо учитывать, что ЦФП отображает подобие структур для участков поверхности, тогда как наибольшее значение параметра самоподобия указывает на их фрактальное самоподобие. Следовательно, участки, имеющие близкие значения ЦФП и близкие к единице значения па-

раметра саомopodobия, с высокой степенью вероятности формировались при аналогичных условиях и в результате идентичных эволюционных процессов.

Таблица 3: Самоподобные участки на лунной поверхности

S_{RGB}	Участок поверхности
-10	Участок в окрестности кратера Метон (73°34' с.ш. 19°38' в.д.)
	Участок в окрестности кратера Платон (51°37' с.ш. 9°23' з.д.)
	Участок между кратером Аристотель (50°14' с.ш. 17°19' в.д.) и <i>Lacus Mortis</i> (45°00' с.ш. 27°12' в.д.)
	Участок в окрестности кратера Шайн (32.6°с.ш. 172.5°в.д.)
	Участок между кратерами Аль Бируни (18°04' с.ш. 92°37' в.д.) и Эдисон (25.0° с.ш. 99.1° в.д.)
	Участок к северу от кратера Ингирами (47°29' ю.ш. 68°57' з.д.)
	Участок в окрестности кратера Пуанкаре (56°52' ю.ш. 163°59' в.д.)
	Участок к северу от кратера Крамера (53.6°с.ш. 127.6°з.д.)
	Участок в окрестности кратера Де ля Рю (59°01' с.ш. 52°50' в.д.)
	Участок в окрестности кратера Лютер (33°12' с.ш. 24°09' в.д.)
	Участок в окрестности кратера Шуберт (2.8 °с.ш. 81.0°в.д.)
	Участок между кратерами Венделин (16°28' ю.ш. 61°33' в.д.) и Каптейн (10°47' ю.ш. 70°35' в.д.)
	Участок в окрестности кратера Ридберг (46°26' ю.ш. 96°26' з.д.)
	Участок в окрестности кратера Де Руа (55°14' ю.ш. 98°59' з.д.)
	Участок в окрестности кратера Чемберлин (58.9°с.ш. 95.7 °в.д.)
Участок в окрестности кратера Планк (57°23' ю.ш. 135°05' в.д.)	
-25	Участок в окрестности кратера Нансен (81°10' с. ш. 95°23' в. д.)
	Участок в окрестности кратера Сегерс (47.1°с. ш. 127.7°в. д.)
	Участок в окрестности кратера Нильсен (31°48' с. ш. 51°46' з. д.)
	Участок в окрестности кратера Лауритсен (27°32' ю. ш. 96°19' в. д.)
-30	Участок к северу от кратера Петерман (74°21' с. ш. 67°53' в. д.)
	Участок в окрестности кратера Маундер (14°31' ю. ш. 93°53' з. д.)

В соответствии с таблицей 3, для большинства участков лунной поверхности значение ЦФП составляет -10, что указывает на сравнительно небольшие перепады высот на них. Участки с максимальными значениями ЦФП находятся в северном полушарии на обратной стороне (ОС) Луны. Для участков, находящихся на видимой стороне (ВС), характерны значения ЦФП < 0; при этом значения ЦФП возрастают по мере движения к южному полюсу. Таким образом можно установить, что в процессе формирования поверхности Луны в северных областях ОС и южных областях ВС преимущественно происходило вытеснение внутренних масс Луны. Одним из вариантов подоб-

ного воздействия является падение массивных ударников высокой плотности. Другие же участки поверхности бомбардировались телами с более пористой структурой.

Распределение средних значений параметра самоподобия для участков поверхности приведено на рис. 5.

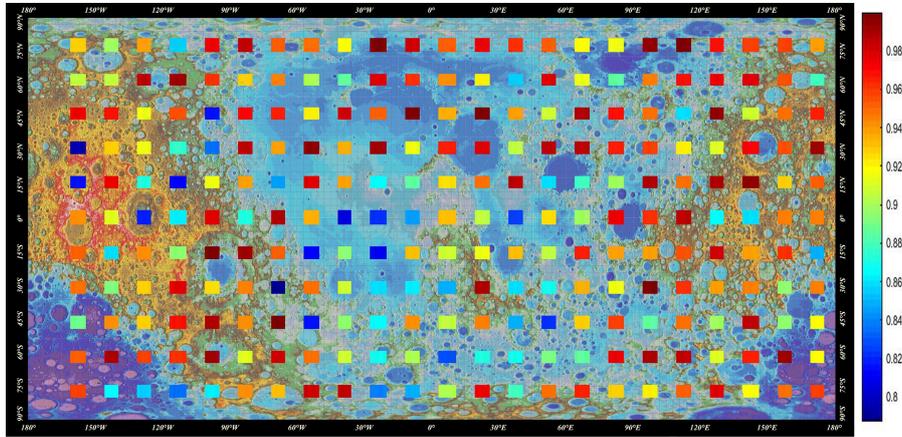


Рис. 5: Распределение средних значений параметра самоподобия для участков лунной поверхности

На рис. 6 приведено распределение ЦФП для участков поверхности.

Из исследования распределения параметра самоподобия по участкам поверхности Луны установлен диапазон его изменения – $[0.8; 1]$, что свидетельствует о существенных вариациях структуры от участка к участку.

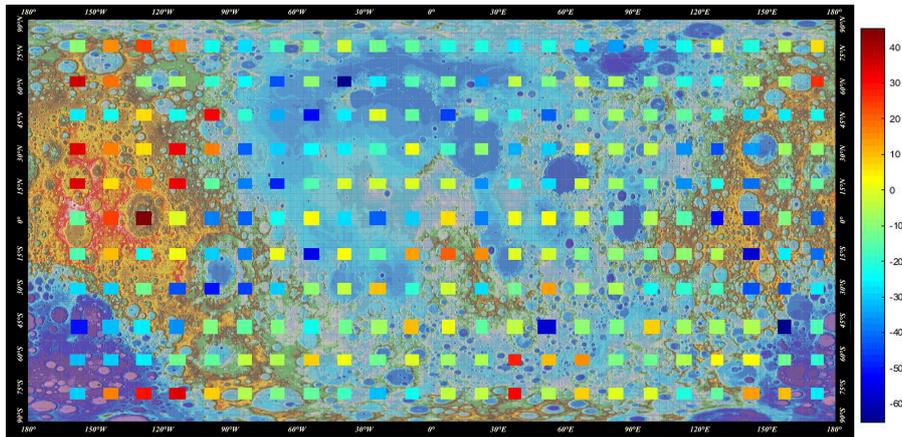


Рис. 6: Распределение ЦФП для участков лунной поверхности

В параграфе 4.4 приведены результаты корреляционного анализа параметров фрактального самоподобия с физико-химическими данными, полученными из независимых источников. Были использованы результаты распределения химических элементов и соединений по лунной поверхности [32] и разработан метод определения их корреляционной связи с фрактальными параметрами.

В результате, было получено, что наибольшее значение коэффициент корреляции приобретает для селенографических широт от 0 до 15 градусов, в целом остается достаточно высоким на интервале широт от -18° до $+30^\circ$, что косвенно подтверждает взаимосвязь распределения температурного градиента на лунной поверхности и образования химических элементов.

Основные результаты работы. Все задачи диссертационного исследования полностью решены, а результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Получены конкретные результаты:

1. Были проанализированы результаты современных спутниковых оптических наблюдений Луны, выполненных космическими миссиями NASA “Apollo”, “Clementine”, “Kaguya” и “LRO”. В результате проведенного анализа были отобраны соответствующие данные для включения в ЦБД. Был рассмотрен вопрос о влиянии на результаты физической либрации Луны. Данное исследование было включено в выдающиеся результаты АН РФ по секции «Астрометрия и небесная механика» в 2021 г., а в феврале 2022 г. опубликован дайджест «Ruminating on the wobble of the Moon» на сайте Nature <https://www.nature.com/articles/d42473-021-00125-3>.

2. Был разработан метод построения динамической селеноцентрической системы с использованием регрессионного моделирования и многопараметрического анализа. В данный метод включены математические алгоритмы по учету физической либрации Луны, возможность трансформации селенографических координат из одной системы в другую, программы для регрессионного моделирования, которые включают сам программный пакет регрессионного моделирования, программный комплекс гармонического многофакторного анализа, программный пакет многофакторного оценивания корреляционных связей, приведение разнородных наблюдений в единую систему. Метод предполагает выполнение редукции измерений как для многопараметрических, так и для динамических регрессионных моделей.

3. Создана единая система селеноцентрических координат в виде цифровой базы данных (ЦБД) оптических наблюдений Луны для ее использования совместно с актуальными методами позиционирования. 279507 координатных положений точек лунной поверхности, включенных в ЦБД, были приведены к единой динамической СК с помощью регрессионного моделирования. Было проведено исследование ЦБД, сделан вывод о том, что ЦБД является динамической селеноцентрической СК.

4. Построена селеноцентрическая опорная система координат, которая в программном виде представлена как селеноцентрическая многопараметрическая модель (СММ), включающая цифровую карту Луны, цифровую базу

данных опорных точек на Луне в системе центра масс и осей инерции и программный комплекс для определения и анализа координат точек на лунной поверхности. СММ позволяет найти опорные объекты ЦБД, находящиеся в окрестности задаваемой точки лунной поверхности. Далее с использованием метода взвешенных расстояний на основе известных координат объектов из этой выборки выполняется привязка к ним задаваемой точки, т.е. определяется ее высота. Учет различной удаленности опорных объектов из выборки от искомой точки реализован с помощью введения весовых коэффициентов.

5. Проведен анализ точности определения координат избранной точки на лунной поверхности и выполнено сравнение полученных результатов с альтиметрическими данными космических миссий. Для этого высоты объектов из ЦБД были сопоставлены с данными альтиметрической карты, построенной по измерениям LRO. При этом лунная сфера была разделена на 8 октантов. Точность определения координат произвольно выбранной точки на поверхности Луны разработанным в диссертационном исследовании методом оценивалась на основе разности высот между ЦБД и электронной картой. Наиболее точный результат (0,4870 км) получен для октанта № 3, которому соответствует диапазоны долгот и широт $\lambda = [0^\circ, -90^\circ]$, $\beta = [0^\circ, -90^\circ]$. Как отмечалось выше, распределение опорных объектов по селенографическим широтам и долготам – неравномерное: в приполярных областях концентрация опорных объектов от 2 до 10 раз ниже, это обстоятельство было учтено при сравнительном анализе результатов тестирования работы СММ. Исключение из анализа данных областей позволяет сократить разницу между высотами из ЦБД и электронной альтиметрической картой примерно на 16% (усредненные разности между высотами ЦБД и электронной картой по 8 октантам с учетом полярных областей и без них равны 1,4813 и 1,2485 км соответственно). Были также исследованы 6 областей, в которых наблюдается повышенная концентрация опорных объектов. Так как для этих областей характерно большее количество опорных кратеров, вероятность того, что попадающие в выборку объекты находятся ближе к произвольно выбранной точке, выше, и, следовательно, разность высот ЦБД и электронной карты должна быть минимальной. Это предположение оказалось верным – в областях с повышенной концентрацией кратеров разность высот оказалась наименьшей (1,0340 км).

6. Разработан синтетический метод для исследования параметров макрофигуры небесных тел и выполнено моделирование фрактальных карт лунной поверхности. В качестве характеристических параметров рассматривались цвета пикселей на цифровой топографической карте, составленной на основании измерений КА “Kaguya”. Структура поверхности таким образом описывалась тремя фрактальными размерностями (F_R , F_G , F_B), и вычисля-

лись площади треугольников, образованных ими, – цветовые фрактальные параметры (ЦФП). По результатам анализа 162 распределений ЦФП найдены участки поверхности, являющиеся структурно подобными. Вероятно, они были образованы в результате идентичных эволюционных процессов. Построены карты распределения средних значений параметра самоподобия и ЦФП. По результатам их анализа найдены самоподобные области на поверхности Луны.

7. Был создан метод для оценки корреляционной связи самоподобных областей с селено-химической картой Луны. Суть метода заключалась в создании корреляционной матрицы, в которую входили параметры, описывающие фрактальные свойства лунной поверхности и ее физико-химические параметры. По результатам исследования рассмотренных диаграмм установлена зависимость от температурных условий: максимум температур несколько смещен в северное полушарие Луны и наблюдается в широтной области $[0^\circ, 7^\circ]$, соответственно, там же наблюдается и наибольший перепад температур, что должно способствовать изменениям как в составе, так и в структуре поверхности, а коэффициент корреляции, вычисленный в диссертационной работе, принимает максимальные значения на интервале широт $[0^\circ, 15^\circ]$.

8. В итоге в результате выполнения работы построена селеноцентрическая опорная система координат на основе методов космической астрометрии и небесной механики. Созданная модель включает ЦБД, цифровые карты Луны, программный комплекс и позволяет проводить имитационные эксперименты по определению координатных положений искомых точек на Луне как с борта КА, так и на поверхности Луны. Важным элементом селеноцентрической опорной системы является возможность использования для позиционирования квантово-оптических систем, в частности, световых лазерных маяков, что может повысить точность привязки к лунной системе координат до нескольких метров, а при использовании лазерного интерферометра – достичь сантиметровых величин. Все компоненты, относящиеся к селеноцентрической опорной системе координат, были исследованы синтетическим методом; подтверждены их достоверность и соответствие динамической системе координат.

Список литературы

- [1] Lunar laser ranging: a continuing legacy of the Apollo program / J. O. Dickey, P. L. Bender, J. E. Faller, X. X. Newhall, R. L. Ricklefs, J. G. Ries, P. J. Shelus et al. // *Science*. — 1994. — Vol. 265, no. 5171. — Pp. 482–490.
- [2] The Clementine mission to the Moon: Scientific overview / S. Nozette, P. Rustan, L. Pleasance, J. Kordas, I. Lewis, H. Park, R. Priest et al. // *Science*. — 1994. — Vol. 266, no. 5192. — Pp. 1835–1839.
- [3] *Binder, A. B.* Lunar prospector: overview / A. B. Binder // *Science*. — 1998. — Vol. 281, no. 5382. — Pp. 1475–1476.
- [4] *Vondrak, R.* Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO): Observations for lunar exploration and science / R. Vondrak, J. Keller, G. Chin, J. Garvin // *Space Science Reviews*. — 2010. — Vol. 150, no. 1-4. — Pp. 7–22.
- [5] Gravity field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) mission / M. T. Zuber, D. E. Smith, M. M. Watkins, S. W. Asmar, A. S. Konopliv, F. G. Lemoine, H. J. Melosh et al. // *Science*. — 2013. — Vol. 339, no. 6120. — Pp. 668–671.
- [6] SMART-1 mission to the Moon: status, first results and goals / B. Foing, G. D. Racca, A. Marini, E. Evrard, L. Stagnaro, M. Almeida, D. Koschny et al. // *Advances in Space Research*. — 2006. — Vol. 37, no. 1. — Pp. 6–13.
- [7] *Kato, M.* The Kaguya mission overview / M. Kato, S. Sasaki, Y. Takizawa // *Space Science Reviews*. — 2010. — Vol. 154, no. 1. — Pp. 3–19.
- [8] The Chang'e 3 mission overview / C. Li, J. Liu, X. Ren, W. Zuo, X. Tan, W. Wen, H. Li et al. // *Space Science Reviews*. — 2015. — Vol. 190, no. 1. — Pp. 85–101.
- [9] Overview of the Chang'e-4 mission: Opening the frontier of scientific exploration of the lunar far side / C. Li, W. Zuo, W. Wen, X. Zeng, X. Gao, Y. Liu, Q. Fu et al. // *Space Science Reviews*. — 2021. — Vol. 217, no. 2. — Pp. 1–32.
- [10] Geology and scientific significance of the Rümker region in northern Oceanus Procellarum: China's Chang'e-5 landing region / Y. Qian, L. Xiao, S. Zhao, J. Zhao, J. Huang, J. Flahaut, M. Martinot et al. // *Journal of Geophysical Research: Planets*. — 2018. — Vol. 123, no. 6. — Pp. 1407–1430.
- [11] *Goswami, J. N.* Chandrayaan-1 mission to the Moon / J. N. Goswami, M. Annadurai // *Acta Astronautica*. — 2008. — Vol. 63, no. 11-12. — Pp. 1215–1220.
- [12] *Mylswamy, A.* Chandrayaan-2: India's First Soft-landing Mission to Moon / A. Mylswamy, A. Krishnan, T. Alex, G. Rama Murali // *39th COSPAR Scientific Assembly*. — 2012. — Vol. 39. — P. 1311.
- [13] *Иванов, М.* Кратер Богуславский на Луне: выбор места посадки для спускаемого аппарата миссии «ЛУНА-ГЛОБ» / М. Иванов, М. Маров, А. Базилевский, Ю. Костицын // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. — 2017. — № 2. — С. 44–51.

- [14] *Bagrov, A. V.* Single-satellite global positioning system / A. V. Bagrov, V. A. Leonov, A. S. Mitkin, A. F. Nasyrov, A. D. Ponomarenko, K. M. Pichkhadze, V. K. Sysoev // *Acta Astronautica*. — 2015. — Vol. 117. — Pp. 332–337.
- [15] *Pugacheva, S. G.* The proposed landing site for the luna-25 mission in the south polar region of the moon // The Eleventh Moscow Solar System Symposium 11M-S3. — 2020. — Pp. 232–232.
- [16] Landing site selection for luna-glob mission in crater boguslawsky / M. A. Ivanov, H. Hiesinger, A. M. Abdrakhimov, A. T. Basilevsky, J. W. Head, J. H. Pasckert, K. Bauch et al. // *Planetary and Space Science*. — 2015. — Vol. 117. — Pp. 45–63.
- [17] Initial observations from the lunar orbiter laser altimeter (LOLA) / D. E. Smith, M. T. Zuber, G. A. Neumann, F. G. Lemoine, E. Mazarico, M. H. Torrence, J. F. McGarry et al. // *Geophysical Research Letters*. — 2010. — Vol. 37, no. 18.
- [18] *Rizvanov, N.* Research on selenodesy and dynamics of the Moon in Kazan / N. Rizvanov, Y. A. Nefed'ev, M. Kibardina // *Solar System Research*. — 2007. — Vol. 41, no. 2. — Pp. 140–149.
- [19] *Кислюк, В. С.* Геометрические и динамические характеристики Луны / В. С. Кислюк. — Наук. думка, 1988.
- [20] *Andreev, A. O.* Development of methods for navigational referencing of circumlunar spacecrafts to the selenocentric dynamic coordinate system / A. O. Andreev, Y. A. Nefedyev, N. Y. Demina, L. A. Nefediev, N. K. Petrova, A. A. Zagidullin // *Astronomy Reports*. — 2020. — Vol. 64, no. 9. — Pp. 795–803.
- [21] *Shirenin, A. M.* Development of a high-precision selenodetic coordinate system for the physical surface of the Moon based on LED beacons on its surface / A. M. Shirenin, E. M. Mazurova, A. V. Bagrov // *Cosmic Research*. — 2016. — Vol. 54, no. 6. — Pp. 452–457.
- [22] *Чуйкова, Н.* Геометрическая фигура Луны, представленная в виде разложения по сферическим и выборочным функциям / Н. Чуйкова // *Астрономический журнал*. — 1975. — Т. 52, № 6. — С. 1279–1292.
- [23] The JPL lunar gravity field to spherical harmonic degree 660 from the GRAIL Primary Mission / A. S. Konopliv, R. S. Park, D.-N. Yuan, S. W. Asmar, M. M. Watkins, J. G. Williams, E. Fahnestock et al. // *Journal of Geophysical Research: Planets*. — 2013. — Vol. 118, no. 7. — Pp. 1415–1434.
- [24] Lunar interior properties from the GRAIL mission / J. G. Williams, A. S. Konopliv, D. H. Boggs, R. S. Park, D.-N. Yuan, F. G. Lemoine, S. Goossens et al. // *Journal of Geophysical Research: Planets*. — 2014. — Vol. 119, no. 7. — Pp. 1546–1578.
- [25] *Araki, H.* Observation of the lunar topography by the laser altimeter LALT on board Japanese lunar explorer SELENE / H. Araki, S. Tazawa, H. Noda, T. Tsubokawa, N. Kawano, S. Sasaki // *Advances in Space Research*. — 2008. — Vol. 42, no. 2. — Pp. 317–322.
- [26] Lunar Reconnaissance Orbiter overview: The instrument suite and mission / G. Chin, S. Brylow, M. Foote, J. Garvin, J. Kasper, J. Keller, M. Litvak et al. // *Space Science Reviews*. — 2007. — Vol. 129, no. 4. — Pp. 391–419.

- [27] *Lemoine, F. G.* Results from the Clementine lunar geodesy investigation / F. G. Lemoine, D. E. Smith, D. D. Rowlands, M. T. Zuber, G. Neumann // *Astrodynamics 1995*. — 1996. — Pp. 201–223.
- [28] *Nefedyev, Y. A.* Creation of a global selenocentric coordinate reference frame / Y. A. Nefedyev, A. Andreev, N. Petrova, N. Y. Demina, A. Zagidullin // *Astronomy Reports*. — 2018. — Vol. 62, no. 12. — Pp. 1016–1020.
- [29] *Nefedyev, Y.* Analysis of data of “Clementine” and “Kaguya” missions and “ULCN” and “KSC-1162” catalogues / Y. Nefedyev, S. Valeev, R. Mikeev, A. Andreev, N. Varaksina // *Advances in space research*. — 2012. — Vol. 50, no. 11. — Pp. 1564–1569.
- [30] *Linkevich, A. D.* Representation of Information in Dynamical Systems: Measures, Entropy and Fractals / A. D. Linkevich // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. — 1999. — Vol. 2, no. 4. — Pp. 93–104.
- [31] *Andreev, A.* The Physical Surface of the Moon: A Digital Model Based on Satellite Altimetry / A. Andreev, E. Akhmedshina, L. Nefediev, Y. A. Nefedyev, N. Y. Demina // *Astronomy Reports*. — 2021. — Vol. 65, no. 5. — Pp. 435–444.
- [32] The 1: 2,500,000-scale geologic map of the global Moon / J. Ji, D. Guo, J. Liu, S. Chen, Z. Ling, X. Ding, K. Han et al. // *Science Bulletin*. — 2022.