

Министерство образования и науки Российской Федерации

**КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
КАФЕДРА АСТРОНОМИИ И КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ**

Направление «21.03.03 - ГЕОДЕЗИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ
ЗОНДИРОВАНИЕ»
Профиль «КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОДЕЗИЯ И НАВИГАЦИЯ»

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

**ИЗУЧЕНИЕ РЕЛЬЕФА МОРЯ ВОСТОЧНОГО ПО ДАННЫМ ОБРАБОТКИ
СНИМКОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ЗОНД-8»**

Работа завершена:

"__" _____ 2018 г. _____ (А.А. Фаляхова)

Работа допущена к защите:

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

"__" _____ 2018 г. _____ (М.И. Шпекин)

Зав. кафедрой,

д.ф.м.н.

"__" _____ 2018 г. _____ (И.Ф. Бикмаев)

Казань – 2018

Оглавление

Введение	2
Глава 1. Исследование рельефа моря Восточного и Луны	5
1.1 Обзор исследования рельефа Луны	5
1.2 Район моря Восточного	8
1.3 Как образовалось Море Восточное на Луне	10
1.4 Наземные и космические наблюдения в районе моря Восточного	13
1.5 Картографическая изученность моря Восточного	15
1.6 Другие исследования района моря Восточного	16
1.7 Либрация Луны	17
Глава 2. Определение высот района Моря Восточного	18
2.1 Орбитальная съемка космического аппарата «Зонд-8»	18
2.2 Система координат снимка и данные калибровки камеры	20
2.3 Фотограмметрическая обработка снимков	23
2.4 Построение высотных профилей по изображению горизонта	33
Глава 3. Анализ полученных результатов	37
3.1 Оценка решения обратной фотограмметрической засечки	37
3.2 Сравнение наших результатов с прогнозом ЦНИИГАиК	39
3.3 Обсуждение высотных профилей, построенных по точкам горизонта	40
Заключение	43
Список литературы	44
Приложения	46
Приложение 1	46
Приложение 2	47
Приложение 3	48

Введение

Луна является единственным естественным спутником Земли. Она сформировалась немного позднее Земли. Согласно популярной сейчас гипотезе Камерона это произошло в результате столкновения Земли с телом размером с Марс. В результате такого столкновения большая часть образовавшихся фрагментов ударного выброса возвратилась на Землю, некоторая часть массы была потеряна из-за высоких скоростей фрагментов, а остатки выброшенного материала остались на орбите Земли, сформировав Луну, масса которой составляет всего 1/80 земной. Луна проходила многоэтапную геологическую эволюцию [5].

Луна – синхронный спутник, то есть период ее осевого вращения сходится с периодом ее орбитального обращения вокруг Земли. Вследствие этого Луна регулярно обращена к нам одной стороной. Данное означает, что только около пятидесяти процентов всей площади ее поверхности открыто исследованиям с Земли [5].

Вокруг своей оси Луна вращается с постоянной скоростью, а вот вокруг Земли она обращается по эллиптической орбите неравномерно: в перигее – быстрее, в апогее – медленнее. К тому же экваториальная плоскость Луны наклонена к плоскости ее орбиты в среднем на $6^{\circ} 41'$. А кроме этого, сам наблюдатель движется в результате вращения Земли. Все это приводит, с точки зрения земного наблюдателя, к небольшим видимым покачиваниям Луны по долготе и широте, так называемым либрациям. В результате либраций земной наблюдатель в течение месяца может увидеть почти 60 % площади лунного шара, но оставшиеся 40 % с Земли не видны никогда [6].

Поверхность Луны богата горами и впадинами, поэтому контур ее видимого диска представляет сложную кривую, вид которой все время меняется с изменением оптической либрации. При наблюдениях Луны, покрытий звезд Луной и затмений Солнца необходимо учитывать рельеф ее края, которое подробно описано в работе [3].

Наблюдения вращения Луны необходимы для изучения ее динамических характеристик, для уточнения некоторых астрономических постоянных и, наконец, для изучения фигуры Земли и неравномерности ее вращения [7].

На Луне были найдены так называемые криптоморя. Это очень древние морские образования, которые были скрыты материалом выбросов при образовании крупных бассейнов, например бассейна Моря Восточного. Признаками криптоморя служат кратеры, имеющие темное гало, что является признаком наличия на некоторой глубине темного вещества, вероятно, базальтового состава [6].

Море Восточное расположено в краевой зоне Луны в центральной части западного полушария. Этот район лунной поверхности привлекает внимание к себе все большее внимание. Можно назвать несколько причин, вызывающих повышенный интерес. Море Восточное- это самый большой на Луне кольцевой бассейн. Он состоит из четырех кольцевых концентрических горных хребтов, окаймляющих центральную часть бассейна - хорошо выраженную морскую равнину диаметром более 300 км [1].

Своеобразие топографии района, без каких-либо предварительных оценок указывает на то, что возникновение моря Восточного связано с бассейнообразующим событием необычайно высокой энергетической мощности. Диаметр внешнего кольца бассейна приблизительно 1000 км (радиус Луны составляет 1738 км). С морем Восточным связаны цепочки лунных кратеров. Они простираются в разных направлениях от центра бассейна на расстоянии до 1000 км, состоят из схожих по размеру кратеров диаметром 15-20 км и предполагают уникальные образования для Луны в целом [1].

Актуальность изучения района Моря Восточного заключается в следующем:

- 1) Море Восточное – самый большой кольцевой бассейн на Луне.
- 2) Изучение гравитационных аномалий района позволит детальнее изучить природу и происхождение масконов [1].
- 3) Море Восточное считается наиболее перспективным районом для создания лунной базы по своему территориальному положению, сырьевым ресурсам и потенциалу научных задач.
- 4) Изучение следов лунных столкновений поможет объяснить условия, царившие на нашей планете в эпоху зарождения жизни, ведь момент образования Моря Восточного совпадает с появлением первых свидетельств жизни на Земле.
- 5) Исследование молодых многокольцевых ударных бассейнов представляет практический интерес для понимания самого процесса кратерообразования[8].
- 6) Море Восточное расположено в краевой зоне Луны и известно столь велико значение точных данных о рельефе краевой зоны при решении практических задач, связанных с наземными, астрометрическими наблюдениями Луны.

Несмотря на большое количество работ по изучению и исследованию района Моря Восточного его рельеф изучен недостаточно до сих пор. Одной из самых полных исследований рельефа этого района были выполнены Ч.Уоттсом при построении карт

краевой зоны Луны. К морю Восточному тянется самая значительная на видимом полушарии Луны трещина в районе кратера Сирсалис. В области моря Восточного прослеживаются гравитационные аномалии.

Цель данной выпускной квалификационной работы заключается в построении высотных профилей сечений района Моря Восточного в краевой зоне Луны по снимкам горизонта КА «Зонд-8».

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить каталоги для опознания кратеров в районе моря Восточного по снимкам горизонта;
2. Проанализировать исходные данные;
3. Опознать опорные точки по каталогу селеноцентрических координат;
4. Получить элементы внешнего ориентирования снимков путем решения обратной фотограмметрической засечки;
5. Построить высотные профили сечений территории Моря Восточного;
6. Сделать выводы по полученным высотным профилям

Глава 1. Исследование рельефа моря Восточного и Луны

1.1 Обзор исследования рельефа Луны

Даже невооруженным глазом на Луне видны неправильные протяженные темноватые пятна, которые были приняты за моря; название сохранилось, хотя и было установлено, что эти образования ничего общего с земными морями не имеют. Телескопические наблюдения, которым положил начало в 1610 Г. Галилей, позволили обнаружить гористое строение поверхности Луны. Выяснилось, что моря – это равнины более темного оттенка, чем другие области, иногда называемые континентальными (или материковыми), изобилующие горами, большинство которых имеет кольцеобразную форму (кратеры).[25]

Рельеф лунной поверхности был в основном выяснен вследствие многолетних телескопических наблюдений. **Анализ рельефа поверхности** планеты позволяет выявить степень тектонической обусловленности орографических элементов и их комплексов, установить перечень действующих экзогенных рельефообразующих процессов и меру их активности. При детальном изучении рельефа можно выявить палеоформы и составить общее представление о физических условиях на планете не только в настоящее время, но и в прошлом[9].

Детали поверхности, расположенные вблизи лимба, и в первую очередь области, видимость которых зависит от либрации, лучше всего наблюдать сразу до или после полнолуния; их изучение в новолунии затруднено. Следует иметь в виду, что некоторые детали, возможно, не всегда будут видны из-за либрации. Так как вследствие проекции детали на лимбе искажены, их довольно трудно узнать, и только многократные наблюдения помогут нам с уверенностью опознать их [10].

«Лунные моря», занимающие примерно 40% видимой поверхности Луны, предполагают собой равнинные низменности, пересечённые трещинами и низкими извилистыми валами; больших кратеров на морях относительно не достаточно. Многочисленные моря охвачены концентрическими кольцевыми хребтами. Другая, наиболее светлая поверхность покрыта множественными кратерами, кольцевидными хребтами, бороздами и так далее. Кратеры меньше 15—20 км обладают элементарной чашевидной формой; наиболее большие кратеры (вплоть до 200 км) состоят из округлого вала с крутыми внутренними склонами, обладают относительно плоским дном, наиболее

углублённое, чем окружающая местность, зачастую с центральной горкой. Высоты гор над окружающей местностью находятся по длине теней на лунной поверхности или фотометрическим способом.

Таким образом, были сделаны гипсометрические карты масштаба 1 : 1 000 000 на большую часть видимой стороны. Однако абсолютные высоты, расстояния точек поверхности Луны от центра фигуры или массы Луны находятся очень нерешительно, и основанные на них гипсометрические карты дают лишь единое представление о её рельефе.

«Названия кратерам на обратном полушарии Луны были даны по согласованию между учеными разных стран; по традиции они были названы именами выдающихся ученых. Так, на Луне есть кратеры Платон, Архимед, Коперник и другие. Из кратера Тихо (в честь датского астронома Тихо Браге) в южном полушарии Луны, 60 км диаметром, во все стороны строго по радиусам почти до половины видимого полушария распространяются светлые лучи. Это тонкий слой вещества, выброшенного из кратера при его возникновении. В этих местах обнаружены скопления мелких кратеров. На обратной стороне Луны мы встречаем более современные нам имена: Море Москвы, кратеры Королев, Циолковский, Жюль Берн, Эдиссон, Герцшпрунг, Менделеев, Гагарин и многие, многие другие. Подобно земной коре лунная кора формировалась посредством чередовавшегося горообразования и опускания обширных областей, заливаемых расплавленной каменистой массой (магмой), поступавшей из недр и родственной излияниям лавы из вулканов. На лунной коре есть складки - горные цепи. Полагают, что многие крупные лунные кратеры образовались при вулканических процессах. Их напоминают гораздо меньшие по размеру лавовые озера с относительно невысокими краями, находящиеся на Гавайских островах. Ведь на обычные вулканы лунные кратеры совсем не похожи, хотя в центре некоторых из них есть крутые конусы, более похожие на вулканы.

Луна признана мертвым миром, на котором не замечается признаков жизни и даже геологических изменений. (Правильнее было бы назвать их селенологическими, так как «ге» - по-гречески Земля, а «селена» - Луна.) Поэтому особый интерес заслуживает наблюдение пулковского астронома Н. А. Козырева. При фотографировании спектра лунного цирка Альфонс Козыреву посчастливилось наблюдать явление, которое, по-видимому, похоже на вулканическое извержение. 4 ноября 1958 г. он обнаружил, что на некоторое время центральная горка этого кратера покраснела, и в ее спектре наблюдались полосы излучения молекул углерода. По-видимому, произошло извержение паров углерода в безвоздушное пространство вокруг Луны, которые засветились под действием лучей Солнца так же, как они светятся в

головах комет. Такие явления на Луне, несомненно, очень редки и, подстеречь их очень трудно.

Таким образом, астрономам удалось еще с Земли «проникнуть» под видимую поверхность Луны, свойства которой мы все еще знаем недостаточно. Станции, опустившиеся на Луну, подтвердили возможность высадки космонавтов на Луне. Обеспечение возвращения их на Землю гораздо более трудная задача»[20].

1.2 Район моря Восточного

Море Восточное («Mare Orientale» на латыни) – лунное море, расположенная на западной границе ближней стороны и дальней стороне от Луны. С Земли видна лишь часть этой территории.

Изображения с космических аппаратов показали, что это будет один из самых ярких масштабных лунных деталей, напоминающее кольцевое яблочко. На рисунке 1 изображено море Восточное, снятое с «Лунного Орбитера- 4» в 1967 году.

Координаты	19,4 ° С 92,8 ° W
Диаметр	327 км (203 мили)

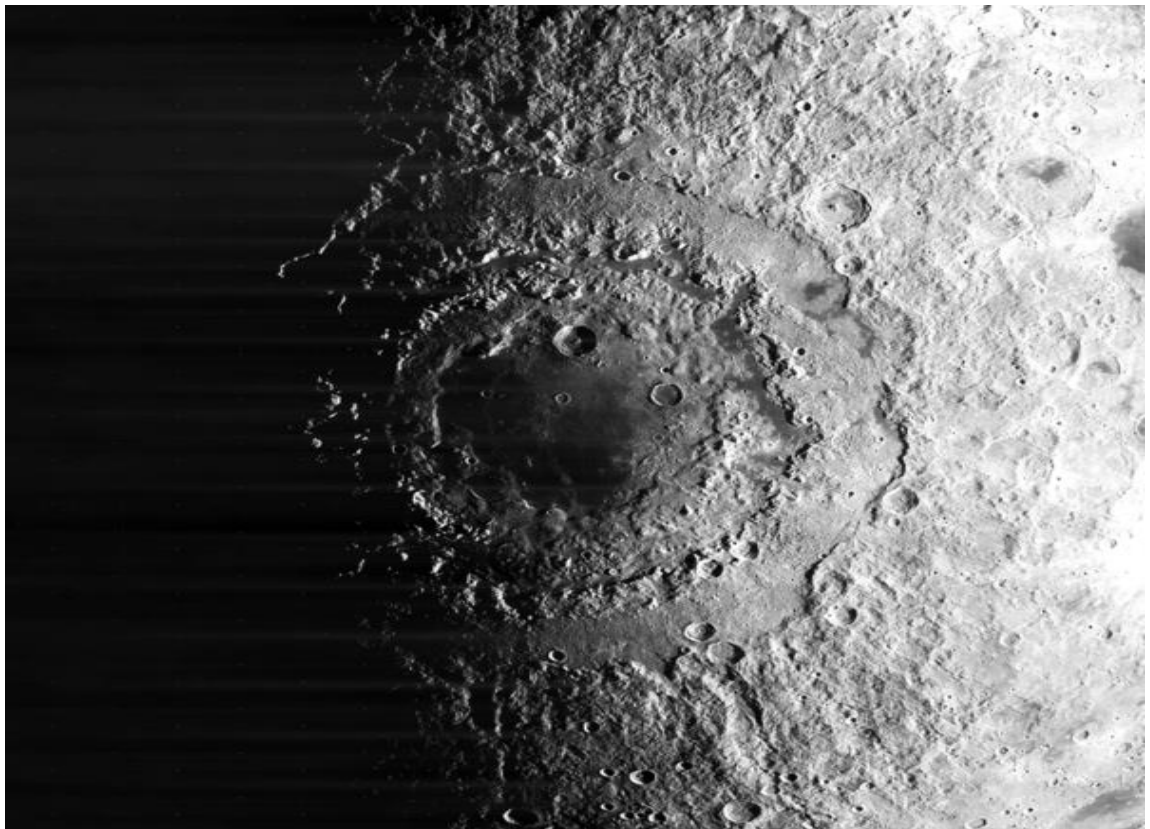


Рисунок 1. Вид моря Восточного, переданный с КА «Лунный Орбитер- 4»,1967 год

По сравнению с большинством других лунных бассейнов Море Восточное менее затоплена базальтами, так что значительная часть структуры бассейна видна, базальт в центральной части бассейна Море Восточного, вероятно, составляет менее 1 км (0,62 мили) по толщине, что намного меньше, чем бассейны на стороне, обращенной к земле Луны.

В программе Аполло не было образцов камней Море Восточного, из-за этого его точный возраст неизвестен. Тем не менее, это самый последний лунный бассейн Луны, вероятно, более молодой, чем бассейн Имбриума, который составляет около 3,85 миллиарда лет.

Море Восточное трудно наблюдать с Земли, так как она лежит на крайнем западном краю ближней стороны. Все, что можно увидеть и разглядеть, - это грубые горные хребты – Граф Монтез и МонтезКордильера. Однако, из-за Луны в редких случаях Море Восточное немного повернуто к Земле и становится немного заметной.

Хотя различные астрономы наблюдали за кобылой, он был в первый раз полностью описан немецким астрономом Юлием Францем в его книге 1906 года «*Дерево*» («Луна»). Франц также дал кобыле свое имя, в то время оно было расположено на том, что по конвенции считалось восточной стороной Луны, поэтому Франц назвал ее «Восточное Море».

1.3 Как образовалось Море Восточное на Луне

Используя данные миссии Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL), ученые НАСА определили более возможную причину развития большого кольцевого кратера на поверхности Луны, напоминающего по форме яблоко.

Полученные данные могут помочь лучше понять, как подобные процессы повлияли на раннюю эволюцию Луны, Марса и Земли. Итоги работы опубликованы в журнале *Science*, сформированный около 3,8 миллиарда лет назад, огромный кратер Море Восточного расположен на юго-западном краю Луны. Он едва виден с Земли. Наиболее характерные его особенности — три концентрических кольца из скал, внешнее из которых имеет диаметр около 580 миль (930 км) [21].

Ученые давно пытались разгадать причину столь необычного ландшафтного явления на поверхности спутника Земли.

«В прошлом, наш взгляд на Море Восточное был в значительной степени связан с его поверхностными особенностями, но мы не знали, как его структура выглядит в деталях. Прелесть данных GRAIL в том, что он как бы положил в Море Восточное рентгеновский аппарат и изучил в мельчайших деталях», — сказал Джим Хэд (Jim Head), геолог из университета Брауна (США), член исследовательской миссии GRAIL.

Одной из ключевых тайн, которую помогли решить новые данные — это вопрос о размере и расположении переходного кратера. Некоторые исследователи считали, что одно из колец Море Восточного может представлять собой остатки переходного кратера. Но данные миссии показали, что это не так. Расчеты показали, что переходный кратер был где-то между двумя внутренними кольцами и достигал от 200 до 300 миль в поперечнике.

Любые узнаваемые поверхностные остатки этого кратера были стерты последующими ударами. Моделирование также показало, что Море Восточное был образован объектом около 64 км в диаметре, летевшим со скоростью примерно 14 км в секунду [21].

Внутреннее кольцо было образовано другим процессом. В результате небольших ударов могут образовываться горки материала в центре кратера, называемые центральным пиком. Но центральный пик Восточного моря был слишком велик, чтобы быть стабильным. Этот материал потек обратно наружу, в конце концов, образовав внутреннее кольцо.

«Это был действительно интенсивный процесс. Километровые скалы и центральное кольцо — все сформировалось в течение нескольких минут первоначального удара», — сказал Брендон Джонсон (Brandon Johnson), руководитель исследовательской группы. По его

словам, на Земле, Марсе и других объектах Солнечной системы имеется много подобных объектов, однако из-за более активных геологических процессов, сейчас уже трудно понять их историю[21]. На рисунке 2 проиллюстрирована цифровая модель Моря Восточного.

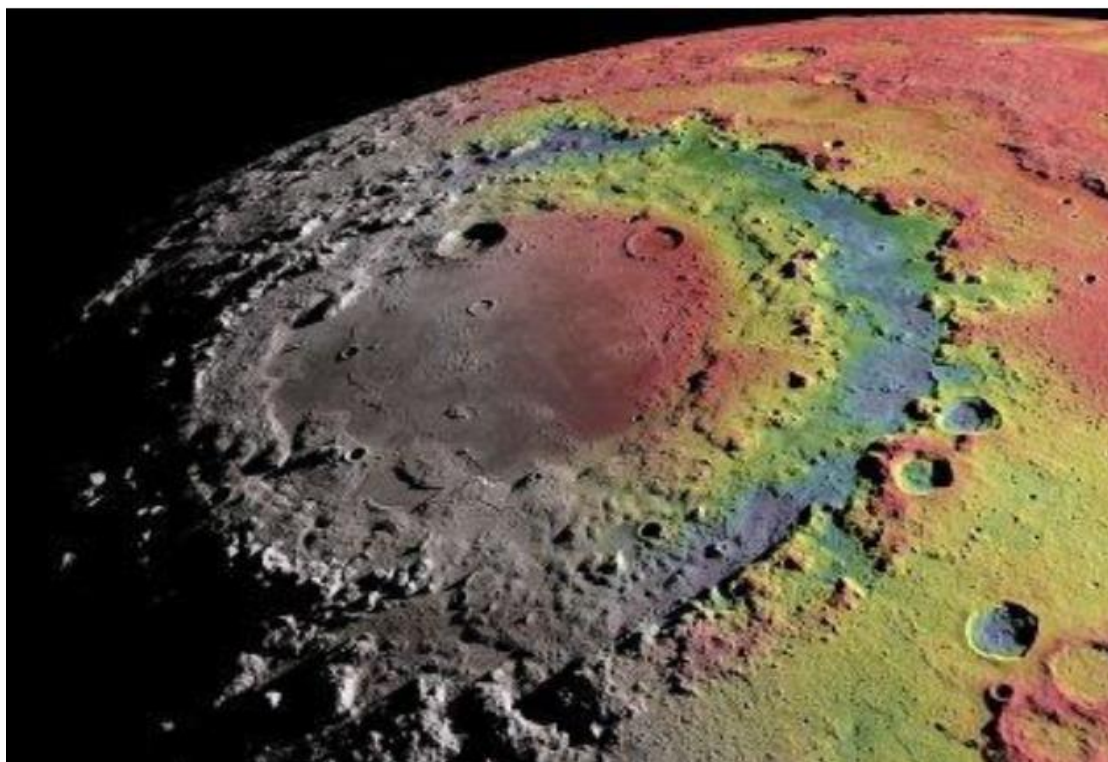


Рисунок 2. Цифровая модель Моря Восточного

Море Восточное имеет диаметр около 327 км и сформировалось в результате удара крупного астероида на раннем этапе формирования Луны.

Точный возраст моря неизвестен, однако предполагается, что оно образовалось немного позже, чем бассейн моря Дождей, то есть не ранее чем 3,85 млрд лет назад. Окружающая порода относится к позднеимбрийскому периоду, в то время как бассейн моря сложен породами раннеимбрийского периода[22].

В отличие от бассейнов других лунных морей, Море Восточное слабо заполнено застывшей базальтовой лавой, что позволяет нам наблюдать его морфологическую структуру.

Центральная часть моря покрыта тонким слоем базальтов: предположительно менее 1 км в толщину, то есть менее мощным, чем у других лунных морей на видимом полушарии. Столкновение, приведшее к возникновению моря, вызвало появление трех концентрических складчатостей на лунной коре. Внутренняя гряда этого огромного ударного кратера сформирована горами Рука, внешнюю цепь диаметром 930 км образуют горы Кордильеры. Выброшенная в результате столкновения горная порода имеет грубую булыжниковую

структуру, начинается у внешних склонов Кордильер и простирается до 500 км в разные стороны, формируя линейные лучевые образования, сходящиеся к центру моря.

На противоположной морю точке лунной поверхности расположено Море Краевое. Одним из заливов Моря Восточного является озеро Весны, рассматриваемое как одно из возможных мест для строительства лунной базы[23].

Практически вся поверхность Луны усеяна кратерами разных размеров, от маленьких, до огромных, некоторые из которых называются бассейнами. Кратеры классифицированы как по размерам и формам, так и по процессам их образования. Так во многих кратерах имеются характерные выступающие в центре горки. Некоторые кратеры залиты магмой, другие имеют вогнутую форму, иные кратеры имеют внутри кольцевые структуры. Много кратеров образованы после падения крупных астероидов, которые выбрасывали из кратера массу обломков и материала которые падали обратно на свежевывапшую магму и образовывали многочисленные мелкие кратеры.

Современное название моря было предложено немецким астрономом Юлиусом Генрихом Францем в его книге *Der Mond*(1906). Однако английский астроном-любитель Патрик Мур в книге *On the Moon* позднее утверждал, что предложил указанное название в 1946 году. В течение 1960-х годов были получены фотографические изображения данного региона, позволившие предположить что Море Восточное является кратером ударного происхождения.

В годы, когда море получило свое название, в отношении Луны в астрономии была принята иная система именования сторон света. Однако позже, в 1961 году Международным Астрономическим Союзом было принято соглашение о смене сторон Восток—Запад местами, таким образом, Море Восточное оказалось на западной окраине видимого полушария Луны[24].

1.4 Наземные и космические наблюдения в районе моря Восточного

Наблюдения с Земли краевой зоны не ставились специально для изучения района моря Восточного, но включали всегда в себя этот район по той причине, что он расположен в близэкваториальных и средних широтах и из этого следует, что условия освещенности здесь лучше, чем в полярных областях.

Краевая зона в районе моря Восточного может наблюдаться с Земли визуально и фотографически в период между полнолунием и новолунием, то есть, когда освещена вся центральная часть западного полушария.

Покрытия звезд Луной, напротив, наблюдают в основном в период между новолунием и полной Луной. Это все связано с тем, что покрытия звезд Луной надежнее наблюдаются на темном крае, то есть, когда район моря Восточного находится на ночной стороне Луны. Из выше перечисленного следует, что наблюдения покрытий звезд в сочетании с визуальными и фотографическими наблюдениями позволяют сократить период наблюдений всей краевой зоны примерно в два раза, поскольку в этом случае в два раза быстрее будет обеспечен необходимый набор либраций[1].

«Если время ваших наблюдений совпало с максимальной западной либрацией по долготе в период между фазами полнолуния и новолуния, направляем телескоп на освещенный западный край видимого диска Луны. Здесь мы увидим образования, расположенные в западной либрационной зоне, в том числе и небольшой участок Моря Восточного в экваториальной области. Море Восточное является антиподом Моря Смита, и по многим характеристикам они очень похожи друг на друга. Их бассейны почти одинаковы по размеру и глубине – удивительный на первый взгляд факт, если учесть различие возрастов этих образований. Оба моря содержат до краев заполненные лавой кратеры, причем в Море Смита таких кратеров, как и кратеров других типов, насчитывается больше, вероятно, из-за его более древнего возраста. Интересная особенность этих морей – оба они содержат гравитационные аномалии. По своему территориальному положению, сырьевым ресурсам и потенциалу научных задач моря Смита и Восточное считаются наиболее перспективными районами для создания лунной базы.

Одновременно на лунном диске вы их не увидите: в момент полнолуния, когда с Земли видно Море Смита, из-за либрации не видно Море Восточное, и наоборот»[6].

Впервые район моря Восточного был сфотографирован в 1965 году советской автоматической станцией «Зонд-3». В 1966-1967 годах, наблюдения района моря Восточного

были выполнены американскими спутниками «Лунар-Орбитер». Перечисленные космические наблюдения были фототелевизионными, Впервые фото пленка с изображением лунной поверхности, содержащая среди других и район моря Восточного, был доставлена на Землю в 1968 году космическим аппаратом «Зонд- 6». Важно отметить, что это были первые фотографические изображения другого небесного тела, сделанные с близкого расстояния и возвращенные на Землю. В 1970 году фотографические наблюдения моря Восточного были произведены КА «Зонд- 8», фото пленка также была доставлена на Землю. Среди космических наблюдений снимки «Зонда-8» являются наиболее полными и качественными наблюдениями района моря Восточного. Фотографии лунной поверхности, выполненные с космических кораблей «Аполлон», район моря Восточного не охватывают[1].

Эксперименты и исследования на Луне можно осуществлять с помощью различных методов. Например, можно создать в различных районах Луны научно-исследовательские полигоны, снабженные автоматической аппаратурой. В частности, очень перспективными районами для организации там полигонов являются полярные области Луны. В настоящее время они наименее изучены по сравнению с другими районами, что значительно повышает интерес к ним со стороны ученых[11].

Следовательно, наблюдения района моря Восточного из космоса не столь продолжительны и не столь многочисленны, как наземные. Однако они имеют важное преимущество и достоинство, так как выполнены с близкого расстояния с ракурсов, недоступных наблюдениям с Земли[1].

1.5 Картографическая изученность моря Восточного

Территория моря Восточного представлена на всех глобальных картах Луны, построенных по материалам космических наблюдений. Это советская Полная карта Луны, созданная в ГАИШ под руководством Ю.Н. Липского, а также Полная карта Луны и карта обратной стороны, построенные в США. Названные карты дают качественное представление о топографии тех или иных районов лунной поверхности, но не содержат количественных данных о рельефе[1].

В район моря Восточного попадает около 20 точек каталога МИИГАиК. Он построен по снимкам КА «Зонд-6», включает в себя 377 точек, опирается на данные наземных определений, имеет погрешности координат 3-4 км[12].

В ГАИШ определены пространственные координаты пунктов на обратной стороне Луны специально в районе моря Восточного [13]. Эти определения включают 105 точек района, выполнены по снимкам КА «Зонд-8», в качестве опоры используют точки каталога ИКИ, имеют погрешности координат относительно опорных точек по высоте 0,6км, по широте 1,3 км, по долготе 3,0 км. На основе 105 точек и точек каталога ИКИ построена гипсометрическая карта района моря Восточного и выполнен топографический анализ моря, в двух сечениях: вдоль меридиана и вдоль параллели [1].

1.6 Другие исследования района моря Восточного

Космические фотографии района моря Восточного, а также наблюдения за движением спутников Луны позволили начать детальное изучение строения лунной поверхности в районе моря Восточного и его окрестностях, исследовать гравитационные аномалии района, построить модели распределения масс и модели образования самого бассейна Восточного [1].

Одной из особенностей строения района являются цепочки лунных кратеров, расходящиеся от центра бассейна в радиальных направлениях. Самая длинная из таких цепочек тянется на северо - запад более чем на 1000 км. Цепочки лунных кратеров в районе моря Восточного рассмотрены в работе [14], а работа [15] посвящена проблеме их происхождения. Исследования распределения кратеров в районе моря Восточного, а также степени их заполнения выброшенным веществом использованы для оценки толщины покрова выбросов. При этом обращается внимание на то, что статистический анализ зависимости количества кратеров от их размеров позволяет получить оценки изменения мощности выбросов по мере удаления от центра моря Восточного [16].

На основе изучения соотношения между размерами и интервалами разбрасывания вторичных кратеров на Луне делается вывод, что выбросы из моря Восточного и моря Дождей охватывают всю Луну [17].

Сопоставление плотности кратеров на темном материале моря Восточного, средней плотности кратеров на морях и материках с плотностью кратеров на участках, занятых выбросами, позволило сделать вывод, что море Восточное является самой молодой из гигантских концентрических кольцевых систем, образовавшейся незадолго до возникновения морей [18].

1.7 Либрация Луны

Район моря Восточного расположен в основном краевой зоны Луны и видимость этих территорий с Земли обусловлена явлением лунной либрации.

Либрация Луны – малые периодические покачивания для земного наблюдателя видимого диска Луны около общего центра.

Из-за совпадения двух периодов – вращения Луны вокруг своей оси и обращения вокруг Земли – Луна постоянно обращена к Земле одним и тем же (видимым) полушарием. То есть мы можем видеть с Земли только 50 % лунной поверхности[19].

Проявление либрации раскрыл в 1635 году Галилео Галилей. Вследствие либрации, мы можем заметить с Земли 59% поверхности Луны. Дело состоит в том, что вокруг Земли Луна обращается с переменной угловой скоростью: возле перигея (наиближайшая к Земле точка орбиты Луны) движется быстрее, возле и апогея (более удалённая точка орбиты Луны) - медленнее, в то время как вращение ее вокруг собственной оси равномерно. Данное дает возможность заметить с Земли западный и восточный края обратной стороны Луны - оптическая **либрация по долготе**. Она доходит в максимуме до $\pm 7^{\circ}45'$.

Помимо этого, в связи с наклоном оси вращения Луны к плоскости земной орбиты с Земли можно заметить северный и южный края обратной стороны Луны (оптическая либрация по широте). **Либрация по широте** в максимуме доходит до $\pm 6^{\circ}41'$.

«Дополнительные эффекты либрации возникают из-за суточного вращения Земли, когда положение наблюдателя относительно Луны изменяется на величину диаметра Земли (**суточная либрация**, доходящая до 1°)» [19]. Она связана с незначительной удаленностью Луны от Земли и с параллаксом, который происходит при вращении Земли. Вследствие, движения наблюдателя вместе с поверхностью Земли при её суточном вращении для наблюдения становятся доступными сначала западные области Луны, затем восточные.

Период суточной либрации, безусловно, составляет одни сутки. «Вследствие неравномерного гравитационного притяжения Земли существует **физическая либрация**, доходящая до $2'$ » .

Данное «покачивание» Луны, которое возбуждает приливными силами со стороны Земли и выражается в незначительном изменении периода вращения Луны вокруг своей оси. Физическая либрация совершается по сложному закону [19].

Глава 2. Определение высот района Моря Восточного

2.1 Орбитальная съемка космического аппарата «Зонд-8»

Для расчета видимых высот точек рельефа по изображениям горизонта и построения графиков зависимостей этих высот от широты, закрепляющих систему селеноцентрических координат на район лунной поверхности, были использованы следующие источники информации:

1. Фотографическая съемка района Моря Восточного, включающая 12 снимков лунного горизонта, КА «Зонд-8»;
2. Каталог лунных кратеров на основе ЦНИИГАиК; [2]
3. Прогноз движения КА "Зонд-8" на моменты фотографирования;[2]
4. Каталог координат селеноцентрических координат 72 точек краевой зоны Луны в районе Моря Восточного на основе каталога ИКИ ;

Теперь рассмотрим эти источники информации подробнее.

Основные параметры съемочной камеры «Зонд-8»:

1. $f = 403.061$ мм - фокусное расстояние объектива, которое выполнялось длиннофокусной узкоугольной фотографической камерой;
2. Размер кадра 13×18 см;
Узкая сторона кадра была ориентирована вдоль направления съемки. Снимки первого сеанса съемки содержат изображения дисков Луны видимой и частично невидимой стороны Луны.
3. Затвор шторно-щелевой;
4. Разрешающая способность системы $R_s \sim 50$ линий/мм.

Фотографический эксперимент на КА "Зонд-8" состоял из двух сеансов фотографической съемки 23-24 октября 1970 г.

Снимки первого сеанса съемки содержат изображения дисков Луны видимой и частично невидимой стороны Луны. Временной интервал между экспонированием первого

и последнего снимка в этом сеансе составлял 10 минут. Съемка в этом сеансе выполнялась с удаления 9700 км при масштабе снимков 1 : 20 000 000.

Второй сеанс съемки сделан через 2 часа после первого 24 октября 1970 г. на момент максимального сближения станции с поверхностью Луны. Начало этого сеанса съемки приходится на район Моря Восточного, изобразившегося в перспективе на краевой части лунного диска. В этот момент высота КА была равна 1370 км, а съемочная камера была сориентирована главным направлением на Землю. Начиная со снимка № 9 по мере сближения с поверхностью Луны и ее облета, изображение лунной поверхности начинает постепенно от снимка к снимку заполнять весь кадр. На рисунке 3 изображена схема траектории движения КА «Зонд-8» (вид с юга) с указанием сеансов фотографирования[2].

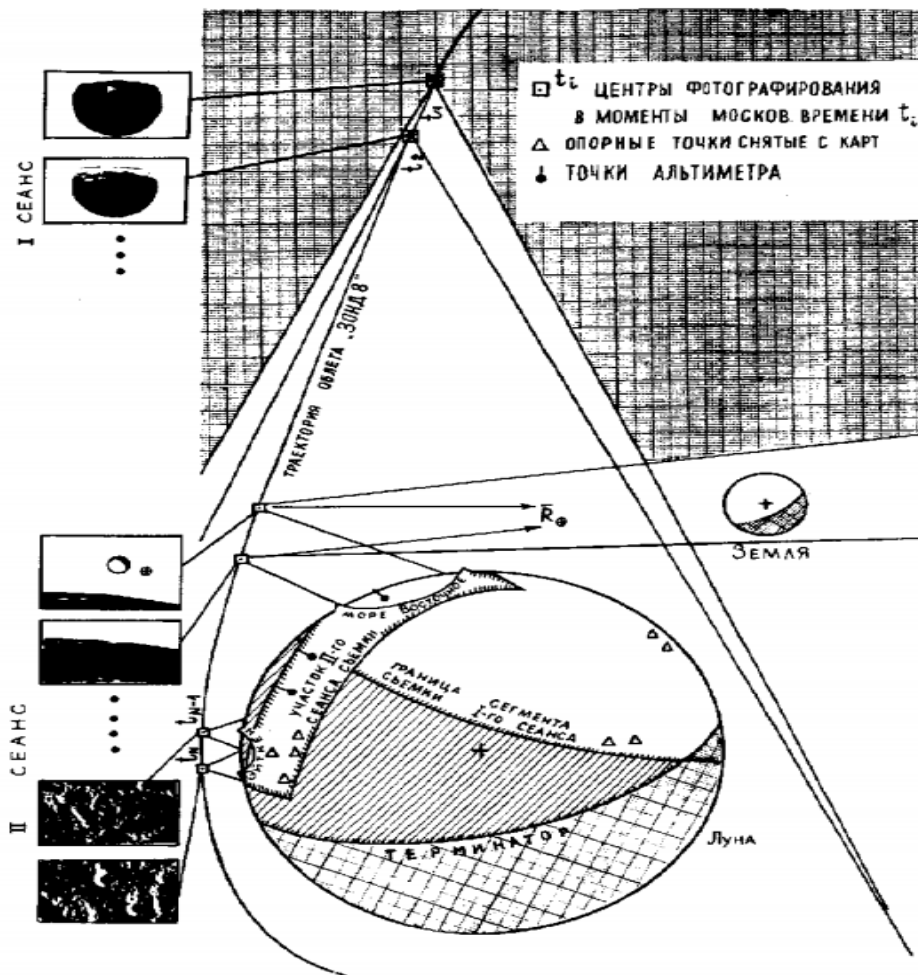


Рисунок 3. Схема траектории движения КА «Зонд-8»

2.2 Система координат снимка и данные калибровки камеры

Использование персонального компьютера в качестве средства измерения координат точек на снимке предполагает, что сами измерения выполняются в системе координат монитора. Однако, формулы фотограмметрии содержат в качестве измеренных величин координаты точек в системе снимка. Поэтому встает задача о переходе от измеренных координат в системе монитора к координатам в системе снимка.

Система координат снимка может задаваться по-разному в зависимости от конструкции съёмочной камеры[27].

Координатные метки часто изготавливаются вместе с прижимной рамкой, которая ограничивает размер кадра. Такие метки располагают по краям рамки, а их изображения впечатываются в снимок в момент экспонирования. Если координатные метки отсутствуют на снимках, то вместо них систему координат на снимке задают с помощью **сетки крестов**. Эта сетка изготавливается на прижимном стекле камеры в виде набора маленьких крестиков, которые наносятся на стекло по специальной технологии. В момент экспонирования изображения крестов «впечатываются» в снимок.

Сетка крестов, как правило, равномерно покрывает всю площадь снимка. Сами кресты отстоят друг от друга на строго фиксированное расстояние.

Координаты крестов, задающие их взаимные положения, измеряются с высокой точностью в процессе калибровки съёмочной камеры. На рис. 4 представлена схема сетки крестов для съёмочной камеры космического аппарата «Зонд-8»[27].

Для ориентации снимка относительно лунной поверхности и направления движения космического корабля следует обратить внимание на расположение и форму координатных меток, а также учесть, что съёмка велась по маршрутам вдоль лунного экватора.

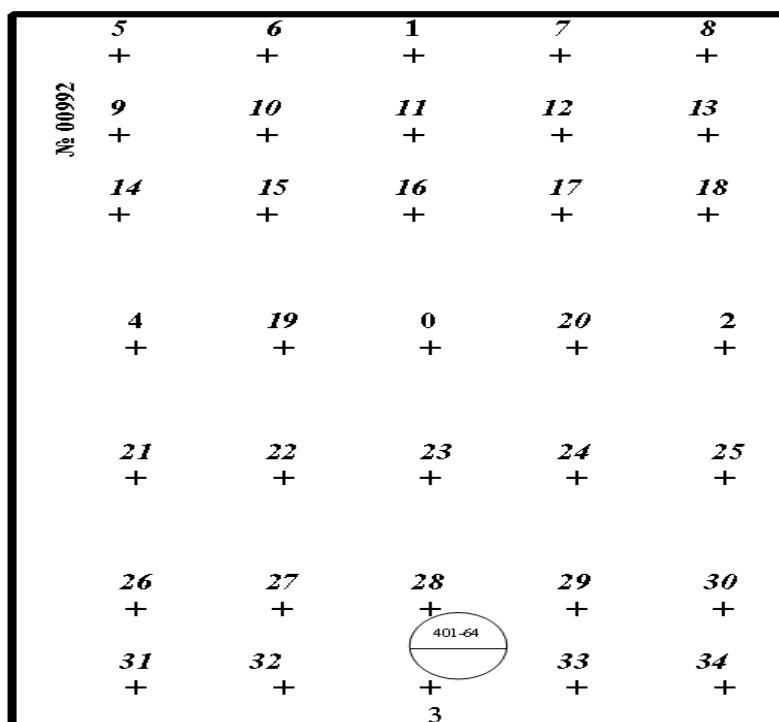


Рис. 4 Схема расположения сетки крестов на прижимном стекле съемочной камеры космического аппарата «Зонд-8».

Точность измеренных координат на снимке зависит от нескольких факторов технического характера. Это дисторсия объектива съемочной камеры, деформация фотопленки и особенности работы затвора камеры в ходе экспонирования кадра. Для учета всех искажений камера проходит исследование перед полетом (а, иногда, также и после полета), которое называют калибровкой камеры. На Рис. 5 представлены результаты калибровки прижимного стекла съемочной камеры.

Дисторсия объектива также измеряется в процессе калибровки камеры. На Рис.6 приведена диаграмма величин фотограмметрической дисторсии объектива. В верхнем левом углу указан масштаб в сотых долях миллиметра[27].

			2				
	+ 19,997	+ 30,006	+ 29,999	+ 30,000	+ 29,999	+ 20,000	
	24,995	24,993	24,995	25,000	24,997	24,996	24,999
		+ 20,000	+ 30,000	+ 30,001	+ 29,999	+ 30,001	+ 19,999
	24,990	24,992	24,994	24,992	24,991	24,994	24,994
1	+ 19,999	+ 30,003	+ 30,001	+ 30,001	+ 30,000	+ 19,997	3
	24,990	24,997	24,999	25,000	25,001	25,000	24,997
	+ 20,000	+ 30,003	+ 29,997	+ 30,003	+ 30,000	+ 20,000	
	24,988	24,989	24,990	24,990	24,991	24,992	24,996
	+ 20,002	+ 30,005	+ 29,996	+ 30,000	+ 30,000	+ 19,999	
	26600			4			

Рис. 5 Координаты сетки крестов прижимного стекла съемочной камеры космического аппарата «Зонд-8»

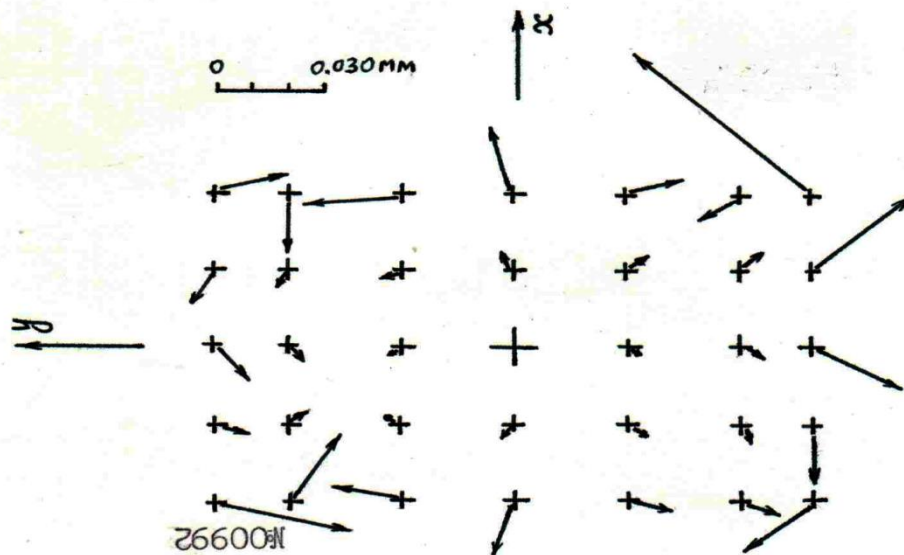


Рис. 6 Векторная диаграмма величин фотограмметрической дисторсии объектива съемочной камеры космического аппарата «Зонд-8».

Для уменьшения искажений изображения связанных с работой затвора при орбитальной съемке применяют шторно-щелевой затвор. Режим работы затвора тщательно исследуется на стробоскопе, на стадии предполетных испытаний. Основная характеристика шторно-щелевого затвора определяется скоростью движения его шторки во время экспонирования[27].

2.3 Фотограмметрическая обработка снимков

При фотограмметрической обработке снимки служили основой для измерений направления на точки изображений физической поверхности в заданной калибровочными метками системе координат снимка.

Основная задача фотограмметрической обработки измерений лимбов в том, чтобы построить ряд взаимно согласованных высотный профилей сечений территории моря Восточного в системе опорных точек. Система опорных точек задавалась селеноцентрическими координатами 72 точек.

Далее рассмотрим фотограмметрическую обработку измерений 3 снимков, выбранных мною произвольно. Это снимки лунного рельефа моря Восточного под номерами 6,9 и 10. Все 3 снимка четко характеризуют лунный рельеф района и сам горизонт.

Для вычисления элементов внешнего ориентирования снимков(ЭВО) №6, №9 и №10 использовался каталог селеноцентрических координат 72 точек краевой зоны Луны в районе Моря Восточного. Этот каталог был построен на основе селеноцентрической системы координат, созданной ИКИ Институтом Космических Исследований, на восточный сектор обратной стороны Луны.

Фотограмметрическая обработка снимков с изображением лунного лимба заключалась в решении следующих задач:

1. Опознавание опорных точек на снимке по каталогу селеноцентрических координат 72 точек краевой зоны Луны в районе Моря Восточного и нахождение элементов внешнего ориентирования в результате решения обратной фотограмметрической засечки (ОФЗ);
2. Измерение точек горизонта и расчет их видимой высоты, отсчитываемой от среднего радиуса Луны = 1738,00 км;
3. Решение ОФЗ с помощью программы;
4. Построение высотных профилей сечений территории Моря Восточного в системе опорных точек.
5. Проанализировать решение ОФЗ.

Для обработки были выбраны оригинальные оцифрованные снимки КА «Зонд-8» с номерами 6, 9 и 10. Измерения проводились с помощью программного обеспечения IrfanView.

IrfanView —небольшая по размеру программа для просмотра/ воспроизведения графических, видео- и аудиофайлов. Работает в среде операционных систем Windows и React OS, бесплатна для некоммерческого использования. Имеет набор возможностей по редактированию графических файлов. [26]

Возможности программы:

- Получение изображений со сканера.
- Захват изображения с экрана, создание скриншотов.
- Предварительный просмотр изображений в виде эскизов.
- Вывод сведений об изображении, в том числе EXIF (также возможен показ выбранной информации из EXIF при полноэкранном просмотре).
- Режим слайдшоу, полноэкранный режим показа картинок.
- Поворот изображения, применение к нему различных эффектов.
- Увеличение/уменьшение видимого размера изображения, а также изменение размера самого изображения.
- Копирование, вырезание, вставка выделенной части изображения.
- Пакетное преобразование и/или переименование файлов.
- Создание экранных заставок из изображений.
- Создание веб-страниц из изображений.
- Интеграция с Total Commander.
- Достаточно эффективная автонастройка, включающая автоматическую коррекцию гаммы, насыщенности и контрастности (для версий 4), позволяющая в некоторой степени качественно «вытягивать» информацию из теневых участков фотографий, совсем не трогая ярких, всего одним щелчком мыши.
- Развитая система управления из командной строки, позволяющая использовать программу, например, в пакетных файлах.
- Интерфейс на многих языках (включая русский) через подключаемые модули.[26]

Пространственная ориентация съемочной камеры в момент съемки определялась решением обратной фотограмметрической засечки. За основу принят алгоритм решения

обратной фотограмметрической засечки (ОФЗ). Этот алгоритм использует формулы фотограмметрии для одиночного снимка, которые связывают в нашем случае селеноцентрические координаты точек лунной поверхности с координатами их изображений на орбитальном снимке, а также с координатами КК на окололунной орбите. ОФЗ использует формулы фотограмметрии для одиночного снимка, которые связывают в нашем случае селеноцентрические координаты точек лунной поверхности с координатами их изображений на орбитальном снимке, а также с координатами КА на окололунной орбите [27].

В данной работе используется лунная селеноцентрическая система координат, в которой заданы пространственные координаты опорного каталога. На Рис. 7 показано как задается сама система OXYZ селеноцентрических координат. Начало системы – в центре масс Луны. Ориентация осей связана с направлением на Землю.

Ось OX направлена к Земле, ось OZ – к северному полюсу Луны, а ось OY дополняет систему до правой системы координат. Единицы измерения зависят от решаемой задачи. Обычно – это километры и метры, а иногда положение объектов на Луне задают, используя в качестве единиц измерения средний лунный радиус [27].

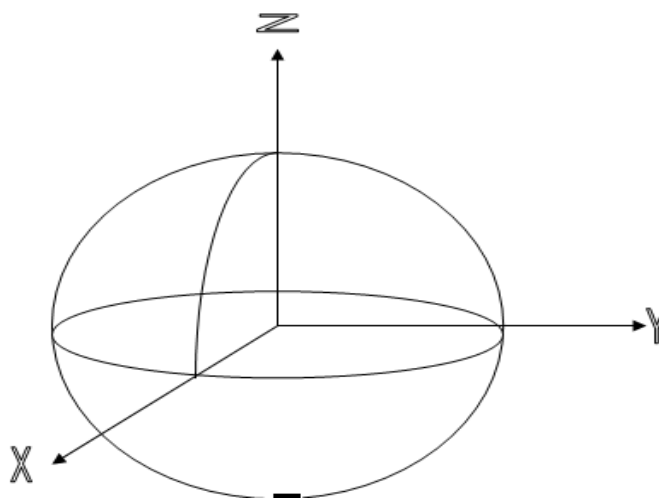


Рис. 7 Селеноцентрическая система координат.

Формулы связи селеноцентрические координаты точек лунной поверхности с координатами их изображений на орбитальном снимке практически мало отличаются от формул наземной фотограмметрии [27].

$$a_{11}(X-X_s)+a_{12}(Y-Y_s)+a_{13}(Z-Z_s)$$

$$x-x_0 = -f \frac{\dots}{\dots}$$

$$a_{31}(X-X_s)+a_{32}(Y-Y_s)+a_{33}(Z-Z_s) \quad (1)$$

$$x-x_0 = -f \frac{a_{21}(X-X_s)+a_{22}(Y-Y_s)+a_{23}(Z-Z_s)}{a_{31}(X-X_s)+a_{32}(Y-Y_s)+a_{33}(Z-Z_s)}$$

Здесь в левой части – плоские координаты точек в системе снимка, в правой части – пространственные координаты точек и центра проекции в системе лунных координат. Направляющие косинусы матрицы ориентации, как и в наземной фотограмметрии, записываются как функции угловых элементов ориентации снимка α , ω и θ :

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\sin\theta\sin\alpha - \cos\theta\cos\alpha\sin\omega \\ a_{12} &= \sin\theta\cos\alpha - \cos\theta\sin\alpha\sin\omega \\ a_{13} &= \cos\theta\cos\omega \\ a_{21} &= \cos\theta\sin\alpha - \sin\theta\cos\alpha\sin\omega \\ a_{22} &= -\cos\theta\cos\alpha - \sin\theta\sin\alpha\sin\omega \\ a_{23} &= \sin\theta\cos\omega \\ a_{31} &= \cos\alpha\cos\omega \\ a_{32} &= \sin\alpha\cos\omega \\ a_{33} &= \sin\omega \end{aligned} \quad (2)$$

Решение ОФЗ состоит из нескольких этапов:

1. Опознание на снимках точек опорного каталога, включая их маркировку (обозначение на снимке и подписание номера точки по каталогу).

Опорные точки я опознала на 3 снимках по каталогу селеноцентрических координат 72 точек краевой зоны Луны в районе Моря Восточного. На рисунке 8 показан фрагмент Полной карты Луны для района моря Восточного[27].

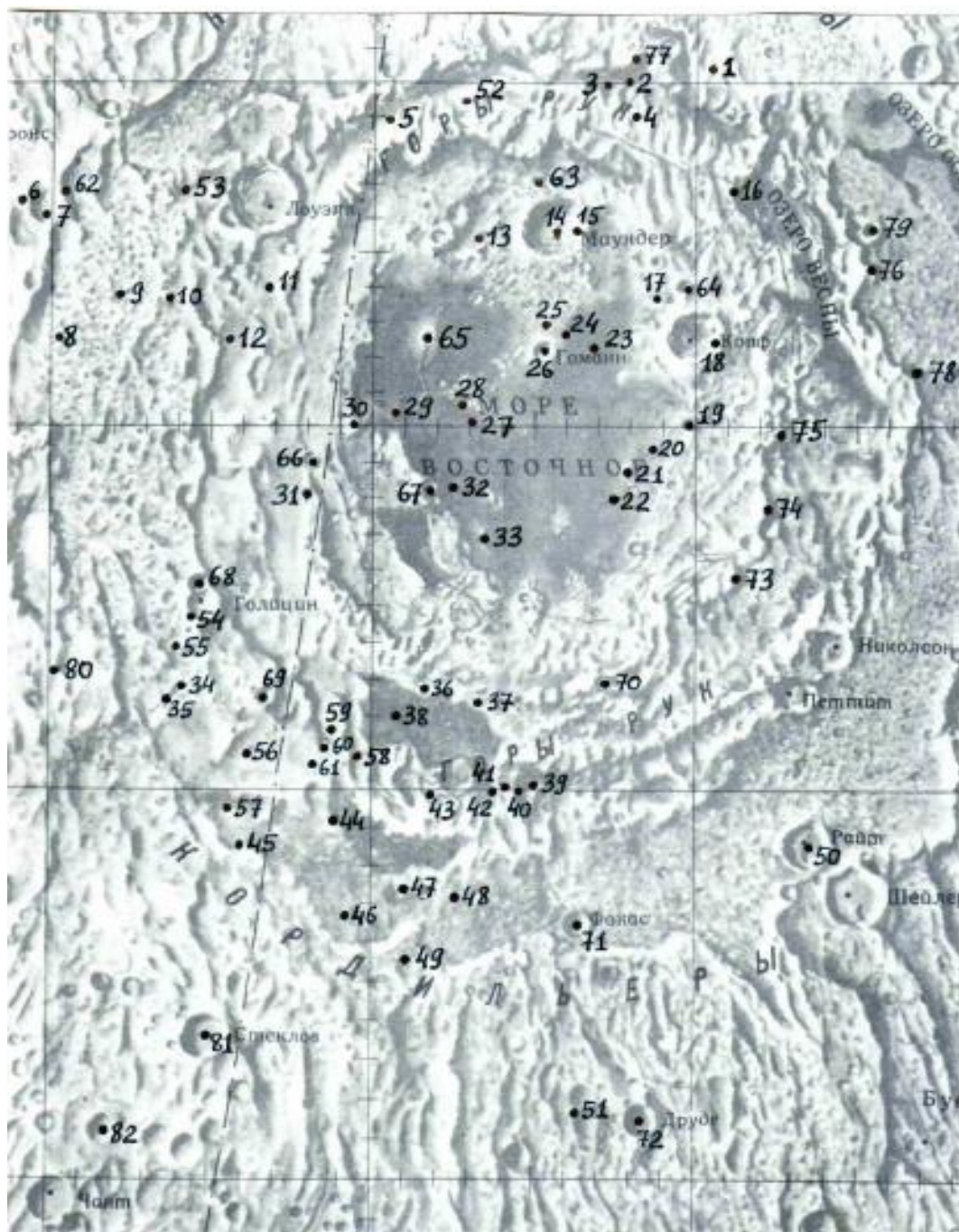
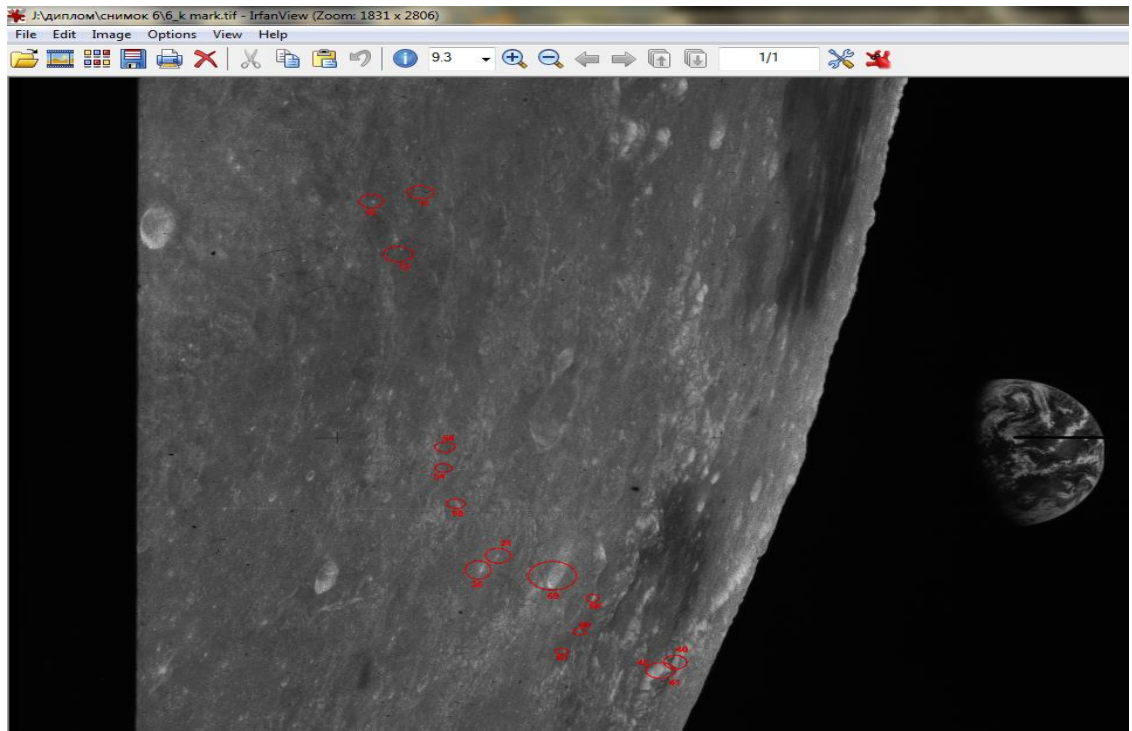


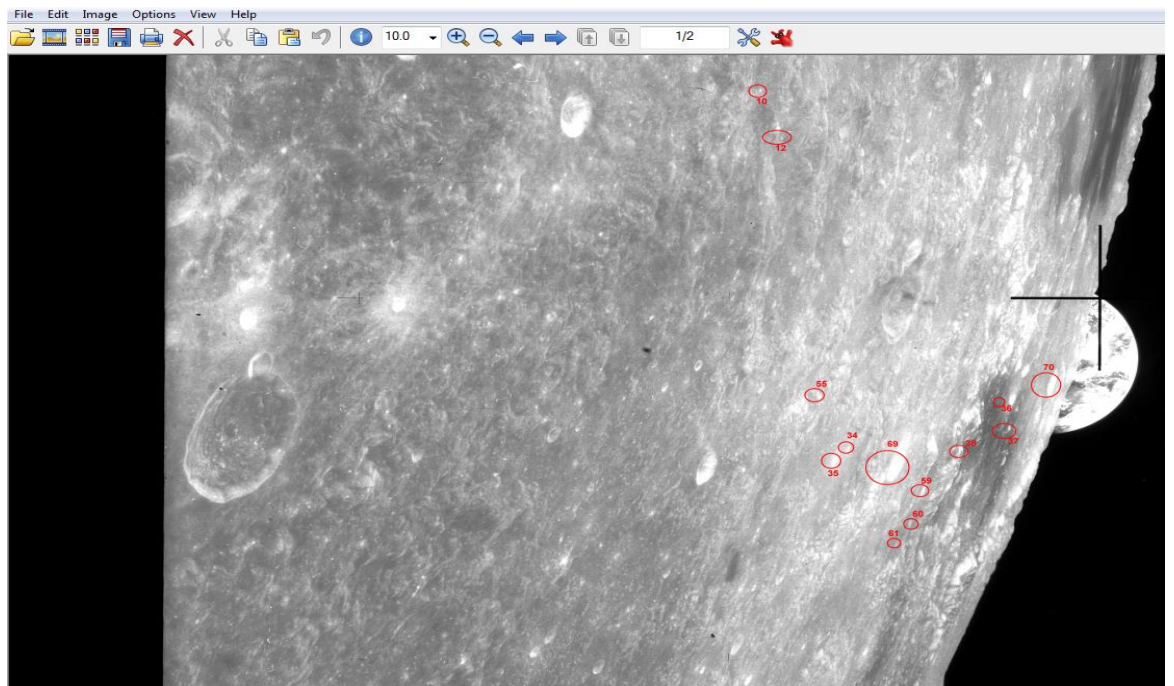
Рисунок 8. Фрагмент полной карты Луны для района моря Восточного.

Измерение опорных точек я выполнила, опираясь на Полную карту Луны для района моря Восточного, что было довольно сложно. На рисунке 9 проиллюстрированы опорные точки, которые я смогла опознать на всех 3 снимках.

Снимок №6



Снимок №9



Снимок №10

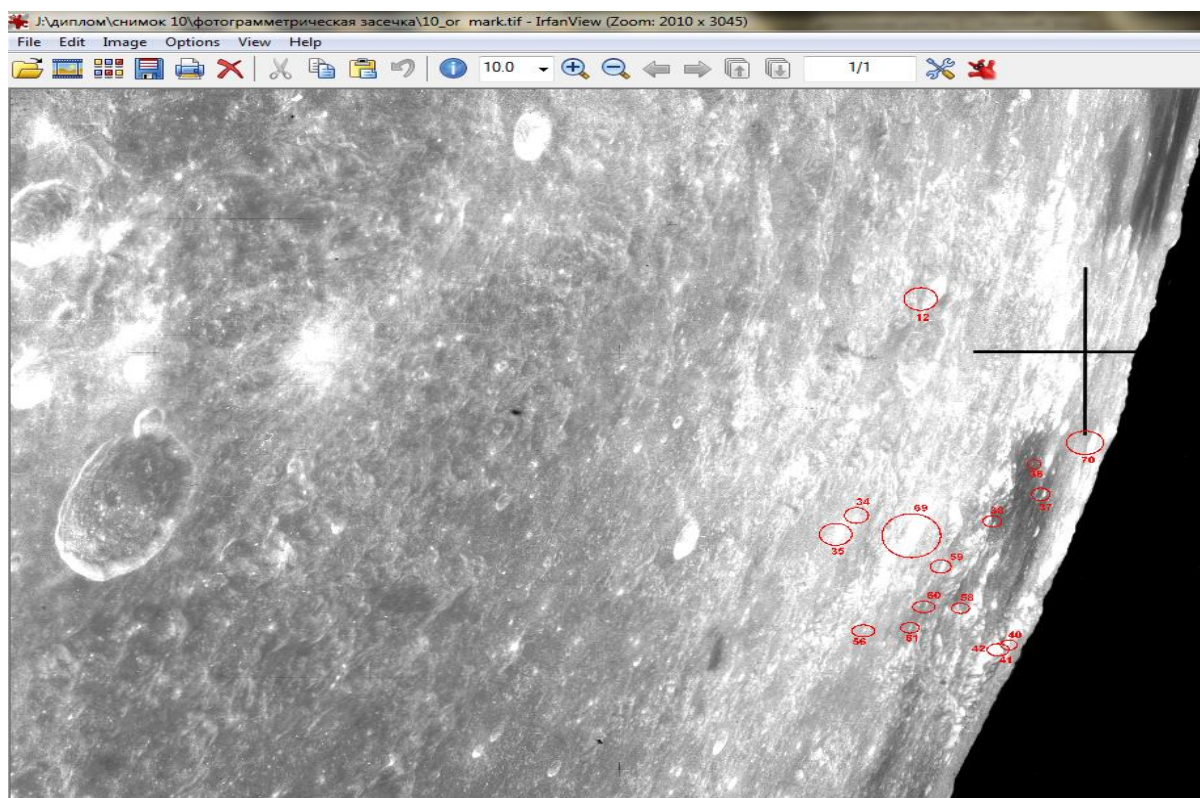


Рисунок 9.Опознавание и маркировка опорных точек по 3 снимкам.

2. Выбор опорных точек их числа опознанных. На снимке следует выбрать и маркировать не менее трех опорных точек. Опорные точки обозначают треугольниками. Три опорные точки – это минимальное число, по которому решается задача. На практике опорные точки выбираются с избытком, что позволяет при решении ОФЗ найти не только элементы внешнего ориентирования (ЭВО), то также и их погрешности. В зависимости от конкретной ситуации на одном снимке берут не менее 6 опорных точек, а часто 10-15 точек, что повышает надежность расчетов.

3. Измерение опорных точек в системе координат монитора.

4. Переход от системы монитора к системе координат снимка [27].

Для перехода от отсчетов в системе координат монитора к координатам точек в системе снимка применяется алгоритм, учитывающий поворот снимка. Сначала определяют координаты главной точки снимка в системе монитора:

$$x_0 = \frac{x'_n + x'_l}{2}$$

(1)

$$y_0 = \frac{y'_n + y'_l}{2}$$

где $x'_п$, $x'_л$ в формулах (1) - это отсчеты на правую и левую координатные метки снимка (метки оси абсцисс)[27].

Затем находят координаты измеренных точек снимка отнесенные к главной точке снимка:

$$x(pxl) = x' - x_0$$

(2)

$$y(pxl) = y_0 - y'$$

где x_0 , y_0 - положение главной точки снимка, найденное по формулам (1).

Формулы (2) написаны с учетом того, что система координат монитора – левая система координат.

Следующий этап состоит в расчете коэффициентов K_x и K_y перевода «пикселей в миллиметры». Для такого расчета необходимо измерить на мониторе детали снимка с известными размерами. Такими «детальями» могут служить края кадра, изображения сетки крестов, координатные метки [27].

Пусть, например, коэффициент определяется с использованием края кадра. Обозначим размер кадра буквами L_x . Следует помнить, что измеряемый снимок был повернут так, что оси координат монитора и снимка взаимно параллельны. Измерения краев кадра на изображении дадут два отсчета $x'_п$ и $x'_л$ (правый и левый края). Тогда коэффициент K_x получится по формуле

$$K_x = \frac{L_x}{x'_п - x'_л}. \quad (3)$$

Коэффициент K_y определяется аналогично с тем лишь отличием, что для измерений и расчетов берутся ординаты измеряемых величин и размер L_y кадра по оси ординат. При этом отсчеты на нижнюю и верхнюю координатные метки обозначаются $y'_н$ и $y'_в$ соответственно [27].

$$K_y = \frac{L_y}{y'_н - y'_в} \quad (4)$$

Координаты измеренных точек в системе координат снимка, выраженные в миллиметрах, получаются по формулам (5)

$$x(\text{mm})=x(\text{pxl}) * K_x$$

(5)

$$y(\text{mm})=y(\text{pxl}) * K_y$$

и используются в дальнейшей обработке снимков.

5. Ввод исходных данных в программу решения ОФЗ.

Программное обеспечение для ввода исходных данных я использовала Microsoft VisualFoxPro. Исходные данные включают в себя три группы: измеренные координаты опорных точек в системе координат снимка в миллиметрах, каталожные лунные координаты опорных точек и начальные приближения искомым ЭВО. На рисунке 10 показано программное обеспечение Microsoft VisualFoxPro для ввода исходных данных [27].

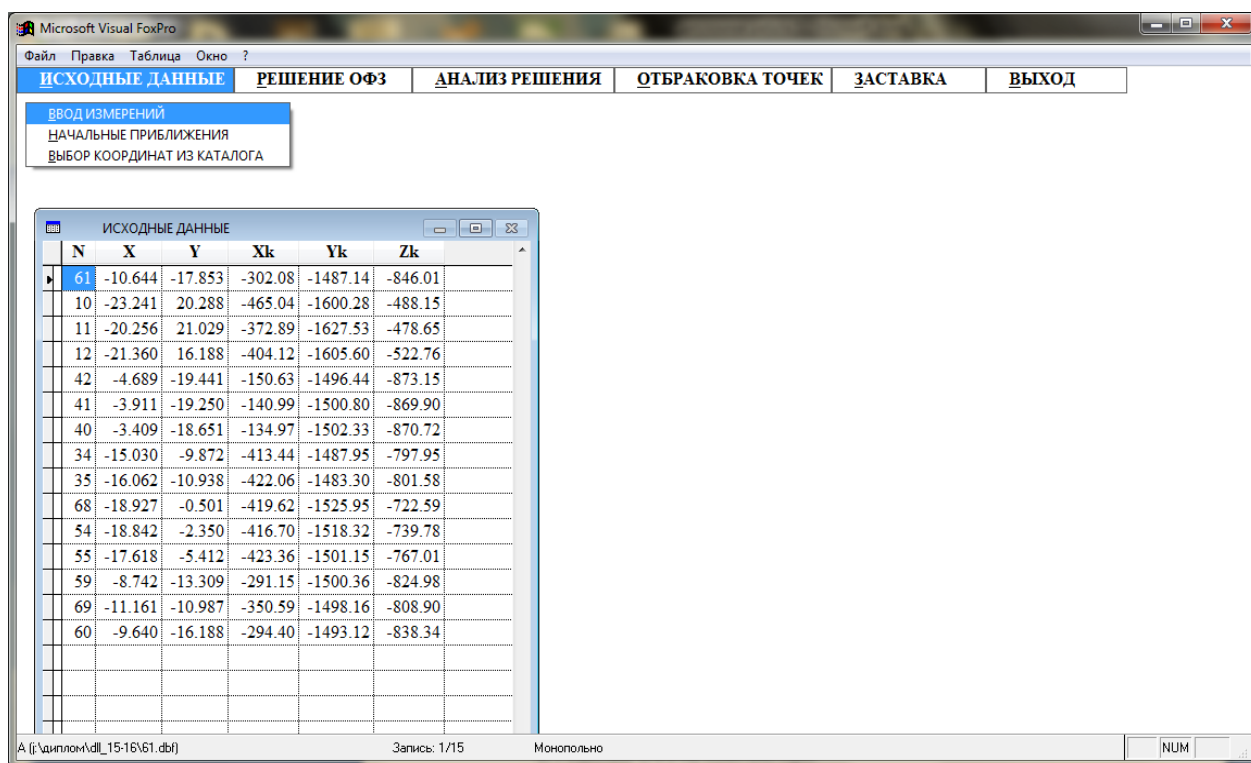


Рисунок 10. Общий вид интерфейса компьютерной программы для решения ОФЗ

6. Решение ОФЗ на компьютере.(см. Приложение 2)

7. Анализ полученных результатов. На этом этапе, возможно, придется выбрать из числа опорных точек те, для которых остаточные рассогласования (невязки) выделяются

на общем фоне. Такие точки удаляются из массива исходных данных. Эта процедура называется «отбраковкой» опорных точек.

8. Повторное решение ОФЗ после отбраковки по меньшему числу опорных точек.

9. Получение окончательных результатов:

– элементов внешнего ориентирования снимка, которые включают селеноцентрические координаты КК на орбите X_s , Y_s , Z_s и три угла описывающие ориентацию съемочной камеры в окололунном пространстве в момент фотографирования

– средние квадратические погрешности всех шести ЭВО

– матрицу ориентации с 9 направляющими косинусами

– остаточные рассогласования (невязки) по всем опорным точкам в последней итерации с указанием отбракованных точек [27].

По анализу полученных результатов решения ОФЗ для снимков №6, №9 и №10 выяснилось, что взаимное положение опорных точек на этих снимках не удачно, так как опознанные точки по каталогу 72 точек КЗЛ покрывают малую часть снимка. В результате решения опорных точек элементы внешнего ориентирования получились с небольшими погрешностями. Это значит, ОФЗ решилось в целом удачно и с небольшими погрешностями в угловых величинах.

2.4 Построение высотных профилей по изображению горизонта

В состав исходных данных для построения профилей входят: результаты измерений снимков, селеноцентрические координаты центров проекций и угловые элементы внешнего ориентирования снимков.

Линии горизонта на снимках будут очень четкими, так как на Луне отсутствует атмосфера. Для наличия атмосферы, планете необходимо иметь хорошую гравитацию, а у Луны она слабая, поэтому разреженная газовая оболочка является атмосферой Луны. Источником этой атмосферы является лунный вулканизм и выделение газов из почвы, но огромная часть этих газов рассеивается в космосе. Луна слабо удерживает на себе газы, так как обладает слабым гравитационным полем, и потому ее атмосфера в большей части рассеивается в космическое пространство. На рисунке 11 показано изображение горизонта лунной поверхности.

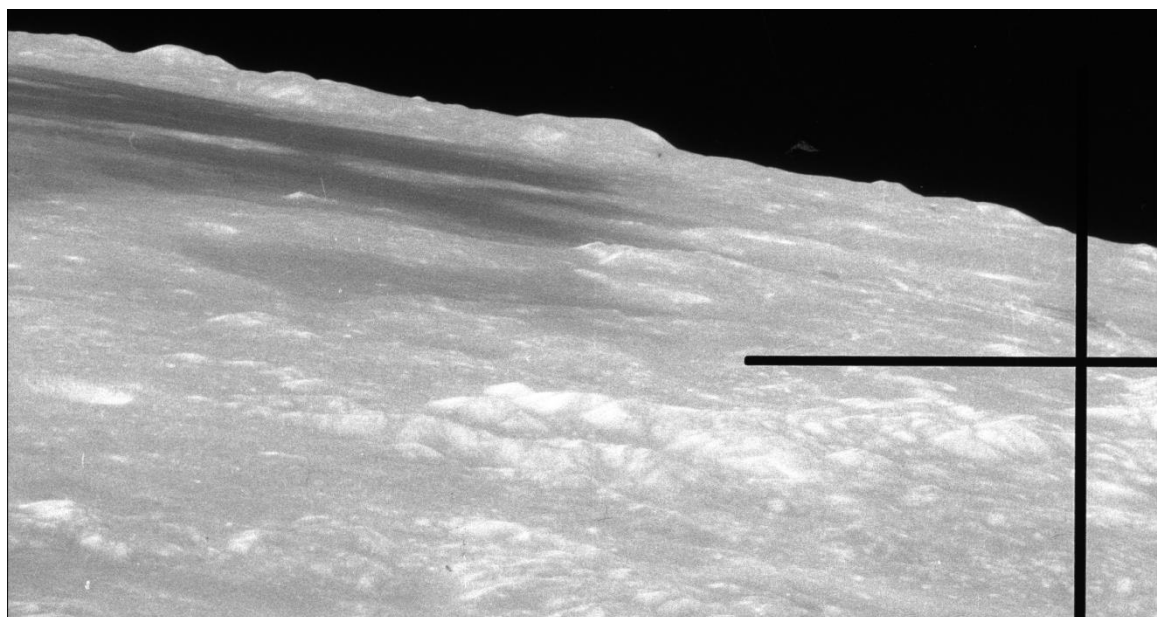


Рисунок 11. Вид лунного горизонта на снимке №10, показывающий детали рельефа на восточной части Кордильер

Если провести проектирующие лучи через точки изображения горизонта m , m_2 и m_3 , то они будут касаться лунной поверхности в точках M , M_2 и M_3 .

Совокупность таких точек касания образует некоторую линию на поверхности Луны – линию лимба. L – центр селеноцентрической сферы, S – центр проектирования, P – плоскость снимка, oxy – система координат снимка, $LXYZ$ – прямоугольная селеноцентрическая

система координат, n - точка надира на снимке, α - угол наклона снимка, m_i - изображения точек лимба на снимке, M_i - точки линии лимба на сфере, β, λ - селенографические координаты точки линии лимба, $OS=f$ - фокусное расстояние съёмочной камеры, $Sxyz$ - фотограмметрическая система координат, оси Sx и Sy , которой параллельны осям ox и oy системы координат снимка. [1]

В результате решения ОФЗ получены селеноцентрические координаты X_s, Y_s и Z_s точки фотографирования S , угловые элементы внешнего ориентирования и матрица A направляющих косинусов осей системы координат $LXYZ$.

Пусть x, y – измеренные координаты точки лимба m в системе снимка. Так как проектирующий луч Sm касается лунной сферы в точке M , то, очевидно, радиус-вектор \vec{OM} будет перпендикулярен проектирующему лучу. Определение углов β и λ точки M равнозначно нахождению ее прямоугольных селеноцентрических координат X, Y, Z , так как связь между ними известна и записывается: [1]

$$\begin{aligned} X &= R \cos\beta \cos\lambda \\ Y &= R \cos\beta \sin\lambda \\ Z &= R \sin\beta \end{aligned} \quad (1)$$

Следовательно, задача сводится к определению координат вектора \vec{OM} . Вектор \vec{OM} с координатами X_s, Y_s, Z_s и вектор \vec{OS} с направляющими косинусами l_1, l_2, l_3 , характеризующими положение проектирующего луча в селеноцентрической системе координат, лежат в одной плоскости. Нормальный вектор этой плоскости получится как векторное произведение векторов \vec{OS} и \vec{SM} : [1]

$$\vec{P} = \vec{OS} \times \vec{SM} \quad (2)$$

Искомые координаты X, Y, Z точки M есть координаты вектора \vec{OM} , который определяется из векторного произведения векторов \vec{SM} и \vec{P} :

$$\vec{OM} = \vec{SM} \times \vec{P} \quad (3)$$

На основании (2) и (3) можно записать:

$$\vec{OM} = \vec{SM} \times (\vec{OS} \times \vec{SM})$$

и, воспользовавшись свойством двойного векторного произведения, получается:

$$\overline{SM} \times (\overline{LS} \times \overline{SM}) = \overline{LS}(\overline{SM} \cdot \overline{SM}) - \overline{SM}(\overline{SM} \cdot \overline{LS}) \quad (4)$$

Сомножители в скобках в координатной форме выразятся и обозначатся следующим образом: [1]

$$(\overline{SM} \cdot \overline{SM}) = l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 = 1,$$

$$(\overline{SM} \times \overline{LS}) = l_1 X_s + l_2 Y_s + l_3 Z_s = Q$$

С учетом формулы (4), можно записать в векторном виде

$$\overline{LM}(X, Y, Z) = \overline{LS}(X_s, Y_s, Z_s) - Q \cdot \overline{SM}(l_1, l_2, l_3)$$

и в координатах [1]

$$X = X_s - l_1 \cdot Q,$$

$$Y = Y_s - l_2 \cdot Q,$$

$$Z = Z_s - l_3 \cdot Q.$$

Направляющие косинусы l_1, l_2, l_3 проектирующего луча SM определяются в два этапа. Сначала находятся направляющие косинусы k_1, k_2, k_3 проектирующего луча в системе координат $Sxyz$: [1]

$$k_1 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}, \quad k_2 = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}, \quad k_3 = \frac{-f}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}$$

где $x, y, -f$ – пространственные координаты точки снимка в фотограмметрической системе координат. Затем с помощью матрицы ориентации A выполняется переход от системы координат снимка $Sxyz$ к системе селеноцентрических координат $LXYZ$

$$\begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix} \quad \text{или} \quad \begin{cases} l_1 = a_{11}k_1 + a_{21}k_2 + a_{31}k_3, \\ l_2 = a_{12}k_1 + a_{22}k_2 + a_{32}k_3, \\ l_3 = a_{13}k_1 + a_{23}k_2 + a_{33}k_3. \end{cases}$$

После нахождения координат X, Y, Z , на основании (1) определяются селенографические координаты β, λ и высота H :

$$\beta = \operatorname{arctg}\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right),$$

$$\lambda = \operatorname{arctg}\left(\frac{Y}{X}\right),$$

$$H = (X^2 + Y^2 + Z^2) - R,$$

где H – это видимая высота измеренной точки лимба над стандартной сферой радиусом $R=1738\text{км}$. [1]

Таблицы селенографических координат и видимых высот точек для снимков №6, №9 и №10 приведены в Приложении 3. В каждом столбце таблицы указаны рассчитанные значения всем параметров, по которым были вычислены селенографические координаты и видимые высоты точек краевой зоны Луны.

Глава 3. Анализ полученных результатов

3.1 Оценка решения обратной фотограмметрической засечки

Элементы внешнего ориентирования	Снимок №6	Снимок №9	Снимок №10
Xs, км	-2614 ± 68	-2433 ± 15	-2526.4 ± 21
Ys, км	-1888±34	-1618± 5	-1652 ± 8
Zs, км	-727±19	-741± 5	-726 ± 7
A()	82°13'12"	78°26'24"	77°49'48"
B()	180°46'48"	180°13'12"	180°27'36"
L()	8°0'36"	2°24'0"	2°39'0"
Высота,км	1568	1277	1367
*N до	10	13	16
*N после	5	10	15

*N- число опорных точек до (после) отбраковки.

Погрешности координаты Xs, как видно из таблицы, получились заметно больше, чем по двум другим координатам. Это связано с ориентацией направления съемки относительно осей системы селеноцентрических координат: направление съемки в этот момент практически совпадает с направлением оси OX и оси камеры смотрят на Землю. В связи с такой геометрией съемки погрешности по двум другим координатам в 2-3 раза меньше. Из результатов угловых величин можно сделать вывод, что расхождение в результатах не превышает значения 3° 46' 48.0" (для угла A) между 6 и 9 снимком, а для 9 и 10 снимков значения не превышают 0° 36' 36.0". Для угла B расхождение между 6 и 9 снимком не превышает значения 0° 33' 36.0", а для снимков 9 и 10 расхождение не превышает значения 0° 14' 24.0". Результаты расхождения для угла L между 6 и 9 снимком не превышают значения 5° 36' 36.0", а для 9 и 10 снимков значения не превышают 0° 15' 0.0". В снимке №6 угол L получился значительным, чем в двух других снимках, так как это

связано с ориентацией камеры и из-за того, что в снимке было опознано малая часть опорных точек. Также видно, что величина угла возрастает при уменьшении числа обрабатываемых опорных точек. Следовательно, 10 опорных кратеров вполне достаточно для решения ОФЗ.

3. 2 Сравнение наших результатов с прогнозом ЦНИИГАиК

Таблица 1. Наши результаты снимка №9 с результатами прогноза ЦНИИГАиК

Наименование	Xs, км	Ys, км	Zs, км	H, км
Наши результаты	-2433.2	-1618.9	-741.3	1277
По прогнозу ЦНИИГАиК	-2447.3	-1633.0	-724.4	1291

Из таблицы 1 видно, что наши результаты положения центра проекции и высота съемки вышли в целом с небольшими погрешностями, а это значит, обработка ОФЗ решилась очень удачно. Так же на снимке №9 получилось опознать больше опорных точек, чем на снимке №6. Из этого следует, что высота съемки и положения центров проекций получились с незначительными погрешностями.

Таблица 2. Наши результаты снимка №10 с результатами прогноза ЦНИИГАиК

Наименование	Xs, км	Ys, км	Zs, км	H, км
Наши результаты	-2526.4	-1652.6	-726.0	1367
По прогнозу ЦНИИГАиК	-2458.7	-1601.0	-719.8	1282

Из таблицы 2 видно, что наши результаты положения центра проекции и высота съемки вышли в целом с небольшими погрешностями, а это значит, обработка ОФЗ решилась очень удачно. Так же на снимках №9 и №10 получилось опознать больше опорных точек, чем на снимке №6. Из этого следует, что высота съемки и положения центров проекций получились с незначительными погрешностями.

3.3 Обсуждение высотных профилей, построенных по точкам горизонта

Описанным выше параграфом 2.4 были построены высотные профили сечений района Моря Восточного по измерениям орбитальных снимков №6, №9 и №10.

Основная задача данной работы состояла в построении высотных профилей сечений территории Моря Восточного в системе опорных точек по снимкам горизонта. По оси абсцисс на графике откладывалась селенографическая широта в градусах, по оси ординат – высота H в километрах. Построенные профили представлены на Рисунках 12,13,14.



Рисунок. 12 Высотный профиль для снимка №6



Рисунок. 13 Высотный профиль для снимка №9



Рисунок. 14 Высотный профиль для снимка №10

Рассмотрим каждый профиль отдельно.

На профиле для снимка №6 видна западная часть района, которая имеет горный рельеф. На этом профиле между широтами $\beta=-11$ и $\beta=-18$ видна центральная равнина, которая как с северной, так и с южной стороны окружена Горами Кордильеры. Также профиль снимка №6 иллюстрирует то, что детали горного рельефа достигают высоты $H=3$ км, а низменности имеют высоты $H=-3$ км.

Профиль снимка №9 представляет собой сечение, которое проходит через западную часть моря Восточного. На этом графике видно, что горы достигают 4 км высотной отметки, а для дна бассейна значения составляют -4 км. Между широтами $\beta=-13$ и $\beta=-24$ видна центральная равнина, которая как с северной, так и с южной стороны окружена Горами Руука.

Профиль снимка №10 представляет собой сечение, которое проходит через западную часть моря Восточного. Профиль этого снимка так же иллюстрирует, что горы достигают той же высотной отметки, а дно бассейна значение составляет -4 км, как и в снимке №9. Между широтами $\beta=-13$ и $\beta=-24$ видна центральная равнина, которая как с северной, так и с южной стороны окружена Горами Руука, тоже самое как и в снимке №9.

Морские территории района представлены несколькими участками. Сюда относится в первую очередь центральная часть бассейна моря Восточного, на северо-востоке района — озеро Осени и озеро Весны, на севере — небольшие участки между внешним и внутренним кольцом Гор Руука и море Мирное в южной части кольца Гор Руука.

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о том, что получившиеся профили построены подробно, но имеют смещение по высоте, так как высоты дна бассейна должны находиться в пределах -4 до -2 км. Высотные профили по этим 2 снимкам

показывают, что высоты горизонта на них изменяются незначительно. Это связано с тем, что центры проекции смещаются за 16 секунд(время между моментами съемки снимков №9 и №10) примерно на 32 км.

Заключение

Результаты фотограмметрии орбитальных снимков КА «Зонд-8» показывают, что для их обработки требуется нестандартное программное обеспечение. Это связано с тем, что космический аппарат проводил съемку с окололунной орбиты, двигаясь, по гиперболической орбите. При этом ориентация съемочной камеры на участке орбиты вблизи перицентра удерживалась так, что в течение всего сеанса маршрутной съемки камера «смотрела» на Землю. Такая геометрия съемки привела к тому, что снимки лунной территории были выполнены с большими наклонами к местной вертикали. Для снимков в начале сеанса съемки эти наклоны особенно велики и доходят до значений 90 градусов.

Такие большие наклоны снимков, несмотря на необычную для фотограмметрии ориентацию камеры, в случае съемки Луны несут в себе положительные свойства с точки зрения точных измерений. В этом случае на снимках отображается лунный горизонт, который в отсутствие у Луны атмосферы, с большой детальностью передает элементы лунного рельефа. При такой ориентации снимков погрешность высоты рельефа точек горизонта прямо зависит от погрешности координат в плоскости снимка. В следствии этого можно ожидать высокой точности определения высот по точкам горизонта.

Высоты рельефа, найденные нами по измерениям изображения лунного горизонта в целом неплохо отражают рельеф лунной поверхности. Однако, следует учесть, что речь идет не об истинной высоте элементов рельефа, а о проекции этой высоты на картинную плоскость, образованную сечением малого круга лунной сферы.

На основе анализа полученных нами высотных профилей оказалось, что имеется систематический сдвиг по высоте в южной части бассейна Восточного. (см. правую часть графика на Рисунках 12-14. Это означает, что положение центров проекции и ориентация камеры в моменты съемки, рассчитанное нами по опорным точкам в полной мере соответствует действительному положению и ориентации. По-видимому, одних опорных точек при описанной выше геометрии съемки, недостаточно для корректного анализа рельефа по изображению горизонта. Отсюда следует вывод, что для определения элементов внешнего ориентирования наряду с фотограмметрической засечкой следует привлекать независимые источники навигации.

Список литературы

1. Шпекин М.И. Рельеф моря Восточного на Луне по данным обработки снимков КА «Зонд-6, -8» Деп. ВИНТИ, 1983.
2. Алексашин Е.П., Тимофеев Ю.С., Ширенин А.М. Селеноцентрическая система координат «Зонд-8». Методы построения и каталог координат опорных точек. Сборник научных трудов ЦНИИГАиК. ЦНИИГАиК ГУГК СССР, 1989.-178с.
3. А. А. Горыня., В.К.Дрофа. Рельеф краевой зоны Луны. По фото графическим наблюдениям на астрографе астрономической обсерватории Киевского государственного университета им. Т.Г. Шевченко. Издательство Академии наук Украинской ССР,1962.-164с.
4. Шевченко В.В. Луна и ее наблюдение/ М.:Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983.-192с.ил.
- 5.Шкуратов Ю.Г. Луна далекая и близкая – Харьков: ХНУ, 2006.-182с.
- 6.В. Г. Сурдин. «Путешествия к Луне»: ФИЗМАТЛИТ; Москва; 2011 ISBN 978-5-9221-1233-8, 98с.
7. Ш.Т. Хабибуллин. Физическая Либрация Луны 9. Издательство Казанского Университета ,1958г.,182с.
8. William M. Vaughan, James W. Head, Lionel Wilson, Geology and petrology of enormous of impact melt on the Moon: A case study of the Orientale Basin impact melt sea. // Icarus Vol. 223, Issue 2, April 2013, pages 749-765.
9. А. Е. Криволицкий «Голубая планета: Земля среди планет. Географический аспект», 1985г.,335с.
10. Данлоп Сторм «Азбука звездного неба. Часть 2», 1990г.,23с.
- 11.В. Д. Перов, Ю. И. Стахеев. Комические аппараты исследуют Луну. Издательство: Знание, 1979г., 62с.
12. Фотоаппаратура, ее эксплуатация и калибровка. Дорофеев А.С., Дунаев Б.С., Родионов Б.Н., Ходарев Ю.К., Чесноков Ю.М. – В сб. Исследование природной среды космическими средствами. География. Методы космической фотосъемки. Том 4, М., АН СССР, 1975, с. 131-134.
13. Чикмачев В.И. Список пространственных координат точек на обратной стороне Луны в районе моря Восточного. Астрономический циркуляр.1978, №986, с . 1-3.

14. Бондаренко Л.Н., Липский Ю.Н., Чикмачев В.И., Шевченко В.В., Суханов А.Л. Гигантские цепочки лунных кратеров в районе моря Восточного. Сообщения ГАИШ, 1978, №196, с.3-22.

15. Короновский Н.В. Происхождение цепочек лунных кратеров в районе моря Восточного. Сообщения ГАИШ, 1978, №196, с.23-36.

16. Cordell, B. M. Radial thickness variations of Orientale Basin ejecta, *Mod. Geol.*, 1978, 6, №4, с. 229–240.

17. Allen C.C Large lunar secondary craters : size range relationships. *Geophys. Res. Lett.* 1979, 6, N1, p. 51-59.

18. Hartmann W.K. Mare Orientale and Its Intriguing Basin. *Sky and Tel.* 1969, 37, N1, p. 4-7.

19. Сост. Н. П. Ерпылев . Энциклопедический словарь юного астронома / 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Педагогика, 1986. — 336 с.

20. Б.А.Воронцов - Вельяминов. Очерки о вселенной. Издание седьмое, переработанное и дополненное Издательство «Наука» главная редакция физико-математической литературы, Москва 1976, 350с.

21. Электронное периодическое издание «Научная Россия», г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 46, офис 138. <https://scientificrussia.ru/articles/kak-obrazovalos-vostochnoe-more-na-lune>

22. Gazetteer of Planetary Nomenclature - planetarynames.wr.usgs.gov/Feature/3685?__fsk=802141954 (англ.). International Astronomical Union (IAU) Working Group for Planetary System Nomenclature (WGPSN).

23. Burgess Eric Outpost on Apollo's moon.— Columbia University Press, 1993. — P. 199. — ISBN 0231076665 .

24. Батаков Б.В. Луна пробитая насквозь астероидом Аполлоном и побитая второй Луной., 2015г., 54с.

25. Сюжет: миссия наса по поиску водяного льда на луне (12) .луна: история наблюдений и исследований. Справка

<https://ria.ru/science/20090720/177936175.html>

26. Википедия свободная энциклопедия

<https://ru.wikipedia.org/wiki/irfanview>

27. Шпекин М.И. Лабораторный практикум «Цифровая орбитальная фотограмметрия», 2011.

Приложения

Приложение 1

Результаты обработки измерений и их перевод в систему координат снимка: снимок №6.

$X_0 = 9985$, $Y_0 = 17164$ – положение главной точки снимка

$L_x = 49.99$ мм, $L_y = 140.003$ мм- расстояние между измеренными координатными метками

№	X'	Y'	X(px1)	Y(px1)	X(мм)	Y(мм)
61	5043	19786	-1505	-2530	-10.644	-17.853
10	3262	14381	-3286	2875	-23.241	20.288
11	3684	14276	-2864	2980	-20.256	21.029
12	3528	14962	-3020	2294	-21.360	16.188
42	5885	20011	-663	-2755	-4.689	-19.441
41	5995	19984	-553	-2728	-3.911	-19.250
40	6066	19899	-482	-2643	-3.409	-18.651
34	4423	18655	-2125	-1399	-15.030	-9.872
35	4277	18806	-2271	-1550	-16.062	-10.938
68	3872	17327	-2676	-71	-18.927	-0.501
54	3884	17589	-2664	-333	-18.842	-2.350
55	4057	18023	-2491	-767	-17.618	-5.412
59	5312	19142	-1236	-1886	-8.742	-13.309
69	4970	18813	-1578	-1557	-11.161	-10.987
60	5185	19550	-1363	-2294	-9.640	-16.188

Приложение 2

Результат решения ОФЗ для снимка №10

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ		F=	403.061 mm			
42	-2.810	-22.901	-150.63	-1496.44	-873.15	1.084
40	-2.002	-22.410	-134.97	-1502.33	-870.72	3.656
41	-2.423	-22.768	-140.99	-1500.80	-869.90	2.404
69	-6.940	-14.078	-350.59	-1498.16	-808.90	0.308
35	-11.007	-14.380	-422.06	-1483.30	-801.58	0.058
34	-10.150	-13.397	-413.44	-1487.95	-797.95	0.290
59	-5.472	-16.909	-291.15	-1500.36	-824.98	-1.210
60	-6.343	-19.677	-294.40	-1493.12	-838.34	-0.504
61	-7.235	-21.321	-302.08	-1487.14	-846.01	-0.597
37	-0.105	-11.767	-172.39	-1529.44	-807.47	0.077
36	-0.618	-9.617	-218.99	-1530.41	-793.64	-0.192
70	2.536	-8.079	-69.99	-1544.72	-792.41	-0.481
56	-9.665	-21.510	-357.30	-1477.98	-841.35	-0.197
38	-2.725	-13.853	-240.64	-1515.45	-814.15	-0.952
58	-4.678	-19.874	-269.55	-1494.77	-842.72	-0.999

J:\ДИПЛОМ\VFP98\F0_Z_AL.FXP
05/11/2018 J:\ДИПЛОМ\VFP98\61.DBF

РЕЗУЛЬТАТ РЕШЕНИЯ ОФЗ

XS, км	-2526.423	21.80
YS, км	-1652.687	8.29
ZS, км	-726.081	7.22
	радианы	градусы
A, ско	-1.357695	0.19
B, ско	-3.147986	0.18
L, ско	0.046184	0.54

Press any key to continue ...

номер	x-(x) мм	y-(y) мм	
1	42	0.146	0.571
2	40	-0.061	0.261
3	41	-0.152	-0.105
4	69	0.105	0.469
5	35	-0.061	0.106
6	34	-0.037	0.144
7	59	-0.080	-0.175
8	60	-0.154	-0.285
9	61	-0.203	-0.260
10	37	-0.091	-0.164
11	36	0.097	-0.043
12	70	-0.108	-0.164
13	56	-0.169	-0.241
14	38	-0.029	-0.047
15	58	0.797	-0.065

число итераций 6
Высота КК, км 1367.0577

МАТРИЦА ОРИЕНТАЦИИ

0.04377244	-0.97640002	-0.21148754
0.01600599	-0.21097787	0.97735978
-0.99891330	-0.04616649	0.00639323-

Приложение 3

Таблица с расчетами селенографических координат и видимых высот точек рельефа для снимка №9. Всего 233 измеренных точек краевой зоны.

$X_s = -2443$, $Y_s = -1662.8$, $Z_s = -739.4$ – положения центров проекций

$A = -1.37$, $B = -3.14$, $L = 0.039$ – угловые величины ориентации камеры

№	$\beta(^{\circ})$	λ	R	H
1	-8.04	89.79	1739.433	1.43
2	-8.29	89.76	1740.349	2.34
3	-8.55	89.72	1740.861	2.861
4	-8.60	89.70	1740.518	2.51
5	-8.71	89.70	1741.206	3.206
6	-8.84	89.69	1741.712	3.712
7	-8.94	89.63	1740.196	2.196
8	-8.98	89.62	1740.219	2.219
9	-9.03	89.61	1739.898	1.898
10	-9.11	89.60	1740.355	2.355
11	-9.18	89.60	1740.774	2.774
12	-9.23	89.57	1740.198	2.198
13	-9.32	89.56	1740.095	2.095
14	-9.38	89.54	1740.153	2.153
15	-9.45	89.54	1740.545	2.545
16	-9.54	89.52	1740.368	2.368
17	-9.65	89.49	1740.123	2.123
18	-9.74	89.47	1740.032	2.032
19	-9.85	89.45	1739.767	1.767
20	-9.97	89.43	1739.140	2.140
21	-10.04	89.41	1739.609	1.609
22	-10.17	89.39	1739.986	1.986
23	-10.24	89.41	1741.142	3.142
24	-10.29	89.40	1741.281	3.281
25	-10.42	89.41	1742.488	4.488