

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ, ОСОБЕННОСТЕЙ И СПОСОБОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ ВИЗУАЛЬНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ И ФОТОСЪЕМКИ НА ЛУНЕ

В.М. Жуков

Докт. техн. наук, профессор В.М. Жуков
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Рассмотрены специфические условия выполнения операций визуально-инструментального наблюдения и съемки на Луне и их влияние на способы наблюдения и съемки с окололунных орбит и на поверхности Луны. Разработаны рекомендации к программе подготовки космонавтов и требования к интеллектуальной системе визуализации внешней обстановки лунного тренажера.

Ключевые слова: форма Луны, видимый горизонт, освещенность, высота орбиты, система имитации внешней обстановки, заход на посадку, лавовая пещера.

Analysis of the Conditions, Features and Ways of Performing the Visual Instrumental Observations and Photography on the Moon. V.M. Zhukov

The paper considers specific conditions of performing visual instrumental observations and photography on the Moon and their influence on the ways of performing observations and survey from near-lunar orbits and on the lunar surface. Some guidelines for the cosmonaut training program and general requirements for the outside conditions visualization intelligent system of the lunar simulator have been developed.

Keywords: figure of the Moon, illumination, camera, orbital altitude, visible horizon, landing approach, cyclorama, landing pad, lava cave, drone, visualization, simulator, virtual reality.

Цель статьи – на основе анализа условий, особенностей и способов выполнения операций визуально-инструментального наблюдения и съемки (ВИН-С) на Луне разработать рекомендации к программе подготовки космонавтов и требования к системе визуализации внешней обстановки лунного тренажера.

Российская лунная программа рассчитана на период 2021–2040 гг. Концепция программы предполагает исследование и освоение Луны в три этапа [1], включающие испытания перспективного пилотируемого корабля, исследование Луны автоматическими станциями серии «Луна», пилотируемые полеты с облетом и высадкой космонавтов на поверхность Луны для создания и размещения элементов посещаемой базы.

Космические программы США, Китая, РФ и Индии включают отправку космонавтов на Луну в период 2024–2035 гг. Постоянные базы на Луне планируют построить США, Китай, Япония и ЕКА.

Для подготовки космонавтов к выполнению операций ВИН-С с борта МКС используются: системы имитации внешней обстановки (СИВО) тренажеров МКС, навигационно-баллистическая программы «СИГМА», регулярно обновляемые комплекты оптических приборов, фото- и видеокамер с набором объективов. Отработка способов применения этих средств выполняется в полетах на самолете-лаборатории и в экспериментах на МКС.

Можно полагать, что системы визуализации внешней обстановки для подготовки космонавтов по лунной программе должны быть более сложными системами в связи с необходимостью имитации выполнения операций ВИН-С с окололунных орбит различной высоты, на этапах захода на посадку и посадки лунного модуля (с учетом особенностей освещенности Луны и ряда других специфических факторов). В связи отсутствием конкретных программ лунных миссий целесообразно создавать средства имитации операций ВИН-С в исследовательском варианте с функциями искусственного интеллекта (для отработки сценариев выполнения задач операций). В качестве основы создания СИВО лунных тренажеров могут быть использованы материалы съемки Луны автоматическими космическими аппаратами (КА).

Съемка Луны автоматическими КА

В исследовании Луны с помощью космических аппаратов (КА) выделяют два периода: 1958–1974 гг. и с 1994 г. по настоящее время, в течение которых получено огромное количество снимков Луны с окололунных орбит и с луноходов. Значительное количество снимков получено астронавтами миссий «Аполлон» с помощью портативных фотокамер.

В полетах советских автоматических станций серии «Луна» (1959–1976 гг.) была отработана мягкая посадка на Луну, выполнена съемка Луны с разных высот (включая ее обратную сторону), а также съемка и передача на Землю первой круговой фотопанорамы в районе посадки [2].

США в первый период отправили к Луне около 30 КА. Кроме того, были запущены 17 КА по программе «Аполлон», из которых шесть пилотируемых КА доставили на Луну астронавтов. КА «Климентина» передал на Землю около 1,8 миллиона снимков поверхности Луны [3]. КА «Смарт-1», оснащенный цветной ПЗС-камерой и другими научными приборами, получил изображение внутреннего строения кратера Шеклтон (диаметр 21 км, глубина 4,2 км), в который не попадает солнечный свет и в котором была обнаружена повышенная концентрация воды. Миссия NASA «GRAIL» выполняла программу изучения гравитационного поля Луны с помощью двух КА (высота орбиты 50 км, скорость 1,68 км/с). Сделано более 115 тысяч снимков лунной поверхности. Один из результатов этого полета – карта высот лунной поверхности (в искусственных цветах).

Автоматический зонд Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO), в состав научной аппаратуры которого входят сканер и лазерный высотомер, с 2009 г. выполняет обширную программу исследований, включающую съемку мест посадки лунных модулей с низкой орбиты (165×20 км) при разрешении на местности 4 м. Результаты съемки представляют большой научный и практический интерес. По данным LRO построена и опубликована 3D-карта Луны, создана анимация и научный визуализатор (Scientific Visualization Studio), получена оценка рисков опрокидывания и сползания аппарата со склона, а также – вероятности опасной посадки КА на площадку с уклоном $>15^\circ$, которая прогнозируется на уровне 4 % [4].

Китайские зонды серии «Чаньэ» получили трехмерные фотографии поверхности Луны с разрешением на местности 1,3 м, анализ которых был выполнен с помощью нейросетей. На Луну были доставлены луноход с фотокамерой для съемки круговых панорам, УФ-телескоп и др. приборы. Снимки высокого разрешения, включая панорамный снимок на обратной стороне Луны, переданы на Землю и опубликованы [5].

КА серии «Чандраян» (Индия) выполняли съемку с орбит высотой 100 и 200 км. Получено и передано на Землю 70 000 фотоснимков. По полученным данным построена карта лунной поверхности площадью порядка 4 млн кв. км [6].

На японском КА «Кагуя» (2007–2009 г.) были установлены ТВ-камеры высокого разрешения, а также десять видов другой научной аппаратуры. Обнаружены лавовые трубки на Луне, которые могут быть использованы для размещения в них элементов инфраструктуры лунной базы [7].

Ряд полученных материалов съемки Луны может быть использован в теоретической и практической подготовке космонавтов для выполнения лунной программы РФ в части визуально-инструментальных наблюдений и съемки на Луне.

Ведущие космические державы разрабатывают перспективные планы исследования Луны. Программа НАСА «Артемиды» предполагает высадку астронавтов на Луну в 2024 г. Программа включает создание орбитальной лунной станции «Gateway» (орбита 3000×70000 км, период обращения 7 дней) с экипажем из четырех человек и продолжительностью экспедиций от 30 до 90 суток.

Запуск российского КА «Луна-25» (с посадкой в районе Южного полюса) запланирован на 2021 год. Предполагается спуск с низкой орбиты высотой 100 км и посадка на площадку в форме эллипса размерами 30×15 км. С помощью КА «Луна-26» (запуск в 2023 г., высота орбиты 60 км) может быть создана трехмерная топографическая карта высот рельефа Луны (с разрешением 2–3 м) на основе стереосъемки и анализа освещенности [8].

В Китае создаются автоматические лунные станции «Чаньэ-5» и «Чаньэ-6», разрабатывается лунный посадочный модуль и осуществляется подготовка пилотируемого полета на Луну. Планируется установка на по-

верхности Луны световых лазерных маяков в качестве основы системы визуальной навигации.

Программы исследования Луны включают достаточно сложные задачи ВИН-С, к которым относятся: поиск мест посадки КА и районов строительства лунной базы, определение ориентиров на трассах захода на посадку пилотируемых КА, разведка маршрутов передвижения луноходов, съемка объектов на поверхности Луны и обследование лавовых пещер и туннелей.

Следует отметить, что в лунных миссиях успешное выполнение операций ВИН-С зависит от приспособленности портативных средств к наблюдению и съемке с рук через иллюминатор ПКА и в скафандре на поверхности Луны.

Снимки, полученные автоматическими КА с окололунных орбит, могут быть использованы в качестве основы для создания СИВО и аналога программы «СИГМА» для лунного тренажера, которые могут быть дополнены 3D-реконструкциями полос обзора (вдоль типовых трасс полета орбитальных лунных ПКА) с учетом изменения дальности видимого горизонта, освещенности, высоты и скорости лунного ПКА.

Условия и особенности наблюдения и съемки Луны

Особенности выполнения операций ВИН-С Луны обусловлены рядом факторов, к которым относятся форма Луны, ее освещенность, дальность видимого горизонта и другие, требующие детального рассмотрения.

Форма Луны

В соответствии с последними исследованиями, форма Луны отличается от сферы. Этот фактор необходимо учитывать в навигационных расчетах местного радиуса Луны и высоты КА над наблюдаемой поверхностью Луны.

Оценить кривизну формы Луны как сферы (со средним радиусом R) можно с помощью известной формулы $k = 1/R^2$: кривизна Луны примерно в 13 раз больше кривизны Земли. Это обстоятельство существенно влияет на условия выполнения операций ВИН-С и их имитацию в СИВО лунного тренажера, т.к. требуется трансформация изображения при изменении высоты окололунной орбиты и в динамике спуска с орбиты по траектории захода на посадку лунного модуля, а также на поверхности Луны в зависимости от высоты положения наблюдателя. При этом будут изменяться дальность видимого горизонта, соответствующая площадь визуализируемой поверхности и пространственное разрешение изображений.

Расстояния на Луне обманчивы ввиду отсутствия достаточно плотной атмосферы. Удаленные объекты визуально воспринимаются как более близкие. При этом расстояния определить крайне сложно по причине отсутствия объектов известного размера. Геометрическую дальность видимости горизонта (d) можно определить по известной формуле (в соответствии с теоремой Пифагора) [9]:

$$d = \sqrt{(R + h)^2 - R^2}, \quad (1)$$

где R – средний радиус планеты, h – высота положения наблюдателя над поверхностью. Средние радиусы Луны и Земли соответственно равны 1737,1 и 6371,2 км. Вычисления по формуле показывают, что с высоты роста космонавта (1,75 м) горизонт на Земле виден на дальности 4,7 км, а на Луне – на дальности 2,5 км, т.е. на дальности почти в два раза меньшей. Это существенно ограничивает площадь изображения лунной поверхности при пейзажной съемке и съемке круговых панорам. В таблице 1 для примера приведены рассчитанные значения дальности видимости горизонта для некоторых возвышенных мест на Луне и для двух окололунных орбит.

Таблица 1

Геометрическая дальность видимости горизонта на Луне
в зависимости от высоты наблюдателя

Высота наблюдателя, м	2	5	30	20 000	50 000
Дальность видимости горизонта, км	2,6	4,2	10,5	100	422

Дальность видимости горизонта может быть дополнительно ограничена в горных районах Луны, в частности, при наличии гор на трассе захода на посадку лунного ПКА.

Дальность взаимной видимости точек пространства (при известных их высотах над поверхностью Луны) может быть приближенно оценена по формуле [10]:

$$D_d = 1,86 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (2)$$

где h_1, h_2 – высоты точек в метрах, D_d – дальность взаимной видимости в км, 1,86 – коэффициент согласования размерностей с учетом радиуса Луны. Дальность взаимной видимости двух астронавтов (рост 1,75 м) будет равна 4,9 км.

Для увеличения площади обзора и съемки может быть использован лунный реактивный коптер с видеокамерой, например, на высотах порядка 10–100 м. Для применения этого способа потребуются профессиональная подготовка космонавта как оператора беспилотного летательного аппарата.

При создании сюжетов с наличием препятствий целесообразно в СИВО лунного тренажера использовать детальные снимки поверхности Луны и приведенные выше формулы. Такой подход позволит визуализировать требуемые участки поверхности Луны, маркировать препятствия и планировать маршруты перемещения астронавтов, роверов, роботов, реактивных коптеров и объектов техники при строительстве лунной базы.

Рельеф Луны

Рельеф экваториальных регионов Луны характеризуется как равнинный, а в приполярных регионах – как сложный. На Луне выделяют следующие основные типы образований: моря (покрытые базальтовой лавой), материки (заполненные кратерами круглой формы), горные цепи и горные системы (с пиками высотой до 9 км), трещины и каньоны (шириной до 2 км, глубиной в сотни метров и протяженностью в сотни километров), долины с радиальными деталями рельефа, лавовые пещеры и туннели.

Лунная поверхность характеризуется низкой отражательной способностью порядка 5–18 %. Локальные изменения рельефа происходят вследствие лунотрясений (до 2400 в год), падения метеоритов и космических аппаратов, обвалов стенок кратеров, изменения температуры поверхности, гравитационного притяжения Земли.

Создана серия изображений рельефа, на которых представлены высотные данные на район кратера Тихо при девяти разных вариантах освещенности (рис. 1). Контрасты соответствуют специфике освещенности в условиях планеты.



Рис. 1. Серия изображений кратера Тихо при различных уровнях освещенности [11]

Анализ приведенных изображений, а также других многочисленных снимков лунной поверхности показывает, что большие углы Солнца над горизонтом приводят в большинстве случаев к снижению контраста элементов рельефа и фона поверхности. При низких углах Солнца элементы рельефа образуют длинные тени, которые можно рассматривать как надежные признаки обнаружения элементов рельефа.

В приполярных районах требуется обеспечение не только мягкой, но и высокоточной посадки с погрешностью в пределах 10–100 м [12]. Кратер Шеклтон (диаметр 21 км, глубина 4,2 км), расположенный в районе Южного полюса, рассматривается как место строительства лунной базы. Посадка ПКА в такой кратер представляется более сложной, чем на равнинную местность. В кратере соседствуют зоны «вечной темноты» и «вечного света», которые могут оказать отрицательное влияние на световую и темновую адаптацию зрения космонавтов во время захода на посадку.

Освещенность на Луне

Освещенность на Луне определяется, в основном, чередованием дня и ночи. Лунные сутки длятся 29,5 земных суток, продолжительность дня и ночи составляет примерно 14 суток. Освещенность на Луне меняется медленно, угловая скорость собственного вращения составляет примерно 0,5 °/час. Этот фактор необходимо учитывать при съемке круговых панорам.

На территориях Луны, обращенных к Земле, местность освещается отраженным от Земли светом. Обратная сторона освещается звездами. После периодов солнечной активности отдельные места лунной поверхности могут слабо светиться в результате люминесценции. Отсутствие метеорологических факторов обуславливает более благоприятные условия наблюдения и съемки.

Светотеневые контрасты на Луне в результате отсутствия атмосферного рассеяния очень резкие. Градации в тенях можно различить в горах за счет переотраженного света. Особенности визуального наблюдения на Луне могут приводить к искажению восприятия окружающего пространства. Например, астронавты миссии «Аполлон-12» при визуальной оценке возможности спуска в кратер Surveyor на ровере переоценили (из-за наличия резких теней) угол наклона стенок кратера (эффект увеличения крутизны), что привело к решению об отмене спуска. Контрастные сюжеты, диапазон яркостей которых превышает фотографическую широту камеры, являются сложными объектами для съемки.

На Луне можно выделить три зоны освещенности:

- зоны периодической освещенности в режиме день-ночь;
- «пики вечного света» (анг. Peak of Eternal Light), расположенные в районе северного полюса Луны (освещаются в течение 80–89 % лунного года [13]);
- зоны «вечной темноты» (анг. Zone of Eternal Darkness).

Локальные зоны «вечного света», всегда освещенные Солнцем, обнаружены в районе северного полюса Луны. Исследуется периодическое изменение уровня их освещенности. Эти зоны могут быть использованы для посадки КА, проведения исследований и создания элементов инфраструктуры лунной базы. Такой выбор оправдывают, по крайней мере, два фактора: приборы, работающие от энергии Солнца, смогут получать ее постоянно (независимо от времени лунных суток), а перепад температур в таких зонах относительно мал.

В районах полюсов Луны находится большое количество кратеров, которые никогда не освещаются солнечным светом. Лунные пещеры и туннели, а также глубокие трещины лишены естественной освещенности. Освещенность на поверхности характеризуется следующими данными: максимальная освещенность при солнечном свете – 140 000 лк; освещенность солнечным светом, отраженным от Земли, – 30 лк; освещенность светом звезд – 0,0005 лк. Для наблюдения крупных деталей лунной поверхности может быть достаточной освещенность в 30 лк [14].

Современные тепловизионные камеры и очки ночного видения целесообразно использовать в течение продолжительной лунной ночи, а также в лавовых пещерах и туннелях для наблюдения на дальностях, измеряемых километрами, а также в поисковых операциях. Созданные тепловизоры работают в спектральных диапазонах: 0,9–1,7 мкм, 3–5 мкм и 8–14 мкм. Верхняя граница регистрируемой температуры – не менее 200 °С, температурное

разрешение порядка $0,1^\circ$. Разрабатываются тепловизоры с повышенным разрешением на матрице 1280×1024 пикселей. В связи с практическим отсутствием атмосферы на Луне тепловизоры могут обеспечивать большую дальность наблюдения, чем на Земле.

В рассматриваемых вариантах строительства и эксплуатации лунной базы предполагается пребывание на ней персонала до 90 суток, половина которых будет приходиться на лунную ночь. В подобных условиях применение тепловизоров можно считать необходимым. Отметим, что низкие температуры на Луне могут быть использованы для охлаждения тепловизионных матриц, однако это требует дополнительных экспериментальных исследований.

Для планирования операций ВИН-С на борту МКС используется навигационно-баллистическая программа «Сигма», которая позволяет определять положение МКС на орбите, прогнозировать трассу полета, рассчитывать освещенность в районе объекта наблюдения и положение Солнца и Луны относительно орбиты. Космонавты имеют возможность подготовиться к сеансу ВИН-С и сделать установки на камере съемки. Целесообразно разработать подобную программу для лунных ПКА.

Атмосфера и температура на Луне

Луна имеет крайне разреженную (по сравнению с Землей) атмосферу. В ней содержатся азот, гелий, аргон, неон, аммиак, метан и углекислый газ. Такая степень разреженности и тонкий слой атмосферы обуславливают большой перепад температур на поверхности (от $+150^\circ\text{C}$ днем до -160°C ночью). Предполагается, что температура в лавовых пещерах и лавовых туннелях достаточно стабильна и равна примерно -35°C .

В связи с этим фото- и видеокамеры при длительном использовании целесообразно помещать в специальные боксы с терморегулированием и защитой от радиации.

Лавовые пещеры и туннели

Лавовые пещеры и туннели были обнаружены с помощью съемки с окололунных орбит. Один из туннелей длиной около 50 км залегает на глубине более 90 м . По предварительным оценкам, лавовые трубки могут быть до 5 км в ширину. Обнаружена лавовая пещера с высотой потолка более 75 м . Теоретически лавовые трубки сводчатой формы могут оставаться структурно стабильными. Предполагается, по аналогии с земными лавовыми трубками, что лунные лавовые трубки имеют внутри базальтовое покрытие.

Считается, что размещение в лавовых пещерах объектов инфраструктуры лунной базы обеспечит им и персоналу базы достаточно надежную защиту от космического излучения, метеоритов и экстремальных перепадов температуры [27]. На некоторых туннелях обнаружены вертикальные входы до 50 м в диаметре. Отверстия меньшего диаметра рассматриваются как световые люки. К настоящему времени обнаружено около 200 световых люков.

На Земле лавовые туннели имеются на Камчатке, Гавайских островах и в других местах. Их размеры значительно меньше (порядка 30 м в диаметре),

но они пригодны для проведения (в условиях полной темноты) экспериментов, подготовки космонавтов и отработки способов применения тепловизоров, очков ночного видения, средств искусственного освещения.

Для обследования лавовых пещер и туннелей может быть использована технология 3D-панорамной съемки интерьеров (при искусственном освещении).

Для съемки в туннелях и пещерах разрабатываются реактивные коптеры, оснащенные фото- и видеокамерами. Устройства предназначаются для съемки вертикальных поверхностей и склонов с углами наклона более 30° . В NASA создан противоударный реактивный летательный аппарат с экстремальным доступом (Extreme Access Flyer), который предназначается для работы на Луне, Марсе и астероидах, обеспечивающий обследование и сбор образцов породы в замкнутых объемах.

Применение этих средств в лавовых пещерах и туннелях Луны потребует специальной подготовки космонавтов в наземных условиях. Для подготовки космонавтов к выполнению операций ВИН-С с применением телевизоров необходимо включить в СИВО лунного тренажера блок визуализации тепловизионных изображений объектов на поверхности Луны и в лавовых пещерах. Одно из основных требований к системе визуализации заключается в обеспечении углового размера строки растра экрана (соответствующего нормальному зрению оператора) не более 1 мрад и не менее $0,5 \text{ мрад}$ [15].

Микрорельеф лунной поверхности

Характерными объектами микрорельефа лунной поверхности является крупнообломочный материал лунных пород (камни) и реголит. Высота крупных камней достигает $10\text{--}15 \text{ м}$. На поверхности в 1 м^2 кратеров (класса А) может находиться в среднем 1 камень поперечником более 10 см . Поверхности внутри кратеров класса С и между ними менее каменисты.

Обнаружение и съемка камней на планируемой посадочной площадке затруднительны в связи с их низким контрастом. Наиболее надежными дешифровочными признаками являются тени от камней, которые образуются при небольших углах Солнца над лунным горизонтом.

К элементам лунного рельефа относят масконы (англ. mass concentration) – локальные области лунных морей с большой концентрацией массы, которые изменяют гравитационное поле Луны. При пролете КА над масконами (по низкой орбите) наблюдается снижение высоты. Для компенсации влияния масконов требуется постоянное расходование топлива. Два КА миссии NASA «GRAIL» после пролетов над масконами (на высоте 50 км) израсходовали топливо, снизились и разбились о поверхность Луны.

Поскольку успешность выполнения операций ВИН-С существенно зависит от высоты орбиты, необходимо включить в СИВО лунного тренажера имитацию режима пролета над масконами с индикацией изменения высоты орбиты (в дополнение к нестабильности круговых окололунных орбит).

Лунная пыль

Лунная пыль, которая представляет одну из основных опасностей для астронавтов, – это липкая субстанция, способная накапливать электрический заряд. При долгом воздействии она может выводить из строя детали скафандров и оптических приборов. Вдыхание лунной пыли представляет опасность для здоровья астронавтов.

Атмосфера Луны регулярно загрязняется пылевыми облаками, которые поднимаются с поверхности под воздействием солнечного ветра. Из-за низкой гравитации пыльные облака поднимаются довольно высоко (в течение лунного дня) и оседают на поверхность ночью. Их можно наблюдать, когда Солнце находится на горизонте Луны.

Цвет Луны

Луна имеет характерный пепельный оттенок. Пыль ярко-оранжевого цвета обнаружена в районе кратера Шорти. Глаз практически не различает цветовые особенности поверхности Луны. Цифровые фотокамеры более чувствительны к цвету, однако целесообразно использовать на Луне в основном цифровые черно-белые камеры, которые имеют (по сравнению с цветными камерами) более широкий динамический диапазон и более высокое разрешение. Блеклые цвета лунной поверхности могут быть зафиксированы цифровой фотокамерой с применением светофильтров.

Способы наблюдения и съемки с окололунных орбит

Для обследования и высокодетальной съемки мест посадки и участков строительства лунной базы используются окололунные орбиты высотой 200, 100 и 50 км. Достигнутое с окололунных орбит автоматическими КА разрешение на местности 1,3 м можно считать достаточным для определения участков строительства лунной базы, однако выбор места посадки – более сложная задача [16]. Кроме требования к уклону посадочной площадки не более 11–15°, рассматривается второй жесткий критерий безопасной посадки лунного модуля – отсутствие на площадке камней и впадин диаметром порядка 0,3 м, попадание на которые одной из опор модуля может привести к его опрокидыванию.

На орбитальных станциях «Салют» и «Мир» были отработаны два способа наблюдения и съемки наземных объектов. Способы включают следующие фазы: ориентация поля зрения по трассе полета на угол 30–45° от вертикали, обнаружение объекта в широком поле зрения, захват на сопровождение в оптическом канале, фокусировка объектива, экспозамер и фотосъемка (в надир). Панкратический визир ОД-5 позволял выполнять сопровождение объекта с угловой скоростью 0,7 °/с и его наблюдение с угловым разрешением 1" [17]. Достоинством этого способа является использование для сопровождения объекта поворотного зеркала.

С борта МКС выполняется съемка объектов, расположенных с отклонением от трассы полета на 30 и более градусов. Для анализа основных закономерностей выполнения операций ВИН-С на низких окололунных орбитах достаточно рассмотреть операцию наблюдения объекта, расположенного на трассе полета.

На рис. 2 показана пространственно-временная схема операций наблюдения и плановой съемки в надир с низких окололунных орбит. Приняты следующие условия выполнения операции: высота орбит равна 100, 50 и 15 км, круговая скорость зависит от высоты орбиты, объект расположен на трассе полета, ориентация поля зрения – в направлении полета, начало поиска объекта невооруженным глазом (точка А) под углом 45° относительно вертикали, плановая съемка объекта в надир (точка В).

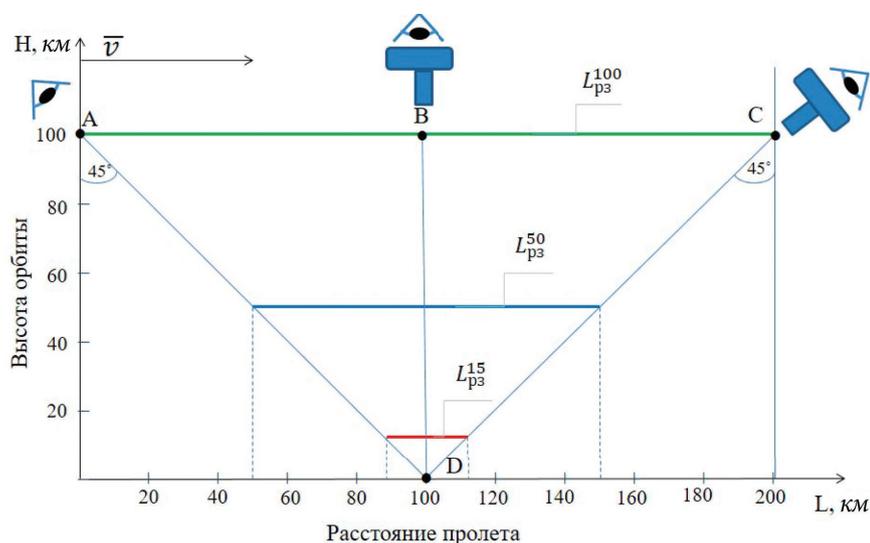


Рис. 2. Пространственно-временная схема операций наблюдения и плановой съемки в надир с низких окололунных орбитах

Круговую скорость КА в зависимости от высоты орбиты определяем по формуле (без учета массы КА и изменения ускорения силы тяжести при пролете над масконами):

$$V = \sqrt{\frac{GM}{R}}, \quad (3)$$

где гравитационный параметр $G = 6,67408 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ с}^{-2} \text{ кг}^{-1}$, масса Луны $M = 7,37358 \times 10^{22} \text{ кг}$, радиус круговой орбиты $R = (1737,1 + h) \text{ км}$, h – высота орбиты над поверхностью Луны, км; V – км/с.

Угловую скорость линии визирования приближенно можно оценить по известной формуле:

$$\omega = \frac{V}{H} \left[\frac{\text{рад}}{c} \right], \quad (4)$$

где V – круговая орбитальная скорость, км/с ; H – высота орбиты, км . Сопровождение объекта осложняется возрастанием угловой скорости линии визирования на участке АВ до максимального значения в точке В и ее снижением на участке ВС.

Расчетные параметры рабочих зон (по приведенным формулам) показаны в табл. 2.

Таблица 2

Параметры рабочих зон операции ВИН-С на низких окололунных орбитах

Высота орбиты, км	Протяженность рабочей зоны, км	Круговая скорость, км/с	Время пролета рабочей зоны, с	Время пролета до точки съемки в надир, с	Макс. угловая скорость линии визирования, $^{\circ}/\text{с}$
100	200	1,63	122,7	61,3	0,93
50	100	1,65	62,6	30,3	1,91
15	30	1,67	17,9	8,9	6,41

Из анализа данных таблицы следует очевидная закономерность: снижение орбиты повышает линейную разрешающую способность средств наблюдения и съемки, сокращает время пролета рабочей зоны и увеличивает угловую скорость линии визирования.

Экипажи МКС используют способ съемки портативными камерами при мануальном управлении. При этом обнаружение заданного объекта осуществляется при наблюдении через иллюминатор невооруженным глазом. Другие фазы операции выполняются при наблюдении через видеискатель или по экрану фотокамеры. Ограничение способа связано с применением фотографических систем с телеконвертером, фокусное расстояние которых увеличивается до величин $f = 1600 \text{ мм}$. Круговая скорость МКС относительно Земли на высоте 400 км составляет $7,68 \text{ км/с}$, при этом максимальная угловая скорость линии визирования равна $1,1 \text{ }^{\circ}/\text{с}$. Можно считать, что это значение ограничивает применение способа съемки портативными камерами со сверхдлиннофокусными объективами. Данные табл. 2 показывают, что на орбитах высотой $H \leq 50 \text{ км}$ вероятность выполнения операции ВИН-С (при мануальном управлении космонавтом) заметно убывает с уменьшением высоты орбиты. Обнаружение малоразмерных препятствий на посадочной площадке и их распознавание как площадных объектов (по критерию Джонсона) с окололунных орбит пока не обеспечивается.

Замена в панкратическом приборе типа ОД-5 механически управляемого зеркала на зеркало в карданно-магнитном подвесе обеспечит сопровождение объекта при более высоких угловых скоростях линии визирования. Методом математического моделирования показано, что использование кар-

данно-магнитного подвеса обеспечит снижение высоты окололунной орбиты до 42 км, сопровождение объекта при угловой скорости линии визирования порядка 2,3 °/с и ошибкой наведения по углу тангажа порядка 0,198" [25]. Применение панкратического визира типа ОД-5 с фотосистемой ($f = 1600$ мм) на окололунной орбите высотой 42 км обеспечило бы детальное наблюдение с геометрическим разрешением на местности 15 см, что достаточно для обнаружения малоразмерных препятствий на посадочной площадке как точечных объектов, но недостаточно для их идентификации как площадных объектов.

Способы видеосъемки

В последнее десятилетие наблюдается интенсивное развитие видеокамер, что позволяет усовершенствовать способы их применения. В миссиях исследования Луны можно выделить следующие способы применения космонавтами видеокамер:

- съемка планеты из обитаемого отсека ПКА через иллюминатор при мануальном управлении камерой;
- съемка планеты камерой, установленной на внешней поверхности ПКА, при дистанционном управлении космонавтом из обитаемого отсека;
- съемка космонавтом мануально управляемой камерой на поверхности Луны.

Способы видеосъемки экипажем могут отрабатываться в экспериментах на МКС. В настоящее время проходит испытания установленная на внешней поверхности модуля «Кибо» МКС современная видеосистема с камерой марки FX6 (фирма Sony, модель $\alpha 7S II$), которая транслирует видеопоток оператору, имеет дистанционное управление зум-объективом и параметрами съемки, обеспечивает запись видеофайлов и передачу их на Землю.

Камера имеет следующие характеристики: видеосъемка в формате 4К (4096 × 3072 пикселей) с поддержкой записи во внутреннюю память, полнокадровая CMOS-матрица с разрешением 10,2 МП, диапазоны чувствительности – ISO 800 и ISO 12800 (для сложных условий съемки), динамический диапазон – порядка 15 EV (англ. Exposure Value) обеспечивает получение снимков отдельными кадрами, вариообъектив имеет диапазон фокусных расстояний 28–135 мм.

Система приспособлена для работы в вакууме. Камера с объективом помещена в алюминиевый корпус, защищающий от космического излучения. Система терморегуляции обеспечивает работу камеры при изменении внешней температуры на 200 °С. Устройство выдерживает вибрации. Питание системы – от аккумулятора или от внешнего источника. Камера не создает электромагнитных помех и может быть использована космонавтом в обитаемом отсеке. Штатив внешней камеры позволяет изменять ее ориентацию и снимать планету и космос под разными углами.

Основные стандарты кадровых частот (видеокамер и камер GoPro) имеют дискретные значения в пределах 24–60 кадр/с. Освоено производство камер с кадровой частотой 120 кадр/с. Время срабатывания затвора камеры (время экспозиции кадра) при изменении частоты кадров в диапазоне 30–120 кадр/с будет изменяться (примерно) в диапазоне 1/60–1/240 с, который существенно уже диапазона выдержек фотокамер (от минут до 1/16 000 с). Увеличение частоты кадров.

Практика применения видеокамер не выработала универсального подхода к выбору частоты кадров, которая неоднозначно зависит от динамики относительного движения камеры и объекта, а также от освещенности объекта. Увеличение частоты кадров обуславливает (при фиксированной скорости считывания изображения) сокращение количества информации в отдельном кадре, т.е. ухудшение качества изображения (вплоть до его пикселизации).

Одной из задач мониторинга Луны можно считать съемку ее поверхности на орбитальном витке, включающем участки дневной и ночной освещенности. Учитывая рассмотренные выше условия съемки с окололунных орбит и особенности освещенности Луны, целесообразно выполнить исследования по классификации сюжетов и разработать рекомендации по способам их съемки фото- и видеокамерами. Можно считать, что этот подход будет полезен в подготовке космонавтов к выполнению операций ВИН-С в миссиях исследования Луны.

Развитие средств ВИН-С можно связать с внедрением формата видеокамер 8К (Full HD Ультра, разрешение 7620 x 4320 пикселей), совершенствованием видеосистем на основе технологии IP-видео (англ. Internet Protocol – межсетевой протокол), обеспечивающей подключение камеры к локальной сети или Интернету; созданием шлема космонавта с дополненной реальностью.

Контроль посадочной площадки

Визуальный контроль посадочной площадки можно считать наиболее ответственным этапом операции ВИН-С. По результатам наблюдения командир лунного модуля должен принять одно из альтернативных решений: осуществить посадку, сменить место посадки, отменить посадку с возвращением на опорную орбиту для стыковки с орбитальным модулем. Критическим является остаток топлива реактивного двигателя, который может обеспечить достаточное по времени зависание, маневры лунного модуля и при необходимости его возвращение на опорную орбиту.

Операцию контроля посадочной площадки на предмет наличия малогабаритных препятствий выполнили, например, экипажи кораблей «Аполлон-11 и 15». Экипаж корабля «Аполлон-15» выбрал ровное место посадки с высоты 610 м. Экипаж корабля «Аполлон-11» при заходе на посадку обнаружил с высоты 140 м на посадочной площадке валуны до 3 м в поперечнике и принял решение о перелете на другую площадку [18].

Обнаружение препятствий в широких углах зрения как площадных объектов зависит от следующих факторов, к которым относятся [20, 21]: разрешающая способность и пороговый контраст зрения, дальность наблюдения, контраст объект/фон, располагаемое время наблюдения, угловые размеры и форма объекта. В работе [22] рассматривается способ оценки зрительного восприятия с помощью понятия «видимость объекта» (V), которая оценивается количеством пороговых контрастов (порогов исчезновения для объектов данной формы и угловых размеров – $\varepsilon_{исч}$), содержащихся в данном контрасте K : $V = K/\varepsilon_{исч}$. Для разрешающей способности глаза и формы объекта с отношением поперечных размеров 1:1 и $K = 1$ имеем $\varepsilon_{исч} = 0,3$ и $V = 3,3$, что обуславливает обнаружение объекта в виде слабого силуэта (при ограниченном времени наблюдения). Расчеты методом геометрической оптики показывают, что идентификация объекта (при фиксированном наблюдении) как площадного (по критерию Джонсона) с достаточно высокой вероятностью может быть обеспечена на дальностях порядка 100 м.

Для контроля зрения космонавта в полете могут быть использованы способ и устройство дистанционной экспресс-диагностики зрительного анализатора [23].

Помехой визуальному наблюдению на участке вертикального спуска является столб пыли, который под воздействием реактивных двигателей посадочного модуля поднимается до высоты порядка 45 м. При снижении посадочного модуля корабля «Аполлон-15» на высоте около 18 м видимость упала практически до нуля. На этапе вертикального спуска видимость осложнялась переменной скоростью спуска: с высоты 6 м до 2,4 м скорость составляла 0,3 м/с, при свободном падении в течение 1,2 с она увеличилась до 2 м/с. Из шести посадок КА «Аполлон» эта посадка была самой жесткой [18].

Следует отметить, что перед заходом на посадку экипаж корабля «Аполлон-15» не смог обнаружить заданную в качестве ориентира группу из четырех кратеров. Возможной причиной может быть, например, снижение высоты орбиты в результате пролета над масконами и уход этих ориентиров за видимый горизонт. На этапе захода на посадку командир корабля вручную выполнил 18 коррекций, которые переместили место посадки на 500 м.

В системе подготовки космонавтов навыки обнаружения и визуально-инструментального контроля посадочной площадки могут быть отработаны при использовании вертолета (на спуске с высоты 3 км) и виртуальной модели захода на посадку (с высоты 100 км). При разработке СИВО целесообразно использовать технологию искусственного интеллекта и интерактивного управления, что обеспечит возможность исследования различных сценариев захода на посадку, посадки на Луну, а также возможность выбора системы ориентиров с учетом прогнозируемых условий освещенности Луны на трассах полетов.

Особенности наблюдения и съемки на поверхности Луны

Особенности наблюдения и съемки на поверхности Луны связаны, в первую очередь, с кривизной формы планеты, малой дальностью видимости горизонта, периодами освещенности и практическим отсутствием атмосферы.

Одна из особенностей фотосъемки на Луне иллюстрируется снимками на рис. 3.

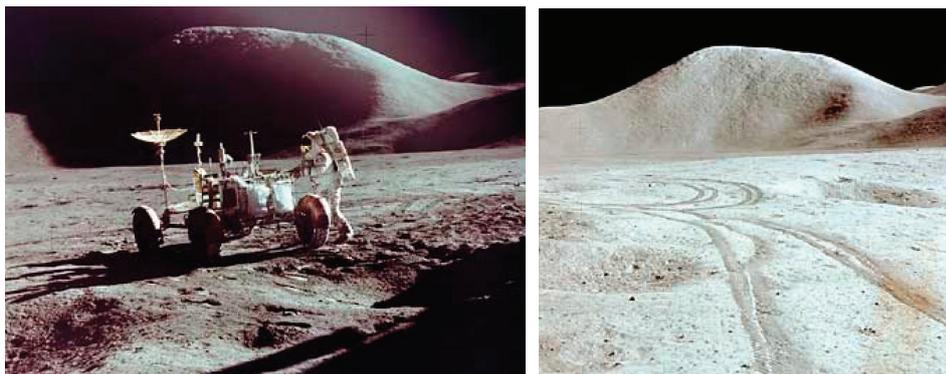


Рис. 3. Фотоснимки, демонстрирующие эффекты «разделительной черты» и «разрыва пространства» при съемке лунной поверхности и горных образований за горизонтом [24]

Можно определить съемку подобного сюжета как «съемку с разрывом пространства», когда значительная часть сферической поверхности за видимым горизонтом, измеряемая десятками километров, выпадает из сюжета. Кроме того, на всех пейзажных снимках, сюжеты которых включают звездное небо, отсутствуют изображения звезд. Это связано с установкой экспозиции по освещенности первого и второго планов, т.е. с установкой короткой выдержки фотокамеры, которой недостаточно для воспроизведения изображений слабо светящихся, но реально присутствующих в сюжете звезд.

Большинство снимков, полученных астронавтами миссии «Аполлон» и снимков с борта луноходов, можно отнести к категории резко контрастных.

Большая продолжительность лунной ночи, а также наличие зон «вечной темноты» обуславливают необходимость использования на Луне тепловизоров и очков ночного видения. Применение тепловизоров обеспечивает обнаружение объектов на большом расстоянии в темноте. Охлаждаемые тепловизоры позволяют обнаруживать человека на расстояниях до нескольких километров.

Способы панорамной съемки

В реализованных миссиях исследования Луны значительное место занимает панорамная съемка. Отработанная на Земле технология получения широкоформатных изображений включает следующие виды панорамной съемки:

– пейзажная съемка одним кадром (с шириной снимка в два и более раз больше его высоты);

- панорамная съемка в поле зрения 160° по горизонтали и 75° по вертикали;
- съемка круговой панорамы в поле зрения 360° пространства в горизонтальной плоскости (в один, два и три вертикальных ряда);
- сферическая 3D-панорамная съемка.

Технология получения круговых панорам предполагает получение широкоформатных изображений обозреваемого пространства с возвышенного места с большой глубиной и широким углом обзора при верхнем освещении. Фотокамеры с панорамным режимом съемки должны обеспечивать перекрытие кадров не менее чем на 30 % (при неизменной экспозиции всех кадров), т.е. при заданных настройках выдержки, диафрагмы, баланса белого и фокусного расстояния объектива. В пейзажной фотографии требуется большая глубина резкости (ГРИП), которая обеспечивается при минимально возможном отверстии диафрагмы. Однако уменьшение отверстия диафрагмы, в свою очередь, ограничивается дифракцией объектива. При этом необходимо определять выдержку в соответствии с законом взаимозаменяемости выдержки и диафрагмы (закон Бунзена-Роско).

При создании СИВО целесообразно использовать круговые лунные панорамы, полученные с помощью автоматических КА, а также реконструированные виртуальные панорамы.

Подготовка космонавтов

Используемые в ЦПК имени Ю.А. Гагарина системы визуализации внешней обстановки тренажеров МКС обеспечивают выработку навыков наблюдения и съемки с орбиты фиксированной высоты. Программа подготовки космонавтов включает также выработку навыков интерьерной фото- и видеосъемки на борту орбитальной станции, а также на внешней поверхности станции (в условиях вакуума с использованием скафандров). Программа подготовки космонавтов к полетам на Луну должна включать более широкий круг задач.

Анализ результатов исследования Луны с помощью КА показывает, что в программу теоретической подготовки космонавтов (в части операций ВИН-С) целесообразно включить следующие разделы:

- краткий курс селенографии;
- мониторинг Луны с окололунных орбит;
- визуальная навигация на трассах захода на посадку и посадки лунного модуля;
- технология съемки круговых панорам на Луне;
- управление реактивным коптером, оснащенным видеокамерой;
- способы ВИН-С в лавовых пещерах и зонах «вечной темноты».

Подготовку космонавтов к выполнению операций ВИН-С на поверхности Луны необходимо осуществлять с учетом работы космонавтов в лунных скафандрах с применением средств наблюдения и съемки в защитных боксах, т.е. отработку навыков, умений и взаимодействия членов экипажа осу-

ществлять с учетом увеличения времени выполнения элементов деятельности и располагаемого времени выхода на поверхность Луны [26, 27].

Одна из основных особенностей подготовки космонавтов к выполнению операций ВИН-С Луны будет заключаться в выработке навыков восприятия и оценки внешней обстановки при ее изменении в функции времени спуска с орбиты (в соответствии с изменениями скорости и высоты полета, дальности видимого горизонта, масштаба изображения, разрешения невооруженного глаза и системы глаз–телескоп на местности).

В качестве обучающего инструмента целесообразно использовать видеоролики захода на посадку на поверхность Луны, а также известные проекты и разработки типа «Цифровой ландшафт» и «Система генерации ландшафта лабиринта», позволяющие с помощью VR-очков исследовать моделируемое пространство.

Выводы

1. Анализ условий, особенностей и способов выполнения операций визуально-инструментального наблюдения и фотосъемки на Луне позволил уточнить способы выполнения этих операций и разработать рекомендации к программе подготовки космонавтов (в части выполнения операций ВИН-С).

2. Дальность наблюдения и съемки лунной поверхности с высоты роста космонавта ограничена (вследствие большой кривизны формы Луны) величиной порядка 2,5 км. Для увеличения площади обзора и съемки может быть использован лунный реактивный коптер с видеокамерой на высоте порядка 10–100 м. Применение этого способа потребует профессиональной подготовки космонавта как оператора беспилотного летательного аппарата.

3. Анализ снимков на поверхности Луны показал, что большинство сюжетов пейзажной съемки высококонтрастные. Для получения детальных снимков целесообразно использовать черно-белые цифровые фотокамеры с большим динамическим диапазоном по способу съемки двойной серией кадров в режиме точечного экспозамера.

4. Возможности поиска, визуального наблюдения и съемки космонавтом посадочной площадки с низких окололунных орбит ограничены временем пролета над объектом и увеличением угловой скорости линии визирования.

5. Расчеты методом геометрической оптики показали, что наиболее надежным способом обнаружения малоразмерных препятствий на посадочной площадке можно считать визуальное наблюдение в режиме зависания лунного модуля на высоте 50–100 м.

6. К особенностям имитации внешней обстановки при выполнении операций ВИН-С по лунной программе относятся:

- имитация внешней обстановки при наблюдении с окололунных орбит различной высоты и соответствующей круговой скорости ПКА;
- необходимость синхронизации процесса визуализации с динамикой захода на посадку по времени и ориентации иллюминаторов лунного модуля;

- имитация внешней обстановки на этапах контроля посадочной площадки и возможного перелета на другую выбранную площадку;
- имитация внешней обстановки при выполнении операции ВИН-С на поверхности Луны, включая съемку круговых панорам;
- имитация внешней обстановки в лунных пещерах и зонах «вечной темноты» при использовании приборов ночного видения.

7. Разработанные предложения по формированию облика интеллектуальной системы визуализации внешней обстановки и навигационно-баллистической системы лунного тренажера позволяют определить направления дальнейших исследований, связанных с применением IP-камер видеонаблюдения и шлема с дополненной реальностью.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Концепция российской лунной программы [Электронный ресурс] // URL: <https://tass.ru/kosmos/2634009> (дата обращения 23.08.2020).
- [2] Афанасьев И.В., Батулин Ю.М., Белозерский А.Г. и др. Мировая пилотируемая космонавтика. История. Техника. Люди / Под. ред. Ю.М. Батурина. – М.: Изд-во: РТСофт, 2005 г. – 752 с., ил.
- [3] Снимки КА «Климентина» [Электронный ресурс] // URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения 20.09.2020).
- [4] «Луноход-2» [Электронный ресурс] // URL: <https://ria.ru/20180126/1513326514.html> (дата обращения 2.10.2020).
- [5] КА серии «Чанъэ». Китай [Электронный ресурс] // URL: <https://rg.ru/2014/01/14/luna-site.html> (дата обращения 10.09.2020).
- [6] КА серии «Чандраян». Индия [Электронный ресурс] // URL: <https://regnum.ru/news/it/3043561.html> (дата обращения 11.09.2020).
- [7] КА серии «Кагуя». Япония [Электронный ресурс] // URL: <https://www.infox.ru/news/123/19358-aponskij-sputnik-kagua-letit-razbivatsa-o-lunu> (дата обращения 20.09.2020).
- [8] КА «Луна-25», «Луна-26» [Электронный ресурс] // URL: <https://rg.ru/2020/03/22/luna-26-pomozhet-vybrat-mesto-dlia-vysadki-kosmonavtov.html> (дата обращения 20.09.2020).
- [9] Дальность видимости горизонта [Электронный ресурс] // URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Пифагора (дата обращения 21.10.2020).
- [10] Дальность взаимной видимости [Электронный ресурс] // URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0BB:HorizonDistance.png> (дата обращения 21.10.2020).
- [11] Лучшие снимки миссии LRO [Электронный ресурс] // URL: <https://universemagazine.com/12443> (дата обращения 20.09.2020).
- [12] Ли Е.К., Фомичев А.В. Исследование точности алгоритма терминального управления посадкой спускаемого аппарата на поверхность Луны // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2017. – № 4.
- [13] Зоны «вечного света» [Электронный ресурс] https://ru.qaz.wiki/wiki/Peak_of_Eternal_Light (дата обращения 2.11.2020).
- [14] Проблемы и возможности освоения Луны [Электронный ресурс] // <https://unnatural.ru/pmmoon> (дата обращения 20.09.2020).
- [15] Ллойд Дж. Системы тепловидения / Под ред. А.И. Горячева. – М.: Мир, 1978. – 414 с.

- [16] Свиридов К.Н. О предельном инструментальном разрешении космического аппарата «Ресурс-П» / Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – Т. 4. – Вып. 2. – С. 20–28.
- [17] Авторское свидетельство № 176284, приоритет от 1.8.77 г. / Жуков В.М., Глазков Ю.Н., Артюхин Ю.П., Виноградов В.И.
- [18] Аполлон-11. Посадка на Луну [Электронный ресурс] <https://ru.wikipedia.org/wiki/Аполлон-11> // Первая посадка людей на Луну (дата обращения 23.12.2020).
- [19] Алексеев Ю.В., Кушпиль В.И., Петрова Л.Ф. и др. Стохастическая модель оперативного поля зрения // Регистрация, обработка и восприятие изображения // Труды ГОИ им. С.И. Вавилова. – 1988. – Т. 70. – Вып. 204. – С. 81–90.
- [20] Роуз А. Зрение человека и электронное зрение. – М.: Мир, 1977. – 216 с.
- [21] Луизов А.В. Глаз и свет. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 140 с.
- [22] Меньшаков Ю.К. Теоретические основы технических разведок / Под ред. Ю.Н. Лаврухина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 538 с.: ил.
- [23] Патент России № 2726604, приоритет от 17.06.2019 г. // Способ и устройство дистанционной экспресс-диагностики зрительного анализатора. / Даниличев С.Н., Спиринов А.Е., Жуков В.М., Крылов А.И., Спиринов Е.А.
- [24] Снимки на Луне [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.skeptik.net/conspir/moonhoax.htm> свободный (дата обращения 23.12.2020).
- [25] Kekler K. Putting Payloads with Pinpoint Accuracy While Conducting Experiments to Monitor Ground Targets // Acquisition, Traking and Pointing, 3, v. 1111. – Orlando, Florida.
- [26] Об особенностях профессиональной деятельности космонавтов при осуществлении лунных миссий / Крючков Б.И., Усов В.М., Ярополов В.И., Сосюрка Ю.Б., Троицкий С.С., Долгов П.П. // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – № 2(19). – С. 35–57.
- [27] Пилотируемые полеты: от Ю.А. Гагарина к МКС и полетам в дальний космос / Крикалёв С.К., Крючков Б.И., Курицын А.А. // Пилотируемые полеты в космос. – 2011. – № 2(2). – С. 6–20.

REFERENCES

- [1] Concept of the Russian Lunar Program [electronic source] // URL: <https://tass.ru/kosmos/2634009> (accessed date 23.08.2020).
- [2] Afanasyev I.V., Baturin Yu.M., Belozersky A.G. et al. World Manned Cosmonautics. History. Technology People / Edited by Yu.M. Baturin. – Moscow: RTSof Publ. House, 2005. – p. 752, il.
- [3] Klimentina Spacecraft Pictures [electronic source] // URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (accessed date 20.09.2020).
- [4] “Lunokhod-2” [electronic source] // URL: <https://ria.ru/20180126/1513326514.html> (accessed date 2.10.2020).
- [5] Spacecraft of the “Chang’e” Series. China [electronic source] // URL: <https://rg.ru/2014/01/14/luna-site.html> (accessed date 10.09.2020).
- [6] Spacecraft of the “Chandrayan” Series. India [electronic source] // URL: <https://regnum.ru/news/it/3043561.html> (accessed date 11.09.2020).
- [7] Spacecraft of the “Kaguya” Series. Japan [electronic source] // URL: <https://www.infox.ru/news/123/19358-aponskij-sputnik-kagua-letit-razbivatsa-o-lunu> (accessed date 20.09.2020).

- [8] Spacecraft “Luna-25”, “Luna-26” [electronic source] // URL: <https://rg.ru/2020/03/22/luna-26-pomozhet-vybrat-mesto-dlia-vysadki-kosmonavtov.html> (accessed date 20.09.2020).
- [9] Horizon Visibility Range [electronic source] // URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Pythagoras’ theorem](https://ru.wikipedia.org/wiki/Pythagoras%27_theorem) (accessed date 21.10.2020).
- [10] Mutual Visibility Range [electronic source] // URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0B-B:HorizonDistance.png> (accessed date 21.10.2020).
- [11] Best Shots of the LRO Mission [electronic source] // URL: <https://universemagazine.com/12443> (accessed date 20.09.2020).
- [12] Lee E.K., Fomichev A.V. Investigation of the Accuracy of the Terminal Control Algorithm for the Descent Vehicle Landing on the Lunar Surface // Mechanical Engineering and Computer Technology. – 2017. – No 4.
- [13] Areas of “Eternal Light” [electronic source] [https://ru.qaz.wiki/wiki/Peak of Eternal Light](https://ru.qaz.wiki/wiki/Peak_of_Eternal_Light) (accessed date 2.11.2020).
- [14] Issues and Opportunities for the Lunar Exploration [electronic source] // <https://unnatural.ru/pmmoon> (accessed date 20.09.2020).
- [15] Lloyd J. Thermal Imaging Systems / Edited by A.I. Goryachev. – Moscow: Mir, 1978. – p. 414.
- [16] Sviridov K.N. Limiting Instrumental Resolution of the “Resurs-P” Spacecraft / Rocket and-Space Instrumentation and Information Systems. – 2017. – V. 4. – Issue 2 – pp. 20–28.
- [17] Copyright Certificate № 176284, priority on 1.8.77. / Zhukov V.M., Glazkov Yu.N., Artyukhin Yu.P., Vinogradov V.I.
- [18] Apollo-11. Lunar touchdown [electronic source] <https://ru.wikipedia.org/wiki/Apollo-11> // The first landing of humans on the moon (accessed date 23.12.2020).
- [19] Alekseev Yu.V., Kushpil V.I., Petrova L.F. et al. Stochastic Model of the Operational Field of Vision // Registration, Processing and Perception of the Image // Proceedings of Vavilov State Optical Institute. – 1988. – V. 70. – Issue 204. – pp. 81–90.
- [20] Rose A. Human Vision vs. Electronic Vision. – Moscow: Mir, 1977. – p. 216.
- [21] Luizov A.V. Vision and Light. – Leningrad: Energoatomizdat, 1983. – p. 140.
- [22] Menshakov Yu.K. Theoretical Foundations of Technical Intelligence / Edited by Yu.N. Lavrukhin. – Moscow: Publishing House of N.E. Bauman Moscow State Technical University, 2008. – p. 538, il.
- [23] Russian Patent № 2726604, priority on 06.17. 2019 // Method and Device for Remote Express Diagnostics of the Visual Analyzer. / Danilichev S.N., Spirin A.E., Zhukov V.M., Krylov A.I., Spirin E.A.
- [24] Pictures of the Moon [electronic source]. Access mode: <http://www.skeptik.net/conspir/moonhoax.htm> free (accessed date 23.12.2020).
- [25] Kekler K. Putting Payloads With Pinpoint Accuracy While Conducting Experiments to Monitor Ground Targets // Acquisition, Tracking and Pointing, 3, v.1111. – Orlando, Florida.
- [26] On the Features of Professional Activity of Cosmonauts when Implementing Lunar Missions / Kryuchkov B.I., Usov V.M., Yaropolov V.I., Sosyurka Yu.B., Troitsky S.S., Dolgov P.P. // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2016. – No 2(19). – pp. 35–57.
- [27] Manned Spaceflight: from Yu.A. Gagarin to the ISS and Deep-Space Missions / Krikalev S.K., Kryuchkov B.I., Kuritsyn A.A. // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2011. – No 2(2). – pp. 6–20.