

УДК 523.34

**СЕЛЕНОЦЕНТРИЧЕСКАЯ КООРДИНАТНАЯ СЕТЬ,
ПОСТРОЕННАЯ В СИСТЕМЕ КАТАЛОГА КСК-1162***Ю.А. Нефедьев, С.Г. Валеев, И.М. Шарафутдинов, Н.Ю. Вараксина***Аннотация**

В работе решается задача по созданию селеноцентрической опорной сети, направление осей координат которой идентично направлению осей инерции Луны, а центр координатной системы совпадает с лунным центром масс. На основе существующих 12 космических и наземных селенодезических каталогов проведено сгущение селеноцентрической системы КСК-1162 с целью построения сводной опорной сети и выполнен ее перспективный анализ. Впервые в мировой практике построен селеноцентрический сводный каталог, охватывающий видимую и обратную стороны Луны.

Ключевые слова: опорная селеноцентрическая сеть, инерциальная система координат, космические миссии, селеноцентрические каталоги.

Введение

В настоящее время Луна является объектом исследований многих космических экспериментов и центром пристального внимания ученых в области астрономии, так и планетологии [1]. Современные космические миссии CLEMENTINE и Lunar Prospector стремительно и качественно изменили ситуацию в исследовании Луны, обозначили перспективы в ее промышленном и робототехническом освоении, создании долговременных обитаемых лунных баз. Развитие таких космических технологий предъявляет особые требования к результатам координатно-временного обеспечения, включающего в себя реализацию систем отсчета, установления взаимной ориентации инерциальной и динамической систем координат, исследования динамики и геометрии небесных тел. Это в полной мере касается динамических и геометрических параметров Луны, отнесенных к центру ее масс. Однако, несмотря на выдающиеся результаты в данном направлении, полученные на основе данных наблюдений космических миссий «Аполлон», «Зонд-6» и «Зонд-8», задача создания глобальной селеноцентрической опорной сети до сих пор окончательно не решена. Например, для трансформирования топографических координат миссии «Аполлон» использовались три станции ALSEP. Поскольку среднеквадратичные ошибки трансформации оказались менее 80 м и ошибка измерений – около 60 м, можно считать, что точки вблизи и в области между тремя станциями ALSEP имеют ошибки положения менее чем 150 м, но смещение от места расположения станций ALSEP по поверхности лунного шара увеличивает предполагаемую плановую ошибку до 300 м и даже может превышать 1000 м. Учитывая ограниченность по размерам на лунной поверхности треугольника, образованного станциями ALSEP, говорить о глобальной опорной сети, созданной на основе этой системы, не представляется возможным. Таким образом, продолжение исследований в данной области является актуальным и востребованным современной селенодезией и космической астрометрией.

В настоящей работе построена селеноцентрическая опорная сеть на основе трансформации координат лунных объектов, входящих в 12 современных космических и наземных каталогов, в систему каталога КСК-1162 (Каталог селеноцентрических координат), построенного в Казанском университете.

1. Система КСК-1162

Опорная селеноцентрическая сеть КСК-1162 на поверхности Луны была создана на основе крупномасштабных снимков Луны со звездами, полученных уникальным методом отдельных пластинок, не имеющих аналогов в мировой практике [1]. В отличие от методов обработки снимков Луны без звезд, в случае привязки к звездам мы имеем абсолютное определение ориентации, нуля-пункта системы координат и ее масштаба. При выборе лунных кратеров, входящих в опорную сеть КСК-1162 использовались следующие критерии: 1) брались кратеры по возможности правильной округлой формы; 2) эти кратеры должны были иметь небольшие размеры; 3) выбранные объекты должны быть хорошо наблюдаемыми и 4) кратеры сети в основном должны были входить в списки объектов других известных селеноцентрических каталогов и удовлетворять рекомендациям МАС. Искомые параметры находились из $2m$ уравнений поправок вида

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

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

Решение относительно искомых параметров $\hat{\Theta}(\hat{\Delta\xi}, \hat{\Delta\eta}, \hat{\Delta\zeta})$ есть:

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

а их ошибки определяются ковариационной матрицей:

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

где \mathbf{V} – вектор остаточных уклонений, \mathbf{P} – диагональная весовая матрица. Анализ каталога КСК-1162 показал, что он наиболее полно удовлетворяет следующим требованиям: включает достаточное количество опорных точек для обеспечения возможности исследования фигуры Луны и осуществления точной привязки к ним; содержит объекты с координатами, отнесенными к эфемеридному центру масс Луны, а также покрывающие достаточно большую область поверхности Луны; точность достигает ± 40 м в плановых координатах и в среднем ± 80 м по высоте.

2. Метод сгущения и расширения опорной координатной системы КСК-1162

Целью исследований является повышение точности сгущения и расширения селеноцентрической контрольной системы (СКС) на основе оптимальных координатных преобразований. В настоящее время практически приемлемым путем распространения известного каталога селеноцентрических координат 1162 (КСК-1162), созданного в Казани [1] в системе с центром масс и осями, совпадающими с осями инерции Луны, на большую часть поверхности Луны или при определенных условиях на всю ее сферу является применение матриц трансформации координат. Элементы матрицы и вектора смещения можно получить по общим точкам для КСК-1162 и преобразуемого в его систему того или иного каталога.

При расширении КСК-1162 (система \mathbf{X}) основной является проблема прецизионного определения элементов матрицы ориентации и вектора смещения начал при переходе из системы координат \mathbf{Y} в другую по общим точкам:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{Y} + \mathbf{X}_0, \quad (1)$$

где \mathbf{A} – матрица ориентации, \mathbf{X}_0 – вектор смещения начала координат системы \mathbf{Y} по отношению к нуль-пункту системы координат \mathbf{X} . Актуальность точного решения задачи особенно возрастает при экстраполяции координат. В нашем случае это особенно важно, так как объекты обратной стороны Луны находятся вне множества опорных точек. Достижение максимально высокой точности трансформации координат (ТК) обеспечивается решением следующих задач.

1. Обоснование применимости адаптивного регрессионного моделирования (АРМ-подхода), предусматривающего при формировании модели (1):

- оценку качества модели ТК;
- диагностику соблюдения условий применения вычислительной схемы МНК (в частном случае, условий Гаусса – Маркова);

- численную адаптацию к существенному нарушению того или иного условия.

2. Разработка методики применения АРМ-подхода, включающей в себя:

- критерии точности перехода;
- набор конкурирующих математических моделей ТК;
- соответствующее множество методов структурно-параметрической идентификации;

- сценарий обработки данных, предусматривающий оценку прогностических свойств модели, диагностику нарушений условий и адаптацию при нарушениях для обеспечения требуемых оптимальных свойств оценок (состоятельности, несмещенности и эффективности).

При АРМ-подходе [2] постулируется, что структура матричной модели ТК (1) неизвестна для каждой пары каталогов и ее необходимо найти из множества конкурирующих. В достаточно общем виде уравнение из (1) можно переписать в виде матричного уравнения регрессии:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (2)$$

добавляя вектор ошибок $\boldsymbol{\varepsilon}$ и считая первую строку матрицы \mathbf{A} вектором $\boldsymbol{\beta}$. Очевидно, при структурной идентификации одновременно оцениваются и параметры уравнения, а именно элементы вектора $\boldsymbol{\beta}$ для простого случая (2). Из-за ошибок в определении координат в обеих системах и возможной мультиколлинеарности (взаимозависимости) оценок матрица \mathbf{A} часто не удовлетворяет условиям ортонормированности перехода из \mathbf{Y} в \mathbf{X} , записываемым в виде:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{E}, \quad \det \mathbf{A} = 1, \quad (3)$$

В связи с этим основным детерминированным преобразованием следует считать выражение (1), рассматриваемое совместно с условиями (3). Эта задача с точностью до расхождения центров систем \mathbf{Y} и \mathbf{X} и масштабного множителя решается в настоящей работе численным методом оптимизации.

На данном этапе исследований в качестве конкурирующего аппроксимирующего преобразования применялась модель (1) без учета условия (3). В дальнейшем при сгущении фундаментальной КСК-1162 будут использованы алгебраические полиномы второй и третьей степени, а также двухкомпонентные описания, где первой компонентой будут детерминированная модель (1) и условие (3), а второй – указанные полиномы для описания остатков после первой компоненты. Оптимальные модели будут получены на основе АРМ-подхода.

3. Программное обеспечение

3.1. Описание программного комплекса «Трансформация селенодезических координат» (ТСК). Программный комплекс разработан в свободной среде SharpDevelop 3.2 на языке C# с применением современных технологий программирования под OS Windows, таких как OOP, .NET и Windows Forms.

Архитектуру программы можно разделить на две независимые части: ядро и графическую оболочку. В соответствии с объектно-ориентированной парадигмой программирования (ООП) в ядре содержатся классы, реализующие основной функционал, а за взаимодействие с пользователем отвечает графическая оболочка. Такая архитектура упрощает взаимодействие с другими программными комплексами, например, части ядра можно перемещать в другие проекты.

Графическая оболочка написана с применением API Windows Forms. Оболочка осуществляет взаимодействие с пользователем и устраняет множество ошибок, связанных с некорректными действиями пользователя. Ниже представлено краткое описание модулей, составляющих ядро.

Модули первичной обработки данных. Подготовка данных для решения основной задачи обеспечивается тремя модулями с назначениями: перевод сферических координат объектов в прямоугольные и обратно, поиск общих объектов в прямоугольной системе координат.

Модули формирования детерминированных моделей. С помощью этих модулей определяются элементы матрицы ориентации и векторы смещения центров координатных систем для модели (1) с учетом условий ортогональности (3) аналитическим [2], численным [3] и параметрическим методами.

Модуль ТК. Предназначен для трансформации прямоугольных координат из системы Y в систему X по матрице ориентации A и вектору смещения X_0 .

3.2. Пакет «Система поиска оптимальных регрессий» (СПОР) для получения аппроксимирующих описаний. Пакет СПОР [2] в его современной модификации [4] используется для получения аппроксимирующих моделей ТК (рабочие процедуры: множественная регрессия, пошаговая регрессия, полный перебор и др.), диагностики остатков и реализации сценариев адаптации.

3.3. Сводный каталог координат на видимую сторону и западное полушарие Луны в системе КСК-1162. В систему КСК-1162 переводились 12 каталогов, а именно ACIC, AMS, ARTHUR, Baldwin, Goloseevo-1, Goloseevo-2, MILLS-2, SCHRUTKA-1, SCHRUTKA-2, приведенные в работе [5], Киевский каталог [6], The Unified Lunar Control Network 2005 (ULCN 2005) [7] и каталог на западное полушарие Луны (Valeev) [8] по матрицам ориентации A и векторам смещения X_0 , полученным для модели (1) при условиях (3) численным методом, а также методом без учета условий (3). Конечной целью исследований является сгущение на видимой стороне и расширение на обратную сторону Луны сети базисных точек КСК-1162 [1], фиксирующей систему селеноцентрических координат с центром, совпадающим с центром массы Луны и осями, направленными вдоль ее осей инерции. В связи с этим решались три задачи:

1) анализ точности математической модели ортогональной трансформации координат;

2) глобальное распространение системы КСК-1162 путем редукции системы ULCN [7];

3) сгущение сети базисных точек КСК-1162 на видимой стороне Луны на основе редукции координат объектов из ряда каталогов, включенных в список [5], и ее распространение на западное полушарие Луны путем редукции системы [8].

Табл. 1

Пара (КСК-1162, ULCN): 450 общих объектов

Метод	Матрица разворота \mathbf{A}			Вектор смещения \mathbf{X}_0	S_Δ
Численный, модель (1) + условие (3)	1.00000	0.00016	0.00005	0.00002	0.00047
	-0.00016	1.00000	-0.00007	0.00005	0.00044
	-0.00005	0.00007	1.00000	0.00005	0.00047
МНК, модель (1)	0.99997	-0.00009	-0.00008	0.00005	0.00053
	0.00018	0.99982	0.00046	-0.00024	0.00038
	0.00010	0.00010	0.99964	0.00030	0.00082

Основные этапы решения этих задач описаны ниже.

3.4. Трансформация координат объектов ULCN в систему КСК-1162. Наиболее известной сводной координатной системой для всей Луны в настоящее время является The Unified Lunar Control Network 2005 (ULCN 2005) [7], содержащая координаты 272931 объекта. Последние примерно равномерно распределены по всей поверхности Луны. Представляет определенный вычислительный интерес редуцирование координат этого каталога в систему КСК-1162 по матрице ориентации \mathbf{A} и вектору смещения \mathbf{X}_0 , приведенным в табл. 1 (численный метод). Элементы вектора \mathbf{X}_0 получены путем усреднения остатков и не имеют геометрической интерпретации. Для сгущения и распространения системы КСК-1162 использовались элементы перехода \mathbf{A} и \mathbf{X}_0 уравнения (1), полученные численным методом с учетом условий (3). Общие точки для отмеченной пары каталогов (\mathbf{X} , \mathbf{Y}) отождествлялись программно в прямоугольной системе координат (ξ , η , ζ) по расхождениям, не превышающим по модулю соответственно значения 0.001, 0.001, 0.002 лунного радиуса.

Эффективность ортогональной модели ТК оценивалась сравнением с результатами, полученными по модели (1) без учета ортогональности. Модель (1) можно рассматривать как простое аппроксимирующее преобразование в виде алгебраического полинома первой степени.

В табл. 1 приведены для пары каталогов (КСК-1162, ULCN) значения элементов матриц ориентации \mathbf{A} , векторов смещения \mathbf{X}_0 и «внешних» среднеквадратичных ошибок (СКО) S_Δ ($S_{\Delta X}$, $S_{\Delta Y}$, $S_{\Delta Z}$), вычисленных по 10% контрольных точек от числа общих объектов.

По данным табл. 1 и результатам анализа СКО можно сделать предварительные выводы:

- 1) с точностью до элементов вектора смещения система КСК-1162 при ортогональной ТК (4), (6) близка к системе, формируемой общими точками из ULCN;
- 2) при использовании модели (4), (6) точность (СКО \mathbf{S}_Δ) ТК по сравнению с моделью (4) по координате ξ , направленной к Земле, выше примерно вдвое;
- 3) элементы вектора \mathbf{X}_0 в модели (4) с учетом СКО аппроксимации \mathbf{S} по каждой координате статистически незначимы, что дает дополнительное основание использовать для ТК результаты численного метода.

3.5. Сгущение и расширение системы КСК-1162 на видимую сторону и западное полушарие Луны. Для пар каталогов (КСК-1162, ACIC), (КСК-1162, AMS), (КСК-1162, ARTHUR), (КСК-1162, Baldwin), (КСК-1162, Goloseevo-1), (КСК-1162, Goloseevo-2), (КСК-1162, KIEV), (КСК-1162, MILLS-2), (КСК-1162, SCHRUTKA-1), (КСК-1162, SCHRUTKA-2), (КСК-1162, Valeev) получены значения матриц ориентации \mathbf{A} и векторов смещения \mathbf{X}_0 , по которым

Табл. 2

Пара (КСК-1162, Киев-4900): 659 общих объектов

Метод	Матрица разворота \mathbf{A}			Вектор смещения \mathbf{X}_0	S_{Δ}
Численный, модель (1) + условие (3)	1.00000	0.00003	0.00050	-0.00001	0.00043
	-0.00003	1.00000	0.00022	0.00003	0.00034
	-0.00050	-0.00022	1.00000	-0.00004	0.00043
МНК, модель (1)	0.99996	0.00009	-0.00070	0.00013	0.00042
	0.00020	1.00000	0.00033	-0.00039	0.00037
	0.00047	0.00035	0.99953	0.00030	0.00078

каждый из каталогов был переведен в систему КСК-1162. Для сгущения и расширения системы КСК-1162 использовались элементы перехода \mathbf{A} и \mathbf{X}_0 уравнения (1), полученные численным методом с учетом условий (3). Общие точки для каждой пары каталогов (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) отождествлялись программно в прямоугольной системе координат (ξ, η, ζ) по расхождениям, не превышающим по модулю соответственно значения 0.001, 0.001, 0.002 лунного радиуса.

В табл. 2 для пары каталогов (КСК-1162, Киев-4900) приведены значения элементов матриц ориентации \mathbf{A} , векторов смещения \mathbf{X}_0 и «внешних» СКО $S_{\Delta}(S_{\Delta X}, S_{\Delta Y}, S_{\Delta Z})$, вычисленных по 10% контрольных точек от числа общих объектов.

Согласно данным табл. 2 система Киев-4900 в большей степени, чем ULCN, отличается от КСК-1162. При решении задачи прецизионного сгущения и расширения фундаментальной селеноцентрической сети КСК-1162 на видимую и обратную стороны Луны получены следующие результаты.

Рассмотрена возможность применения АРМ-подхода к решению задачи ТК по общим объектам, позволяющего находить оптимальные оценки параметров и структуру модели ТК.

Разработан метод структурно-параметрической идентификации адекватной модели ТК, основанный на АРМ-подходе, в условиях интерполяции (сгущения) и экстраполяции (расширения) селеноцентрической сети.

Разработан прототип программного комплекса трансформации селеноцентрических координат (ТСК), позволяющей в автоматизированном режиме отождествления общих объектов получать координаты объектов рассматриваемого каталога в системе КСК-1162 как при ортогональной матрице ориентации для детерминированных моделей, так и для аппроксимирующих преобразований при дополнительном применении пакета СПОР [4].

Получена версия сводного каталога в системе КСК-1162, дающая представления о диапазоне расхождений координат для исходной и редуцированной версий каталогов при разных моделях.

Заключение

Дальнейшие работы в этом важном направлении обусловлены как ограничениями, при которых решалась проблема, так и необходимыми для достижения цели этапами. Необходимо отметить следующие ограничения.

1. Общие объекты каждой пары каталогов отождествляются программно по модулям принятых координатных расхождений, что может привести к ошибкам дешифрования; тем более что в каталоге ULCN вместо кратеров часто в качестве новых базисных точек используются заметные формы рельефа.

2. При ортогональной трансформации вектор смещения центров \mathbf{X}_0 не оценивается совместно с элементами матрицы \mathbf{A} , элементы матрицы \mathbf{A} содержат и

смещение центров; в будущем при снятии предыдущего ограничения желательно оценивать \mathbf{X}_0 в совместном решении, но только в том случае, если эти оценки будут статистически значимы и применение новой модели ТК обеспечит сохранение или повышение внешней точности S_{Δ} .

3. В качестве аппроксимирующей модели используется только модель (1), тогда как использование алгебраических полиномов второй и третьей степени в усеченном виде, идентифицируемом при АРМ-методе, позволяет учесть разнообразные систематические ошибки при соответствующем количестве общих точек.

Последние два ограничения требуют расширения математического (функционального) наполнения пакета ТСК. В связи с вышеуказанным формулируются следующие будущие этапы исследований:

- анализ и исследование точности фундаментальных сетей, содержащихся в ULCN;
- дешифровка общих объектов для исследуемых координатных систем;
- расширение математического наполнения пакета ТСК;
- развитие ТСК как экспертной системы универсальной трансформации планетодезических координат.

Решение этих задач в полном объеме позволит получить независимую от разработанной в США сети ULCN глобальную фундаментальную систему координат на Луне, которая будет служить основой для массового однородного расширения по фотоматериалам с российских космических аппаратов при стационарном исследовании и практическом освоении Луны.

Summary

Yu. A. Nefedev, S. G. Valeev, I. M. Sharafutdinov, N. Yu. Varaksina. The Selenocentric Reference Grid Built in the KSK-1162 Catalogue System.

This work solves the problem of building a selenocentric inertial reference grid with the coordinate axes directed identically to the Moon's axes of inertia and with the center coinciding with the Moon's center of mass. Based on 12 cosmic and ground selenodesic catalogues, the densening of the KSK-1162 selenocentric system for building a summary reference grid was carried out. Prospective analysis of this grid was performed. For the first time, the selenocentric reference catalogue covering the visible and the far sides of the Moon was compiled.

Key words: selenocentric reference grid, inertial coordinate system, space missions, selenocentric catalogues.

Литература

1. Нефедьев Ю.А., Валеев С.Г., Шарафутдинов И.М., Кутленков М.В. Построение единой селеноцентрической системы координат в системе центра масс и главных осей инерции Луны // Изв. Крым. астрофиз. обсерв. – 2009. – Т. 101, № 6. – С. 212–216.
2. Валеев С.Г. Регрессионное моделирование при обработке данных. – М.: Наука, 1991. – 272 с.
3. Валеев С.Г., Унянина Е.А. Моделирование взаимосвязи и трансформации пространственных координат. Свид-во об официальной регистрации программы для ЭВМ. – Роспатент, 2009. – № 2010610146.
4. Валеев С.Г., Кадырова Г.Р., Турченко А.А. Программная система поиска оптимальных регрессий // Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. Сер. Техн. науки. – 2008. – Т. 2, № 4(14). – С. 97–101.
5. Липский Ю.Н., Никонов В.А., Скобелева Т.П. Единая система селенодизических координат из девяти каталогов на видимом полушарии. – М.: Наука, 1973. – 384 с.

6. *Гаврилов И.В., Кислюк В.С., Дума А.С.* Сводная система селенодезических координат 4900 точек лунной поверхности. – Киев: Наукова думка, 1977. – 172 с.
7. *Archinal B.A., Rosiek M.R., Redding B.L.* Unified Lunar Control Network 2005 and Topographic Model // Lunar Planetary Science XXXVI. – Houston: Lunar and Planetary Institute, 2005. – Abstr. No 2106. – URL: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2005/pdf/2106.pdf>, свободный.
8. *Чуйкова Н.А.* Геометрическая фигура Луны, представленная в виде разложения по сферическим и выборочным функциям // Астрон. журн. – 1975. – Т. 52, № 6. – С. 1279–1292.

Поступила в редакцию
28.03.11

Нефедьев Юрий Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: star1955@mail.ru

Валеев Султан Галимзянович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математики Ульяновского государственного технологического университета.

E-mail: sgv@ulstu.ru

Шарафутдинов Ильгизар Мансурович – аспирант Ульяновского государственного технологического университета.

E-mail: 956333@mail.ru

Вараксина Наталья Юрьевна – аспирант, младший научный сотрудник Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: vnu_357@mail.ru