

УДК 523.34

**ЛУННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В КАЗАНСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ:
ТЕНДЕНЦИИ, РЕЗУЛЬТАТЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ.
II. СЕЛЕНОГРАФИЯ**

*Ю.А. Нефедьев, Н.К. Петрова, Н.Ю. Вараксина,
С.А. Дёмин, Р.Р. Заббарова*

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы современного развития в Казанском федеральном университете селенографических исследований, связанных с позиционными и спутниковыми наблюдениями Луны, изучением её геометрической и динамической фигур, лунного гравитационного поля и морфологии объектов на поверхности нашего естественного спутника.

Ключевые слова: селеноцентрическая система координат, позиционные и спутниковые наблюдения Луны, селенопотенциал, динамическая фигура.

Введение

Статья посвящена вопросам исследования селенографии в Казанском федеральном университете. Необходимо отметить, что термин «селенография во многих аспектах пересекается с определением «селенодезия». Селенография включает вопросы картографирования поверхности Луны, её фигуры и рельефа, гравитационного и магнитного полей, определение селенографических координат объектов лунной и окололунной поверхности. В свою очередь, селенодезия занимается исследованиями фигуры и размеров Луны в следующих направлениях:

1) исследования динамической фигуры Луны, которые заключаются в построении модели лунного эллипсоида инерции – селеноида – и определении параметров уровенной поверхности силы тяжести;

2) анализ физической поверхности и геометрической фигуры Луны, что можно отнести в большей степени к вопросам лунной астрометрии.

Таким образом, оба термина можно использовать для определения сути тех исследований, которые описываются в настоящей статье.

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 гг.), космические миссии «Лунар Проспектор» (1998–1999 гг.) [1] и «Клементина» (1994 г.) [2]. 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 гг.), «Кагуя» (японский спутник, 2007–2009 гг.) [3], «Чанг-1» (китайский зонд, 2007–2009 гг.),

«Чанг-2» (китайский зонд, 2010 г.) [4], «Чандраан-1» (индийский спутник, 2008–2009 гг.), «Чандраан-2» (индийский спутник, 2013 г.) [1], «ЛРО-ЛКРОСС» (американские спутники “Lunar Reconnaissance Orbiter” и “Lunar CRater Observation and Sensing Satellite”, 2009–2012 гг.) [1]. Программа исследований включала создание селенографической картографической системы, исследование внутреннего строения Луны [5], изучение тонких эффектов физической либрации во вращательном движении нашего естественного спутника, использование межспутникового слежения с целью исследования гравитационного поля Луны [6].

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 ЛРО, вращающимся вокруг Луны по полярной орбите. Радиотелескоп по изучению Солнечной системы (Goldstone Solar System Radar), находящийся в Калифорнии, позволяет проводить высокоточное изучение поверхности кратеров. Лунные аппараты ЛРО и ЛКРОСС были первым масштабным шагом НАСА в рамках новой лунной программы США «Созвездие» (Constellation). С помощью ЛРО ученые составили карту радиоактивности лунной поверхности и осуществили поиск источников водных ресурсов на Луне.

В январе 2013 г. был осуществлен запуск китайского космического спутника «Чанг-3» с мягкой посадкой на лунную поверхность спускаемого аппарата «Ютюровер» (Yutu rover). В будущем планируется и высадка человека на Луну, и, как итог, создание к 2030 г. обитаемой лунной базы. Она будет использоваться для запуска пилотируемых космических аппаратов к другим планетам, и первой такой планетой должен стать Марс.

Важными источниками информации о параметрах динамической фигуры Луны, несомненно, стали космические миссии «Клементина» и «Лунар Проспектор». Они на десятилетие вперед обеспечили ученых новейшими данными о структуре гравитационного поля Луны с разрешением порядка более 100 [7–9], о свойствах упругости лунного тела, а также обозначили проблемы интерпретации обнаруженных гравитационных аномалий на обратной стороне Луны и их отождествлении топографическими особенностями. Многие проблемы в этом плане удалось решить японской миссии «СЕЛЕНЕ (Кагуя)» [10–12], которая обеспечила получение высокоточной топографической информации обо всей лунной поверхности, включая ранее недоступные области обратной стороны и краевой зоны Луны. На основе данных наблюдений «Кагуя» была построена карта гравитационного поля с разрешением более 300 гармоник и было уточнено значение коэффициента упругости Лява k_2 [13]. Исследования, проведенные с помощью серии китайских спутников «Чанг» [4] и индийских «Чандраан» [1], позволили получить новые данные о геохимическом составе коры и подповерхностных слоёв Луны, её гравитационном поле, масконах, свойствах приповерхностного и окололунного пространств.

Имеются планы на исследование Луны в российских программах [14]. В 2014–2016 гг. будут осуществлены две экспедиции: российская «Луна-Глоб» и российско-индийская «Луна-Ресурс». Программы предусматривают изучение полюсов Луны на предмет наличия там воды и условий размещения обитаемых баз, а также доставку с неё на Землю воды и других летучих веществ в течение этого десятилетия. Этот запуск ознаменует собой «возвращение России на Луну» и откроет широкие перспективы её дальнейших исследований. В рамках программ предполагается посадка на лунную поверхность луноходов нового поколения для отбора образцов пород из наиболее интересных районов, сопровождаемая в дальнейшем их доставкой на землю возвратной ракетой. Результаты исследования Луны покажут,

сколько воды есть на спутнике Земли. Если воды там окажется много, то это позволит планировать строительство на естественном спутнике Земли баз и структур для добычи полезных ископаемых, что, в свою очередь, ознаменует новую эру в изучении космоса [15, 16].

Современные космические технологии предъявляют особые требования к результатам координатно-временного обеспечения [17]. Это в полной мере относится к установлению взаимной ориентации динамической и инерциальной систем координат, к реализации динамических систем отсчета, отнесенных к центру её масс, к изучению динамики и кинематики небесных тел [18]. Большое значение имеет также разработка точной теории вращения Луны, как с целью получения расчетных параметров для эффективной навигации и прилунения посадочных модулей, так и для компьютерного моделирования планируемых экспериментов [19].

Исследования вращения и фигуры Луны по гелиометрическим наблюдениям начаты в Казани более ста лет назад. Следует отметить, что до 1959 г. селенодезические задачи решались исключительно астрономическими методами по измерениям, выполненным с помощью наземных телескопов. Запуски к Луне советских и американских космических аппаратов серий «Луна», «Зонд», «Лунар Орбитер» и «Аполлон» открыли возможности проведения селенодезических измерений в окололунном космическом пространстве и непосредственно на поверхности Луны.

С 1908 г. после переноса гелиометра в загородную обсерваторию эти исследования стали проводиться в Астрономической обсерватории им. В.П. Эгельгардта (АОЭ). Поэтому в предлагаемом обзоре рассматривается также развитие позиционных наблюдений Луны в АОЭ и в городской астрономической обсерватории при Казанском университете: это и покрытия звезд Луной, и наблюдения с поверхности Луны, а также другие аспекты селенодезии и динамики Луны.

1. Наземные и космические наблюдения Луны

В Казанском университете наземные позиционные наблюдения Луны проводились для решения трех задач:

- изучение вращения Луны (физической либрации);
- определение селенодезических координат лунных кратеров;
- установление равномерной шкалы эфемеридного времени.

В XX столетии одной из актуальных задач астрономии и геодинамики стало изучение неравномерности вращения Земли и установления равномерной шкалы эфемеридного времени. С целью освоения Луны ракетно-космической техникой необходимо было иметь картографическое обеспечение поверхности её видимой стороны – это задача определения селенодезических координат лунных объектов. Решению данной задачи с помощью наземных наблюдений наиболее соответствуют крупномасштабные снимки Луны со звездами. Впервые в практике астрофотографии крупномасштабные снимки Луны со звездами были получены в АОЭ на горизонтальном телескопе Н.Г. Ризвановым [20]. Для этого телескоп был соответствующим образом модернизирован, и с его помощью было выполнено несколько десятков наблюдений. На основе наблюдений был решен ряд селенодезических задач. Впервые в селенодезии построен каталог селеноцентрических координат 264 кратеров путем привязки к звездам, то есть «абсолютным методом» [21], выполнен цикл работ по изучению фигуры краевой (либрационной) зоны Луны [22], построены карты краевой зоны Луны, приведенные к центру её масс [23]. Произведено определение ориентировки эллипсоида инерции Луны [24]. Построен каталог селенодезических положений 120 кратеров на основе координат 10 кратеров, определенных по измерениям на гелиометре относительно звезд [25] и, как итог, построен каталог 1162 селеноцентрических динамических координат лунных объектов [26]. Каталог

«Казань» создан на основе крупномасштабных снимков Луны со звездами, включает опорные точки, равномерно покрывающие всю видимую поверхность Луны. Описанные исследования актуальны по той причине, что в настоящее время в мире не существует аналога казанской опорной сети кратеров на поверхности Луны, во-первых, равномерно покрывающей всю видимую часть лунного диска и, во-вторых, построенной в небесной системе координат.

Если, например, говорить о наблюдениях, выполненных с бортов космических кораблей миссии «Аполлон», то эти измерения производились в поясе по широте от -20° до $+40^\circ$, соответственно, каталог координат лунных кратеров по этим данным охватывает лишь ограниченную зону. Вместе с тем крупномасштабные снимки Луны со звездами позволяют исследовать рельеф видимой стороны лунной поверхности по широте от -70° до $+70^\circ$. Абсолютные высоты кратеров в каталогах «Аполлон» и «Казань» отнесены к центру масс Луны. Оси координат в каталоге «Казань» ориентированы вдоль главных осей инерции Луны с учетом постоянных членов в разложениях физической либрации Луны по долготе, в наклонности и узле ($\Delta\tau$, $\Delta\rho$, $\Delta\sigma$). Оси же координат каталога положений кратеров по данным космического корабля «Аполлон-15» ориентированы вдоль главных осей инерции Луны без учета этих членов. Иначе говоря, каталог «Казань» реализует динамическую селеноцентрическую систему координат, а каталог «Аполлон» – квазидинамическую систему координат [27].

Эстафету казанских селенографических исследований в новом столетии подхватили молодые исследователи. Н.Ю. Варакина под руководством Ю.А. Нефедьева разработала метод расширения и сгущения селеноцентрических динамических систем координат с использованием робастных подходов [28], что позволило, используя казанскую опорную сеть 1162 лунных объектов, построить глобальную селеноцентрическую динамическую систему лунных объектов и провести её анализ. 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 С.Г. Валева [29] для западного полушария Луны. Для того чтобы осуществить процедуру сгущения и распространения системы «Казань-1162», был разработан специальный программный модуль в среде SharpDevelop 3.2 на языке C Sharp, используя современные программные технологии под OS Windows, такие как PLO, NET и Windows Forms, с помощью которых для двух селенографических систем S1 и S2 было произведено отождествление общих точек, селенографические координаты ξ , η , ζ которых не превышали по модулю значений 0.001, 0.001, 0.002 лунного радиуса соответственно.

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

$$\mathbf{A} \times \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{Z}, \quad (1)$$

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 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\Delta\hat{\xi}, \Delta\hat{\eta}, \Delta\hat{\zeta})$ определяется в виде

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

а их ошибки – 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.

Результатом 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 главных осей инерции.

Таким образом, в динамической системе координат была построена опорная сеть, содержащая 282215 объектов [30]. Сравнение опорных точек лунной поверхности всех включенных в обработку трансформированных каталогов с данными каталога «Казань-1162» показало, что в пределах точности наблюдений их оси приблизительно одинаково ориентированы относительно базового каталога «Казань», что подтверждает факт построения Н.Ю. Вараксиной селеноцентрической опорной сети, близкой к динамической системе.

2. Модели макрофигуры Луны

Астрономами Казанского университета были выполнены оригинальные исследования геометрии Луны – макрофигуры по наземным и космическим наблюдениям.

Начало данным исследованиям в Казани положил А.А. Нефедьев. На основе 5630 высот в краевой зоне, определенных по гелиометрическим измерениям, А.А. Нефедьев [31] построил карты краевой зоны Луны с учетом либрационного эффекта в радиусе Луны. В этой фундаментальной работе дано решение вопроса о нулевой поверхности, от которой должны отсчитываться высоты на Луне. В работе Ю.А. Нефедьева, А.И. Нефедьева, В.С. Боровских [32] произведено уточнение этих карт рельефа краевой зоны Луны, учтен макрорельеф Луны по второй модели Яковкина. Итогом указанных исследований стало построение Л.И. Рахимовым [23] карт краевой зоны Луны по данным измерений свыше 40000 точек лимба на 127 крупномасштабных снимках Луны со звездами. Оригинальность данной работы заключалась в том, что впервые в практике селенодезии были созданы карты краевой зоны Луны, приведенные к центру её масс. Карты Л.И. Рахимова были переведены в цифровой вид, и разработан метод интерполяции высотных данных с этих карт с учетом веса получаемых данных [33].

Необходимо упомянуть и работу К.С. Шакирова [34] по определению постоянных физической либрации Луны (ФЛЛ) и координат кратера Местинг А по отношению к центру масс Луны. Им были обработаны 89 меридианных наблюдений кратера Местинг А, выполненных в Гринвиче с 1952 по 1954 г., и наряду с параметрами ФЛЛ получены пространственные координаты кратера Местинг А относительно центра фигуры Луны. К.С. Шакиров впервые в мире показал, что центр масс Луны расположен на 3.3 км ближе к Земле относительно центра её фигуры. В дальнейшем эти исследования были продолжены группой Н.Г. Ризванова [35]: было проведено всестороннее исследование проблемы фигуры Луны по данным наземных и новых космических экспериментов – «Галилео», «Клементина», «Лунар Проспектор» и др.

Наиболее полно на данный момент проблема построения макрофигуры Луны решена в работе Ю.А. Нефедьева, Н.Ю. Вараксиной и др. [36], посвященной вопросам, связанным с анализом динамической и геометрической фигур Луны. Исследование заключалось в анализе систем координат селенографических каталогов и космических миссий на основе анализа взаимного положения лунного центра фигуры и её центра масс. Отмечено, что в настоящее время все данные по лунной топографии можно разделить на два типа. С одной стороны, 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 описывает с достаточной точностью лунный рельеф. При этом координатные системы двух типов данных имеют разные начала и разную ориентацию координатных осей. Кроме того, 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. В настоящее время не существует опорной динамической селеноцентрической системы координат, полученной на основе космических наблюдений и покрывающей достаточную площадь на лунной поверхности. И поэтому, несмотря на хорошую 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 согласования разнотипных данных нами использовался метод гармонического анализа на основе разложения топографических данных по сферическим функциям. Для построения моделей макрорельефа Луны использовались следующие источники топографической информации: данные космических миссий «Клементина» и «Кагуя», данные наземных каталогов «Казань-1162», «Киев 4900» [37], каталог ГАИШ [38], данные исследований Биллза и Феррари [39], опорная сеть ULCN [40]. 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 регрессионной модели [41]:

$$R(\lambda_i, \varphi_i) = F(\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}, \bar{P}_{nm}) + \varepsilon, \quad (2)$$

где λ , φ – (широта, долгота) известные координаты лунных объектов; \bar{C}_{nm} , \bar{S}_{nm} – нормированные амплитуды гармоник; \bar{P}_{nm} – нормированные присоединённые функции Лежандра; ε – случайная ошибка регрессии. Решение переопределенной системы (2) для разных источников гипсометрической информации осуществлялось в рамках подхода регрессионного моделирования, предусматривающего в дополнение к обычным этапам – постулированию модели (2) и оцениванию амплитуд $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ – 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 (2) для отдельных участков сферы (полусферы и пр.) бывает затруднительным из-за мультиколлинеарности коэффициентов разложения, поэтому был использован способ оценивания амплитуд модели (2) путем предварительного расширения сегмента до полной сферы, что позволило полностью устранить эффект мультиколлинеарности. Затем шумовые гармоники удалялись пошаговой регрессией. В результате были получены координаты центра фигуры Луны относительно её центра масс для разных источников топографической информации. Параметры смещения положений центра масс Луны относительно её геометрического центра по осям селеноцентрической прямоугольной системы координат приведены в табл. 1.

На основе полученных данных можно с уверенностью сделать вывод, что каталог «Казань-1162» для видимой стороны Луны, приведенный к центру масс и к

Табл. 1

Координаты центра фигуры Луны относительно центра масс для пяти источников гравиметрической информации, км

Смещение координат центра масс относительно центра фигуры Луны	Клементина	Киев	Казань 1162 + Клементина	Киев + Клементина
$\Delta\xi$	-1.8	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

главным осям инерции Луны, при совместном использовании объектов вне зоны его охвата из списка данных макрорельефа миссии «Клементина» имеет наиболее близкое согласие с результатами последних космических миссий «Клементина» и «Кагуя».

3. Интерпретация космических экспериментов по изучению лунного гравитационного поля и наблюдений с поверхности Луны

Цикл работ по определению параметров селенопотенциала по данным слежения за низкими искусственными спутниками Луны выполнен Р.А. Кащеевым [42]. С начала 80-х годов XX в. в области космической геодезии начали разрабатываться новые методы изучения гравитационного поля Земли, опирающиеся на дифференциальные наблюдения в спутниковых системах с изменяемой геометрией расположения элементов: методы межспутникового слежения и спутниковой градиентометрии. Указанная и другие работы Р.А. Кащеева посвящены исследованиям возможностей применения указанных методов для изучения гравитационных полей Луны и других небесных тел. Им разработаны методы и выполнены многочисленные имитационные эксперименты, имеющие целью установление оптимальных условий определения параметров гравитационных полей Земли, Луны и Марса по данным межспутникового слежения и спутниковой градиентометрии.

Результаты реализуемых в настоящее время на околоземной орбите космических программ межспутникового слежения CHAMP (Gravity and Magnetic Field Mission) и GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) убедительно демонстрируют достоинства дифференциальных методов измерений при построении моделей геопотенциала высокой точности и разрешения. Заметим, что уже достигнутые оперативность и точность решения этой задачи позволяют обсуждать возможности изучения изменений гравитационного поля и фигуры Земли с течением времени. Сегодня предмет научных интересов Р.А. Кащеева составляют исследования перспектив применения новейших спутниковых методов и технологий для изучения геодинамических явлений, а также фигур и гравитационных полей Луны и других небесных тел.

В статье [19] отмечается, что методы структурного анализа внутреннего строения, разработанные для Земли, могут быть успешно использованы и для Луны, но необходимость принимать во внимание резонансный характер её орбитально-вращательного движения существенно усложняет математическое описание этих процессов. В связи с этим представляется весьма важным и необходимым построение аналитической и/или полуаналитической теории для спин-орбитального движения Луны. Эта теория должна быть пригодна для уточнений соответствующих параметров гравитационного поля, характеристик резонансных либраций, чисел Лява, коэффициента добротности Q , вязкости мантии и ядра, характеризующих внутреннюю диссипацию, характеристики пограничной зоны «мантия – ядро»

и другие величины, определяющие внутреннюю и внешнюю структуры спутника. Все это даст возможность получить точное решение, аналогичное прецессионно-нутаационным рядам, описывающим вращение Земли. Такая теория физической либрации Луны может быть положена в основу лунного астрономического ежегодника.

4. Наблюдения покрытий звезд Луной

Наблюдения покрытий звезд Луной визуальным, а затем фотоэлектрическим методом проводились и проводятся во многих астрономических обсерваториях мира, в том числе и в АОЭ, включая наблюдения для определения диаметров звезд. Регистрация моментов покрытий звезд Луной является традиционной темой АОЭ. До 1982 г. наблюдения проводились визуально. Рядом сотрудников были получены длительные ряды наблюдений. Результаты опубликованы в основном в изданиях АОЭ, в Информационных сообщениях Астрометрической комиссии Астросовета АН СССР, в Информационных сообщениях о покрытиях звезд и планет Луной, издаваемых Астрономической обсерваторией Киевского университета.

С 1982 г. регистрация моментов покрытий звезд Луной стала производиться фотоэлектрическим методом. В.Б. Капковым и Р.Р. Шаймухаметовым [43, 44] получено 63 регистрограммы моментов покрытий звезд Луной и одно покрытие звезды астероидом Паллада. Для 12 звезд определены их диаметры [45, 46].

К настоящему времени группой ученых под руководством Ю.А. Нефедьева создана полная мировая база покрытий, насчитывающая 405835 наблюдений, и произведена их редукция. На основе этой базы данных покрытий произведен анализ динамической системы координат относительно инерциальной и получены углы смещения и скорости вращения этих систем друг относительно друга. В работе [47] выполнен анализ современных каталогов звездных положений и произведено исследование ориентации и положения нуля-пункта космического каталога Hipparcos на основе нового метода редукции наблюдений покрытий звезд Луной. С этой целью была построена база данных 430322 таких наблюдений в цифровом формате [48]. База уникальна, не имеет аналогов в мире. На её основе было произведено исследование динамической системы координат относительно инерциальной, задаваемой каталогом звездных положений Hipparcos. В результате получены параметры смещения и скорости поворота этих систем друг относительно друга

$$\varepsilon_x = (30 \pm 24) \cdot 10^{-4} \text{ угл. сек,}$$

$$\varepsilon_y = (-11 \pm 12) \cdot 10^{-4} \text{ угл. сек,}$$

$$\varepsilon_z = (16 \pm 27) \cdot 10^{-4} \text{ угл. сек,}$$

$$\omega_x = (7 \pm 10) \cdot 10^{-4} \text{ угл. сек/сут,}$$

$$\omega_y = (-14 \pm 19) \cdot 10^{-4} \text{ угл. сек/сут,}$$

$$\omega_z = (-12 \pm 26) \cdot 10^{-4} \text{ угл. сек/сут,}$$

$$\Delta = (74 \pm 48) \cdot 10^{-3} \text{ угл. сек,} \quad \Delta D = (45 \pm 19) \cdot 10^{-3} \text{ угл. сек,}$$

$$\Delta L = (41 \pm 38) \cdot 10^{-3} \text{ угл. сек,} \quad \Delta \varepsilon = (50 \pm 41) \cdot 10^{-4} \text{ угл. сек,}$$

где ε_x , ε_y , ε_z – углы поворота каталога Hipparcos относительно осей x , y , z динамической системы координат, ω_x , ω_y , ω_z – скорости изменения углов ε_x , ε_y , ε_z , Δ , ΔD – поправки к равноденствию и положению экватора каталога, ΔL , $\Delta \varepsilon$ – поправки долготы Луны и наклона эклиптики к экватору.

Заключение

Исследования в области селенодезии являются традиционными для казанской школы астрономии [49]. Представленный обзор исследований и полученных результатов подтверждает, что лунная школа в Казани продолжает плодотворно развиваться.

Основной акцент в современных исследованиях сделан на работы по трансформации поверхности отсчета селенографических данных, полученных с помощью космических миссий («Клементина», «Кагуя» и др.) с целью построения карт лунной поверхности в динамической системе координат.

В настоящее время во многих лунных исследованиях принимают участие молодые ученые, и это является гарантом сохранения традиций селенодезической школы Казани и в будущем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 13-02-00792_а, 12-02-97000_рег_а, 14-02-31296_мол_а).

Summary

Yu.A. Nefedev, N.K. Petrova, N.Yu. Varaksina, S.A. Demin, R.R. Zabbarova. Lunar Studies at Kazan University: Trends, Results and Prospects. II. Selenography.

The article discusses the development of contemporary selenographical studies at Kazan Federal University. The issues under consideration are related to the positional and satellite observations of the Moon, the investigations of its geometric and dynamic characteristics, the lunar gravitational field and the morphology of the objects on the Moon's surface.

Keywords: selenocentric coordinate system, positional and satellite observations of the Moon, selenopotential, dynamic figure.

Литература

1. *Kirk R.L., Archinal B.A., Gaddis L.R., Rosiek M.R.* Cartography for lunar exploration: 2008 status and mission plans // The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Beijing, 2008. – V. 37, Pt. B4. – P. 1473–1490.
2. *Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A., Lemoine F.G.* The topography of the Moon from the Clementine lidar // J. Geophys. Res. – 1997. – V. 102, No E1. – P. 1591–1611.
3. *Noda H., Araki H., Goossens S., Ishihara Y., Matsumoto K., Tazawa S., Kawano N., Sasaki S.* Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA (SELENE) laser altimeter // Geophys. Res. Lett. – 2008. – V. 35, No 24. – Art. L24203, P. 1–5.
4. *Li C.L., Ren X., Liu J.J., Zou X.D., Mu L.L., Wang J.Y., Shu R., Zou Y.L., Zhang H.B., Lu C., Liu J.Z., Zuo W., Su Y., Wen W.B., Bian W., Wang M., Xu C., Kong D.Q., Wang X.Q., Wang F., Geng L., Zhang Z.B., Zheng L., Zhu X.Y., Li J.D., Ouyang Z.Y.* Laser altimetry data of Chang'E-1 and the global lunar DEM model // Science China Earth Sci. – 2010. – V. 53, No 11. – P. 1582–1593.
5. *Wieczorek M.A., Joliff B.L., Pritchard M.E., Weiss B.P., Williams J.G., Hood L.L., Richter K., Nea C.R., Shearer C.K., McCallum I.S., Tompkins S., Hawke B.R., Peterson C., Gillis J.J., Bussey B.* The constitution and structure of the lunar interior // Rev. Mineral Geochem. – 2006. – V. 60, No 1. – P. 221–364.
6. *Williams B.G., Mottinger N.L.* Venus gravity field: Pioneer Venus orbiter navigation results // Icarus. – 1983. – V. 56, No 3. – P. 578–589.
7. *Lemoine F.G.R., Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A., Rowlands D.D.* A 70th degree lunar gravity model (GLGM-2) from Clementine and other tracking data // J. Geophys. Res. Planets. – 1997. – V. 102, No E7. – P. 16339–16359.

8. *Konopliv A.S., Binder A.B., Hood L.L., Kucinskas A.B., Sjogren W.L., Williams J.G.* Improved gravity field of the Moon from Lunar Prospector // *Science*. – 1998. – V. 281, No 5382. – P. 1476–1480.
9. *Konopliv A.S., Asmar S.W., Garranza E., Sjogren W.L., Yuan D.N.* Recent gravity models as a result of the Lunar Prospector mission // *Icarus*. – 2001. – V. 150, No 1. – P. 1–18.
10. *Kato M., Takizawa Y., Susaki S.* The SELENE mission: present status and science goals // *Lunar Planet. Sci.* – Houston: Lunar and Planetary Institute, 2007. – V. XXXVIII. – Abstr. No 1211.
11. *Matsumoto K., Kikuchi F., Iwata T., Kono Y., Tsuruta S., Hanada H., Goossens S., Ishihara Y., Kamata S., Sasaki S.* VLBI radio sources on a lander and an orbiter for study of lunar internal structure proposed for SELENE-2 mission // *Int. Astr. Congr. Proc. “Astrokazan-2011”*. – Kazan, Russia, 2011. – P. 6–11.
12. *Namiki N., Iwata T., Matsumoto K., Hanada H., Noda H., Goossens S., Ogawa M., Kawano N., Asari K., Tsuruta S.I., Ishihara Y., Liu Q., Kikuchi F., Ishikawa T., Sasaki S., Aoshima C., Kurosawa K., Sugita S., Takano T.* Farside gravity field of the Moon from four-way Doppler measurements of SELENE (Kaguya) // *Science*. – 2009. – V. 323, No 5916. – P. 900–905.
13. *Goossens S., Matsumoto K., Liu Q., Kikuchi F., Sato K., Hanada H., Ishihara Y., Noda H., Kawano N., Namiki N., Iwata T., Lemoine F.G., Rowlands D.D., Harada Y., Chen M.* Lunar gravity field determination using SELENE same-beam differential VLBI tracking data // *J. Geodesy*. – 2011. – V. 85, No 4. – P. 205–228.
14. *Zelenyi L.M., Zakharov A.V., Zakutnyaya O.V.* Will the Lunar Renaissance Come Forth? // *Solar System Res.* – 2011. – V. 45, No 7. – P. 697–704.
15. *Galimov E.M., Polishchuk G.M., Sevastianov N.N.* Objectives and Facilities of Lunar Exploration by Russia // *Proc. of 8th ILEWG Conf. on Exploration and Utilization of the Moon*. – Beijing, China, 2006. – P. 15–16.
16. *Shevchenko V.V.* New view on the Moon // *Int. Astr. Congr. Proc. “Astrokazan 2011”*. – Kazan, Russia, 2011. – P. 12–21.
17. *Нефедьев Ю.А.* Разработка моделей независимых селенодезических сетей, методов анализа звездных координатных систем и фигур небесных тел: Дис. ... д-ра физ.-матем. наук. – М., 2007. – С. 1–393.
18. *Нефедьев Ю.А.* Теория и практика покрытий звезд Луной. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2003. – 110 с.
19. *Петрова Н.Ю., Нефедьев Ю.А., Дёмин С.А., Гусев А.В.* Лунные исследования в Казанском университете: тенденции, результаты, перспективы. I. Физическая либрация // *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки*. – 2013. – Т. 155, кн. 3. – С. 19–35.
20. *Risvanov N.G.* Photographic observations of the Moon with long-focus telescope // *New Techniques in Astronomy*. – N. Y.: Gordon and Breach Sci. Pub., 1971. – P. 35–36.
21. *Habibullin Sh.T., Risvanov N.G.* Independent selenocentric system of coordinates by large-scale star-calibrated lunar photography // *Earth, Moon, Planets*. – 1984. – V. 30, No 1. – P. 1–19.
22. *Habibullin Sh.T., Rahimov L.I., Risvanov N.G.* Coordinates of center of the figure of lunar marginal zone // *Earth, Moon Planets*. – 1984. – V. 30, No 1. – P. 21–30.
23. *Рахимов Л.И.* Карты рельефа краевой зоны Луны в системе фундаментального каталога звезд // *Изв. АОЭ*. – 1993. – № 57. – С. 69–113.

24. *Ризванов Н.Г., Щужин Е.М.* Ориентировка осей инерции Луны с помощью наблюдений // Письма в Астрон. журн. – 1984. – Т. 10, № 2. – С. 138–142.
25. *Нефедьев Ю.А., Щужин Е.М.* Каталог 120 кратеров на поверхности Луны. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1985. – 11 с. – Деп. в ВИНТИ 01.06.1985. № 4697.
26. *Нефедьев Ю.А.* Каталог 1000 селеноцентрических объектов по крупномасштабным снимкам Луны со звездами // Труды Междунар. конф. «Околосемная астрономия – 2005». – Казань: Казан. гос. ун-т, 2006. – С. 315–319.
27. *Nefedyev Y.A., Valeev S.G., Mikeev R.R., Andreeva A.O., Varaksina N.Y.* Analysis of data of “Clementine” and “Kaguya” missions and “ULCN” and “KSC-1162” catalogues // Adv. Space Res. – 2012. – V. 50, No 11. – P. 1564–1569.
28. *Нефедьев Ю.А., Валеев С.Г., Шарафутдинов И.М., Вараксина Н.Ю.* Селеноцентрическая координатная сеть, построенная в системе каталога КСК-1162 // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2011. – Т. 153, кн. 2. – С. 150–158.
29. *Valeev S.G.* Coordinates of the Moon reverse side sector objects // Earth, Moon, Planets. – 1986. – V. 34, No 3. – P. 251–271.
30. *Вараксина Н.Ю., Валеев С.Г., Нефедьев Ю.А.* Каталог селеноцентрических опорных точек (КСОТ). – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2013. – 5464 с.
31. *Нефедьев А.А.* Карты рельефа краевой зоны Луны на общем нулевом уровне // Изв. АОЭ. – 1958. – № 30. – С. 1–149.
32. *Нефедьев Ю.А., Нефедьев А.А., Боровских В.С.* Карты краевой зоны Луны, построенные с учетом макрорельефа Луны // Изв. АОЭ. – 1990. – № 55. – С. 69–114.
33. *Nefedjev Yu.A., Rizvanov N.G.* The results of an accurate analysis of EAO charts of the Moon marginal zone constructed on the basis of lunar occultations // Astronomische Nachrichten. – 2002. – V. 323, No 2. – P. 135–138.
34. *Шакиров К.С.* Определение постоянных физической либрации Луны и координат Местинга А по отношению к центру масс Луны // Изв. АОЭ. – 1963. – № 34. – С. 39–59.
35. *Rizvanov N, Gusev A., Petrova N.* Modern advances and problems in the investigations of the lunar figure // Proc. of Int. Conf. “Geometrization of Physics IV”. – Kazan, Russia, 1999. – P. 95–106.
36. *Валеев С.Г., Микеев Р.Р., Вараксина Н.Ю., Нефедьев Ю.А.* Параметры положения центра масс Луны относительно центра ее фигуры на основе данных космических миссий Clementine, Kaguya и каталога ULCN // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2011. – Т. 153, кн. 2. – С. 158–163.
37. *Гаврилов И.В., Кислюк В.С., Дума А.С.* Сводная система селенодезических координат 4900 точек лунной поверхности. – Киев: Наукова думка, 1977. – 172 с.
38. *Липский Ю.Н., Никитов В.А., Скобелева Т.П.* Единая система селенодезических координат из девяти каталогов на видимом полушарии Луны. – М.: Наука, 1973. – 384 с.
39. *Bills B.* A harmonic analysis of lunar topography // Icarus. – 1977. – V. 31, No 2. – P. 244–259.
40. *Archinal B.A., Rosiek M.R., Kirk R.L., Redding B.L.* The Unified Lunar Control Network 2005. Open-File Report 2006-1367 – Version 1.0. – Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2006. – 21 p.
41. *Валеев С.Г.* Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. – Казань: ФЭН, 2001. – 296 с.

42. *Кащеев Р.А.* Определение параметров селенопотенциала по данным слежения за низкими ИСЛ: Автореф. дис. ... канд. физ.-матем. наук. – Казань, 1984. – 12 с.
43. *Капков В.Б.* О наблюдении покрытия звезды AGC 3+181844 малой планетой Паллада 4 мая 1983 г. // Письма в Астрон. журн. – 1983. – Т. 10, № 1. – С. 67–70.
44. *Шаймухаметов Р.Р.* Фотоэлектрические наблюдения покрытий звезд Луной в Казани // Селенодезия и динамика Луны. – Киев: Наукова думка, 1990. – С. 148–151.
45. *Капков В.Б., Сулейманов В.Ф., Шаймухаметов Р.Р.* Угловые диаметры звезд, полученные из анализа фотоэлектрических покрытий // Письма в Астрон. журн. – 1990. – Т. 16, № 2. – С. 160–162.
46. *Shaymukhametov R.R., Rizvanov N.G.* Photoelectric observations of lunar occultation at Engelhard Astronomical Observatory // Astron. J. – 1998. – V. 116, No 3. – P. 1504–1507.
47. *Нефедьев Ю.А., Вараксина Н.Ю., Чуркин К.О., Заббарова Р.Р., Андреев А.О.* Новый метод исследования современных звездных каталогов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2013. – Т. 155, кн. 1. – С. 188–194.
48. *Nefedyev Yu., Varaksina N., Kutlenkov M., Churkin K.* The building of the occultation observations base // European Planetary Science Congress 2011, EPSC-DPS Joint Meeting, La Cite Internationale des Congres Nantes Metropole. – Nantes, France, 2011. – V. 6. – P. EPSC-DPS2011-135.
49. *Нефедьев Ю.А., Ризванов Н.Г., Кибардина М.И.* Исследования по селенодезии и динамике Луны в Казани // Астрон. вестн. – 2007. – Т. 41, № 2. – С. 154–164.

Поступила в редакцию
16.01.14

Нефедьев Юрий Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной физики и МФП, директор Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: star1955@mail.ru

Петрова Наталья Константиновна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: nk_petrova@mail.ru

Вараксина Наталья Юрьевна – кандидат физико-математических наук, ассистент, младший научный сотрудник Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: vnu_357@mail.ru

Дёмин Сергей Анатольевич – старший преподаватель кафедры вычислительной физики и МФП, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: serge_demin@mail.ru

Заббарова Регина Рустемовна – инженер Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: zregr22@rambler.ru