

УДК: 521.9/523.3

Ю.А. Нефедьев¹, С.Г. Валеев², Н.Ю. Вараксина¹, Р.Р. Заббарова¹
К.О. Чуркин¹, В.С. Боровских³¹Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгардта, Казань, star1955@mail.ru²Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, sgv@ulstu.ru³Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, borovskix@kgasu.ru

НОВЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ЕДИНОЙ СЕЛЕНОЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

Построение глобальной опорной сети на поверхности Луны является одной из важнейших задач современной селенодезии. В работе описываются основные подходы создания единой селеноцентрической системы координат в системе центра масс и главных осей инерции Луны на основе объединения космических и наземных наблюдений.

Ключевые слова: интеллектуальные навигационные системы, опорные селеноцентрические сети, регрессионные методы обработки данных, планетология.

Введение

Развитие космических технологий предъявляет особые требования к результатам координатно-временного обеспечения, включающего реализацию систем отсчета, установление взаимной ориентации инерциальной и динамической систем координат, исследованию динамики и геометрии небесных тел. Однако космические исследования Луны, выполняемые не только в научных, но и в практических целях, не обеспечены селенодезической координатной сетью – каталогом опорных объектов, достаточно полно охватывающим видимую и обратную стороны Луны и имеющим центр, близкий к центру масс.

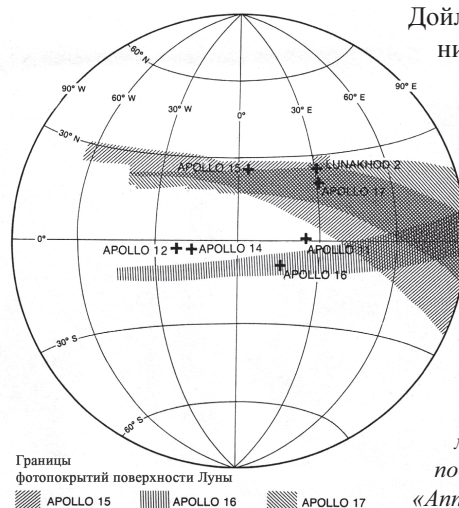
При наличии базового селеноцентрического каталога селеноцентрических координат опорных объектов на видимой стороне Луны КСК-1162 (Казанский Селеноцентрический Каталог) и ряда каталогов объектов в либрационной зоне и на обратной стороне Луны в разнородных системах построение единой системы координат с центром и осями, совпадающими с центром масс Луны и главными осями ее инерции, включает следующие этапы: 1) исследование систематических и случайных ошибок каталога КСК-1162; 2) сгущение и расширение системы каталога КСК-1162 на видимую, обратную стороны Луны и либрационную зону.

Каталог на основе данных миссии «Аполлон»

По данным миссий «Аполлон» была создана опорная селенодезическая сеть на видимой полусфере Луны. Специальная метрическая камера позволяла с борта корабля одновременно фотографировать поверхность Луны и звездного поля и производить лазерную альтиметрию фотографируемых участков. Астрофотографии звездных полей в дальнейшем использовались при редукции наблюдений для определения ориентации метрической камеры относительно небесной системы координат. В результате была достигнута точность фотографирования поверхности Луны 5-10 мкм и точность ориентации метрической камеры относительно небесной системы координат 20". С использованием фотограмметрических методов обработки лазерные и фотографические наблюдения Луны были приведены в единую систему и затем были получены координаты лунных объектов в системе центра масс Луны. Последнее

осуществлено из сравнительного анализа баллистических орбитальных эфемерид и лунных гравитационных и либрационных моделей. Однако данная опорная сеть покрывает всего 10 % лунной поверхности (полоса шириной 150-500 км, простирающаяся по долготе от 60° с запада до 70° на восток в экваториальной зоне). Координаты имеют расчетную точность 20-40 м по высоте и ± 300 м в плановых координатах. Также остается неизвестной точность ориентации осей системы координат относительно лунных осей инерции и сдвиг ее по отношению к центру масс Луны.

Для распространения опорных сетей миссии «Аполлон» на всю видимую полусферу Луны решили использовать малоизвестный наземный каталог Мейера Д.Л., содержащий координаты для 1156 точек и построенный в системе центра фигуры Луны. В данном каталоге содержится 130 общих точек, входящих в опорный каталог миссии Аполлон. В качестве унифицированной опорной сети для привязки каталога Мейера в области покрываемой камерами Аполлонов была выбрана трансформированная опорная сеть DMA/603 миссии Аполлонов. Были определены параметры трансформации с целью отображения 130 координат каталога Мейера в 130 унифицированных опорных сетевых координатах. Среднеквадратичные ошибки оказались равными 808 м, а среднее смещение 130 точек 1352 м. Используя эти параметры 1026 оставшихся координат каталога Мейера, были переведены в систему унифицированных опорных сетевых координат.



Дойл Ф.Д. и др. выполнили подробный анализ внутренней точности системы Аполлонов. Анализ показал, что среднеквадратичное отклонение горизонтальных положений большин-

Рис. 1. Границы области фотосъемки поверхности Луны с КК «Аполлонов».

ства точек для Аполлонов 15 и 17 оказалось менее чем 30 м. Области Аполлона 16 были значительно беднее, со среднеквадратичным отклонением горизонтальных положений в западных областях, увеличивающихся до 1800 м, и до 30 м в областях, общих с Аполлонами 15 и 17. Эти результаты позволяют выделить те области, где координаты миссий Аполлонов очень надежные и показывает те небольшие области, где они могут иметь значительные ошибки. Для трансформирования топографических координат Аполлона использовались три станции ALSEP. Поскольку среднеквадратичные ошибки трансформации оказались менее 80 м и ошибка измерений около 60 м, можно считать, что точки вблизи и между тремя станциями ALSEP имеют ошибки положения менее чем 150 м. Смещение от места расположения ALSEP увеличивает предполагаемую плановую ошибку до 300 м, и это большинство территорий в области охвата измерений. Ошибки положений точек, находящихся вблизи границ изученных областей, могут достичь 300 м и даже превысить 1000 м.

Последнее свидетельствует о том, что распространение опорной сети миссии «Аполлон» на видимую сторону Луны может содержать значительные неточности. Таким образом, создание более точной опорной системы координат на лунной поверхности остается актуальной и востребованной для навигации Луны задачей.

Метод построения единой селеноцентрической системы координат

При построении опорной сети КСК-1162 использованы алгоритмы, разработанные для привязки лунной и звёздной пластинок. По меньшей мере две из рассматриваемых при этом задач метода наименьших квадратов (МНК) могут быть на сегодняшний день решены точнее. Поскольку переобработка базового каталога потребует громоздких перевычислений, следует исследовать и численно оценить, насколько это будет целесообразно. При решении стандартной задачи определения постоянных звёздной пластинки использовался метод шести постоянных (метод Тернера). Рассмотрим три возможные модификации этого способа, основанные на регрессионном моделировании (Валеев, 1991).

а) Метод полного перебора структур. Вместо полиномиального разложения стандартных координат звёзд X и Y первой степени по измеренным координатам звёзд x и y можно использовать полиномы второй и третьей степени. Полным перебором структур под условием минимума «внешней» среднеквадратической ошибки (СКО) σ_{Δ} определяется оптимальная структура модели трансформации по каждой координате. Такая модель «плавающей» структуры для каждой пластинки обеспечивает повышение точности определения координат меток и, соответственно, объектов каталога от нескольких десятков процентов и выше.

б) Метод ортогонализации для двумерного случая. Задача трансформации координат рассматривается как задача Тернера с дополнительным условием ортогональности перехода из системы измеренных координат в стандартную, что является адаптацией к нарушению условия МНК о независимости измеренных координат x и y .

в) Метод учета взаимозависимости стандартных координат X и Y (решение системы одновременных уравнений-СОУ). В этом случае устраняется влияние взаимозависимости между стандартными координатами X и Y . При её обнаружении одна из координат поступает в правую часть полинома по другой координате – с коэффициентом, подлежащим оцениванию.

Вторая задача МНК решается для системы в работе (Ризванов, 1985):

$$A\theta + \varepsilon = Z, \quad (1)$$

где $A = (A_{ij})_m$ – ранее вычисленная матрица преобразования координат для каждой m -ой пластинки, $\theta = (\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta)$ – вектор оцениваемых поправок к принятым значениям координат кратеров (объектов каталога), $Z = (\Delta X, \Delta Y)_k^T$ – вектор наблюдений.

В отличие от первой задачи, нацеленной на прогнозирование, выражение (1) используется только для получения оценок $\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta$, что приводит к необходимости проверки условий применения МНК – диагностики условий регрессионного анализа (РА)-МНК. При их выполнении можно констатировать, что найденные оценки являются наилучшими линейными оценками (состоятельными, несмещёнными и эффективными) в пределах возможностей использованного объёма наблюдений. Адаптацию к нарушению условий независимости $\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta$ и $\Delta X, \Delta Y$ между собой можно выполнить методом ортогонализации или решением СОУ, отмеченным выше. Способы адаптации к другим нарушениям рассматриваются в монографии (Валеев, 1991).

При сгущении и распространении селеноцентрического каталога на видимую и обратную сторону Луны, а также на её либрационную зону, необходимо с высокой точностью решить задачу определения элементов матриц перехода между базовой КСК-1162, промежуточными системами и редуцируемым каталогом.

Для её прецизионного решения можно исследовать способы, эскизно представленные выше для двумерного случая. Достаточно подробно рассмотрим один из них, его аналитическая версия применена для распространения координатной сети видимого полушария Луны на обратную по результатам измерения снимков с АМС «Зонд-6,-8».

Обычно при преобразовании координат из одной прямоугольной системы (X) в другую (Y) используется модель аффинного преобразования:

$$X = AX + X_0, \quad (2)$$

где $X = (X_1 X_2 X_3)^T$, $Y = (Y_1 Y_2 Y_3)^T$ – векторы координат в системах M_x и M_y , $A = (A_{ij})$ – матрица ориентации, $X_0 = (X_{01} X_{02} X_{03})^T$ – вектор смещения центра системы M_x относительно M_y . Для определения по общим объектам элементов a_{ij} и смещения используется МНК, применяемый к каждой из трёх подсистем уравнений по отдельности или к совместной системе.

Преобразование (2) не всегда обеспечивает удовлетворительную точность. Из-за ошибок координат в системах M_x и M_y и возможной взаимозависимости оценок a_{ij} матрица A может не удовлетворять условиям ортогонального перехода из M_y в M_x :

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

где E – единичная матрица.

В связи с этим, моделью, конкурирующей с моделью (2) и возможными другими, является выражение (2), рассматриваемое совместно с условиями (3). Такая модель применялась в работе (Валеев, 1991). В рамках теории ус-

ОЦЕНКА ПРОДУКТИВНОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ СПОСОБОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ЛАБОРАТОРНЫХ ДАННЫХ (Пякяхинское месторождение, скважина 2020)

Проведена литогеохимическая интерпретация лабораторных данных по скважине №2020 Пякяхинского месторождения при помощи сопоставления химического состава с коллекторскими и другими свойствами пород. Установлено, что литогеохимический индекс исследуемых пород изменяется от минимальных значений к наибольшим значениям в зависимости от типа насыщенности пород флюидами в направлении УГЛЕВОДОРОД (УВ) → УВ+ВОДА → ВОДА → НЕКОЛЛЕКТОР. Предлагается использовать литогеохимический индекс для разделения гидрофильных, гидрофобных коллекторов и прогноза УВ.

Ключевые слова: оценка, продуктивность, насыщенность, лабораторные анализы, интерпретация, керн.

Совместное использование современных математических методов анализа и специальных (геологических, геофизических, петрофизических и др.) методов позволяет получить более детальную информацию об особеннос-

тях строения продуктивных толщ (Элланский, 2003). В данной работе на основе разработки новых методических приемов комплексной интерпретации гранулометрических, рентгеноспектральных и других лабораторных данных

Окончание статьи Ю.А. Нефедьева, С.Г. Валеева, Н.Ю. Вараксиной, Р.Р. Заббаров, К.О. Чуркина, В.С. Боровских «Новый метод построения единой селеноцентрической...»

ловной оптимизации параметры этой модели могут быть оценены путём аналитического или численного решения задачи поиска минимума (абсолютного или относительного) квадратичной формы $S = \varepsilon^T \varepsilon$ с нелинейными ограничениями в виде равенств:

$$\begin{aligned} \min \varepsilon^T \varepsilon, \\ A, X_0 \in G, \\ A^T A = E, \det A = 1, \end{aligned} \quad (4)$$

где ε – вектор ошибок для модели (2), $\varepsilon^T \varepsilon = \sum_{1 \leq i \leq n} \sum_{1 \leq j \leq 3} \varepsilon_{ij}^2$, n – количество объектов; G – допустимая область.

Заключение

В заключении можно сделать следующий вывод. Выбор метода трансформации координат должен быть осуществлён в результате тщательных исследований сравнительной эффективности следующих подходов: аффинного преобразования; оптимальной полиномиальной аппроксимации; ортогонального преобразования без и с учётом систематических ошибок; решения системы одновременных уравнений и др.

Следует отметить, что согласно данной работе, прогресс достигнутый мировой наукой с целью создания опорной сети привязанной к данным миссий «Аполлонов» ограничился созданием на видимой полусфере Луны достаточно неточной системы, особенно в плановых координатах с ошибками до 1 км.

Литература

- Валеев С.Г. Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. М.:Наука. 1991.
Ризванов Н.Г. Система координат 264 опорных кратеров по крупномасштабным снимкам Луны со звёздами. Труды КГАО. 1985. №49. 80-110.

Nefedev Y.A., Valeev S.G., Varaksina N.Y., Zabbarova R.R., Churkin K.O. Borovskih V.S. **Construction of a unified selenocentric coordinate system on the lunar surface.**

Construction of a global reference network on the lunar surface is one of the most important problems of modern selenodesy. We describe main approaches to modeling the reference selenocentric coordinate system in the center of mass and principal axes of inertia of the Moon based on the combination of space and ground-based observations.

Key words: intelligent navigation systems, reference selenocentric network, regression methods for data processing, planetology.

Юрий Анатольевич Нефедьев

Д.физ.-мат.н., профессор, директор Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта.

Наталья Юрьевна Вараксина

Мнс Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта.

Регина Рустэмовна Заббарова

Аспирант кафедры Вычислительной физики.

Константин Олегович Чуркин

Аспирант кафедры Вычислительной физики.

Казанский (Приволжский) федеральный университет. 420008, Казань, ул. Кремлевская, д.18. Тел: (927) 425-93-30.

Султан Галимзянович Валеев

Зав. кафедрой Прикладной математики и информатики Ульяновского государственного технического университета

432027 Ульяновск, ул.Северный Венец, 32.

Тел: (927) 801-14-71.