

На правах рукописи

Лазарев Евгений Николаевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ГИС-ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ
ГИПСОМЕТРИЧЕСКИХ КАРТ ЛУНЫ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ
СЪЕМОК**

Специальность 25.00.33. – картография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2008

Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Шингарева Кира Борисовна

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор
Берлянт Александр Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Макаренко Алла Александровна

Ведущая организация: Государственный астрономический институт им.
П.К. Штернберга (МГУ)

Защита состоится «___»_____ 2008 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д. 212.143.01 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер., 4, зал заседаний ученого совета

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Автореферат разослан «___»_____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Краснопевцев Б.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Спутник Земли – Луна, является нашим ближайшим соседом в космическом пространстве и, поскольку, в настоящее время намечается возобновление исследований Луны с помощью космических аппаратов, разработка методики и обработки современных высотных данных и создание гипсометрической карты Луны является важной задачей, имеющей существенное значение для развития картографии внеземных территорий. Предполагаемая программа России по освоению Луны в 2009-2015 году включает в себя: запуск орбитального лунного спутника для разведки запасов полезных ископаемых, сбор лунного грунта, отправку его на Землю, создание научно-исследовательского полигона для отработки методик переработки лунного грунта. Особое внимание в планах освоения Луны уделяется главным образом южной, но также и северной, приполярным областям, поскольку в этих районах находятся затененные кратеры, в глубине которых есть места, никогда не освещаемые Солнцем, где, возможно, находятся запасы водяного льда, вследствие чего представляется важным составление подробных каталогов высот на данные области.

Степень разработанности темы. Первая гипсометрическая карта Луны была создана в конце XIX Ю.Францем. По данным наземных наблюдений в середине XX в. Картографической службой Армии США (AMS) были созданы карты TLM в масштабе 1:5 000 000 и Центром аэронавигационных карт и информации Военно-воздушных сил США (ACIC USAF) карты LAC в масштабе 1:1 000 000. По данным космического корабля *Аполлон* в начале 70-х годов были созданы крупномасштабные карты LTO и LT на зону покрытия этим аппаратом (25% видимого полушария). В Советском Союзе в 1972 году по материалам фотосъемки с КА Зонд-8 в МИИГАиК была составлена Фотокарта участка лунной поверхности в масштабе 1:1 000 000. В начале 80-х годов в ГАО АН СССР была составлена также гипсометрическая карта на видимое полушарие Луны. После издания в 1992 году «Атласа планет земной группы и их спутников», в котором содержалась мелкомасштабная гипсометрическая карта полушарий Луны в масштабе 1:25 000 000, подобные тематические карты в России не издавались. В 1994 году КА *Клементина* выполнил глобальное высотное зондирование поверхности Луны,

получив данные в различных диапазонах спектра. С этого момента в США по анализу стереоизображений КА *Клементина* создаются высотные сети на всю поверхность Луны (CLCN и ULCN).

Методы автоматизированной обработки данных КА *Клементина* рассмотрены в работах Э.Кука (2000) и М. Розика (2000), но отсутствие свободного доступа к снимкам КА *Клементина* и необходимого программного обеспечения, предопределяет создание отдельной методики обработки имеющихся цифровых данных и составления гипсометрической карты.

Целью исследования является разработка методики получения высотных данных, используя частично обработанную комплексную информацию космических съемок (после необходимого этапа фотограмметрической обработки) и составление на основе этих данных гипсометрической карты Луны масштаба 1:13 000 000 в равновеликой азимутальной проекции Ламберта согласно предложенной методике. Для достижения данной цели, необходимо было решить следующие *задачи*:

- изучить созданные гипсометрические карты; проанализировать имеющиеся высотные данные и методы их обработки; на основе комплексной экспертной оценки выбрать программные продукты.
- создать методику обработки данных, что должно включать в себя: получение баз данных и их генерализацию, расчет корреляции между различными типами данных, создание единого банка данных, обработку атрибутивной информации и расчет корреляции между полученным банком данных и современными существующими каталогами высот.
- составить гипсометрическую карту, а именно: построить изогипсы и выполнить их генерализацию, разработать цветовую шкалу, создать и добавить светотеневую отмывку и шрифтовую нагрузку карты.
- создать руководство пользователя (manual) по обработке данных и составлению карты.

Научная новизна диссертации определяется защищаемыми в ней положениями и состоит в том, что гипсометрическая карта полушарий Луны создана на основе наиболее современных данных КА *Клементина*. Для создания карты используются два источника высотной информации: данные, собранные с помощью радарного высотомера КА *Клементина* и изображения, полученные камерой в видимом

диапазоне спектра, что позволило подробно отразить рельеф приполярных областей Луны.

Несмотря на неполноту и труднодоступность исходных данных и специального программного обеспечения, например, космических снимков КА *Клементина* и специальных программ по их обработке, необходимых при использовании уже имеющихся методов, разработанная методика позволила получить БД на приполярные области Луны, состоящую из более чем 9 миллионов точек поверхности на каждую из приполярных областей. Значения корреляции между полученной ЦМР и наиболее современной и точной на данный момент высотной сетью ULCN 2005 (United lunar Clementine network (USGS)), составили 83,77% и 94,26% для видимого и обратного полушарий Луны соответственно, что говорит о высокой надежности использования разработанной методики.

Предложенное цветовое решение высотной шкалы гипсометрической карты было выбрано с учетом визуального восприятия Луны наблюдателем с Земли, а используемые высотные интервалы позволили отобразить различные формы рельефа Луны от глобальных (морей и горных цепей), до отдельных кратеров. С целью подчеркнуть переход через ноль, в шкале сделан сдвиг отрицательных высот относительно положительных.

В процессе составления карты и обработки данных были разработаны и описаны 2 метода автоматизированной генерализации векторных объектов, а именно точек и полигонов, причем для генерализации точечных данных использовался специальный метод генерализации полигональной сеткой.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

1. Оценка имеющихся исходных высотных данных, обоснование необходимости разработки методики их обработки.
2. Обоснование выбора программного обеспечения, необходимого для обработки данных и составления карты.
3. Методика составления гипсометрической карты.
4. Созданная гипсометрическая карта и разработанная высотная шкала.

Источниковая база. При составлении карты использовались высотные данные КА *Клементина*: точечные данные, полученные лазерным альтиметром КА *Клементина* (точность по высоте – 40 м, в плане – 200 м, интервал между точками 0,25°) и

растровые изображения, полученные на основе стереоизображений КА Клементина, на которых яркость каждого пиксела находится в определенной математической зависимости от высоты (точность по высоте – 50 м, разрешение – 1 км/пиксел). Работа выполнялась с помощью геоинформационных систем ESRI ArcGIS 9.0 (а также модуля Spatial Analyst), ArcView 9.3, статистического пакета R и программы по объединению данных GeoMerge 1.0.1. При выполнении работы были использованы и проанализированы различные литературные источники, атласы планет и гипсометрические карты.

Практическое значение. Разработанная методика позволяет продолжить работу по составлению гипсометрических карт различных масштабов для планет Земной группы, их спутников и других небесных тел (спутников планет гигантов, астероидов, комет и др.) Карты, подобные составленной гипсометрической карте Луны, которые впоследствии должны составить серию гипсометрических карт планет, дают возможность не только геометрически точно отобразить и изучить рельеф небесных тел, но и на основе свойств поверхности выбрать районы, перспективные для исследований. Также, благодаря своей наглядности, эти карты могут широко использоваться в процессе вузовского обучения.

Методология исследования основана на аналитическом и эмпирическом методах исследования.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 93 наименования источников и 4 приложений. Общий объем диссертации 96 страниц текста и 15 страниц приложения, в том числе 6 таблиц и 50 рисунков в тексте.

Апробация работы и публикации. Результаты исследований по диссертации докладывались автором на 23 Международном картографическом конгрессе (Москва, 2007); международной конференции InterCarto–InterGIS 13 (Ханты-Мансийск, 2007); Всероссийской астрономической конференции (Казань, 2007); микросимпозиуме Brown-Vernadsky Micro'46 (Москва'2007); на международной конференции по картографии и геоинформатики (Боровец, Болгария, 2008).

По теме диссертации опубликовано 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК России, промежуточные и окончательные результаты работы представлены в 8 сборниках международных конференций. Созданная карта Луны используется в

учебном процессе на кафедре Картографии и геоинформатики Географического факультета МГУ. В 2007 году автором была издана мелкомасштабная гипсометрическая карта Венеры масштаба 1:90 000 000, методика создания которой частично использовалась при разработке методики составления карты Луны.

Созданное подробное пошаговое описание (manual) некоторых наиболее важных при составлении операций, в частности, генерализации точечных и полигональных объектов, размещено на крупнейшем независимом информационном Internet-ресурсе, посвященном ГИС и ДЗЗ <http://gis-lab.info> («ГИС Лаборатория»).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыты актуальность темы, цель и задачи, научная новизна и практическая ценность работы.

Глава 1. Гипсометрические карты Луны: история картографирования и современные проблемы

Первая гипсометрическая карта видимой с Земли стороны Луны была построена Юлиусом Францем в конце XIX в. Для построения своей карты Франц применял линейную интерполяцию, используя всего 55 точек. В 1961-64 гг. на основе обработки наземных фотографий на видимое полушарие была составлена карта в масштабе 1:5 000 000 – Topographic Lunar Map (TLM). Основой для составления этой карты послужил каталог AMS. Еще одной важнейшей серией гипсометрических карт на видимое полушарие Луны, является Lunar Astronautical Chart (LAC) в масштабе 1:1 000 000 (каталог ACIC). С 1962 по 1967 г. было издано 44 листа. Высотной основой карт LAC служили 196 точек каталога ACIC. В качестве поверхности относимости для карт LAC была выбрана сфера с радиусом 1738,0 км. Однако, нулевой уровень отсчета высот был выбран ниже радиуса сферы на 2600 м, для того, чтобы уменьшить количество отрицательных высот. Ошибка в измерении абсолютных высот этих карт составляет около ± 1 км.

Все вышеописанные гипсометрические карты, являются картами, составленными по наземным наблюдениям. С появлением данных, полученных о Луне космическими аппаратами, появились карты Луны более крупных масштабов на территории, которые были отсняты космическими кораблями *Аполлон* (25% видимого полушария Луны). И первая из таких серий – это карты Lunar Topographic Orthophotomap (LTO) в масштабе 1:250 000. С 1972 по 1980 г. было издано 215

листов. В качестве основы использовались данные, полученные космическими кораблями *Лунар Орбитер* и *Аполлон 15,16 и 17*. Точность определения высот по этим картам варьируется от 30 до 115 м. Еще более крупномасштабной серией карт являются карты Lunar Topophotomap (LT) (1974-78 гг.) – это гипсометрические карты в масштабах 1:50 000, 1:25 000 и 1:10 000. Для всех вышеперечисленных крупномасштабных карт в качестве нулевой высоты был принят радиус-вектор 1730 км. Это было сделано для того, чтобы исключить на картах отрицательные высоты.

В начале 80-х годов, в связи с приостановкой американской лунной программы каталоги точек лунной поверхности не переиздавались, однако в начале 90-х годов, в связи с получением данных КА *Клементина*, в США начали составляться новые и обновляться уже имеющиеся базы данных. Итогом этой работы было составление двух основных опорных сетей Unified Lunar Control Network (ULCN) и Клементина Lunar Control Network (CLCN). Из-за довольно больших погрешностей в плановом определении истинного положения точек, привязанных к сфере радиусом 1736,7 км, в 2005 году на основе ULCN и CLCN при поддержке программы NASA, Planetary Geology and Geophysics была создана Глобальная сеть опорных точек Unified Lunar Control Network 2005 (ULCN 2005), которая является на сегодняшний день наиболее точной, поскольку она основана на фотограмметрической обработке 43 866 снимков Клементины и данных о трехмерном положении 272 931 точек. Точки были привязаны к сфере радиуса 1737,4 км. Высотная точность этой БД оценивается авторами равной приблизительно 100 м.

Также большое внимание уделяется картографированию отдельно приполярных областей Луны. Во-первых, это БД, полученная Энтони Куком, и состоящая более чем из 90 000 точек, полученных вследствие анализа стереоизображений КА *Клементина* на приполярные области Луны, ограниченные параллелями $\pm 60^\circ$. На основе цифровой модели были созданы подробные изображения приполярных областей с разрешением 1 км/пиксел. В качестве поверхности относимости для этих карт использовалась сфера, радиуса 1737,4 км. Высотная точность полученной БД оценивается авторами равной приблизительно 100 м.

Вторая БД на южную приполярную область Луны, созданная параллельно в USGS в 2000 г состоит из 29386 точек. На основе этой БД методом триангуляции была составлена гипсометрическая карта на южную приполярную область. Основой для этой карты также служила сфера, радиусом 1737,4 км.

Если гипсометрическое картографирование в США, в первую очередь, относится к видимой стороне Луны, то советские космические аппараты первыми получили изображения обратной стороны Луны. Одним из первых лунных каталогов в СССР, стал каталог, составленный в 1965-67 гг. на Главной астрономической обсерватории АН СССР (Пулково), состоящий из 500 точек, полученных и измеренных на обсерваториях в Голосеево (ГАО Укр. ССР) и Пулково. Точность измерения вертикальных координат этого каталога варьировалась от $\pm 0,40$ до $\pm 2,50$ км. В 1970 г в ГАИШ на основе 9 селенодезических каталогов высот была составлена единая система селенодезических координат, состоящая из 2900 точек.

В 1971 – 1972 гг. в МИИГАиК по материалам фотосъемки с КА Зонд-8 была составлена Фотокарта участка обратной стороны Луны в масштабе 1:1 000 000, дополненная горизонталями, проведенными через 0,5 км. Ошибка определения высот по снимкам Зонда-8 составляет $\pm 0,2$ км.

В начале 80-х годов в Советском Союзе была составлена гипсометрическая карта на видимое полушарие Луны на основе каталога высот Киев-4, составленного в 1977 г. и содержащего 4900 точек. Высоты отсчитаны от сферы 1738,0 км. Ошибка отображения высот на карте составляет $\pm 0,18 - 0,30$ км.

В конце 80-х – начале 90-х гг. в Атласе планет земной группы и их спутников была представлена Гипсометрическая карта Луны в масштабе 1:25 000 000. В качестве поверхности относимости для этой карты использовалась сфера, радиусом 1737,57 км.

При составлении гипсометрических карт планет и их спутников вообще и Луны, в частности, необходимо учитывать некоторые аспекты, осложняющие процесс составления и анализ поверхности, а именно:

1. Различие поверхностей относимости и уровней отсчета высот. На сегодняшний день, согласно постановлению Международного Астрономического Союза, для расчетов принято использовать радиус Луны, равный 1737,4 км. Часто в

работах, выполненных ранее, использовались совсем другие значения, например 1736,7 км, 1737,57 км, 1738,0 км и др. То же самое можно сказать и о выборе нулевого уровня при составлении гипсометрических карт. Например, для тех же карт ЛАС уровень отсчета высот был выбран равным 1735,4 км, а на картах ЛТО – 1730,0 км. Подобные расхождения приводят к появлению ошибок при сравнительном анализе различных каталогов.

2. Неполнота данных. Наборы высотных данных, полученные в результате исследования небесных тел космическими аппаратами, часто отличаются дискретностью распределения по поверхности и неполнотой. Например, на некоторые участки поверхности Луны, имеются данные с очень высоким разрешением (до 5 м), например, на зоны посадок и пролетов КК *Аполлон*, но распределение этих данных по поверхности носит дискретный характер. Также существенным является и тот факт, что часто при составлении карт небесных тел приходится иметь дело с разновременными данными, имеющими различную точность и площадь покрытия.

3. Труднодоступность данных. Данная проблема свойственна сегодняшнему состоянию в России тематического картографирования планет и их спутников вообще и гипсометрического картографирования, в частности. В связи с отсутствием собственных космических аппаратов, получающих информацию о рельефе и других физических свойствах небесного тела, российские картографы вынуждены ждать поступления подобной информации от NASA, ESA и других зарубежных организаций. Часто это не первичные, а уже обработанные данные, что также осложняет работу с ними.

В результате при создании гипсометрической карты Луны были учтены вышеперечисленные особенности, а именно для создания карты использовались наиболее современные и покрывающие всю поверхность Луны высотные данные КА *Клементина*, привязанные к сфере радиусом 1737,4 км и с помощью разработанной методики, была успешно отчасти решена проблема труднодоступности данных.

Глава 2. Анализ существующего программного обеспечения

Одними из наиболее популярных на сегодняшний день ГИС-пакетов, которые используются для изучения и обработки различных наборов географической

информации, являются программы фирмы ESRI (**ArcView** и **ArcGIS**), а также **ERDAS**.

ArcView – нетребовательная к ресурсам компьютера геоинформационная система. Она имеет простой встроенный язык программирования Avenue, что позволяет писать для нее специальные подпрограммы-приложения или скрипты. ArcGIS – следующее поколение ГИС, значительно более требовательная к ресурсам компьютера. По сравнению с ArcView, ArcGIS предоставляет больше *встроенных* возможностей пользователю по анализу географической информации и по оформлению карты. С другой стороны ArcGIS не ориентирован на создание дополнительных скриптов и встраивание их в тело программы. ERDAS IMAGINE – программа для работы с растровыми изображениями (снимками), их координатной привязкой и фотограмметрической обработкой, созданная компанией ERDAS, Inc.

Помимо ГИС фирм ESRI и ERDAS, Inc., существуют и другие пакеты, в том числе и разработанные в России, позволяющие решать различного рода задачи, наиболее популярные из которых: MapInfo, AutoCAD и ГИС «НЕВА».

MapInfo – ГИС, разработанная компанией MapInfo Corporation, по своим функциям возможностям похожая на ArcView. AutoCAD GeoSyn, Civil – мощный пакет, разработанный фирмой Autodesk, Inc., используемый главным образом для автоматизированного проектирования и черчения. Являясь первоначально системой автоматизированного проектирования (САПР), сейчас AutoCAD по своим возможностям и семейству приложений и дополнительных программ является практически полноценной геоинформационной системой. ГИС «НЕВА» – это геоинформационная система, нетребовательная к ресурсам компьютера, разработанная в России и предназначенная для создания и редактирования электронных карт, решения типовых прикладных задач и разработки специализированных ГИС-приложений. Возможности ГИС «НЕВА» постоянно расширяются и имеют гибкую систему обновления, поскольку система позволяет создавать различные приложения и интегрировать их в программу.

В таблице 1 приведено сравнение по 5-балльной системе рассмотренных ГИС-пакетов по различным параметрам: *стоимость, требования к ресурсам компьютера, возможности* (способность самой ГИС выполнять различные функции (работа с математической основой пространственных данных, работа со

Таблица 1. Сравнение ГИС-пакетов

	Стоимость	Требования к ресурсам компьютера	работы с математической основой карт	Возможности				Сложность создания модулей и расширений	Относительная скорость работы	Распространенность форматов	Итого	
				работы с растровыми изображениями		пространственного анализа	работы с БД					графического ввода результатов
				одноканальные растры	многоканальные растры (космические снимки)							
ArcView	4	5	3	3	2***	3	3	2	4	5	36	
ArcGIS	2	2	5	4	3	5	4	4	2	5	38	
ERDAS*	2	2	5	5	5	2	2	3	1	3	32	
MapInfo	4	5	3	3	2	3	3	2	3	4	36	
AutoCAD**	2	2	2	3	1	1	3	5	1	3	26	
ГИС «НЕВА»	5	4	3	4	3	3	3	3	3	1	36	

* предназначена для пространственного анализа снимков и растровых изображений
 ** предназначена главным образом для автоматизированного проектирования и черчения
 *** (3 балла) с дополнительным модулем Image Analysis



снимками, пространственный анализ и др.) сложность создания модулей и расширений, относительная скорость работы и распространенность форматов.

Анализируя таблицу, можно отметить, что в совокупности возможности продуктов фирмы ESRI очень высоки. ArcGIS позволяет выполнять огромное количество различных операций с векторными и растровыми данными, использовать большое количество проекций и поверхностей относимости, выполнять пространственный анализ, моделирование данных и поверхностей, оверлей, геокодирование и др. Существует также большое количество дополнительных модулей, разработанных для

ArcGIS и значительно расширяющих возможности этой программы. Среди недостатков можно отметить высокие стоимость и требования к операционной системе, однако ArcGIS можно использовать вместе с ГИС ArcView, которая, хотя и является предшествующим поколением ГИС относительно ArcGIS, в то же время дает возможность создавать скрипты, позволяющие выполнять многие из операций

ArcGIS, но при этом значительно дешевле и менее требовательна к ресурсам компьютера.

Пакет ERDAS является одним из наиболее мощных программ по обработке, трансформации, дешифрированию, привязке и различному виду анализа аэро- и космических снимков. Однако, поскольку в данной работе для получения исходных данных снимки КА *Клементина* не могли использоваться в силу отсутствия к ним свободного доступа, в работе с таким мощным и дорогим пакетом, как ERDAS не было необходимости. Тем более что все необходимые операции по привязке, векторизации и анализу растровых изображений, которые были заложены в разработанную методику, можно выполнить с помощью программ ArcView и ArcGIS, совокупная мощность и возможности которых это вполне позволяют.

ГИС-пакет MapInfo по своим возможностям и характеристикам напоминает ArcView. Однако, для выполнения всех видов работ по обработке данных и созданию гипсометрической карты Луны одного этого программного продукта, как собственно и исключительно ArcView, недостаточно.

AutoCAD по сути своей не является ГИС в полном смысле этого слова, хотя, некоторые из его приложений, разработанных компанией Autodesk, в особенности AutoCAD Map 3D позволяют говорить о том, что этот пакет можно использовать для большого спектра задач, решаемых геоинформационными системами. Однако, тем не менее, по своей изначальной и основной ориентации, AutoCAD является скорее очень развитой и многофункциональной системой автоматизированного проектирования (САПР), чем ГИС, поэтому решать задачи картографирования всей поверхности какого-либо небесного тела с помощью этого пакета представляется проблематичным, тем более что по возможностям пространственного анализа, AutoCAD также уступает остальным ГИС.

ГИС «НЕВА» по своим возможностям практически не уступает, а в некоторых аспектах и превосходит, зарубежные аналоги. С другой стороны, распространение файловых форматов НЕВЫ, вследствие недостаточной популяризации и рекламы, за границей практически отсутствует.

В результате вышеизложенного анализа различных ГИС-пакетов, можно сделать вывод, что с учетом поставленных задач наиболее удачным и оптимальным

соотношением инструментария для работы с векторными и растровыми данными обладают ГИС фирмы ESRI.

Итак, основными ГИС-пакетами, используемыми в данной работе, являются программы фирмы ESRI – **ArcGIS 9.0** и **ArcView 3.3**. Также для всех операций, связанных с построением цифровых моделей рельефа и изолиний, использовались модули **Spatial Analyst** и, помимо встроенных модулей, специально написанные скрипты.

Помимо ГИС-пакетов, для расчета статистики и корреляции использовался специальный статистический пакет **R**, а для объединения баз данных пакет **GeoMerge** – свободное программное обеспечение, т.е. программы, которые бесплатно распространяются через интернет и в создании которых участвует множество разработчиков со всего мира.

Глава 3. Разработка методики составления гипсометрической карты Луны

Лазерный альтиметр КА *Клементина*, запущенного 25 января 1994 года и вышедшего на полярную орбиту вокруг Луны 19 февраля 1994 года, получил радарные высотные данные с разрешением до 200 м. Также камерой, снимающей как в видимом, так и в ультрафиолетовом диапазоне, было получено при разных углах съемки около 600 тыс. изображений. Данные лазерного высотного альтиметра КА *Клементина*, покрывают всю поверхность Луны в пределах широт $\pm 60^\circ$, но практически отсутствуют на приполярные области Луны. Таким образом, при составлении полной гипсометрической карты Луны необходимо разработать методику получения и обработки данных КА *Клементина* на области высоких широт.

На данный момент существуют две основных методики обработки изображений КА *Клементина* и получения высотных данных. Автором первой из них является Э. Кук (Центр изучения Земли и планет, Национальный аэрокосмический музей, National Aeronautic and Space Museum, Вашингтон). Если имеются исходные данные зондирования поверхности Луны (космические изображения и данные лазерного альтиметрирования КА *Клементина*), то процесс составления Цифровой Модели Рельефа (ЦМР) включает в себя четыре стадии обработки таких данных:

1. Выбор стереопар изображений для каждой орбиты;

2. Создание ЦМР на определенную территорию;
3. Объединение всех ЦМР, для создания единого ЦМР-покрытия на всю поверхность Луны;
4. Объединение полученных данных с данными лазерного альтиметрирования.

На **первой стадии** используется специальный автоматический алгоритм для того, чтобы определить общие узловые точки для каждой стереопары. Когда такие точки найдены, из каждой пары изображений затем создается стереопара. На **второй стадии** обработки, полученные стереопары объединяются для того, чтобы создать ЦМР. Для расчета положения КА и ориентации камеры используется специальное программное обеспечение GOTCHNA. Затем данные, **объединенные в единое ЦМР-покрытие, соединяются** с данными, полученными высотным альтиметром КА *Клементина*, т.е. каждая из полученных ЦМР, составляющих ЦМР-покрытие, добавляется к данным высотного альтиметрирования и этот процесс повторяется в интерактивном режиме. Именно вышеописанным методом в 2001 г. Э. Куком была создана карта приполярных областей Луны, которая использовалась в данной для получения необходимой высотной цифровой информации.

Автором второй методики обработки данных и составления карты является М. Розик (Американская геологическая служба, USGS, Флагстафф). Первоначальной задачей в этом методе является также создание единого покрытия на приполярные области. Для этого вручную находят общие точки привязки, позволяющие вначале грубо «сшивать» соседние изображения и, в итоге, создать единое покрытие на приполярные области. Для того, чтобы создать вертикальную опорную сеть, на основе данных лазерного альтиметра строится ЦМР, на которую накладываются полученные точки привязки, в атрибутуку которых записывается значение высоты, что, в свою очередь, обеспечивает построение начальной «грубой» сети опорных точек. После этого для более точной привязки с помощью фотограмметрической программы SOCET SET и специально разработанной программы ISIS последовательно проводится несколько стадий триангуляции, в процессе которых исправляются ошибки по высоте и каждое изображение разбивается на 9 равных частей, для каждой из которых автоматически генерируются дополнительные узловые точки.

По оценкам самих авторов второго метода, имеются расхождения между их высотами и высотами, полученными методом Э. Кука. Высоты в районе южного полюса, определенные Розиком, в среднем на 1 – 2 км ниже высот Кука, причем сами авторы метода причиной ошибки считают недоработки в их внутренней программе ISIS. Автором данной работы также было проведено сравнение высотных профилей, построенных на основе растровых моделей, полученных обоими методами, проходящих вдоль меридианов 90° и -90° , которое подтвердило указанное расхождение.

Несмотря на все преимущества, использование методов, описанных выше, не представлялось возможным по двум причинам:

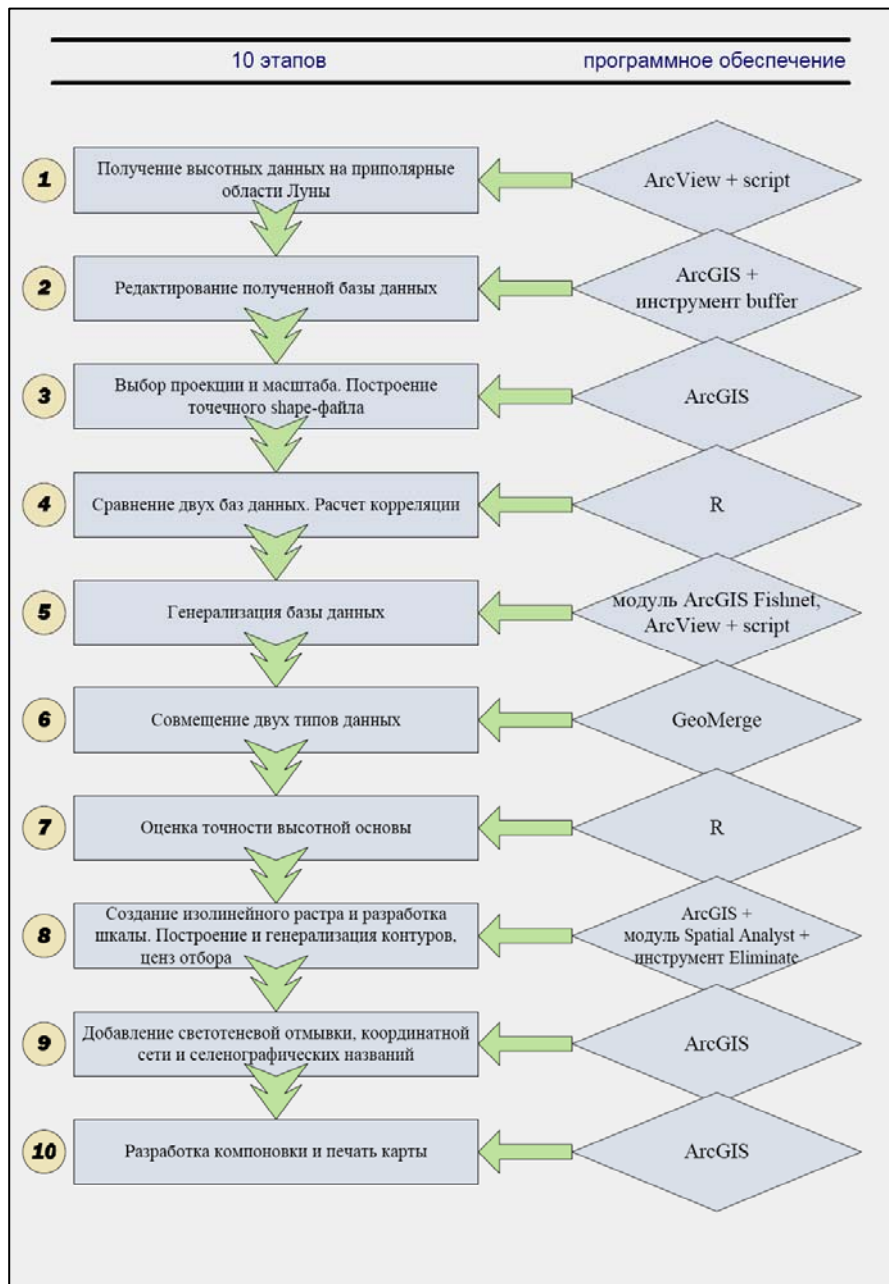
1. отсутствие свободного доступа к стереоизображениям КА *Клементина*, которые могли бы быть использованы для составления ЦМР;
2. отсутствие специально разработанного программного фотограмметрического обеспечения, подобного тому, которое использовалось американскими специалистами (например, GOTCHA или ISIS).

Однако имеющиеся аппаратные возможности (см. гл. 2), а также опыт составления автором гипсометрической карты Венеры позволили разработать метод, позволяющий создать ЦМР на приполярные области Луны без обработки стереоизображений. Для этого в качестве исходных данных для создания гипсометрической карты Луны использовались:

1) данные высотного альтиметра КА *Клементина*, представляющие собой набор из более 1 млн. точек, отстоящих друг от друга на $0,25^\circ$, и в атрибутах которых содержатся значения координат и абсолютных высот. Однако, как уже было указано, приполярные области не обеспечены такими данными в полной мере, поэтому для приполярных областей был необходим дополнительный источник информации, а именно

2) растровые изображения приполярных областей Луны, полученные Э.Куком, на которых высота каждого пиксела находится в определенной зависимости от его яркости.

Схема 1



Точность этих моделей рельефа составляет около 1 км/пиксел. Абсолютные ошибки высот, вычисленные по стандартному отклонению между точками лазерного альтиметрирования КА *Клементина* и цифровой моделью высот, составляют $\pm 0,4$ км для северной приполярной области и $\pm 0,7$ км для южной приполярной области. В приполярных областях выше 80-х параллелей ошибки высот могут составлять $\pm 1,0$ км. Поскольку длина радиуса Луны, равная $1737,4 \pm 1$ км, официально считается Международным астрономическим союзом наиболее корректной, то при создании гипсометрической карты Луны использовалась референц-поверхность, представляющая собой шар с радиусом 1737,4 км.

Итак, отсутствие снимков КА *Клементина* и необходимого программного обеспечения для составления и выполнения анализа стереоизображений, потребовало разработки специальной десятиэтапной методики обработки данных и составления гипсометрической карты Луны (схема 1), каждый из этапов которой раскрывается в последней главе диссертации.

Глава 4. Составление полной гипсометрической карты Луны с использованием двух типов исходных данных

На **первом этапе** были получены данные на области высоких широт Луны, которые не покрываются данными высотного альтиметра КА *Клементина*. Для этого использовались растровые изображения, составленные Э. Куком, на северную и южную приполярные области и ограниченные параллелями $\pm 60^\circ$. На этом этапе выполняется так называемый обратный анализ изображений с последующим пересчетом значения яркости в высоту. Эта работа выполнялась с помощью программы ArcView, а также с использованием дополнительного написанного модуля – скрипта.

Затем, поскольку на используемых растрах находились «черные области» с яркостью 0, в которых отсутствовали данные, на **втором этапе** работы необходимо было удалить точки, содержащие в себе информацию о «черных» пикселах, а также точки, содержащие в себе информацию о пикселах с «переходной яркостью», т.е. находящихся на границе «черных» зон. Эта было выполнено путем построения буферных зон вокруг «черных» пикселов.

На **третьем этапе**, были выбраны проекция (равновеликая азимутальная проекция Ламберта) и масштаб карты (1:13 000 000). Азимутальная равновеликая проекция Ламберта позволяет отобразить полушария Луны и провести некоторый анализ созданной гипсометрической карты, например, измерение площадей высотных уровней и различных форм рельефа Луны. Масштаб карты был выбран равным 1:13 000 000, т.е. диаметр полушария, с учетом использования равновеликой азимутальной проекции Ламберта, составляет 37,81 см. Несмотря на то, что такой масштаб является обзорным, при печати с разрешением 300 dpi и достаточно подробной базе данных, на основе которой строилась карта, на ней можно отобразить высотные уровни и кратеры диаметром до 6400 м. Карта полушарий в

масштабе 1:13 000 000 вписывается в лист размером $59,4 \times 84,1$ см (A1). Именно в таком формате издается серия гипсометрических карт планет, в рамках которой уже изданы гипсометрические карты Марса и Венеры.

Установив, что высота пиксела растрового изображения, находится в следующей зависимости от его яркости: $h = 75 \cdot I - 9600$, где h – высота точки, а I – яркость, значения яркости в полученной ЦМР на приполярные области были пересчитаны в высоты. В свою очередь, прямоугольные координаты, которые первоначально были в атрибутивной таблице, были пересчитаны в сферические координаты по алгоритму, представленному в *приложении 1*, и требуемая база данных приобрела законченный вид.

На **четвертом этапе** с помощью статистического пакета R была рассчитана корреляция между полученной ЦМР на приполярные области и ЦМР, созданной по данным высотного альтиметра КА *Клементина*. Алгоритм расчета корреляции представлен в Приложении 2. Значение корреляции было получено равным приблизительно 54%. Учитывая, что точность и количество данных высотного альтиметра на приполярные области невысоки, (что и было подтверждено невысоким значением корреляции), было принято решение не «накладывать», а «сшить» ЦМР созданные на приполярные области и ЦМР высотного альтиметра по параллелям $\pm 60^\circ$.

На **пятом этапе**, поскольку интервал между полученными точками приполярных областей, намного меньше интервала между точками ЦМР, созданной по данным высотного альтиметра КА *Клементина* ($0,06^\circ$ и $0,25^\circ$ соответственно), требуется выполнение генерализации точек приполярных областей, которая производилась путем осреднения значений высот точек, находящихся в определенной окрестности. Для этого разработан специальный метод – генерализация полигональной сеткой. Смысл этого метода состоит в том, что после наложения полигональной сетки, точки генерализуемого слоя будут перекрыты квадратами сетки. Все значения высоты точек, «попавших» в квадрат, будут осреднены. И это новое среднее значение высоты будет присвоено каждому полигону сетки. Затем рассчитываются координаты центроида каждого квадрата (полигона) сетки. В результате координаты центроида и среднее значение высоты и будут новыми координатами генерализованной ЦМР. Для создания сетки

использовался модуль ArcGIS Fishnet, а для выполнения самой – генерализации специальный, написанный для ArcView, скрипт. Учитывая то, что если на экваторе Луны один градус составляет 30,32 км, а на широте $\pm 60^\circ$ – 15,16 км, т.е. в два раза меньше, ЦМР генерализовалась на приполярные области не до $0,25^\circ$, а до $0,5^\circ$. Алгоритм автоматизированной генерализации точечных данных полигональной сеткой представлен в Приложении 3.

На **шестом этапе** необходимо «сшить» 2 типа данных, для чего используется программа GeoMerge, и затем поделить весь массив точек на два больших блока для видимого (долготы от -90° до $+90^\circ$ с запада на восток, центральный меридиан 0°) и обратного полушарий (долготы от $+90^\circ$ до -90° с запада на восток, центральный меридиан 180°).

На **седьмом этапе**, способом, описанным в Приложении 2, была посчитана корреляция между объединенной и генерализованной ЦМР и наиболее точной и современной на сегодняшний день сетью ULCN 2005. Корреляция рассчитывалась отдельно для видимого и обратного полушария Луны. После проведения расчетов, для видимого полушария была получена корреляция равная 83,77% и для обратного полушария – 94,26%, что позволяет говорить о хорошей надежности использования разработанной методики, и дает возможность перейти непосредственно к составлению карты.

Далее, на **восьмом этапе**, начинается непосредственно составление карты, для чего используется модуль ArcGIS Spatial Analyst, с помощью которого строится изолинейный растр, а затем и сами векторные контура. Для построения изолинейного растра использовался метод регулярной сплайн-интерполяции, в процессе которого создается гладкая постепенно изменяющаяся поверхность.

Размер ячейки создаваемого растра был выбран равным 1530 м, исходя из того, что, в среднем, принтер или плоттер печатает 120 точек на сантиметр. Но, поскольку на карте Луны в проекции Ламберта и масштабе 1:13 000 000 1 см на экваторе составляет приблизительно 92 км, то, соответственно, размер ячейки растра ($[92/120] \times 1000$) должен быть выбран равным 767 м. Обычно, во избежание погрешностей и брака печати, математически рассчитанный размер ячейки умножают на 2, т.е. приблизительный размер пиксела должен составлять 1530 м, что и указывается при выполнении сплайн-интерполяции. При выполнении затем

генерализации контуров и выборе ценза отбора, опять же во избежание погрешностей печати, значения ячейки растра умножают еще на 4, получая таким образом значение 6120 м. Соответственно, с карты снимаются все контура площадью менее 37 454 400 м². Генерализация выполняется в ArcGIS с помощью модуля Eliminate. Алгоритм выполнения этой операции представлен в Приложении 4.

При разработке высотной шкалы карты учитывалось восприятие Луны наблюдателем с Земли, т.е. при отображении таких глобальных форм рельефа как моря, наблюдаемые с Земли как серо-зеленые пятна, и возвышенные светлые области, использовалась серо-зеленая и светло-желтая гамма цветов, сделавшая восприятие карты читателем более привычным. Также при разработке шкалы учитывались глобальные свойства лунной поверхности, что отразилось в выборе высотных интервалов – от –4 км до +4 км – через 500 м, и выше +4 км и ниже -4 км – через 1000 м. Это дало возможность подробно отразить на карте и структуру плоских морей Луны, высотную поясность и многочисленные кратеры.

На **девятом этапе** автоматизированным способом с помощью инструмента hillshade модуля Spatial Analyst на карту добавлялась светотеневая отмывка. Поскольку размер пиксела при создании изолинейных растров был выбран равным 1530 м, с помощью отмывки были выразительно подчеркнуты все основные формы рельефа Луны, а также отображены многие объекты (например, кратеры и горные пики), не выраженные на карте изогипсами, что, в свою очередь, добавило карте наглядности.

На **десятом, завершающем, этапе** разрабатывается компоновка карты и выполняется ее печать.

Заключение

Основным результатом работы является созданная автоматизированная методика получения и обработки данных на приполярные области Луны и впервые в новейшей истории России составленная и подготовленная к изданию полная гипсометрическая карта Луны (рис.1).

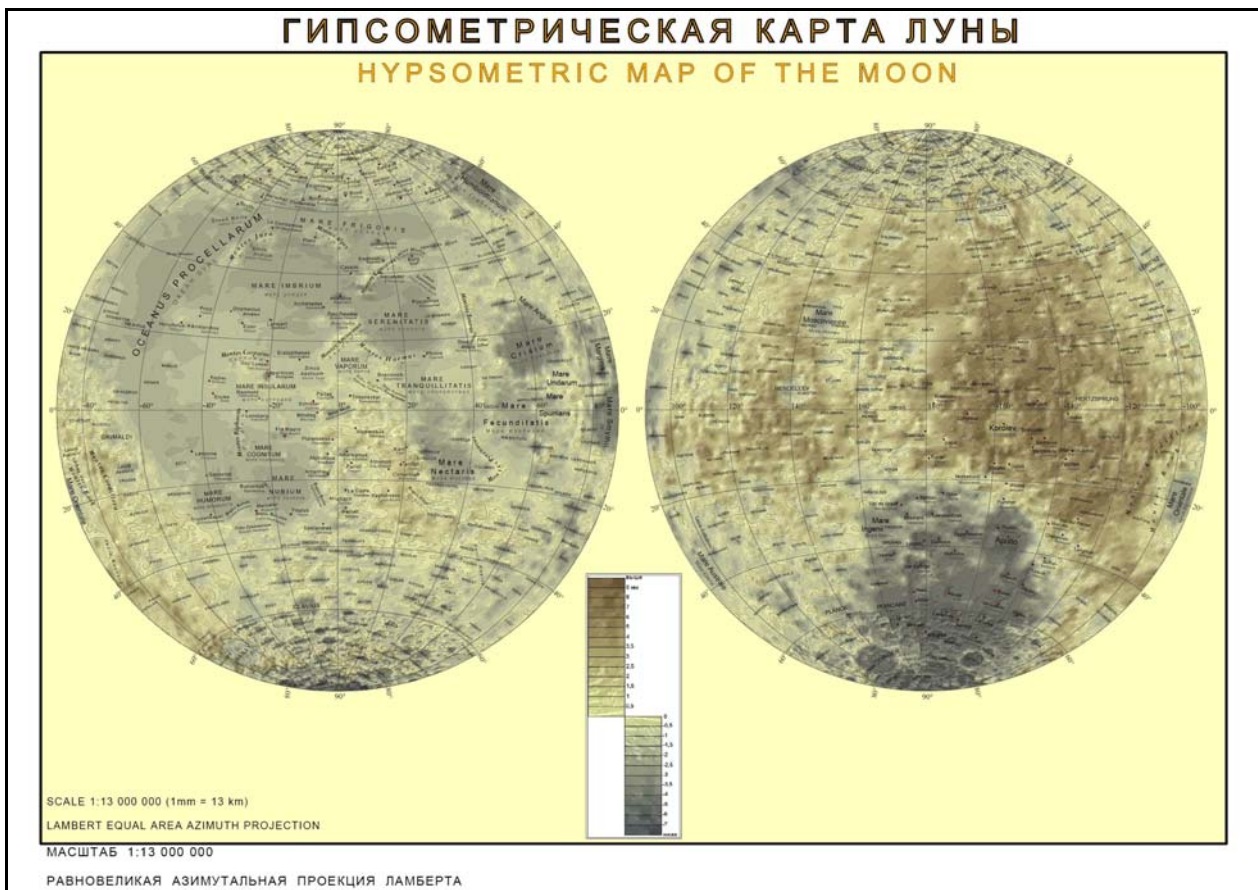


Рис.1. Гипсометрическая карта Луны

В итоге получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Перед составлением карты по нескольким параметрам был проведен экспертный анализ различного геоинформационного программного обеспечения, и по результатам этого анализа были выбраны наиболее подходящие для решения поставленных задач продукты.
2. Несмотря на неполноту и труднодоступность исходных данных и программного обеспечения, разработанная методика позволила получить БД на приполярные области Луны, состоящую из более чем 9 миллионов точек поверхности на каждую из приполярных областей, отстоящих друг от друга на $0,06^\circ$.
3. Для составления карты использовалась наиболее современная основа, имеющаяся на сегодняшний день – данные КА *Клементина*, причем в процессе получения ЦМР было осуществлено так называемое *data fusion*, т.е. объединение двух типов данных, а именно полученной ЦМР и данных высотного альтиметра КА *Клементина*, что позволяет говорить о более объективном отображении рельефа. Высокие значения корреляции между полученной ЦМР и наиболее современной и

точной на данный момент высотной сетью ULCN 2005 позволяют говорить о высокой надежности использования разработанной методики.

4. В процессе составления карты и обработки данных были разработаны и описаны 2 метода автоматизированной генерализации векторных объектов, а именно точек и полигонов, причем для генерализации точечных данных использовался специально разработанный метод генерализации полигональной сеткой.

5. Цветовое решение высотной шкалы гипсометрической карты было выбрано с учетом визуального восприятия Луны наблюдателем с Земли, а используемые высотные интервалы позволили отобразить различные формы рельефа Луны от глобальных (морей и горных цепей), до отдельных кратеров, которые были подчеркнуты добавлением светотеневой отмывки.

6. В процессе работы над картой, в качестве приложения было составлено подробное пошаговое описание (manual) некоторых наиболее важных при составлении операций, которое можно использовать при работах по составлению гипсометрических карт не только Луны, но и других небесных тел и земной поверхности. Методы генерализации, описанные в приложении, уже размещены в качестве интернет-статей на некоторых геоинформационных ресурсах сети Internet, в частности gis-lab.info, и могут свободно применяться и уже применяются пользователями как для составления гипсометрических, так и при составлении других тематических карт.

Работы, опубликованные по теме диссертации:

1. Лазарев Е.Н. Гипсометрическая карта Венеры: методы создания и использования. //Известия Вузов, № 4, 2007. С.127-131.
2. Лазарев Е.Н. Генерализация точечных массивов данных посредством использования дополнительных возможностей геоинформационных систем. //Известия Вузов, № 5, 2008. С.70-72.
3. Гипсометрическая карта Венеры. М.: ООО «ПринтЭкспресс», 2008.
4. Лазарев Е.Н. История картографирования Марса. //Сборник историко-астрономических исследований РАН, Вып. 33, 2008. С.235-257.
5. Lazarev E.N., Rodionova J.F., Iuhina J.A., Litvin P.V. The creation of the Moon, Mars and Venus hypsometric maps series according to the remote sensing data.

- //Proceedings InterCarto – InterGIS 12; Berlin: Deutsche Gesellschaft für Kartographie e.V., 2006. P. 267 – 277. (Лазарев. Е.Н. Родионова Ж.Ф., Илюхина Ю.А., Литвин П.В. Создание серии гипсометрических карт Луны, Марса и Венеры по данным космических съемок.//Материалы Международной конференции InterCarto – InterGIS 13)*
6. Lazarev E.N., Rodionova J.F. The lunar subpolar relief map: the ways and techniques of compiling and using. *//Proceedings XXIII International Cartographic Conference; Moscow: Роскартография, 2007. С.371. (Лазарев Е.Н., Родионова Ж.Ф. Карта рельефа приполярных областей Луны: методы создания и использования.//Материалы 23 Международного картографического конгресса)*
 7. Лазарев Е.Н., Родионова Ж.Ф. Морфометрический анализ лунной поверхности на основе данных КА «Клементина». *// Материалы Всероссийской астрономической конференции "Космические рубежи XXI века" (ВАК – 2007), Казань: Изд. КГУ, 2007. С.60-61.*
 8. Lazarev E.N., Rodionova J.F. Raster Venus and Lunar maps as a source for obtaining vector topographic data.*//Proceedings of The Second International Conference on Cartography and GIS, Borovets (Bulgaria); Sofia: University of Agriculture, Civil Engineering and Geodesy, 2008. P. 181-192. (Лазарев. Е.Н. Родионова Ж.Ф. Растровые изображения Венеры и Луны как источник для получения векторных гипсометрических данных.//Материалы 2й Международной конференции по картографии и ГИС)*