

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В.ЛОМОНОСОВА
Государственный астрономический институт
им. П.К. Штернберга

На правах рукописи
УДК 523.3

Вараксина Наталья Юрьевна



**СОЗДАНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ ОПОРНОЙ СЕТИ НА
ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ В ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ
КООРДИНАТ**

Специальность:

01.03.01- Астрометрия и небесная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

МОСКВА – 2013

Работа выполнена в Астрономической обсерватории им. В.П.Энгельгардта
Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Института физики, директор Астрономической
Обсерватории им. В.П.Энгельгардта Казанского
(Приволжского) Федерального университета

НЕФЕДЬЕВ
Юрий Анатольевич

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий отделом исследований
Луны и планет Государственного астрономического
института имени П.К.Штернберга
Московского государственного университета

ШЕВЧЕНКО
Владислав Владимирович

Кандидат технических наук, доцент кафедры географии
факультета картографии и геоинформатики
Московского государственного университета
геодезии и картографии (МИИГАиК)

НЫРЦОВ
Максим Валерьевич

Ведущая организация

Институт астрономии Российской Академии Наук (ИНАСАН)

Защита состоится 3 октября 2013 г. в 14⁰⁰ часов на заседании
Диссертационного совета Д.051.000.86 при Московском государственном
университете им. М.В.Ломоносова по адресу: 119992, Москва,
Университетский пр., д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского
государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: Москва,
Ломоносовский проспект, 27, Фундаментальная библиотека
Автореферат разослан 2 сентября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета
Д501.000.86, доктор физ.-мат. наук



Алексеев С.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.

Современные экспериментальные исследования внешних и внутренних характеристик Луны связаны с планами её освоения в ближайшем будущем. В течение последних двух десятилетий Луна является объектом всестороннего исследования, о чем свидетельствует большой ряд космических экспериментов, таких как лазерная локация Луны (ЛЛЛ) (1969–2012), космические миссии Лунар Проспектор (1998-1999) [12] и Клементина (1994) [17]. Серия космических программ, направленных на всестороннее изучение естественного спутника Земли, стартовала в начале нового тысячелетия. Необходимо отметить такие космические проекты, как миссии СМАРТ-1 (европейский спутник, 2003 -2006), Кагуя (японский спутник, 2007-2009) [15], Чанг-1 (китайский зонд, 2007-2009), Чанг-2 (китайский зонд, 2010) [13], Чандраан-1 (индийский спутник, 2008–2009), Чандраан-2 (индийский спутник, 2013) [12], ЛРО-ЛЛКРОСС (американские спутники, 2009-2012) [12]. Программа исследований включала создание селенографической картографической системы, исследование внутреннего строения Луны, изучение тонких эффектов физической либрации во вращательном движении нашего естественного спутника, использование межспутникового слежения с целью исследования гравитационного поля Луны. На основе космических миссий Американским космическим агентством НАСА создана карта Южного полюса Луны, которая в настоящее время является самой подробной по отображению физической поверхности Луны, но не имеющей достаточно определенной поверхности отсчета координат. Новые важные данные были получены аппаратом «Lunar Reconnaissance Orbiter» (LRO), вращающимся вокруг Луны по полярной орбите. Радиотелескоп Goldstone Solar System Radar, находящийся в Калифорнии, позволяет проводить высокоточное изучение поверхности кратеров. Лунные аппараты LRO и LCROSS были первым масштабным шагом НАСА в рамках новой лунной программы США «Созвездие» (Constellation). С помощью LRO ученые составили карту радиоактивности лунной поверхности и осуществили поиск источников водных ресурсов на Луне. В ближайших планах запуск космического аппарата «Чанъэ-3», а к 2020 году планируется высадка человека на Луну и, как итог, создание к 2030г. обитаемой лунной базы. Она будет использована для запуска пилотируемых

космических аппаратов к другим планетам, одной из первой из которых должен стать Марс.

Важными источниками информации о параметрах динамической фигуры Луны, несомненно, стали космические миссии Клементина и Лунар Проспектор. Вместе с тем японская миссия СЕЛЕНА (Кагуя) [14] также обеспечила высокоточное топографическое и гравитационное картирование всей лунной поверхности, включая ранее недоступные области обратной стороны и зоны лимба. Серия китайских спутников Чанг [13] и индийских Чандраан [12] позволили получить новые данные о геохимическом составе, коре, гравитационном поле, масконах, поверхностного и окололунного пространства. Российская программа исследования Луны запланирована на ближайшие 10 лет [18]. В 2014-2016 гг. включает две космические миссии - российскую «Луна-Глоб» и российско-индийскую «Луна-Ресурс». Программа предусматривает доставку с Луны на Землю воды и других летучих веществ, а также изучение полюсов Луны. Эта программа открывает широкие перспективы дальнейших исследований Луны. В рамках этой программы предполагается посадка на лунную поверхность луноходов нового поколения для сбора образцов пород из наиболее интересных лунных районов, сопровождаемая в дальнейшем их доставкой на землю возвратной ракетой. Запуск «Луна-Глоб» ознаменует собой «возвращение России на Луну» и даст возможность дальнейших ее исследований. Запланированное исследование нашего естественного спутника даст возможность определить количество водных запасов на Луне, что в свою очередь позволит планировать строительство обитаемых лунных баз с целью промышленного освоения Луны и откроет новую эру в изучении космоса [10, 16].

Для осуществления новых космических миссий и, особенно, для создания лунных обитаемых баз необходимо создание на Луне системы точного обеспечения координатно-временными данными. Это в полной мере относится к установлению взаимной ориентации и динамической и инерциальной систем координат, реализации динамических систем отсчета, отнесенных к центру ее масс, изучению динамики и кинематики небесных тел [5]. Также с целью прилунения посадочных модулей и эффективной навигации на лунной поверхности необходима точная теория вращения Луны, что в настоящее время является одной из самых актуальных задач непосредственно связанной с координатно - временным обеспечением.

Настоящая работа посвящена задаче определения селеноцентрической динамической системы координат на лунной поверхности. В настоящее время имеется достаточно большой ряд современных каталогов лунных объектов. Тем не менее, проблема создания селеноцентрической опорной сети, покрывающей всю поверхность Луны, остается до сих пор не решенной с достаточной точностью. Например, система координат опорной селенодезической сети на основе данных, полученных с бортов космических кораблей миссии "Аполлон", отнесена центру масс Луны. Однако, во первых, объекты данной сети покрывают ограниченную область лунной поверхности в поясе по широте от -20 до $+40$ градусов, во вторых, возникают большие ошибки в плановых координатах при расширении данной сети в сторону от треугольника, который формируют станции ALSEP, и в третьих, система координат данной сети является квазидинамической, то есть ее оси не совпадают с осями инерции Луны. Другие каталоги также имеют проблемы с системами координат, положенных в их основу. Это в лучшем случае квазидинамические системы. В настоящее время только каталог «Казань - 1162» [4] наилучшим образом удовлетворяет динамическим характеристикам, что подтверждается и в настоящей работе.

Учитывая все выше сказанное, данная работа направлена на исследование взаимного положения геометрического центра масс Луны относительно ее центра масс, анализе динамической системы координат, и как итог, создание абсолютной опорной системы объектов в краевой зоне Луны и расширение и сгущения селеноцентрической динамической системы координат для большей части лунной поверхности и построении модели макрорельефа Луны.

Цели и задачи работы

Цель работы: исследование взаимного положения геометрического центра масс Луны относительно центра фигуры, анализ динамической системы координат, и как итог, создание абсолютной опорной системы объектов в краевой зоне Луны и расширение и сгущения селеноцентрической динамической системы координат для большей части лунной поверхности и построении модели макрорельефа Луны.

Для реализации поставленной цели, необходимо осуществить следующие задачи:

1. Выполнение теоретических и практических работ по исследованию современных селенографических каталогов относительно динамической системы координат.
2. Развитие метода анализа относительного положения геометрического центра Луны относительно центра масс и его реализация на практике.
3. Создание метода построения абсолютного каталога в краевой зоне Луны.
4. Построение абсолютного каталога в краевой зоне Луны.
5. Развитие метода создания и построения опорного селеноцентрического каталога на основе расширения и сгущения динамической системы координат, имеющего высокие показатели точности и достоверности представленных в нем результатов.
6. Создание сводного опорного селеноцентрического каталога.
7. Моделирование макрофигуры лунного диска.

Работа носит как теоретический, так и экспериментальный характер: анализ длительных рядов наблюдений и их редукция, разработка новых методов анализа и обработки экспериментальных данных с целью решения комплексных задач селенодезии.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

Данная диссертация является законченным научным исследованием.

Все результаты, которые приводятся в 6 пунктах результатов, вынесенных на защиту, являются оригинальными и впервые опубликованы в работах автора.

1. Создан и реализован новый метод определения относительного положения геометрического центра Луны относительно центра масс на основе гипсометрических данных каталога «Казань-1162» с использованием гармонического анализа.
2. Впервые построен абсолютный каталог лунных объектов в ее краевой зоне на основе прямой привязки избранных кратеров к небесной системе координат.

3. Создан метод расширения и сгущения селеноцентрических динамических систем координат с использованием робастных подходов, построена сводная селеноцентрическая динамическая система лунных объектов и проведен ее анализ.
4. На основе полученных в работе результатов построена новая модель макрофигуры лунного диска.

ПРАКТИЧЕСКАЯ И НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при решении широкого круга задач лунной астрометрии, и ряда проблем астрометрии.

1. Метод определения положения центра масс Луны относительно ее центра фигуры можно использовать в обсерваториях, где ведутся работы по исследованию динамических селенодезических параметров, а методы ее редуцирования с успехом можно применять при анализе современных космических каталогов. Важность решения этих задач особенно становится актуальной в настоящее время, когда мировая тенденция снова направлена на углубление и расширение лунных исследований.
2. Параметры положения центра масс Луны относительно ее центра фигуры и оценка полученных величин является важным элементом в области построения теорий эволюции небесных тел и разработки моделей внутреннего строения Луны.
3. Опорная селеноцентрическая динамическая опорная сеть в либрационной зоне Луны с успехом может использоваться для решения задачи перевода систем опорных селенодезических сетей с видимой полусферы Луны на ее обратную сторону.
4. Опорный каталог объектов на поверхности Луны в системе центра масс Луны может использоваться в качестве опорной сети для определения координат объектов обратной стороны Луны полученным из миссий «Аполлон», «Зонд», «KAGUYA» и будущих космических экспериментов, а также могут использоваться для оценки параметров и точности других селенодезических систем.
5. Новые подходы к моделированию макрофигуры лунного диска позволят производить более точный учет возможных отклонений и неточностей как

при картографировании лунной поверхности, так и при редукции наблюдательных данных.

В настоящее время «прогресс в области селенодезических исследований может быть достигнут путем разумного сочетания данных космических и наземных наблюдений» [5]. Попытка такого подхода и была осуществлена в настоящей работе.

За цикл работ по селенодезии автор настоящей диссертационной работы была удостоена в 2010 году стипендией мэра города Казани, завоевала Первое место за лучшую печатную работу Казанского федерального университета в области естественных наук, а в 2011 году получила Премию первой степени Академии наук РТ, Стипендию Президента России и премию за лучшие 50 инновационных идей Республики Татарстан.

Анализ динамической и инерциальной систем координат, разработка и внедрение новых методов исследования в области селенографии, позволило получить принципиально новую научную информацию. В результате можно сделать вывод, что данная работа дает новые значимые результаты в теории и практике определения ориентации динамической системы координат. Все это будет способствовать дальнейшему прогрессу отечественной астрономии в области селенодезии. Результаты работы могут быть использованы в ГАИШ МГУ, ИНАСАН, ГАО РАН, ИКИ РАН, УГТУ, КФУ, и других научных организациях, занимающихся вопросами современного координатно – временного обеспечения.

ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность полученных результатов подтверждается: а) хорошим согласием полученных результатов с выводами ведущих зарубежных ученых; б) совокупностью используемых в работе точных методов обработки и анализа наблюденных данных; в) большим объемом используемого в обработке практического и информационного материала; г) проведением контроля точности принятых в обработку данных; д) апробации полученных результатов при выполнении работ по смежным научным темам и грантам РФФИ, а также на международных и всероссийских конференциях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа основана как на теоретических, так и на экспериментальных методах и расчетах. Использовались современные методы анализа планетарных структур. При построении опорных селенографических сетей

краевой зоны Луны были использованы уникальные наблюдения на модифицированных горизонтальном телескопе. Исследования опорных селенодезических сетей были выполнены с использованием новых подходов. Все используемые в работе методы, теоретические и наблюдательные материалы были исследованы на достоверность и точность представленных в них данных.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

Все поставленные выше цели успешно достигнуты. На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Развитие метода определения параметров положения центра масс Луны относительно ее центра фигуры на основе прямого использования динамической опорной системы объектов, построенной в системе центра масс и главных осей инерции небесного тела. Примененный в работе метод позволяет использовать для определения таких параметров наземные селеноцентрические сети в совокупности с данными космических миссий и, таким образом, проводить анализ этих сетей с точки зрения их квазидинамических характеристик.
2. Параметры положения центра масс Луны относительно ее центра фигуры и оценка полученных величин. Было определено, что на основе использования наземного селеноцентрического каталога «Казань-1162» совместно с данными миссии «Клементина» положения центра масс Луны относительно ее центра фигуры имеет следующие относительные значения: $\Delta\xi = -1,49$; $\Delta\eta = -0,69$; $\Delta\zeta = 0,16$, что хорошо согласуется с данными других космических миссий и подтверждает, что система координат каталога «Казань-1162» является динамической.
3. Создание метода построения абсолютного каталога в краевой зоне Луны и построение опорной селеноцентрической динамической опорной сети в либрационной зоне Луны. Как известно, опорные селенодезические сети служат для привязки к ним исследуемых координатных систем, но до сих пор в либрационной зоне не было создано такой сети, которая с одной стороны была бы динамической, а с другой стороны позволяла бы осуществлять трансформацию координат между видимой и обратной сторонами Луны.

4. Развитие метода построения опорного селеноцентрического каталога на основе расширения и сгущения селеноцентрической динамической системы координат. Данный метод позволяет на основе опорного селеноцентрического каталога осуществлять трансформацию современных селенографических координатных систем в динамическую систему координат, до настоящего момента такую трансформацию возможно было осуществить только как квазидинамическую систему отсчета данных.
5. Сводный опорный селеноцентрический каталог лунных объектов в небесной системе координат. Впервые построена координатная сеть на Луне, которую можно считать динамической, то есть ее оси координат совпадают с осями инерции Луны, а начало координат лежит в ее центре масс.
6. Параметры модели макрофигуры лунного диска, полученные на основе анализа сводного опорного селеноцентрического каталога лунных объектов, построенного в небесной системе координат. Данная модель позволила оценить вариации макрофигуры Луны для данной поверхности отсчета высотных данных используемой при наших исследованиях и показала ее хорошее согласие с данными современных космических миссий.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Varaksina, N.Y. ANALYSIS OF DATA OF "CLEMANTINE" AND "KAGUYA" MISSIONS AND "ULCN" AND "KSC-1162" CATALOGUES / Y. Nefedyev, S.Valeev, R. Mikeev, N. Varaksina, A. Andreev// Advanced in Space Research.- 2012.- №50, P. 1564 – 1569. DOI : 10.1016/j.asr.2012.07.012.
2. Varaksina, N.Y. The method of a reference selenocentric coordinate system construction for visible and far sides of the Moon referred to the lunar mass center and to its main inertia axes / Yu. Nefedyev, S.Valeev, I. Sharafutdinov, R. Zabbarova, N.Varaksina// Astronomical and Astrophysical Transactions. - 2012. - V. 27, Issue 3.- P. 503 – 508.
3. Varaksina, N.Y. Modeling of the lunar visible side figure / Yu. Nefedyev, S.Valeev, K. Samokhvalov, I. Sharafutdinov, R. Zabbarova, N.Varaksina // Astronomical and Astrophysical Transactions. - 2012.- V. 27, Issue 3.- P.509 – 512.

4. Varaksina, N.Y. Teaching the courses of astronomy and concepts of modern natural science in Kazan Federal University / Yu. Nefedyev, R. Zabbarova, M. Kutlenkov, N.Varaksina, K. Churkin // *Astronomical and Astrophysical Transactions.*- 2012.- V. 27, Issue 3.- P. 545 – 548.
5. Вараксина, Н.Ю. Новый метод построения единой селеноцентрической системы координат на поверхности Луны / Ю.А.Нефедьев, С.Г.Валеев, Н.Ю.Вараксина, Р.Р.Заббарова, К.О.Чуркин, В.С.Боровских// *Георесурсы.*- 2012.- № 1 (43).- С. 44 - 46.
6. Вараксина, Н.Ю. Особенности динамики рентгеновского излучения астрофизических объектов: 2012 Классификация эффектов статистической памяти / С.А. Дёмин, О.Ю. Панищев, Ю.А. Нефедьев, Н.Ю. Вараксина // *Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки.* – 2012. – Т. 154(3). – С. 62-74.
7. Вараксина, Н.Ю. Метод создания каталога кратеров либрационной зоны Луны / Ю.А.Нефедьев, Л.И.Рахимов, Н.Г.Ризванов, Н.Ю.Вараксина, Р.Р.Заббарова, К.О.Чуркин, В.С.Боровских // *Георесурсы.*- 2012.- № 1 (43).- С. 62 - 64.
8. Вараксина, Н.Ю. Проблема построения глобальной селеноцентрической системы / Ю. А. Нефедьев, С.Г. Валеев, Н.Ю. Вараксина, Р.Р. Заббарова, В.С. Боровских // *Георесурсы (английская версия).*- 2012.- 1(12).- Р. 40 - 42.
9. Вараксина, Н.Ю. Прецессионный метод редукции наблюдений селенодезических объектов в небесной системе координат // *Вестник ТГГПУ.*- 2011.- № 3 (25).- С. 26 – 30.
- 10.Вараксина, Н.Ю. Селеноцентрическая координатная сеть, построенная в системе каталога КСК-1162 / Ю.А.Нефедьев, С.Г.Валеев, И.М. Шарафутдинов, Н.Ю.Вараксина // *Ученые записки Казанского университета.*- 2011.- Том 153, Кн.2.- С. 150 - 158.
- 11.Вараксина, Н.Ю. Параметры положения центра масс Луны относительно центра ее фигуры на основе данных космических миссий Clementine, Kaguya и каталога ULCN / С.Г.Валеев, Р.Р.Микеев, Н.Ю.Вараксина, Ю.А.Нефедьев // *Ученые записки Казанского университета.*- 2011.- Том 153, Кн.2.- С. 158 - 163.

12. Вараксина, Н.Ю. Новый метод определения положения центра масс Луны / Ю.А. Нефедьев, Н.Ю. Вараксина, С.Г. Валеев, Н.Г. Ризванов, Р.Р. Микеев // Вестник ТГГПУ, №1 (23), 2011, с. 31-35.
13. Вараксина, Н.Ю. Построение метода создания единой селеноцентрической системы координат в системе центра масс и главных осей инерции Луны на основе разнородных наблюдений / Ю.А. Нефедьев, Н.Ю. Вараксина, М.В. Кутленков, К.О. Чуркин // Вестник ТГГПУ, ISSN 2074-0239.- 2010.- № 1 (20).- С. 31 – 33.
14. Вараксина, Н.Ю. История солнечных и спектральных исследований в астрономической обсерватории им. В. П. Энгельгардта (АОЭ)/ Ю.А. Нефедьев, И.А. Дубяго, Н.Ю. Вараксина // Кинематика и физика небесных тел.- 2010.- № 6.- С. 48 – 59.
15. Вараксина, Н.Ю. Василий Павлович Энгельгардт/ Ю.А. Нефедьев, И.А. Дубяго, Н.Ю. Вараксина // Земля и Вселенная.- 2009.- № 1.- С. 37 - 45.
16. Вараксина, Н.Ю. Исследование макрофигуры Луны/ Н.Ю. Вараксина, М.В. Кутленков // Вестник ТГГПУ.- 2008, №4(15).- С. 4 – 6.

Монографии

1. Вараксина, Н.Ю. История астрономии в Казани / Ю.А. Нефедьев, Р.А. Кащеев, Н.Г. Ризванов, О.И. Белькович, И.А. Дубяго, Е.Е. Беляева, Н.Ю. Вараксина // Монография: Изд. КГУ.-2009.- С. 1 - 600.
2. Вараксина, Н.Ю. История астрономии в Казани (2-ое издание, дополненное)/ Ю.А. Нефедьев, Р.А. Кащеев, Н.Г. Ризванов, О.И. Белькович, И.А. Дубяго, Е.Е. Беляева, В.В. Лапаева, Н.Ю. Вараксина // Монография: Изд. КГУ.-2010.- С. 1 - 440.

В других изданиях:

1. Вараксина, Н.Ю. Построение глобальной селеноцентрической опорной координатной системы/ Ю.А. Нефедьев, Н.Ю. Вараксина, Р.Р. Заббарова, М.Ю. Кутленков // Известия ГАО РАН – 2013 - №220.- С. 23 – 28.
2. Вараксина, Н.Ю. Модернизация наблюдательного комплекса АОЭ/ В.В. Сасюк, Ю.А. Нефедьев, Н.Ю. Вараксина, К.О. Чуркин // Известия ГАО РАН – 2010 - №219, Т.4.- С. 319 – 323.

3. Вараксина, Н.Ю. История научных связей астрономов «северной столицы» и Казани/ Ю.А. Нефедьев, Н.Г. Ризванов, И.А. Дубяго, А.И. Галеев, Н.Ю. Вараксина // Известия ГАО РАН – 2010 - №219, Т.4.- С. 419 – 427.
4. Вараксина, Н.Ю. Построение глобальной селеноцентрической опорной координатной системы/ С.Г. Валеев, Ю.А. Нефедьев, Н.Ю. Вараксина // Известия ГАО РАН – 2010 - №219, Т.4.- С. 57 – 61.
5. Вараксина, Н.Ю. Модернизация наблюдательного комплекса АОЭ для учебных целей/ Ю.А.Нефедьев, В.В.Сасюк, Н.Ю.Вараксина// Известия КрАО.- 2009.- Том 104, №6.- С. 217-219.
6. Вараксина, Н.Ю. Модель поверхности Луны/ Ю.А.Нефедьев, С.Г.Валеев, К.М.Самохвалов, И.М.Шарафутдинов, М.В.Кутленков, Н.Ю.Вараксина// Известия КрАО.- 2009.- Том 104, №6.- С. 206-211.
7. Вараксина, Н.Ю. История АОЭ и связи с КрАО/ Ю.А.Нефедьев, И.А.Дубяго, Н.Ю.Вараксина// Известия КрАО.- 2009.- Том 104, №6.- С. 199-205.

В сборниках трудов конференций

1. Varaksina, N.Y. The modeling of a lunar visible side macrofigure/ Y. Nefedjev, S. Valeev, N. Rizvanov, M. Kutlenkov, and N. Varaksina // European Geosciences Union, EGU General Assembly 2009, Vienna, Austria, 19-24 April 2009, Geophysical Research Abstracts.-2009.- Vol. 11.- P. EGU2009-11462.
2. Varaksina, N.Y. The construction method of united celenocentric coordinates system for visible and reverse lunar sides, brought to the lunar center masses and main axis of its inertia/ Y. Nefedjev, S. Valeev, I. Sharafutdinov , M. Kutlenkov, and N. Varaksina // European Geosciences Union, EGU General Assembly 2009, Vienna, Austria, 19-24 April 2009, Geophysical Research Abstracts.-2009.- Vol. 11.- P. EGU2009-11491.
3. Varaksina, N.Y. V.P.Engelhardt – EAO founder/ Yu. Nefedjev, I. Dubyago, M. Kutlenkov, N. Varaksina // In book: Astrokazan2009.- 2009.- P.24 – 29.

4. Varaksina, N.Y. Catalogue of a craters lunar libration zone/ Yu. Nefedjev, L. Rakhimov, N. Rizvznov, M. Kutlenkov, N. Varaksina // In book: Astrokazan 2009.- 2009.- P.183 – 184.
5. Varaksina, N.Y. The relative position of lunar center masses and centre of the figure in selenocentric catalogues/ Yu. Nefedjev, S. Valeev, N. Rizvanov, R. Mikeev, N. Varaksina // In book: Astrokazan2009.- 2009.- P.227 – 229.
6. Varaksina, N.Y. Astronomical education in natural science courses/ Yu. Nefedjev, V. Sasuk, M. Kutlenkov, N. Varaksina // In book: Astrokazan 2009.- 2009.- P.313 – 315.
7. Varaksina, N.Y. The obtaining relative position of lunar centre masses and centre of the figure in selenocentric catalogues/ Yu.A. Nefedjev, S.G. Valeev, N.G. Rizvanov, R.R. Mikeev, N.Yu. Varaksina // European Geosciences Union, EGU General Assembly 2009, Vienna, Austria, May, 5, 2010, Geophysical Research Abstracts.-2010.- Vol. 12.- P. EGU2010-14967.
8. Varaksina, N.Y. The building of the catalogue of a craters lunar libration zone / Yu. Nefedjev, L. Rakhimov, N. Rizvanov, M. Kutlenkov and N.Varaksina // European Geosciences Union, EGU General Assembly 2009, Vienna, Austria, 19-24 May, 5, 2010, Geophysical Research Abstracts.-2010.- Vol. 12.- P. EGU2010-14968.
9. Varaksina, N.Y. Making selenocentric reference coordinates net in the dynamic system/ Yu. Nefedyev, S. Valeev, I. Sharafutdinov and N. Varaksina // European Planetary Science Congress 2011, EPSC-DPS Joint Meeting, La Cite Internationale des Congres Nantes Metropole, 03 – 07 October 2011, Nantes, France.-2011.- Vol. 6.- P. EPSC-DPS2011-43.
10. Varaksina, N.Y. The building of the occultation observations base/ Yu. Nefedyev, N. Varaksina, M. Kutlenkov and K. Churkin // European Planetary Science Congress 2011, EPSC-DPS Joint Meeting, La Cite Internationale des Congres Nantes Metropole, 03 – 07 October 2011, Nantes, France.-2011.- Vol. 6.- P. EPSC-DPS2011-135.

11. Varaksina, N.Y. Extention and distribution of Kazan selenocentric reference system/ Yu. Nefedjev, S. Valeev, I. Sharafutdinov, N. Varaksina // In book: Astrokazan2011.- 2011.- P.61 – 64.
12. Varaksina, N.Y. The relative position of lunar center masses and center of the figure in selenocentric catalogues/ Yu. Nefedjev, S. Valeev, N. Rizvanov, R. Mikeev, N. Varaksina // In book: Astrokazan2011.- 2011.- P.119 – 120.
13. Varaksina, N.Y. The catalogue of a craters lunar libration zone/ Yu. Nefedjev, L. Rakhimov, N. Rizvanov, M. Kutlenkov, N. Varaksina // In book: Astrokazan2011.- 2011.- P.120 – 121.
14. Varaksina, N.Y. The occultation observations base/ Yu. Nefedjev, M. Kutlenkov, N. Varaksina, K. Churkin // In book: Astrokazan2011.- 2011.- P.121 – 126.
15. Вараксина, Н.Ю. Построение глобальной селеноцентрической опорной координатной системы/ Ю.А. Нефедьев, С.Г. Валеев, Н.Ю. Вараксина // Тезисы докладов Всероссийской астрометрической конференции «Пулково - 2009» 15-19 июня 2009 г. С.Петербург, ГАО РАН .- 2009.- С. 35-36.
16. Вараксина, Н.Ю. История научных связей астрономов «Северной столицы» и Казани/ Ю.А. Нефедьев, Н.Г. Ризванов, И.А. Дубяго, А.И. Галеев, Н.Ю. Вараксина // Тезисы докладов Всероссийской астрометрической конференции «Пулково - 2009» 15-19 июня 2009 г. С.Петербург, ГАО РАН .- 2009.- С. 66.
17. Вараксина, Н.Ю. Применение информационных технологий и систем при формировании научно-методической базы данных АОЭ/ Ю.А. Нефедьев, Н.Г. Ризванов, И.А. Дубяго, М.В. Кутленков, Н.Ю. Вараксина, К.О. Чуркин // Сборник научных трудов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации», 1-5 декабря 2009 г., Россия, Ульяновск.- 2009.- Т.2.- С. 367 – 373.
18. Вараксина, Н.Ю. Создание глобальной селеноцентрической опорной системы координат/ Ю.А. Нефедьев, С.Г. Валеев, Н.Ю. Вараксина, К.О.

Чуркин // Тезисы докладов Всероссийской астрономической конференции «От эпохи Галилея до наших дней», Нижний Архыз (САО), 12-19 сентября 2010, ВАК-2010.- 2010.- С. 51.

19. Варакина, Н.Ю. Космический туризм в Казани/ Ю.А. Нефедьев, И.А. Дубяго, А.В. Гусев, Н.Ю. Варакина // Тур – фактор: Материалы третьей международной научно-практической конференции «Комплексное развитие перспективных туристских центров: новые подходы и решения», Казань 16-17 апреля 2010. – 2010.- С. 52 – 55.

20. Варакина, Н.Ю. Метод построения единой селеноцентрической опорной системы координат/ Ю.А. Нефедьев, С.Г. Валеев, Н.Ю. Варакина // Материалы Международной научно-практической конференции «Спецпроект: анализ научных достижений», Украина, г. Днепропетровск, 30-31 мая 2011.-2011.- Том 3.- Стр. 88-90.

21. Варакина, Н.Ю. Система космической навигации на Луне/ Ю.А. Нефедьев, Н.Ю. Варакина // Сборник тезисов лучших докладов XXX Научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященных Году учителя в Российской Федерации и Республике Татарстан, Казань – 2010. – С. 18-19.

22. Варакина, Н.Ю. Анализ космических и наземных селенографических опорных сетей/ Н.Ю. Варакина, Ю.А. Нефедьев, Р.Р. Заббарова, К.О. Чуркин // Всероссийская астрометрическая конференция «Пулково-2012» 1-5 октября 2012 года.- 2012.- С. 8.

Публикации в электронных ресурсах

1. Варакина, Н.Ю. Каталог селеноцентрических опорных точек (КСОТ)/ Н.Ю. Варакина, С.Г. Валеев, Ю.А. Нефедьев // Издательство Казанского федерального университета. - 2013. - С. 1-5464.
(<http://diglib.kpfu.ru/xmlui/handle/123456789/820>)

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 48 работах, из которых одна публикация является электронным ресурсом, а 16 опубликованы в научных журналах,

рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных результатов диссертаций. Основные выводы, полученные в диссертации, неоднократно докладывались на научных семинарах и итоговых конференциях АОЭ и КФУ, а также автором было сделано более 20 докладов на Международных и Всероссийских конференциях:

Основные результаты диссертации докладывались на Международных конференциях:

1. European Geosciences Union, EGU General Assembly 2009, Vienna, Austria, 19-24 April 2009.
2. Международная конференция «Физика Солнца: наблюдения и теория», 6 – 12 сентября 2009, КрАО, п. Научный, АР Крым.
3. Международный симпозиум «Луна, луны и планеты: спутниковые зондирования и сравнительная планетология» 19.08.2009 - 26.08.2009, г.Казань.
4. European Geosciences Union, EGU General Assembly 2009, Vienna, Austria, May, 5, 2010.
5. Международная конференция «150 лет спектральным исследованиям в астрофизике: от Кирхгофа до наших дней» (Kirchhoff-150) 7-13 июня 2009 г. Украинская астрономическая ассоциация, Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория» МОН Украины и Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, п. Научный, АР Крым.
6. European Planetary Science Congress 2011, EPSC-DPS Joint Meeting, La Cite Internationale des Congres Nantes Metropole, 03 – 07 October 2011, Nantes, France.-2011.
7. International astronomical congress “Robotic Exploration of the Moon, moons, and planets” (“ASTROKAZAN-2011”), August 22 – 30, 2011, Kazan, Russia.
8. Международная научно-практическая конференция «Комплексное развитие перспективных туристских центров: новые подходы и решения», Казань 16-17 апреля 2010.
9. Международная научно-практическая конференция «Спецпроект: анализ научных достижений», Украина, г. Днепропетровск, 30-31 мая 2011.
10. Международный семинар по лунной астрометрии, Шанхайская астрономическая обсерватория, 6 июня 2011 года.

Всероссийских конференциях:

1. Всероссийская астрометрическая конференция «Пулково - 2009» 15-19 июня 2009 г., С.Петербург.
2. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации», 1-5 декабря 2009 г., Россия, Ульяновск.-2009.
3. Всероссийская астрономическая конференция «От эпохи Галилея до наших дней», Нижний Архыз (САО), 12-19 сентября 2010, ВАК-2010.
4. Всероссийская астрометрическая конференция «Пулково-2012» 1-5 октября 2012 года, С.Петербург.

Полученные во время выполнения работы научные гранты, стипендии и награды:

1. За цикл научных работ Премия первой степени Академии наук РТ (2011 год), Стипендия Президента России (2011)
2. Стипендия мэра города Казани (2010)
3. Премия за лучшие 50 инновационных идей Республики Татарстан (2011)
4. Первое место за лучшую печатную работу Казанского федерального университета в области естественных наук (2010)
5. Грант РФФИ 13-02-00792_a (исполнитель)
6. Грант РФФИ 08-02-01214_a (исполнитель)
7. Грант РФФИ 11-02-91160 ГФЕН_a (исполнитель)
8. Грант РФФИ 11-02-92113 ЯФ_a (исполнитель)

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА В СОВМЕСТНЫХ РАБОТАХ

Основные результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно. По теме диссертации опубликовано 48 работ, 16 статей опубликованы в рецензируемых научных журналах рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, из них 1 публикация написана без соавторов. Изданы две монографии. 47 работ написано совместно с другими авторами. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают вклад автора в опубликованных работах. Все опубликованные статьи выполнены с непосредственным участием автора: от постановки задачи и выбора метода исследования до получения и интерпретации результатов и технического исполнения и написания самой

статьи. Автор диссертации принимал непосредственное участие в обработке и интерпретации результатов.

Сделано более 20 докладов на Всероссийских и Международных конференциях.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст диссертации содержит 127 страниц, включая 6 рисунков, 8 таблиц. Приложение состоит из 78 страниц. Список литературы включает 157 наименований на 17 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** кратко описаны актуальность, цели работы, новизна, достоверность, материалы и методы исследований, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены основные публикации по теме диссертации и данные по апробации полученных в работе результатов, описан вклад автора в совместных публикациях, даны параметры структуры и объема диссертации, кратко описаны основные разделы работы.

Первая глава посвящена вопросам, связанным с анализом динамической и геометрической фигур Луны. В **параграфе 1.1.** обсуждаются основные задачи лунной астрометрии. Сделан вывод, что важнейшими задачами являются построение селеноцентрических динамических опорных сетей, создание лунных топоцентрических и гравиметрических моделей, установление взаимного положения центра фигуры и центра масс Луны, задания систем отсчета селенографических координат для навигационного ориентирования и определения поверхностей отсчета для картографирования лунной поверхности. Относительно последней задачи необходимо отметить, что все современные топографические модели, построенные по космическим наблюдениям, в целом имеют неопределенные поверхности отсчета координат, и, таким образом, и не точные координаты представленных на них объектов. Также без опорного каталога лунных объектов, охватывающего наилучшим образом исследуемую область поверхности невыполнима и задача сгущения и расширения космических навигационных сетей. **Параграф 1.2** носит обзорно-аналитический характер и в нем описано, как в настоящее время решаются современные вопросы лунной селеноографии на основе данных, полученных космическими миссиями. В частности рассмотрены

миссии Lunar Orbiter (США), Apollo (США), Ranger (США), Galileo, Clementine (США), Lunar Prospector (США), SMART-1 (Европа), SELENE (Япония), Chang'E-1 (Китай), Chandrayaan-1 (Индия), Lunar Reconnaissance Orbiter (США), KAGUYA (Япония). Показана необходимость многократной обработки различных наборов космических данных, в силу постоянного улучшения методов обработки и подходов, на основе которых продолжается развитие глобальных селенодезических опорных сетей. Это направление стало особенно важным с появлением селеноцентрических опорных сетей. Также активизируется создание баз данных для глобальных высотных измерений в последующих космических миссиях, что, несомненно, повысит точность опорных селеноцентрических сетей, как это было при исследовании Марса. В **Параграфе 1.3** выполнен анализ динамической и геометрической фигуры Луны, который заключался в исследование систем координат селенографических каталогов и космических миссий на основе анализа взаимного положения лунного центра фигуры и ее центра масс. Подчеркнуто, что в настоящее время все данные по лунной топографии можно разделить на два типа. С одной стороны, одни данные полученные на основе лазерного сканирования лунной поверхности с бортов спутников, хорошо описывают лунный рельеф, но не дают значения координат опорных объектов на Луне. Другой тип данных дает точные координаты опорных объектов на основе наблюдений прямой привязки их к звездам, но не описывают с достаточной точностью лунный рельеф. Причем все эти системы имеют разные системы отсчета и ориентацию осей координат. С другой стороны данные, полученные во всех космических миссиях, относятся к квазидинамической системе координат, в которой центром отсчета координат является центр масс Луны, но оси координат не совпадают с осями инерции Луны. Большинство современных селенодезических каталогов также относится к квазидинамической системе координат, так как у них или центр отсчета координат не совпадает с центром масс Луны, или оси координат не совпадают с осями инерции Луны. Также в настоящее время не существует опорной динамической селеноцентрической системы координат, полученной на основе космических наблюдений и покрывающей достаточную площадь на лунной поверхности. Кроме того, несмотря на точность определения физического рельефа Луны космическими миссиями, поверхность отсчета отметок этого рельефа представляет собой абсолютно неопределенную

фигуру. Таким образом, нельзя говорить, что спутниковые топографические карты являются полноценными моделями, имеющими определенную поверхность отсчета топографических данных. Для осуществления поставленных целей использовался метод гармонического анализа на основе разложения топографических данных по сферическим функциям. Для построения моделей использовались следующие источники топографической информации: данные космических миссий "Clementine" и "Kaguya", данные наземных каталогов Казань-1162, Киев 4900 [2], каталог Гаиш [3], данные работы "Bills, Ferrari" [9], опорная сеть "ULCN" [8]. В качестве модели, описывающей поведение рельефа на лунной сфере, использовалось разложение функции высоты $R(\lambda_i, \varphi_i)$ в ряд по сферическим гармоникам в виде модели регрессии [1]:

$$R(\lambda_i, \varphi_i) = F(\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}, \bar{P}_{nm}) + \varepsilon, \quad (1)$$

где φ, λ - (широта, долгота) известные координаты лунных объектов; C_{nm} , S_{nm} - нормированные амплитуды гармоник; \bar{P}_{nm} - нормированные присоединённые функции Лежандра; ε - случайная ошибка регрессии. Решение переопределенной системы (1) для разных источников гипсометрической информации осуществлялось в рамках подхода регрессионного моделирования, предусматривающего кроме обычных этапов (постулирование модели (1) и оценивание амплитуд C_{nm}, S_{nm}): использование ряда статистик качества, в том числе, внешних мер; диагностику соблюдения основных условий метода наименьших квадратов; адаптацию при их нарушении. В качестве вычислительных схем метода наименьших квадратов используются схемы Гаусса-Жордана и Хаусхолдера.

Прямое использование модели (1) для отдельных участков сферы (полусфера и пр.) бывает затруднительным из-за мультиколлинеарности коэффициентов разложения, поэтому в настоящей работе был использован способ оценивания амплитуд модели (1) путем предварительного расширения сегмента до полной сферы, что позволяет полностью устранить эффект мультиколлинеарности. После чего шумовые гармоники удалялись пошаговой регрессией. В результате были получены координаты центра фигуры Луны относительно ее центра масс для разных источников топографической информации.

Таблица 1 Координаты центра фигуры Луны относительно центра масс для пяти источников гипсометрической информации, км

	Clementine	Киев	Казань 1162 + Clementine	Киев + Clementine
$\Delta\xi$	-1,80	0,14	-1,49	-0,94
$\Delta\eta$	-0,74	0,47	-0,69	-0,73
$\Delta\zeta$	-0,64	0,17	0,16	0,35

Таблица 2 Координаты центра фигуры Луны относительно ее центра масс взятых из других источников, км

	ГАИШ [7]	Bills, Ferrari [9]	ULCN 2005 [8]	KAGUYA [15]
$\Delta\xi$	-2,03	-1,82	-1,71	-1,77
$\Delta\eta$	0,07	-0,45	-0,73	-0,78
$\Delta\zeta$	-2,04	-0,64	0,26	0,24

В таблицах $\Delta\xi$, $\Delta\eta$, $\Delta\zeta$ разницы в положениях центра масс относительно центра фигуры в прямоугольной селенографической системе координат. Анализ этих данных показал, что каталог Казань-1162 для видимой стороны Луны, приведенный к центру масс и к главным осям инерции Луны, при совместном использовании объектов вне зоны ее охвата из списка Clementine имеет наиболее близкое согласие с результатами последних космических миссий. Также было определено, что коррекция первых измерений миссии Clementine, выполненная авторами ULCN 2005, по-видимому, имела отношение к данным на видимой стороне Луны, так как амплитуды и смещения для варианта (Казань-1162 + Clementine; близки к результатам ULCN2005, а не к Clementine.

Во **второй главе** рассмотрены вопросы создания опорной селеноцентрической сети в либрационной зоне Луны, так как либрационная зона Луны до сих пор представляет собой достаточно неисследованный в селеноцентрическом плане район. В **Параграфе 2.1** анализируются методы построения селенографических моделей либрационной зоны Луны. Особое внимание уделено проблеме построения именно селеноцентрической опорной сети, так как создание такой системы предполагает ее использование при

связи и трансформации координат навигационных систем между видимой и обратной стороны Луны. **Параграф 2.2.** посвящен описанию и основному математическому аппарату, связанным с системой координат Гайна. В **Параграфе 2.3** непосредственно рассматривается вопрос построения каталога объектов в либрационной зоне Луны. Метод построения опорного селенодезического каталога объектов в либрационной зоне состоит из следующих основных этапов: приведение изогипс карт Уоттса с поправками Моррисона к системе карт «Казань» в электронном виде; отождествлению кратеров на картах краевой зоны с использованием Полной карты Луны [6], созданной ГАИШ МГУ и уточнение их положения по картам космических миссий; далее с использованием программного пакета MAPS были определены уточненные координаты кратеров в системе гайновских координат с использованием динамических карт либрационной зоны, и, в итоге, получены прямоугольные координаты опорных объектов и проведен анализ их точности. Сравнение полученных координат с высотной топографией миссий Clementine и Kaguya показали их хорошее согласие.

Третья глава посвящена вопросам построения опорного каталога объектов на поверхности Луны в небесной системе координат. В **параграфе 3.1** описаны методы построения селенографических каталогов лунных объектов. Отмечается, что современные селенодезические сети не являются равноточными по различным координатным осям и обладают эллипсоидальным распределением ошибок. Для устранения этих недостатков возможно использовать два метода: 1) Использование стереофотограмметрии с достаточным базисом и 2) Комбинирование данных, полученных по наземным наблюдениям Луны с данными, полученными космическими аппаратами. **Параграф 3.2** содержит основные положения математического аппарата для работы с селенографическими системами координат. Рассмотрены взаимосвязи координатных систем с селенодезическими параметрами, используемые в настоящей работе. Анализируются системы селенографических и динамических координат, методы их трансформации, основные поправки, которые необходимо учитывать при вычислениях. В **Параграфе 3.3** приводится описание основных этапов создания базы данных

каталогов. Отмечается, что для видимой стороны есть несколько координатных систем, среди которых несколько каталогов построены в динамической системе координат, это каталоги Казань - 264 [11] и Казань-1162, построенные по крупномасштабным снимкам Луны со звёздами. Ставятся основные задачи: исследование систематических и случайных ошибок каталога Казань-1162 и сгущение и расширение системы каталога Казань-1162 на видимую, обратную стороны Луны и либрационную зону. С этой целью описывается информационное и программное обеспечение для решения поставленных задач. Анализируется используемый в работе программный комплекс, который использовался для первичной обработки данных, в частности, для подготовки данных для решения основной задачи. В систему Казань-1162 были переведены 12 селенографических каталогов: ACIC, AMS, ARTHUR, Baldwin, Goloseevo-1, Goloseevo-2, MILLS-2, SCHRUTKA-1, SCHRUTKA-2, Киев 4900, ULCN 2005) и каталог на западное полушарие Луны Валеева. Для того, чтобы осуществить процедуру сгущения и распространения системы Казань-1162 было произведено отождествление общих точек для двух селенографических систем S_1 и S_2 с использованием специального программного модуля в селенографической системе координат (ξ, η, ζ) на основе невязок координат, которые не превышали по модулю для ξ, η, ζ соответственно значения 0.001; 0.001; 0.002 лунного радиуса.

Основную регрессионную модель для нахождения искомых параметров, представленную в векторной форме, можно записать как:

$$\mathbf{A} \times \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{Z},$$

где $\mathbf{A}(A_{ij})$ - переходная структурированная матрица, $\boldsymbol{\theta}(\Delta \xi, \Delta \eta, \Delta \zeta)$ - вектор-столбец искомых параметров, $\boldsymbol{\varepsilon}$ - вектор - столбец случайных ошибок наблюдений, $\mathbf{Z}(\Delta X, \Delta Y)$ - вектор - столбец наблюдений.

Оценка искомых параметров $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\Delta \hat{\xi}, \Delta \hat{\eta}, \Delta \hat{\zeta})$ представляет:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{Z}),$$

а их ошибки определяются с помощью ковариационной матрицы ошибок

неизвестных

$$\mathbf{D}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{2m-3} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1},$$

где \mathbf{V} - вектор остаточных уклонений.

Конечной целью исследования явилось сгущение на видимой стороне и расширение на обратную сторону Луны сети базисных точек опорной сети Казань-1162, фиксирующей систему селеноцентрических координат с центром, совпадающим с центром массы Луны и осями, направленными вдоль её осей инерции. В результате была построена опорная сеть, содержащая 282 215 объектов и созданная в динамической системе координат. Было выполнено сравнение опорных точек на лунной поверхности полученного после трансформации каталога с данными каталога Казань-1162. В итоге определено, что в пределах точности наблюдений оси трансформированных каталогов приблизительно одинаково ориентированы относительно каталога Казань 1162. Показано, что селеноцентрическая опорная сеть близка к динамической системе.

В **четвертой** главе рассмотрены вопросы, связанные с созданием модели макрофигуры лунного диска. В **Параграфе 4.1** анализируются методы построения моделей макрофигуры Луны. Отмечается, что создание моделей макрофигуры Луны несмотря на точность представления самого физического рельефа, получаемого на основе данных космических миссий, до настоящего времени остается не решенной задачей из-за проблемы с определением размерности координатной сетки и, соответственно, неточности отсчетов самих координат модели физической поверхности Луны. В **Параграфе 4.2** описываются все этапы построения модели макрофигуры Луны. Основным методом, используемым для исследования лунного макрорельефа, является численно - аналитический метод, заключающийся в разложении селенографических данных в гармонические ряды по сферическим функциям. При этом используются методы регрессионного анализа. В **параграфе 4.3** осуществлено построение модели макрофигуры Луны по данным каталога селеноцентрических опорных точек и ее анализ. Новые данные о рельефе видимой стороны лунной поверхности были получены при анализе радиусов-векторов (абсолютных высот) 282215 точек селенодезического каталога селеноцентрических опорных точек (КСОТ),

полученного в настоящей работе. В результате на основе данных каталога КСОТ была построена модель восьмого порядка разложений. При этом были выполнены следующие этапы создания модели. Был произведен регрессионный анализ моделей рельефа Луны для различных порядков разложения и определено, что увеличение в данном случае порядка разложения не играет заметной роли, далее были проанализированы оптимальные структуры для данной модели, и в итоге исследовалось влияния переопределенности структуры на значения искомых параметров.

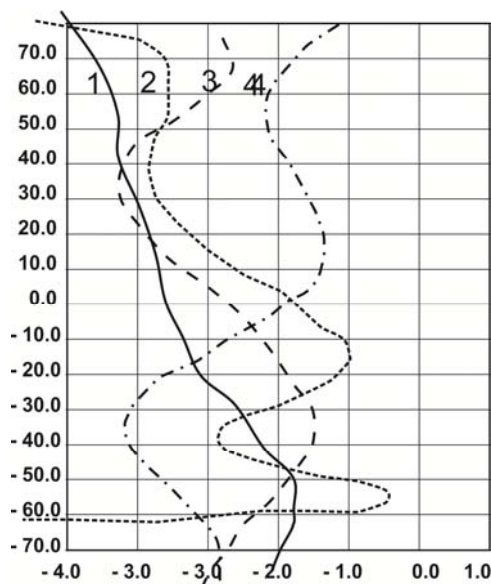


Рис. 1 Сравнение сечений лунного рельефа моделей, построенных по данным миссии Clementine (линия 3), каталогов Казань-1162 (линия 4), Киев (линия 2) и КСОТ (линия 1) для селенографической долготы $\lambda = 20^{\circ}$. По оси абсцисс отложены высоты в км, по оси ординат селенографические широты в градусах.

Оценка параметров и анализ стандартной модели выполнялась с использованием метода наименьших квадратов Гаусса-Жордана. На основе данных каталога КСОТ была построена модель макрофигуры Луны. В дальнейшем она была представлена в виде карты изогипс. Анализа точности построенной гипсометрической модели был выполнен сопоставлением сечений исследуемых систем. При этом общепринятый средний гипсометрический уровень задан каталогом Казань-1162.

В результате исследований показано, что имеется согласие рельефа в моделях построенных по данным космической миссии Clementine, каталога Казань-1162 и КСОТ.

В заключении даются краткие итоги и выводы по данной работе, кратко описаны основные выводы по главам диссертации, перечислены основные результаты диссертации, дается перспективный план дальнейших исследований в направлениях, обозначенных в настоящей работе.

В Приложении приводится, как пример, часть данных 282 215 опорных точек сети КСОТ.

Цитируемая литература:

1. Валеев, С.Г. Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. - Казань: ФЭН. - 2001. – С. 1-296.
2. Гаврилов, И.В. Сводная система селенодезических координат 4900 точек лунной поверхности/ И.В. Гаврилов, В.С. Кислюк, А.С. Дума // Киев, 1977.- С. 1- 172.
3. Липский, Ю.Н. Единая система селенодезических координат из девяти каталогов на видимом полушарии Луны/ Ю.Н. Липский, В.А. Никонов, Т.П. Скобелева // М.: Наука, 1973.- С. 1-384.
4. Нефедьев, Ю.А. Метод построения единой селеноцентрической системы координат для видимой и обратной сторон Луны, приведенной к центру масс Луны и главным осям ее инерции / Ю.А. Нефедьев, С.Г. Валеев, Н.Г. Ризванов // Тезисы Международной конференции «Астрономия и астрофизика начала XXI века» 1-5 июля 2008.- 2008.- С. 35 - 36.
5. Нефедьев, Ю.А. Теория и практика покрытий звезд Луной //Монография Казань.- 2003.- С. 1 - 110.
6. Полная карта Луны 1:5 000 000, Научн. рук. Липский Ю.Н., М., Наука, 1979.
7. Чуйкова, Н.А. Геометрическая фигура Луны, представленная в виде разложения по сферическим и выборочным функциям // Астрономический журнал.- 1975. - Том 52. №6. - С. 1279-1292.
8. Archinal, B.A, The Unified Lunar Control Network 2005 By Brent A. Archinal¹, Mark R. Rosiek¹, Randolph L. Kirk¹, and Bonnie L. Redding¹ USGS Open File Report, <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1367/ULCN2005-OpenFile.pdf> .- 2006.- P. 1-18.
9. Bills, B. A harmonic analysis of lunar topography/ B. Bills, A. Ferrari // Icarus.- 1977.- V 31, №2.- P. 244-259.
10. Galimov, E.M. Objectives and Facilities of Lunar Exploration by Russia/ E.M. Galimov, G.M. Polishchuk, N.N. Sevastianov// 8th ILEWG Conference on

- Exploration and Utilization of the Moon, 23-27 July 2006, Beijing, China.- 2006.- P. 15 - 16.
11. Habibullin, Sh.T. Independent selenocentric system coordinates / Sh.T. Habibullin, N.G. Rizvanov// Earth, Moon and Planets.- 1984.- Vol. 30, №1.- P. 1-19.
 12. Kirk, R.L. Cartography for Lunar exploration: current status and planned missions / R.L. Kirk, B.A. Archinal, L.R. Gaddis, M.R. Rosiek //Proceedings of the 23rd International Cartographic Conference, Moscow, Russia (http://astropedia.astrogeology.usgs.gov/alfresco/d/d/workspace/pacesStore/4515e467-c196-4938-b293-a9fd9ba5cf96/ISPRS_2006_Kirketal_MoonCarto.pdf).- 2007.- P.1-12.
 13. Li, C.L. Laser altimetry data of Chang'E-1 and the global lunar DEM model/ C.L. Li, X. Ren, J.J. Liu, Zou, et al. // Science China Earth Sciences.- Volume 53, Issue 11, November 2010, P. 1582-1593.
 14. Namiki, N., et al. Far side gravity field of the Moon from four-way Doppler measurements of SELENE (Kaguya), Science.- 2009.- 323, 900–905.
 15. Noda, H. Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA(SELENE) laser altimeter/ H. Noda, H. Araki, S. Goossens // Geophysical Research Letters.- 2008.- Vol. 35, Issue 24, L24203.- P.1-5.
 16. Shevchenko, V.V. New view on the Moon / V.V. Shevchenko // “Astrokazan 2011”. Int. Astr. Congr. Proc. Kazan, August.- 2011.- P.12-21.
 17. Smith, D. E. The topography of the Moon from the Clementine LIDAR / D. E. Smith, M.T. Zuber, G.A. Neumann, F.G. Lemoine // Geophys. Res.- 1995.- № 15.- P. 27-35.
 18. Zelenyi, L.M. Russian short and mid-term plans for Lunar investigation and Exploration.- “Astrokazan 2011”. Int. Astr. Congr. Reports. Kazan.- 2011.