

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛНСС В ЧАСТИ КАРТОГРАФИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы существенно расширилось число стран, участвующих в исследовании Луны. К многолетним программам России и США присоединились учёные Европейского Космического Агентства, Японии, Китая, Индии. Среди наиболее интересных проектов прошедших лет следует назвать NASA «Clementine» (1994 г.) [1], «LunarProspector» (1998–1999 гг.) [2], ЛЛЛ (1969–2010 гг.) [1], европейский спутник «SMART-1» (2003–2006 гг.) [2], японский спутник «Kaguya» (2007–2009 гг.) [3], китайские зонды «Chang-1» (2007–2009 гг.), «Chang-2» (2010 г.) [2], «Chang-3» (2014 г.) [4], «Chang-4» (2018 г.) [5], американский спутниковый дуэт «LRO» (2009–2010 гг.) [2], индийские спутники «Chandrayaan-1» (2008–2009 гг.), «Chandrayaan-2» (2013 г.) [2], космическая миссия GRAIL [6]. Российские планы космических миссий к Луне включают в себя проведение работ, которые обеспечат привязку снимков лунной поверхности к системе сelenографических. Выполнение этих планов может вывести селенодезию на уровень, сравнимый с геодезией Земли. В то же время анализ данных в указанных проектах предъявляет повышенные требования к описанию сложной динамической и гравитационной модели структуры Луны.

Повышение точности координатных измерений, запланированное в ближайших российских миссиях к Луне, должно обеспечить существенно более высокий уровень моделирования сelenографических систем [7]. При этом построение высокоточной системы сelenоцентрических координат является исходным базисом для проведения исследований Луны космическими аппаратами. В настоящее время точность посадки космических аппаратов на поверхность Луны укладывается в эллипс ошибок 15x30 км [9]. Для геологических исследований приходится использовать луноходы, чтобы взять образцы пород или провести их анализ на месте в геологически интересных местах. Доставка научной аппаратуры в запланированное место исследований многократно снизит стоимость исследований и их эффективность. Еще более актуальным достижение высокой точности координатного обеспечения космической деятельности на Луне будет при создании постоянной лунной станции из доставляемых с Земли модулей: нужно будет либо доставлять модули на расстоянии ихстыковки гибкими узлами, либо предусмотреть средства перемещения тяжелых модулей по поверхности Луны на большие расстояния [10]. Положение каждой точки на поверхности Луны определяется тремя величинами – широтой, долготой и радиусом-вектором, отсчитываемым от центра масс Луны. Для

повышения точности координатно-временного обеспечения необходимо разработать теоретические основы, как проводимых спутниковых наблюдений, так и обработки их результатов. Измерения проводятся с космического аппарата движущегося вокруг Луны, имеющего нестабильную орбиту. Измеряемые углы из-за этого будут функцией десятков изменяющихся параметров, без учета которых вычислить конечный результат (координаты объекта на Луне) невозможно. При описании этих параметров необходимо использовать современные модели движения и теорию ФЛЛ [11]. Также в настоящее время важной становится задача проведения исследований в области разработки методов параметризации временных рядов спутниковых наблюдений на основе новых теоретических и экспериментальных данных с помощью методов математического моделирования исследования гравитационных, сейсмологических, петрологических и геохимических данных выполненных наблюдений [12]. Анализ вариаций лунного гравитационного поля и разработка теории ФЛЛ представляет собой многоступенчатую и многогранную задачу, которая, несмотря на усилия международного научного сообщества, изучена еще далеко не полно.

Таким образом, роботизированное освоение Луны, вошедшее в планы всех космических агентств мира, требует достижения точности сelenоцентрических координат на уровне нескольких метров (в пересчете на поверхность Луны), причем повышение точности может быть достигнуто только с применением всего ансамбля космических средств координатных измерений непосредственно с окололунной орбиты. Поэтому одной из основных задач является создание сelenоцентрической динамической навигационной сети на основе спутниковых наблюдений для ее использования в будущих космических навигационных задачах по применению высокоточных углеродных устройств на бортах космических аппаратов на окололунной орбите. Это предполагает решение ряда взаимосвязанных конкретных задач: а) Приведение разнородных спутниковых наблюдений к единой системе, адаптированной для высокоточного численного интегрирования; б) Разработку авторским коллективом метода анализа стохастических и динамических особенностей сelenографических систем. В ходе реализации проекта также были: а) разработаны статистические параметры, предназначенные для параметризации динамики ФЛЛ; в) исследована теория ФЛЛ в приложении к налунным наблюдениям, так как ФЛЛ представляет собой инструмент, используемый для анализа и интерпретации таких высокоточных наблюдений, как многолетняя лазерная локация, и экспериментальных данных по наблюдению вращения Луны с помощью аппаратуры, установленной на ее поверхности [13]; г) созданы и исследованы сelenоцентрические имитационные модели. Обработка экспериментальных данных выполнялась при помощи

оригинальных численных алгоритмов и компьютерных программ, включающих в себя вычисление и построение динамических характеристик сelenоцентрических систем [14]. При создании прецизионной лунной навигационной спутниковой системы (ЛНСС) требуется точное селенографическое координатно - временное обеспечение (СКВНО) с целью определения расчетных данных для решения навигационных задач и осуществления высокоточного прилунения космических аппаратов на физическую поверхность Луны [15]. Одной из ключевых составляющих СКВНО является построение сelenоцентрической динамической референцной системы координат (СДРСК), оси которой совпадают с лунными осями инерции, а центр лежит в центре масс Луны. С созданием СДРСК самым тесным образом связано и развитие теории ФЛЛ. В настоящее время имеющиеся селенографические опорные системы координат, то есть позволяющие выполнить непосредственную привязку к физическим объектам на лунной поверхности, не дают достаточной точности по ряду причин. Все существующие модели референцных селенографических систем, построенные на основе данных космических миссий, по сути ориентированы относительно достаточно индивидуальных для конкретного спутника систем отсчета координат, напрямую зависящих от динамических параметров его орбиты, и, соответственно, недостаточно точно связанных с лунной динамической референцной системой координат. Таким образом, при использовании высокоточной лазерной альтиметрии лунной поверхности, спутниковые наблюдательные данные не имеют привязки ни к земной, ни к лунной системам координат. Поэтому, с одной стороны, полученные спутниковым альтиметром высотные измерения физической поверхности Луны хорошо описывают лунный рельеф, но не могут служить для создания референцной селенографической сети. С другой стороны, лунные позиционные наблюдения, выполненные наземными методами, относятся к соответствующим селенографическим системам, включая сelenоцентрическую динамическую систему координат, но на их основе не представляется возможным построить высокоточную модель рельефа Луны [16]. Также полученные в ходе выполнения космических миссий наблюдения относятся к так называемой квазидинамической системе, у которой центр отсчета данных совпадает с центром масс Луны, но оси имеют сдвиг по отношению к осям инерции Луны. Поэтому в статьях, где по спутниковым измерениям определены селенографические параметры, особое внимание обращено на хорошую точность описания лунного рельефа и очень скудная информация дается непосредственно о координатной привязке самих наблюдений. Квазидинамическую систему координат также имеют многие каталоги лунных кратеров, построенных с использованием наземных наблюдений. Еще одним недостатком существующих опорных сетей является также то, что они не покрывают

равномерно и достаточно плотно всю лунную сферу, особенно полярные области Луны. Проблемой является и применение фотограмметрических методов к разрозненным спутниковым лунным астрофотографиям с целью приведения их в единую систему, так как очень трудно однозначно определить ориентацию лунных снимков в фазовом пространстве [17].

Основные задачи проекта связаны с построением теоретических моделей физической поверхности и развитии теории ФЛЛ по современным спутниковым измерениям. Проведение регрессионного анализа сelenодезических моделей на данном этапе исследований является необходимым для оценки точности представленных спутниковых данных и достоверности полученных в ходе выполнения проекта результатов. Все планируемые в настоящем проекте задачи призваны внести значительный вклад в построение и анализ модели навигационной сelenоцентрической системы и развития теории ФЛЛ с целью соответствия современным и предстоящим наблюдениям лунного вращения для изучения внутреннего строения Луны [18] и обеспечения навигационных задач в окололунном пространстве, что является необходимыми компонентами при реализации проектов освоения Луны как российскими, так и зарубежными космическими миссиями.

1. Разработка имитационных моделей отдельных элементов ЛНСС в части картографического обеспечения

1.1 Создание опорного каталога лунных объектов видимой и обратной стороны Луны.

В направлении проведения системного анализа сelenографических данных современных космических миссий и разработки метода сведения разнородных сelenографических данных в единую сelenоцентрическую систему и создания каталога сelenоцентрических опорных точек следует сказать следующее [19]. В настоящее время, несмотря на успехи в получении сelenографических параметров космическими аппаратами, проблема точного координатно-временного обеспечения на лунной поверхности остается не решенной. Существует мнение, что орбиты, например, космических миссий "LRO" и "GRAIL" были восстановлены и привязаны к земной системе координат с точностью порядка метра на всём интервале наблюдений [20]. Это основывается на мнении, что снимки "LRO" были "сшиты" друг с другом и точность полученных топографических данных соответствует уровню 0.5 м на пиксель. Модель сelenоида по данным миссии "GRAIL" глобально уравнена и хорошо согласуется с "LRO". В действительности, если проанализировать

результаты, полученные на основе одной из самых известных миссий “LRO”, то согласно работе Konopliv [21] основной массив наблюдений по координатному сканированию космического аппарата с целью определения его ориентации в фазовом пространстве – это данные наземного допплеровского слежения, выполненные, в основном, сетью DSN (Сеть дальней космической связи НАСА, англ. Deep Space Network). Эти данные не имеют более-менее точной абсолютной привязки ни к земной, ни к небесной системе координат. Используемые авторами статьи данные лазерной альтиметрии поверхности Луны и структурные параметры гравитационного поля также не привязаны ни к земной, ни к небесной системе отсчета, а только ориентированы определенным образом по отношению к самой Луне. Оценка точности получаемых результатов при этом выполняется по расхождениям орбит аппарата в точках их пересечений. Иными словами, речь здесь идет о “внутренней” точности, которая, по существу, характеризует адекватность модели орбитального движения. Учет новых видов наблюдений (альтиметрия) и новых видов возмущений (уточненная модель сelenопотенциала) естественно повышают внутреннюю точность, что проявляется в улучшении согласования орбит. Однако к абсолютной привязке, которая только и могла бы позволить оценить “внешнюю” точность результатов исследований, выполненная работа, на наш взгляд, отношения не имеет. Таким образом, речь идет только о привязке различных орбит “LRO” друг к другу. Очевидно, нужны данные другого типа, например, привязка к звездам, точность которой должна быть сравнима с характеристиками “внутренней” точности [22]. Поэтому предложенный метод сведения разнородных сelenографических данных в единую сelenоцентрическую систему на основе рабочих оценок и создание каталога сelenоцентрических опорных точек с использованием абсолютных наблюдений привязки лунных объектов к звездам и адаптация к ним данных современных космических миссий, а также использование последних моделей теории физической либрации Луны, позволили бы получить сelenоцентрическую динамическую опорную сеть, координатные оси которой совпадают с осями инерции Луны, а центр – с лунным центром масс.

Впервые навигационную привязку к опорной сelenодезической сети был осуществлен миссией “LRO”. На платформе этого спутника были установлены “LALT” для составления точной карты высот “LOLA” и “LROC” главная оптическая камера, для получения фотографий поверхности Луны с разрешением до полуметра, с помощью которых искали подходящие места для посадки пилотируемых экспедиций. В миссия “LRO” особое внимание было обращено на повышение точности определения параметров орбиты спутника. С использованием камеры панорамной съемки были получены

изображения высокого разрешения покрытия определенных областей Луны. Была проведена попытка связать орбитальные параметры космического аппарата с глобальным опорным каталогом кратеров с использованием соответствующих фотограмметрических процедур. В итоге такая процедура была выполнена.

Следует отметить и будущие проекты по освоению и роботизации Луны: это российские миссии Луна 25 (2019), 26 (2020), 27 (2021), 28 (2024), при выполнении которых планируется отработка базовых технологий мягкой посадки на поверхность Луны, высокодетальная съемка Луны, забор и доставка на Землю лунного грунта.

1.1.1 Система сelenографических координат

При создании опорного каталога лунных объектов видимой и обратной стороны Луны (КЛО) необходимо точно определить системы координат, в которых будут проведены все построения, так как в специальной литературе имеются определенные несогласия в данной области. Прямоугольные сelenографические координаты отсчитываются в долях радиуса Луны $R=1738,1$ км.

Направления осей:

ζ – направлена к Земле (x в декартовой системе координат)

ξ – совпадает с проекцией лунного экватора и направлена на восток (y в декартовой системе координат)

η – совпадает с проекцией нулевого меридиана и направлена к северному полюсу (z в декартовой системе координат)

Меридиан, проходящий через первый лунный радиус, т.е. через ось инерции X, имеет долготу 0^0 .

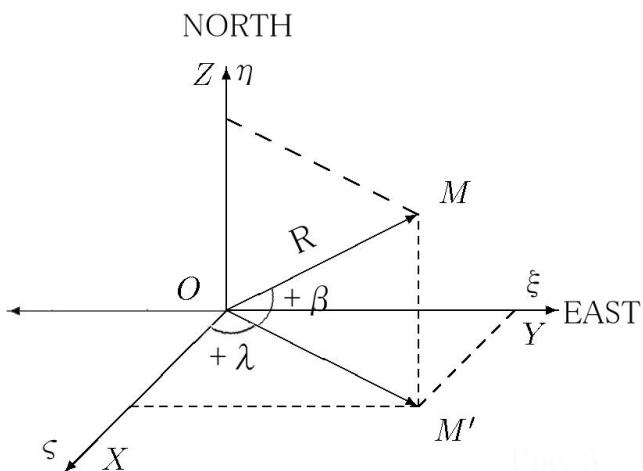


Рис. 1.1.1 Системы сelenографических координат

Долгота: отсчитывается в градусах. Согласно классикам сelenографии [23, 24] селенографическая долгота пункта равна двугрannому углу между нулевым меридианом и меридианом кратера. Она положительна в восточном и отрицательна в западном полушарии Луны. В ту и другую сторону долготы возрастают до 180^0 в первом случае и уменьшаются до -180^0 во втором . Меридиан 180 проходит через центр обратной стороны Луны, пересекая Море Мечты. Однако, согласно [25, 26] определение дается неправильно – положительные долготы отсчитываются к западу от нулевого меридиана, отрицательные в востоку. Таким образом, нужно внимательно относиться к публикациям и определениям, которые даются в различных источниках, так как на их основании было впоследствии опубликовано большое количество научных работ.

Широта: отсчитывается в градусах. Дуга, отсчитываемая от экватора по меридиану, проходящему через кратер до кратера, называется широтой. Измеряется от 0 до 90 к северному полюсу Луны и от 0 до -90 к южному.

Формулы перевода сферических координат в прямоугольные:

$$\xi = R \sin(\lambda) \cos(\beta)$$

$$\eta = R \sin(\beta)$$

$$\zeta = R \cos(\lambda) \cos(\beta)$$

Соответственно углы при вычислениях нужно перевести в радианы

При выборке по λ, β нужно взять средний радиус $R=1738,1$ и далее найти наиближайшее значение по ξ затем по η и ζ .

Перевод прямоугольных координат в сферические:

$$C = 57.295779513082321$$

$$\lambda^0 = C \operatorname{arctg} \frac{\xi}{\zeta}$$

$$\beta^0 = C \operatorname{arcsin} \frac{\eta}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}}$$

$$R = R_0 \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}, \text{ где } R_0 = 1738.1 \text{ км.}$$

Таблица 1.1.1 Связь селенографических координат в разных октантах лунной поверхности (определение знака)

N	ξ	η	ζ	λ	β
1	+	+	+	$0^0 \div +90^0$	+
2	-	+	+	$0^0 \div -90^0$	+

3	-	-	+	$0^0 \div -90^0$	-
4	+	-	+	$0^0 \div +90^0$	-
5	+	+	-	$+90^0 \div +180^0$	+
6	-	+	-	$-90^0 \div -180^0$	+
7	-	-	-	$-90^0 \div -180^0$	-
8	+	-	-	$+90^0 \div +180^0$	-

1.1.2 Метод по разработке и создании референцных селенографических динамических сетей

Для создания селеноцентрической системы используются методы прямой привязки лунных кратеров к звездам с целью создания опорной сети и дальнейшей ее трансформации, сгущения и расширения на большее число объектов. При этом для вычисления координатных положений опорных кратеров применяются алгоритмы робастных оценок. Учитывая, что трансформация селеноцентрических координат требует громоздких перевычислений, предварительно необходимо проанализировать и провести оценку целесообразности производимых вычислений. Для этой цели выполняются подходы регрессионного моделирования:

- 1) Основой метода полного перебора элементов регрессионной модели является полиномиальное разложение стандартных координат, вместо которого можно использовать полиномы второй и третьей степеней. При этом ставится условие минимизации среднеквадратической ошибки (СКО), что выполняется полным перебором элементов регрессионной модели с целью определения оптимального вида модели для трансформации каждой селеноцентрической координаты. Такой подход «плавающей» модели позволяет повысить точность определения селенографических координат лунных объектов на несколько десятков процентов и выше.
- 2) Аффинные преобразования используются при трансформации селенографических координат из одной декартовой селеноцентрической системы \vec{X} в другую \vec{Y} .

Сам процесс трансформации селенографических координат производится в результате точного сравнительного анализа эффективности используемых процедур:

- а) аффинных преобразований;
- б) оптимальных полиномиальных аппроксимаций;
- в) ортогональных преобразований с вариациями систематических ошибок;
- г) решений систем одноуровневых уравнений.

При разработке метода сведения разнородных селенографических данных в единую сelenоцентрическую систему использовались следующие основные подходы. Для робастного оценивания получаемых данных при редукции разнородных наблюдений использовалась следующая регрессионная модель [27]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{AY} + \mathbf{X}_0 + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1.1.2.1)$$

где \mathbf{X} – матрица итоговой приведенной системы разнородных наблюдений, \mathbf{Y} – матрица базисной наблюдательной системы, \mathbf{A} - матрица ориентации , \mathbf{X}_0 – вектор смещения и $\boldsymbol{\varepsilon}$ - матрица ошибок. Для решения системы (1.1) использовалось адаптационное регрессионное моделирование, при котором обеспечение достаточно высокой точности сведения разнородных наблюдений достигается выполнением ряда необходимых условий:

- 1) Производится оценка качественных характеристик регрессионной модели разнородных наблюдений,
- 2) Выполняется диагностика с целью соблюдения требуемых основных условий использования алгоритма метода наименьших квадратов (МНК) (таких как, условие Гаусса - Маркова),
- 3) Анализируется возможность учета численной адаптации к возможному нарушению некоторых условий МНК.

При робастных оценках необходимо

- проанализировать критерии системных преобразований,
- определить спектр конкурирующих регрессионных моделей сведения разнородных наблюдений,
- построить соответствующее множество методов структурно-параметрической идентификации,
- учесть различные сценарии редукции наблюденных данных, предусматривающие прогнозные оценки качественных модельных свойств, позволяющие диагностировать

возможные нарушения условий алгоритма вычислений и выполнять адаптацию при отклонении от постулируемых требований к оптимальным свойствам робастных оценок.

Расширение и сгущение опорной сети выполняется с использованием следующего алгоритма:

$$\mathbf{A} \times \boldsymbol{\Theta} + \vec{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{Z}, \quad (1.1.2.2)$$

где $\mathbf{A}(A_{ij})$ матрица ориентации, $\boldsymbol{\Theta}(\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta)$ - вектор смещения начала координат $\mathbf{Z}(\Delta X, \Delta Y)$ относительно $\vec{\boldsymbol{\varepsilon}}$.

Адаптивное регрессионное моделирование (ARM-подход) постулирует, что структура преобразования координат модели (1.2) неизвестна для каждой пары систем и ее необходимо найти по заданным конкурентным параметрам [28]. В общем случае уравнение (1.2) можно переписать как уравнение матрицы регрессии [19]:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\vec{\boldsymbol{\beta}} + \vec{\boldsymbol{\varepsilon}}, \quad (1.1.2.3)$$

где $\vec{\boldsymbol{\varepsilon}}$ - вектор ошибок, вектор $\vec{\boldsymbol{\beta}}$ первая строка в матрице \mathbf{A} . По-видимому, члены вектора для простого события (1.3) одновременно оцениваются по идентификатору структуры.

Матрица \mathbf{A} часто не соответствуют условиям преобразования ортогональности из $\vec{\mathbf{Y}}$ в $\vec{\mathbf{X}}$ из-за ошибок определения координат обеих систем и вероятных оценок мультиколлинеарности. При этом должно соблюдаться условие:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{E}, \det \mathbf{A} = 1. \quad (1.1.2.4)$$

Выражение (1.1.2.3) совместно с условием (1.1.2.4) можно рассматривать как общее детерминированное преобразование. Эта задача решается методом численной оптимизации, который имеет точность в пределах разности систем $\vec{\mathbf{X}}$ и $\vec{\mathbf{Y}}$.

Определение требуемых параметров $\boldsymbol{\Theta}(\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta)$ осуществляется из выражения:

$$\boldsymbol{\Theta} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{Z}), \quad (1.1.2.5)$$

ошибки искомых параметров $\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta$ находятся из решения ковариационной матрицы:

$$D(\boldsymbol{\Theta}) = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{2n-3} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}, \quad (1.1.2.6)$$

где \mathbf{V} – вектор остаточных отклонений.

При создании КЛО учитываются разные подходы трансформации координат при аппроксимирующих и детерминированных преобразованиях. При этом используются математические алгоритмы, разработанные при выполнении абсолютной привязки

объектов на поверхности Луны к небесной системе координат. Для решения поставленной задачи выполняется модификация метода наименьших квадратов с использованием регрессионного моделирования. Последнее учитывает использование модели аффинных преобразований из одной системы в другую [27].

Исследование сelenоцентрической опорной сети лунных объектов, проводимое в рамках настоящего проекта, выполнено с использованием данных космических миссий, специализированных программных комплексов и системы робастных оценок. Метод исследования включает следующие этапы:

- 1) Исследование систематических и случайных ошибок опорной сelenоцентрической системы;
- 2) Гармонический и фрактальный анализ опорной сelenоцентрической системы видимой, обратной стороны Луны и либрационной зоны.

При создании опорной сelenоцентрической системы используются алгоритмы, разработанные для привязки лунных объектов к звёздной (небесной) системе координат. По меньшей мере, две из рассматриваемых при этом задач метода наименьших квадратов (МНК) могут быть на сегодняшний день решены точнее. Поскольку переобработка базовых координат потребует громоздких перевычислений, следует исследовать и численно оценить, насколько это целесообразно. Проанализированы две возможных модификации метода, основанные на регрессионном моделировании:

- 1) Метод полного перебора структур. Вместо полиномиального разложения стандартных координат будут использоваться полиномы второй и третьей степеней. Полным перебором структур под условием минимума «внешней» среднеквадратической ошибки (СКО) определяется оптимальная структура модели трансформации по каждой координате. Такая модель «плавающей» структуры обеспечивает повышение точности определения координат лунных объектов от нескольких десятков процентов и выше;
- 2) При преобразовании координат из одной прямоугольной системы (\vec{X}) в другую (\vec{Y}) использовалась модель аффинного преобразования.

Метод трансформации координат осуществлён в результате тщательных исследований сравнительной эффективности следующих подходов:

- 1) аффинного преобразования;
- 2) оптимальной полиномиальной аппроксимации;
- 3) ортогонального преобразования без и с учётом систематических ошибок;

4) решения системы одновременных уравнений.

Одной из наиболее важных вычислительных процедур при обработке наблюдений является этап определения (оценивания) параметров математических моделей, используемых, в частности, в геодезии, астрометрии и небесной механике. К сожалению, традиционный подход в указанных областях к оцениванию параметров, предусматривающий жестко фиксированную модель и применение метода наименьших квадратов (МНК), не соответствует возрастающим требованиям практики и возможностям методологии, основанной на статистическом, компьютерном моделировании. Отдельные попытки выйти из рамок стандартного МНК нацелены на решение частных проблем и не предусматривают системного подхода к задаче. Типичными ограничениями при обработке наземных наблюдений и космических данных могут быть наличие незначимых, малоинформативных и дублирующих (зависимых друг от друга) членов разложения, нарушение предположений МНК нормальной схемы Гаусса - Маркова. В качестве альтернативы традиционному подходу в проекте использована методология регрессионного моделирования, предусматривающая в задачах оценивания регрессионный анализ, проверку предположений, адаптацию в случае их нарушений и предполагающая наличие специального программного обеспечения системы обработки информации, автоматизирующей процесс вычисления и анализа. Регрессионное моделирование – это системный подход, при котором корректность применения любого элемента системы (выборка, модель, метод оценивания параметров, метод оценивания структур, мера качества, набор предположений) может быть подвергнута сомнению и проверке с соответствующей адаптацией при нарушении заданных условий. Аналога рассмотренного вкратце системного подхода регрессионного моделирования вкупе с программным обеспечением нет в РФ и за рубежом. На сегодняшний день разработан ряд базовых алгоритмов, обеспечивающих в первом приближении прецизионную обработку информации как для многофакторных, так и для динамических регрессий. Речь идет о следующих алгоритмах:

- 1) ПКРА (программный алгоритм регрессионного анализа); предназначена в первую очередь для анализа оптимальной модели обработки данных, используемой для прогноза. ПКРА имеет достаточно рациональную структуру, включающую в себя: 1) контролирующий программный узел; 2) программный узел создания запроса; 3) набор программных функциональных процедур; 4) программный узел сценария; 5) интерактивный модуль настроек системы; 6) модуль редактора информации; 7) модуль создания интерактивных таблиц; 8) интерактивный справочник.

- 2) ППМГА (программный алгоритм многопараметрического гармонического анализа); разработанная автоматизированная система является специализированной системой, реализующей стратегию статистического (регрессионного) моделирования для решения ряда задач математического описания рельефа и вариаций гравитационного поля. Основное назначение системы – получение регрессионных моделей процессов или явлений с последующим их использованием для прогноза выходных характеристик (откликов).
- 3) ПСПОГС (программный алгоритм параметрического оценивания генетических связей); разработанный алгоритм является специализированной системой, реализующей стратегию статистического (регрессионного) моделирования при решении задач оценивания параметров. Основное ее назначение – получение параметрических регрессионных моделей. Эти модели в основном не предназначены для получения прогноза; их цель – описание причинно-следственных связей изучаемого явления.

1.1.3 Описание цифрового каталога лунных объектов видимой и обратной стороны Луны

Цифровой сelenоцентрический динамический каталог лунных объектов видимой и обратной стороны Луны построен в рамках СЧ НИР «Исследование возможности и эффективности использования, разработка предложений по сelenодезическому обеспечению ЛНСС в части налунных оптических и квантово-оптических средств и бортовых оптических средств. Разработка предложений по навигационному обеспечению лунных миссий в части оптических средств. Разработка имитационной модели картографического обеспечения ЛНС» и предназначен для широкого использования специалистами по небесной механике, астрометрии и космической геодезии. В качестве основы для формирования ЦБК были взяты материалы наземных наблюдений лунных кратеров при привязке к звездам, спутниковых миссий «Clementine», «Kaguya», «LRO» и «Apollo», полученными из интернет ресурсов и в ходе российского и международного сотрудничества. В частности, сelenографические данные, полученные миссией Apollo, описаны на сайте:

https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/revisited/#.W3Z7RM4za6I и в работах [28-34]. Описание сelenографических данных миссии «Clementine» на сайте: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/clementine.html>. Навигационные данные миссии «LRO» доступны на сайте <http://lroc.sese.asu.edu/>. Исходные данные миссии «Kaguya» доступны на сайте <http://gisstar.gsi.go.jp/selene/index-E.html>. Для миссий Clementine, LRO и Kaguya непосредственно сelenографические данные на интернет

источниках отсутствуют и были получены в процессе международного сотрудничества и приведены в единую систему динамических сelenоцентрических координат в КФУ.

Перечень файлов и объектов ЦБД

В перечень файлов на CD входят:

- 1) Цифровая база КЛО, полученного на основе современных космических миссий BD3

Структура ЦБК

Структуру ЦБК составляют значения сelenографических прямоугольных координат, сelenографических долгот и широт, и радиуса вектора кратеров точек на лунной поверхности, полученные из разносортных спутниковых наблюдений и приведенные рабочим моделированием в единую сelenоцентрическую динамическую систему отсчета. Файл ЦБК имеет название BD2. В зависимости от вида содержащейся информации, данные в базе условно можно разделить на восемь структурных разделов, которые можно представить как октанты описанные выше в Таблице 1.1. При этом отношение цифровой информации к определенному структурному разделу характеризуется знаком представленных значений координат. Структура ЦБК следующая. Каждая строка ЦБД содержит наблюденные сelenографические прямоугольные координаты, которые представляют собой: ζ – координата, направленная к Земле, ξ – координата, направленная перпендикулярно к ζ и лежащая в плоскости лунного экватора, η – координата, совпадающая с осью вращения Луны, сelenографическая долгота в градусах, сelenографическая широта в градусах, радиус-вектор кратера в километрах. Всего строк 274093. Координаты ξ, η, ζ связаны с главными осями инерции Луны и в базе даны в долях среднего радиуса Луны 1738,1 км и представляют собой прямоугольные координаты. Средняя расчетная точность координат в базе не превышает по модулю для ξ, η, ζ соответственно значения 0.0001; 0.0001; 0.0002 среднего лунного радиуса. По общепринятой практике описание лунных объектов, координаты которых приведены в ЦБК, имеют сквозную нумерацию, что делается и в других каталожных сelenографических базах. Сопоставление объектов между разными базами данных лунных объектов может быть выполнено с использованием сравнительного анализа близости представленных координатных положений.

Система доступа к информации ЦБД

Для удобства предусмотрена возможность доступа к данным базы двумя способами. Один обеспечивает непосредственный просмотр данных с помощью обычного интерфейса ПК, например, программы «Блокнот». Другой способ, реализованный в виде программы

HeightsComparison, входящей в пакет имитационного моделирования, составленной в системе MATLAB. Данная программа предоставляет возможность доступа к интерактивному поисковому механизму, позволяющему по различным критериям, задаваемым пользователями, осуществлять выборку цифровых данных, создать имитационной модели картографического обеспечения ЛНСС и проводить сравнительный анализ высотных данных модели с селенографической цифровой картой лунной поверхности. Программа позволяет осуществлять тестирование базы и выборку наблюденных объектов селенографических прямоугольных координат лунных объектов по значениям вводимых сферических селенографических координат, характеризующих положение объекта на поверхности Луны (разумеется, никаких поверхностных систем отсчета координат в селенодезии не существует). Здесь можно выбрать и/или задать требуемые опции: значения селенографической широты и долготы, тип выборки: куб или сфера, радиус выборки в долях среднего радиуса Луны. Итоговую информацию можно получить в виде пакета данных базы, в который входят все объекты, попадающие в куб или сферу выборки. Данный подход планируется в дальнейшем использовать при решении задач фотограмметрической привязки космического аппарата к электронным лунным картам и других навигационных задач.

Формат файлов ЦБД

Код хранения: типы данных MS-DOS. Типы ЭВМ, на которой используется база данных: ПЭВМ (персональная электронная вычислительная машина). Для работы с ЦБД система ПЭВМ должна удовлетворять следующим минимальным требованиям:

- 64 Мб ОЗУ;
- 8 Мб видеопамяти;
- CD-Rom привод;
- 5 Мб свободного пространства на жестком диске;
- установленный программный пакет Microsoft Windows

Заключительные положения

Дополнительное использование системы ПЭВМ позволит выполнять операции с данными ЦБД:

- добавить в таблицу одну или несколько записей;
- удалить из таблицы одну или несколько записей;

- обновить значения некоторых полей в одной или нескольких записях;

- найти одну или несколько записей, удовлетворяющих заданному условию.

В ходе выполнения проекта была разработана ЦБК, необходимая для выполнения картографических и селенографических работ. Для выборки и тестирования ЦБД можно использовать прилагаемую программу HeightsComparison. ЦБК позволяет выполнять изменение, добавление и удаление информации в таблицах. Можно использовать ЦБК при работе на таких языках программирования, как C++ и Fortran. Данная работа выполнена полностью в соответствии с предъявляемыми требованиями.

1.1.4 Качественный анализ цифрового каталога лунных объектов видимой и обратной стороны Луны.

В таблице 1.2 приводится распределение объектов цифрового КЛО в зависимости от селенографических долготы и широты.

Таблица 1.1.4.1 Распределение объектов КЛО в зависимости от селенографических долготы и широты

$\lambda \backslash \beta$																		
-170																		
-180	144	193	166	383	463	542	521	555	549	540	526	495	465	407	351	281	202	119
-160																		
-170	138	175	191	374	422	516	528	540	544	545	548	507	472	444	426	394	187	109
-150																		
-160	232	233	298	293	324	363	448	510	585	554	579	629	704	674	407	295	186	114
-140																		
-150	189	246	436	459	470	508	526	563	545	559	528	511	489	436	390	423	199	134
-130																		
-140	259	196	483	413	430	486	527	561	567	548	543	500	458	422	422	408	180	139
-120																		
-130	195	206	374	505	428	451	488	540	568	574	582	556	528	464	380	335	182	117
-110																		
-120	172	223	481	446	441	521	533	615	575	520	526	517	489	471	434	385	226	129
-100																		
-110	185	221	504	392	358	420	502	566	597	567	574	582	561	575	490	388	207	121
-90																		
-100	225	233	411	370	386	450	458	663	632	630	541	526	530	488	491	498	252	79

-80																		
-90	130	206	529	456	451	535	516	524	523	530	532	512	534	498	452	419	163	89
-70																		
-80	190	197	506	435	391	485	505	517	537	546	546	495	459	410	418	452	206	119
-60																		
-70	231	194	442	429	418	453	488	541	584	570	580	551	540	491	448	418	198	137
-50																		
-60	187	206	569	443	488	531	548	573	545	551	537	515	500	468	430	399	167	111
-40																		
-50	148	254	596	427	436	492	522	573	546	554	548	512	465	427	394	433	187	117
-30																		
-40	153	238	594	478	417	478	499	571	600	599	597	574	539	506	460	360	184	119
-20																		
-30	146	257	581	476	501	546	545	570	545	555	571	508	493	422	415	404	183	123
-10																		
-20	175	256	606	541	528	573	577	615	596	605	572	522	569	513	457	348	210	118
0																		
-10	152	242	243	314	515	570	649	720	844	867	871	1149	820	581	445	506	288	177
0																		
+10	148	230	189	538	630	628	693	752	592	573	573	484	602	599	533	458	246	128
+10																		
+20	173	214	227	433	466	537	556	597	583	569	528	502	473	421	398	445	199	144
+20																		
+30	182	207	248	408	438	492	508	557	552	620	601	558	545	469	450	310	123	115
+30																		
+40	138	199	239	446	422	499	507	550	537	552	549	533	518	449	411	416	197	134
+40																		
+50	166	203	251	381	410	656	765	1025	702	714	674	615	659	527	466	514	286	149
+50																		
+60	115	180	195	436	425	446	475	540	586	597	600	563	525	475	425	422	211	122
+60																		
+70	122	176	242	462	499	516	531	526	547	550	556	538	537	471	435	422	200	137
+70																		
+80	124	200	209	440	441	495	516	561	537	546	534	505	451	529	541	360	179	137
+80																		

+90																			
+90																			
+100	191	227	221	483	477	504	515	508	495	522	538	517	501	472	425	354	190	108	
+100																			
+110	225	223	170	454	417	501	524	538	539	534	524	496	454	423	412	408	195	124	
+110																			
+120	171	195	169	367	393	462	479	547	588	577	579	546	510	484	437	420	183	115	
+120																			
+130	117	104	162	472	445	514	528	530	533	534	544	519	500	470	422	357	195	128	
+130																			
+140	221	225	292	457	458	512	547	530	506	487	508	494	459	396	409	418	255	139	
+140																			
+150	239	224	196	467	423	459	505	546	567	582	577	547	525	490	435	413	228	126	
+150																			
+160	231	235	185	434	420	496	505	508	532	519	537	509	480	425	366	363	163	124	
+160																			
+170	212	190	138	381	458	523	540	550	524	515	514	483	472	466	378	362	173	116	
+170																			
+180	169	174	184	341	359	407	519	624	586	583	565	636	639	621	483	228	195	117	

На Рис. 1.1.4.1 и Рис. 1.1.4.2 приводятся распределения объектов КЛО в виде 2D и 3D моделей.

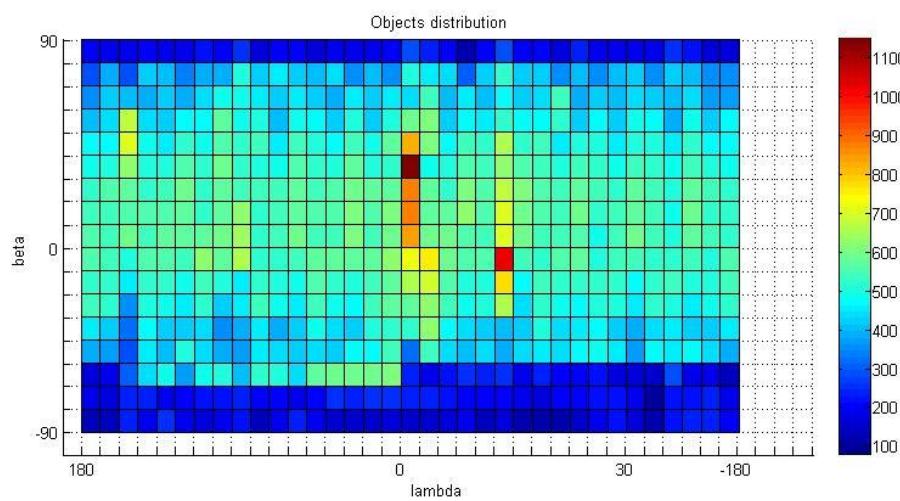


Рис 1.1.4.1 Распределения объектов КЛО в виде 2D модели. По оси ординат отложены сelenографические широты в градусах, по оси абсцисс долготы в градусах. Цветовая диаграмма характеризует количество объектов.

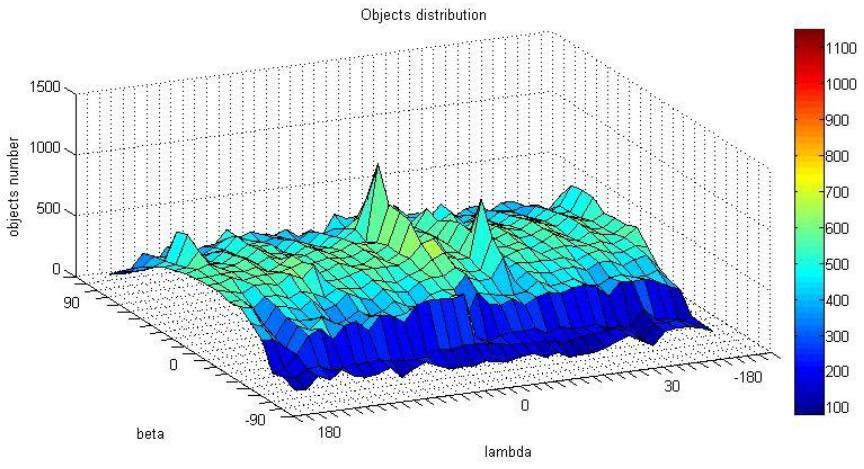


Рис 1.1.4.2 Распределения объектов КЛО в виде 3D модели. По оси beta отложены сelenографические широты в градусах, по оси lambda долготы в градусах. Вертикальная ось и цветовая диаграмма характеризует количество объектов.

Как видно из таблицы 1.4.1 и рисунков 1.1.4.1 и 1.1.4.2 наименьшее количество объектов содержат полярные области. По сelenографическим широтам распределение достаточно равномерное как для видимой, так и обратной сторон Луны.

1.1.5 Сравнительный анализ цифрового каталога лунных объектов видимой и обратной стороны Луны.

Анализ масштаба и ориентации осей КЛО был выполнен с использованием сравнительного метода. Сравнение было выполнено с динамическим каталогом DSC [27].

Основное выражение сравнительного метода разнородных каталогов имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} A & B & C \\ E & F & G \\ M & N & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_i \\ \eta_i \\ \zeta_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D \\ H \\ K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\xi_i \\ \Delta\eta_i \\ \Delta\zeta_i \end{pmatrix}, \quad (1.1.5.1)$$

Где A, F, L - масштабные коэффициенты, зависящие от масштаба сравниваемых систем относительно осей ξ, η, ζ . Данные коэффициенты можно считать множителями относительно осей ξ, η, ζ для приведения данных к единому масштабу в сравниваемых координатных системах *cat 1* и *cat 2*:

$$\xi_{cat\ 1} = (1 - A)\xi_{cat\ 2}, \eta_{cat\ 1} = (1 - A)\eta_{cat\ 2}, \zeta_{cat\ 1} = (1 - A)\zeta_{cat\ 2}. \quad (1.1.5.2)$$

Параметры B, C, E, G, M, N характеризуют ориентацию координатных осей *cat 1* и *cat 2*. D, H, K - являются свободными членами и зависят от несовпадения центров отсчета селенодезических координатных систем. ξ_i, η_i, ζ_i сравниваемые общие точки в *cat 1* и *cat 2* ($i = 1, 2, \dots n$) , где n число сравниваемых объектов, соответственно ξ_i, η_i, ζ_i координаты общих сравниваемых объектов, $\Delta\xi_i, \Delta\eta_i, \Delta\zeta_i$ можно записать как:

$$\Delta\xi_i = \xi_i^{cat1} - \xi_i^{cat2}, \Delta\eta_i = \eta_i^{cat1} - \eta_i^{cat2}, \Delta\zeta_i = \zeta_i^{cat1} - \zeta_i^{cat2}, \quad (1.1.5.3)$$

где $\xi_i^{cat1}, \eta_i^{cat1}, \zeta_i^{cat1}$ - координаты объектов, входящих в систему *cat 1*, которая сравнивается с системой *cat 2* содержащей объекты $\xi_i^{cat2}, \eta_i^{cat2}, \zeta_i^{cat2}$. Индекс i соответствует номеру сравниваемого объекта.

Для КЛО и DSC были составлены условные уравнения вида (1.1.5.1). Всего было получено m уравнений, которые были решены МНК. В результате были получены следующие параметры (Таблица 1.1.5.1). Параметры π, ν, μ , входящие в последний столбец Таблицы 1.1.5.1 представляют собой углы поворота сравниваемых координатных систем в соответствующих плоскостях координатных систем $\xi O\eta, \xi O\zeta, \eta O\zeta$, где O обозначено начало координатной системы. π, ν, μ находятся согласно следующим формулам:

$$\pi = \frac{N-G}{2}, \nu = \frac{C-M}{2}, \mu = \frac{E-B}{2}. \quad (1.1.5.4)$$

Значения π, ν, μ получены из уравнений (1.1.5.4) в радианах и переведены в секунды дуги. Параметры B, C, E, G, M, N являются безразмерными величинами, умноженными на 10^5 , соответственно параметры D, H, K даны в долях радиуса Луны и умножены на 10^5 .

Таблица 1.1.5.1 - Результаты сравнения параметров ориентации КЛО относительно DSC

Системы	A E M	B F N	C G L	D H K	π ν μ
КЛО - DNS	9 ± 11 10 ± 12 32 ± 22	16 ± 14 15 ± 10 30 ± 24	40 ± 16 25 ± 16 33 ± 20	-5 ± 17 -22 ± 21 -34 ± 24	$-10''$ 4 -14

Анализ Таблицы 1.1.5.1 показывает, что масштабные параметры для координат ξ, η, ζ , у сравниваемых систем близки. Положение нуль - пунктов КЛО и DNS имеют достаточно неплохое согласие в границах оцененных ошибок. Согласно значению угла μ у

системы КЛО относительно DNS они обе достаточно близко ориентированы в плоскости в плоскости $\xi O\eta$. Согласно значению угла ν в плоскости $\xi O\zeta$ имеется также неплохое согласие. Согласно значению угла π разница в ориентации систем в плоскости $\eta O\zeta$ лежит в границах ошибок измерений. Основной результат полученный при сравнительном анализе КЛО и DNS состоит в том, что в пределах ошибок измерений координатные оси КЛО и DNS ориентированы достаточно близко в фазовом пространстве и можно сказать, что так как у системы DNS оси совпадают с осями инерции Луны, этот же вывод справедлив и для системы КЛО.

1.1.6 Определение положения нуль – пункта системы координат КЛО

В предыдущем разделе была найдено положение координатных осей КЛО относительно осей инерции. Следующий этап для анализа динамических свойств КЛО состоит в анализе положения центра отсчета (ЦОК) координатной системы КЛО относительно ЦМЛ, при этом находится положение ЦОК исследуемой системы относительно ЦФЛ и затем из сравнения этого положения со значениями, полученными для моделей современных миссий, оценивается близость с ЦМЛ, так как считается, что системы координат спутниковых миссий квазидинамические, то есть ЦОК совпадает с ЦМЛ.

Моделирование положения ЦОК систем координат КЛО и DSC относительно ЦМЛ выполняется в три этапа: 1) Создание многопараметрической гармонической модели разложением по сферическим функциям данных КЛО; 2) Разработка алгоритма оценивания гармонических амплитуд 3) Определение положения ЦОК модели макрофигуры системы КЛО относительно ЦМЛ и сопоставление полученных результатов данными спутниковых наблюдений по нахождению положений ЦМЛ относительно ее ЦФЛ.

1) Создание многопараметрическая гармоническая модель ФПЛ разложением по сферическим функциям данных КЛО

С целью разложения по сферическим функциям данных каталога КЛО используется следующая регрессионная модель:

$$h(\lambda, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \varphi) + \varepsilon, \quad (1.1.6.1)$$

где λ, φ сelenоцентрические долгота и широта кратера, входящего в систему КЛО; $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ - нормированные коэффициенты; \bar{P}_{nm} - нормированные присоединённые функции Лежандра; ε - случайные погрешности регрессии. На основе модели (1.9) создается математическая модель физической лунной поверхности.

Так как гармонический ряд (1.1.6.1) относится к медленно сходящимся, то для параметров отдельных деталей лунного рельефа, имеющих пространственные отличии в областях 1° , порядок разложения должен составлять $n = 180$. Соответственно, при выполнении процедуры оценивания результатов разложения необходимо $(180)^2$ гармонических коэффициентов.

При практическом использовании регрессионной модели (1.1.6.1) необходимо определять количество объектов каталога, которые будут соответствовать задаваемой размерности модели (1.1.6.1) порядка n . Количество каталожных объектов должно быть в $5\div 15$ раз превышать количество гармонических коэффициентов. Следует отметить, что оценивание амплитуд гармоник относится к самому важному этапу вычислительных процессов. Здесь необходимо определить степень достоверности результатов, надежность регрессионной модели с точки зрения ее использования: аппроксимирующая или причинно-следственная регрессия. Данный выбор необходим при решении конкретной задачи описания процесса. В нашем случае используется аппроксимирующая модель.

Классическим методом нахождения гармонических коэффициентов является МНК. При оценивании с помощью МНК \bar{C}_{nm} , \bar{S}_{nm} и моделирования прогнозных значений в процессе разложения по сферическим функциям наблюдательных данных наличие мало информативных, равных по значению и коррелирующих параметров гармонического ряда может в итоге дать ошибочные результаты. Также при этом нет возможности для оценки адекватности регрессионной модели с использованием самих наблюдений, так как набор мер качеств очень ограничен и они сами имеют много недостатков. В этом случае при оценивании регрессионной модели должно быть учтено влияние шумов в измерениях, проверяться условия использования МНК и применяться адаптивные вычислительные алгоритмы. Все эти требования выполняются при регрессионном моделировании, при котором анализируются начальные условия и выполняется адаптация к ним при их несоответствии принятым значениям. С этой целью используются специальные автоматизированные программные пакеты для регрессионного моделирования, позволяющие осуществлять заданную выборку наблюдательных данных для анализа, изменение типа регрессионной модели, модификацию метода оценивания регрессионных структур и параметров, формировать набор мер качеств, использовать дополнительные предложения и проводить адаптацию к заданным условиям.

2) Разработка алгоритма оценивания гармонических амплитуд

Модель (1.1.6.1) относится к переопределенным системам. Ее использование при регрессионных вычислениях позволяет анализировать различные источники

гипсометрических данных. При этом преимуществом такого подхода является возможность выполнения дополнительных процедур:

- применение набора статистических оценок качества модели, включая внешние меры;
- проверка соблюдения условий МНК;
- использование алгоритмов Хаусхолдера и Гаусса-Жордана для адаптации при нарушении условий МНК, к которым относятся: присутствие избыточных шумовых гармонических коэффициентов, что приводит к уменьшению точности модельных построений, наличие корреляционных эффектов между рядом гармоник.

При этом бывает эффективным применение пошаговой регрессии для оценивания гармонических коэффициентов системы (1.1.6.1) в случае, если:

- a) Кратеры имеют равномерное или неравномерное распределение, но по всей поверхности Луны. Причем в случае равномерного распределения кратера можно исключить статически малозначимые члены разложения и выполнить расчеты снова.
- б) Уменьшение порядка разложения меньше 15 в связи с уменьшением обрабатываемых объектов.

Очень важное замечание состоит в том, что при локальных вычислениях, то есть регрессионный анализ не всей сферы, а ее локальной части, возникает эффект мультиколлинеарности, при котором появляется взаимозависимость определяемых параметров и, соответственно, неверная оценка искомых коэффициентов. Поэтому нужно стремиться к наиболее полному заполнению лунной сферы опорными объектами, даже если их распределение неравномерно. В нашем случае отдельное исследование, выполненное в настоящем проекте, показало удовлетворительное распределение объектов системы КЛО по лунной сфере, и, таким образом, эффектом мультиколлинеарности можно пренебречь.

4) Определяется положение ЦОК модели макрофигуры системы КЛО относительно ЦМЛ и сопоставление полученных результатов с данными спутниковых наблюдений по нахождению положений ЦМЛ относительно ее ЦФЛ.

Смещение ЦФЛ относительно ЦМЛ определяется гармониками первого порядка:

$$\Delta\xi = \sqrt{3}\bar{C}_{11}; \Delta\eta = \sqrt{3}\bar{S}_{11}; \Delta\zeta = \sqrt{3}\bar{C}_{10} \quad (1.1.6.2)$$

где $\Delta\zeta$ – поправка к ЦФЛ по оси, совпадающей с направлением на Землю, $\Delta\xi$ – поправка к ЦФЛ по оси направленной перпендикулярно к ζ и лежит в плоскости лунного экватора, $\Delta\eta$ – поправка к ЦФЛ по оси совпадающей с лунной осью вращения; $\bar{C}_{11}, \bar{S}_{11}, \bar{C}_{10}$ - гармонические амплитуды первого порядка в разложении регрессионной модели.

На основе данных космических миссий «Clementine», «Kaguya» и каталога КЛО получены значения нормированных коэффициентов разложения первого порядка

регрессионной модели (1.1.6.1). В таблице 1.1.6.1 приведены соответствующие значения, а также СКО полученных величин.

Первый столбец таблицы 1.1.6.1 содержит величины степени n и порядка m разложения (1.9). Столбцы 2 и 3 содержат оценки гармоник $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ для миссии «Clementine» при порядке разложения $N=40$ и их СКО; столбец 4 – данные миссии KAGUYA при $N=180$; столбцы 5, 6 – данные КЛО при $N=5$. Поправки к принятому среднему радиусу Луны (\bar{C}_{00}) содержатся в строке «0,0». Данные для миссии Clementine и каталога КЛО содержат значения СКО, так как регрессионные модели для них были определены авторами отчета, данные для KAGUYA не содержат СКО, так как были взяты из работы [7].

Таблица 1.1.6.1 Нормированные гармонические коэффициенты первого порядка разложения регрессионной модели (1.9), км.

$n,$ m	Clementine				KAGUY		КЛО			
	\bar{C}	\bar{S}	σ_C	σ_S	\bar{C}	\bar{S}	\bar{C}	\bar{S}	σ_C	σ_S
1	2		3		4		5		6	
0,0	-0.82				-1.21		-1.17			
1,0	-0.36		± 0.02		0.15		0.22		± 0.04	
1,1	-1.05	-0.42	± 0.02	± 0.02	-1.03	-0.44	-0.92	-0.46	± 0.03	± 0.04

Используя данные таблицы 1.1.6.1 и формулы (1.1.6.2) были определены значения положения ЦОК моделей макрофигуры систем миссий Clementine, Kaguya и каталога КЛО относительно ЦМЛ

Таблица 1.1.6.2 Координаты ЦФЛ относительно ЦМЛ для четырех источников гипсометрической информации, км.

	Clementine	KAGUYA	КЛО
$\Delta\xi$	-1,82	-1,78	-1,59
$\Delta\eta$	-0,72	-0,76	-0,79
$\Delta\zeta$	-0,62	0,25	0,43

Как видно из таблицы 1.1.6.2, каталог КЛО показывает хорошее согласие с данными положения ЦФЛ относительно ЦМЛ космических миссий «Clementine» и «Kaguya». Таким образом, можно сделать вывод, что координатная система КЛО относится к динамической сelenоцентрической системе координат и может полноценно использоваться для выполнения навигационных задач как на поверхности Луны, так и в окололунном пространстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Smith D.E. Geophysical Topography of the Moon from the Clementine lidar// J. Geophys. Res. Res., V. 102, 1591, 1997.
2. Kirk, R.L., Archinal, B.A., Gaddis, L.R., and Rosiek, M.R., Cartography for lunar exploration: 2008 status and mission plans// International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences, XXXVII, Part 4, “A Silk Road for Information from Imagery”, Beijing, 3–11 July.- 2008.- P. 1473–1480.
3. Araki H. Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry, Science, V.323, 897-900, 2009.
4. Wu, B., Li, F.b, Ye, L., Qiao, S., Huang, J., Wu, X., Zhang, H. Topographic modeling and analysis of the landing site of Chang'E-3 on the Moon// Earth and Planetary Science Letters.- 2014.- Volume 405, Pages 257-273.
5. Qiao, L., Ling, Z., Fu, X., Li, B. Geological characterization of the Chang'e-4 landing area on the lunar farside// Icarus.-2019.- Volume 333, 15, Pages 37-51.
6. Williams J. G., A.S.Konopliv, D.H.Boggs et al., 2014. Lunar interior properties from the GRAIL mission// J. Geophys. Res. Planets, 119, 1546–1578.
7. Nefedyev, Y., Valeev, S., Mikeev, R., Varaksina, N., Andreev, A. Analysis of data of "Clementine" and "Kaguya" missions and "ULCN" and "KSC-1162" catalogues // Advanced in Space Research.- 2012.- №50, P. 1564 – 1569.
8. Andreev, A., Nefedyev, Y., Gusev, A., Petrova, N., Demina, N. Problems of the lunar internal structure and gravitational field of cosmic mission // AIAA Space and Astronautics Forum and Exposition, SPACE 2016; Long Beach; United States; 13 September 2016 through 16 September 2016; Code 183669 2016, pp. 1-7.
9. Багров А.В. Орбитальный космический комплекс точной координатной привязки наземных и космических объектов. // Труды Ин-та Прикладной астрономии РАН, 2005. - вып. 13. - с.258-263.

10. Bagrov, A. Single-satellite global positioning system/ A.V. Bagrov, V.A. Leonov, A.S. Mitkin, A.F. Nasyrov, A.D. Ponomarenko, K.M. Pichkhadze, V.K. Sysoev. // ActaAstronautica 117 (2015) 332–337.
11. Загидуллин А.А., Усанин В.С., Петрова Н.К., Нефедьев Ю.А. Проблема редукции углов вращения Луны, полученных в разных теориях лунной физической либрации// Известия ГАО РАН.-2018.- № 225 с. 155-160.
12. Nefedyev, Y.A Application of antijamming robust analysis method for selenocentric reference net building / Nefedyev, Y.A., Bezmenov, V.M., Demin, S.A., Andreev, A.O., Demina, N.Y.// Nonlinear Phenomena in Complex Systems Volume 19, Issue 1, 2016, Pages 102-106.
13. Demina N.Y., Petrova N.K., Zagidullin A.A., Andreev A.O., Nefedyev Y.A., Demin S.A. Construction of simulation models of lunar observations //Journal of Physics: Conference Series. - 2018. - Vol. 1135 (2018) - Art. № 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/1135/1/012001
14. Andreev A.O., Zagidullin A.A., Demina N.Y., Petrova N.K., Nefedyev Y.A., Demin S.A. Analysis of topocentric and gravimetric data from modern space missions //Journal of Physics: Conference Series. - 2018. - Vol. 1135 (2018) - Art. № 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1135/1/012002
15. Андреев А.О., Нефедьев Ю.А., Демина Н.Ю. Создание единой сelenоцентрической системы отсчета координат на основе спутниковых и наземных наблюдений// Известия ГАО РАН.-2018.- № 225 с.11-16.
16. Andreev A. Computer determination of optimal parameters for the telescope placed of the lunar surface / A. Andreev, N. Petrova, H. Hanada, Y. Nefedyev // In: Proceedings of the 18th International multidisciplinary scientific conference “SGEM-2018”. – Congress Center, Albena, Bulgaria, 2018. – Vol. 18, Issue 6.1. – P. 545–552. DOI: 10.5593/sgem2018/6.1/S28.072
17. Andreev A. The method of reducing dissimilar space images to the single reference system / A. Andreev, Y. Nefedyev, N. Demina, S. Demin, V. Borovskih // SGEM.– 2018.– Vol. 18, Issue 6.1. – P. 601–606. DOI: 10.5593/sgem2018/6.1/S28.079
18. Kronrod E. V., Kronrod V. A., Kuskov O. L., and Nefedyev Yu. A. Geochemical Constraints for the Bulk Composition of the Moon ISSN 1028-334X// Doklady Earth Sciences, 2018, Vol. 483, Part 1, pp. 1475–1479.
19. Nefedyev Yu. A., Andreev A. O., Petrova N.K., Demina N.Yu, and Zagidullin A. A. Creation of a Global Selenocentric Coordinate Reference Frame// Astronomy Reports, 2018, Vol. 62, No. 12, pp. 1015–1019.

20. Williams J., Konopliv A. S., and Boggs D. H., et al. Lunar interior properties from the GRAIL mission// *J. Geophys. Res. Planets* 119, 2014, pp. 1546-1578.
21. Konopliv A., Park R., Yuan D.-N., Asmar S., et al. The JPL lunar gravity field to spherical harmonic degree 660 from the GRAIL Primary Mission// *J. Geophys. Res. Planets*, 2013, 118, pp. 1415-1434.
22. Nefedev, Y.A. Analysis of the reference systems of modern selenographic systems/ Y. Nefedev, N.Demina, N.Petrova, A.Andreev// 41st COSPAR Scientific Assembly Istanbul, Turkey, 30 July - 7 August 2016.-2016.- №18795.
23. Куликов К. А., Гуревич В. Б. Основы лунной астрометрии// М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1972. 392 с.
24. Шевченко В.В. Современная селенография// М.: Наука.- 1980.- С. 1-388.
25. Хабибуллин Ш.Т. Лунная картография и селенографические координаты// В кн.: Луна, М.- I960.- С. 57-75.
26. Хабибуллин, Ш.Т. К вопросу о системах селенографических координат, о прецессии и нутации оси вращения Луны // Астрономический журнал.- 1968, № 3.- С.663-674
27. Nefedev Y. Construction of the navigational reference network on the surface of the Moon/ Y.Nefedev, A.Andreev, N.Demina, N.Petrova// AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition, AIAA SPACE Forum, (AIAA 2017-5212).-2017.- pp.1-5. SCOPUS DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2017-5212>.