

На правах рукописи

СЮЙ ЯН

**АЛГОРИТМЫ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧИ
АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ НА ЛУНУ**

Специальность 2.3.1 –

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сюй Ян

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: Кандидат технических наук, доцент
Бобков Александр Валентинович

Официальные оппоненты: **Сазонова Татьяна Владимировна**
доктор технических наук, профессор,
Акционерное общество «Раменское
приборостроительное конструкторское
бюро», главный конструктор

Бодрышев Валерий Васильевич
кандидат технических наук, доцент,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет), доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Нижегородский
государственный технический университет
имени Р.Е. Алексеева»

Защита состоится «06» июня 2023 г. в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, д. 10, факультет «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Муратов Игорь Валентинович



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современный этап освоения космоса связан с созданием и развертыванием долговременных автоматических или обитаемых баз на поверхности ближайших небесных тел, и прежде всего – на Луне.

Задача мягкой посадки на Луну была успешно решена ещё в прошлом веке, в программах «Аполлон» и «Луна». Однако в этих миссиях вопрос точности посадки не стоял настолько остро, поскольку посадку предполагалось выполнять в экваториальных районах, с протяжённым плоским рельефом, и допустимая точность составляла десятки километров.

Современные задачи освоения Луны связаны с посадкой в выбранную область полярных регионов со сложным рельефом, а также с развертыванием и последующей поддержкой лунных баз. Они требуют на порядки более высокой точности посадки – десятки метров по положению и единиц градусов по наклону посадочной площадки. Данная задача не может быть решена с использованием какого-либо одного измерительного средства, а требует комплексирования показаний различных навигационных средств, и, соответственно, разработки методов интеллектуального синтеза законов управления.

Повысить точность определения собственного положения можно с использованием искусственных маркеров, положение которых легко обнаружить, либо – по естественным признакам и ориентирам в месте посадки. В качестве искусственных маркеров могут выступать системы радиомаяков, спутников глобального позиционирования на орбите Луны или псевдоспутников на ее поверхности. Однако их развертывание, обслуживание и топологическая привязка представляет собой отдельную сложную техническую задачу, которая на данный момент не решена. Поэтому необходимо рассматривать альтернативу – систему автоматической визуальной ориентации, использующей для определения положения наблюдаемые ориентиры (кратеры, горы, разломы) и сравнивающие их положение с бортовой картой местности.

Технология определения местоположения при посадке на основе технического зрения применялась в миссиях посадки и возвращения проб на Луну, планеты, астероиды и кометы. Важным компонентом её решения является обзорно-сравнительная система. Она служит как для коррекции показаний ИНС, так и для решения навигационных задач, таких как определение собственного положения и выбор безопасного места посадки.

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов системы визуальной навигации для обеспечения мягкой безопасной высокоточной посадки на поверхность Луны.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Изучить существующие подходы к решению задачи визуальной навигации лунного посадочного модуля;
2. Разработать и исследовать алгоритм определения собственного положения по видеоизображению с использованием векторной карты Луны;
3. Разработать и исследовать алгоритм выбора безопасного места посадки.

Объектом исследования диссертационной работы является:

1. Алгоритм определения собственного положения по видеоизображению с использованием векторной карты Луны;
2. Алгоритм определения собственного положения с использованием метода сигнатур кратеров;
3. Алгоритм выбора безопасного места посадки.

Предметом исследования является разработка и исследование алгоритмов и методов визуальной навигации, позволяющих обеспечить выполнение мягкой безопасной высокоточной автоматической посадки спускаемого аппарата на поверхность Луны.

Методы исследования. При решении сформулированных задач использовались методы:

1. Метод обобщенного преобразования Хафа и его модификации;
2. Методы теории графов для поиска подграфа сигнатур в графе карты;
3. Методы математической морфологии для определения безопасного места посадки лунного спускаемого аппарата.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

– Разработка и исследование нового алгоритма визуальной навигации на основе обобщенного преобразования Хафа, отличающегося от известных аналогов тем, что он способен работать с векторной картой Луны, не требуют предварительного детектирования кратеров, и способен работать в реальном времени с высокой точностью и надежностью; метод преобразования Хафа расширяется на поиск объектов, описанных семейством окружностей;

– Разработка и исследование нового алгоритма визуальной навигации на основе метода сигнатур, отличающегося от известных аналогов тем, что он способен работать в режиме реального времени и при этом быть нечувствительным к изменениям ракурса съемки, пропускам и ложным обнаружениям отдельных кратеров; метод способен быстро находить кратер на карте с использованием идентификатора-сигнатуры;

– Разработка и исследование нового алгоритма определения безопасного места посадки лунного спускаемого аппарата, отличающегося тем, что он способен работать только с использованием видеоизображения без привлечения дополнительных технических средств.

Практическая ценность результатов исследования. Предложенные подходы и методы могут использоваться для решения актуальной задачи мягкой высокоточной посадки в предстоящих миссиях исследования Луны.

Достоверность и обоснованность полученных результатов проведённых исследований подтверждается результатами экспериментов с применением имитационного математического моделирования предложенных алгоритмов, в том числе и с учетом воздействия шума, помех, изменения освещенности и ракурса съемки.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Алгоритм определения собственного положения по видеоизображению с использованием векторной карты Луны;
2. Алгоритм определения собственного положения с использованием

метода сигнатур кратеров;

3. Алгоритм выбора безопасного места посадки.

Внедрение результатов. Разработанные алгоритмы и методы используются в научно-исследовательских проектах в компании Sichuan Huaxin Zhichuang Technology Co. Ltd. и в учебном процессе кафедры Системы автоматического управления по курсам «Теория автоматического управления» и «Системы распознавания образов».

Личный вклад. Автором разработан алгоритм определения собственного положения по видеоизображению с использованием векторной карты Луны, алгоритм определения собственного положения с использованием метода сигнатур кратеров и алгоритм выбора безопасного места посадки.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях:

1. 13th International Symposium "Intelligent Systems-2018" (INTELS'18) (Санкт-Петербург, 2018)

2. Конференция XLIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства («Королевские чтения-2019») (Москва, 2019)

3. 19-я Всероссийская конференция с международным участием «Математические методы распознавания образов» (ММРО-2019) (Москва, 2019)

4. Конференция XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства («Королевские чтения-2020») (Москва, 2020)

5. 14th International Symposium "Intelligent Systems-2020" (INTELS'20) (Москва, 2020)

6. Конференция XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства («Королевские чтения-2021») (Москва, 2021)

7. Конференция XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства («Королевские чтения-2022») (Москва, 2022)

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 научных работы, в том числе 2 работы в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, общим объемом 17.26 п.л./2.08 п.л.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка используемых источников. Текст диссертации изложен на 139 машинописных страницах, содержит 59 рисунок, 1 таблицу. Список литературы содержит 84 источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность, цель и задачи исследования, проводимых в диссертационной работе, научная новизна, практическая значимость темы, а также приведено краткое содержание работы.

В первой главе приведен обзор задачи выполнения безопасной высокоточной мягкой посадки.

Изначально спускаемый аппарат выводится на круговую орбиту Луны, определяется его положение и параметры движения. В расчетной точке данной орбиты вырабатывается импульс, переводящий аппарат на переходную орбиту, пересекающую лунную поверхность в окрестности точки посадки. Далее выполняется основное торможение аппарата. Во время этого этапа проводится коррекция отношения, цель которого – одновременно погасить орбитальную скорость (до ее значения, близкого к нулю) и при этом вывести аппарат в окрестность желаемой области посадки.

По окончании этапа основного торможения и после коррекции показаний инерциальной навигационной системы (ИНС) по данным видеосистемы, начинается этап активного маневрирования. На данном этапе также происходит выбор безопасного места посадки. Этап активного маневрирования завершается по достижении требуемой области и достижении требуемой высоты, обычно – несколько десятков метров.

По достижении заданной области начинается заключительный этап – вертикальной мягкой посадки с одновременным гашением скорости практически до нуля (до небольших допустимых значений).

Для измерения положения объекта используется ИНС и обзорно-сравнительная система. ИНС измеряет отклонение положения объекта от заданного управления и вырабатывает разностный сигнал коррекции, который подается на исполнительные устройства объекта. Фактически ИНС измеряет не положение, а углы, скорости и ускорение. Положение вычисляется по результатам интегрирования, в процессе которого накапливается ошибка. Для коррекции ошибок интегрирования ИНС используется обзорно-сравнительная система. Она получает видеоизображение поверхности Луны и ищет его положение на бортовой электронной карте. Вычисленное положение сравнивается с показаниями ИНС на момент получения изображения, вычисляется величина рассогласования, которая далее добавляется к показаниям ИНС.

У обзорно-сравнительной системы нет ошибки интегрирования. Она оценивает положение, и работает как настройка для ИНС для коррекции её данных (Рис.1).



Рис.1. Структура видеосистемы

Во второй главе рассмотрены существующие подходы и методы визуальной навигации. В зависимости от используемых признаков, методы поиска положения кадра на карте можно разбить на следующие группы:

- Площадные методы – в качестве признака используют яркости сразу всех точек на изображении.
- Контурные методы – используют точки границ и линии контуров.
- Методы ключевых точек – используют лишь некоторые, особенные точки изображения: угловые точки, точки с локальным экстремумом яркости, точки с высокой кривизной линий контура, центры пятен.
- Методы поиска специфических объектов – в качестве признаков используют ударные кратеры и их геометрические параметры.

Для детектирования кратеров могут использоваться следующие методы:

- Контурные методы: кратер детектируется как окружность или эллипс.
- Морфологические методы: кратер детектируется как близкорасположенная пара тёмных и ярких областей (освещённый и противоположный неосвещённый склон).
- Методы машинного обучения: здесь описание кратера формируется сетью на основе анализа обучающей выборки.

В качестве основы дальнейшей работы выбрано использование контурных методов с использованием обобщённого преобразования Хафа для случаев, когда отдельные кратеры найти не удается, и метод сигнатур на основе сопоставления графов в случае удачного обнаружения кратеров.

В третьей главе приведен вариант обобщенного преобразования Хафа и метод сигнатур, позволяющие находить объекты – кратеры на векторной карте, заданной списком окружностей.

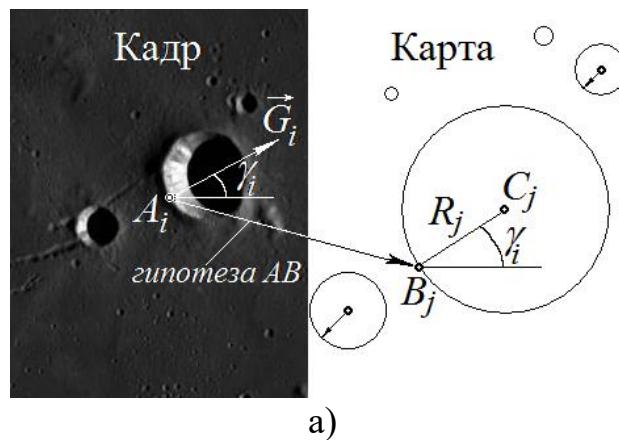
Подход на основе преобразования Хафа работает следующим образом. В качестве опорных точек кадра и карты выбраны точки границ, лежащие на гребне вала кратера. Эти точки будут обладать максимальным перепадом яркости, поскольку они находятся на границе освещенной поверхности стенки кратера и полной тени, и их легко найти детектором границ. Однако резкими переходами яркости могут обладать и другие элементы – крутые склоны, границы тени и бликов. Полностью отфильтровать их невозможно, поэтому они будут рассматриваться как воздействие помех.

Каждая точка гребня A_i может совпадать с соответствующей точкой B_j одного из кратеров на карте (Рис.2, а). К какому из кратеров относится точка – на данном этапе определить невозможно, поэтому приходится рассматривать все гипотезы A_iB_j о принадлежности каждой точки контура кадра каждому кратеру карты.

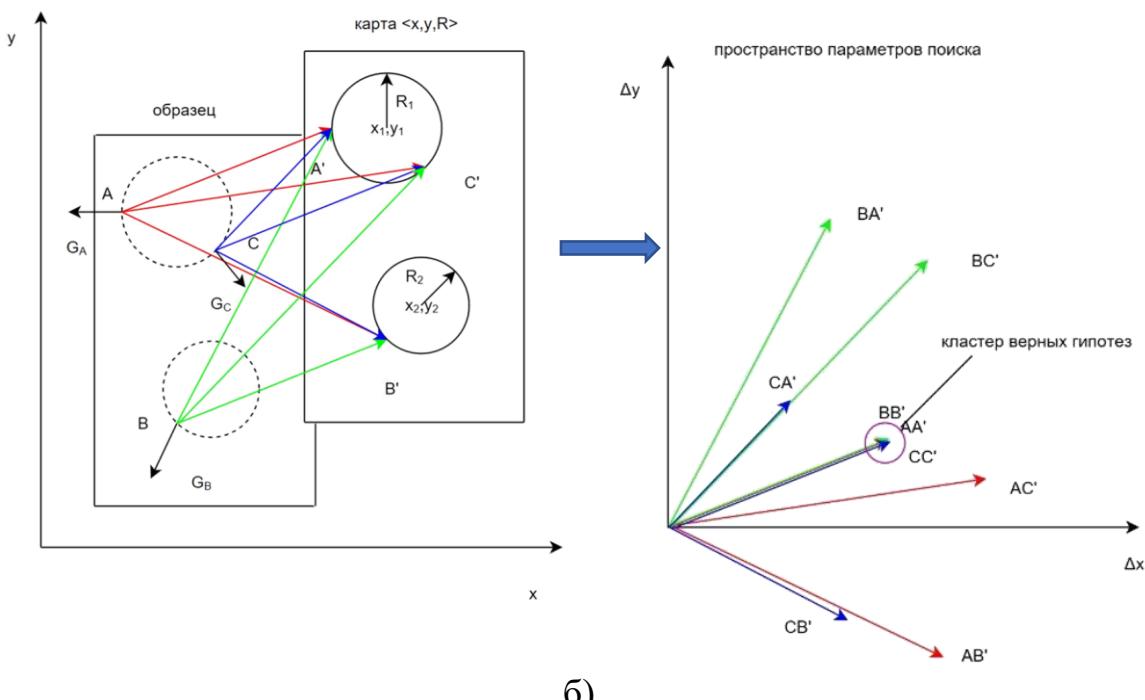
Будем перебирать точки карты B_j -того кратера, соответствующие точке границы A_i . Эти точки могут быть найдены с использованием информации о градиенте яркости G_A в точке A_i : вектор градиента перпендикулярен касательной к контуру в точке A_i и проходит вблизи центра кратера (Рис.2, а). Поэтому точка B_j будет отстоять от центра j -того кратера C_j на расстоянии радиуса R_j этого кратера в направлении, противоположном градиенту яркости G_A :

$$x_B = x_C - R \cos \gamma_i \quad (1)$$

$$y_B = y_C - R \sin \gamma_i \quad (2)$$



а)



б)

Рис.2. Схема преобразования Хафа: а) Схема вычисления гипотез о совпадении точки кратера на кадре и карте; б) Схема вычисления откликов в пространстве гипотез.

Каждая пара точек (A, B) будет порождать гипотезу ($\Delta x, \Delta y$) о совпадении точки кадра A и точки карты B . Введем пространство гипотез $H[\Delta x, \Delta y]$ и будем размечать в нем каждую гипотезу, увеличивая для нее счетчик $H[\Delta x, \Delta y]$ на единицу. (Рис.2, б). При этом правильные гипотезы будут совпадать, будут давать одни и те же значения ($\Delta x^*, \Delta y^*$) и будут многократно увеличивать один и тот же счетчик $H[\Delta x^*, \Delta y^*]$, в результате чего он накопит существенное значение, равное количеству совпавших точек границ кадра и карты. Неверные же гипотезы, порожденные неверным определением принадлежности точки кратеру или же учетом шумовых точек, будут порождать случайные значения ($\Delta x, \Delta y$), распределенные хаотически, не совпадающие друг с другом и не порождающие существенных значений ни в одном из счетчиков. Положение кадра на карте можно определить как положение максимума $h_{max} = H[\Delta x^*, \Delta y^*]$ в пространстве гипотез.

Алгоритм можно записать в следующем виде:

1. Для имеющегося кадра изображения находим точки контура A и направление градиента яркости G_A в них.

2. Для каждой точки контура кадра A перебираем все кратеры карты с центром (x_C, y_C) и радиусом R :

– Вычисляем точку B , соответствующую точке A :

$$x_B = x_C - R \cos \gamma_i \quad (3)$$

$$y_B = y_C - R \sin \gamma_i \quad (4)$$

– Вычисляем гипотезу AB :

$$\Delta x = x_B - x_A \quad (5)$$

$$\Delta y = y_B - y_A \quad (6)$$

– Увеличиваем счетчик $H[\Delta x, \Delta y]$ на единицу.

3. Находим максимум максимума $h_{max} = H[\Delta x^*, \Delta y^*]$ в пространстве гипотез. Положение максимума ($\Delta x^*, \Delta y^*$) соответствует искомому положению кадра на карте, а его величина – количеству совпавших точек контура карты и кадра.

Далее исследовалось поведение предложенного метода при наличии мешающих факторов, таких как шум, изменение масштаба и ориентации камеры, отклонение кратеров от круглой формы.

Верные гипотезы в пространстве гипотез будут точно совпадать в пространстве гипотез только в том случае, если кратер в кадре представляет собой идеальную окружность, а его радиус точно совпадает с радиусом кратера карты. Отклонение формы кратера от окружности приводит к тому, что верные гипотезы попадают не в одну точку, а в некоторую область – кластер верных гипотез. В результате максимум размыается достаточно сложным образом, и значительно уменьшается. Основными факторами, вызывающими размытие главного отклика, являются следующие:

1. Ошибка определения направления градиента яркости, из-за которых он не всегда проходит точно через центр кратера.

2. Изменение ракурса съемки из-за собственного движения посадочного модуля, из-за ошибок определения ожидаемой ориентации и высоты полета. В

в этом случае гипотезы для разных кратеров уже не будут совпадать: небольшие изменения ракурса будут приводить к большим рассогласованиям гипотез (Рис.4).

3. Влияние шума и мелких деталей. Наличие шума приводит к возникновению ложных точек границ, генерирующих неверные гипотезы.

Далее рассматриваются подходы, позволяющие ослабить влияние негативных факторов.

Для учета ошибки градиента яркости будем считать, что он вычислен с некоторой погрешностью ε . Поскольку точное значение направления градиента теперь неизвестно, то будем голосовать за все возможные направления. Гипотезы будут располагаться на дуге $B' - A - B''$ (Рис.3). При таком подходе более крупные кратеры будут давать большее количество голосов на точку, и их совпадение станет более приоритетным.

При наличии искажений ракурса каждая пара точек будет порождать уже не одну гипотезу, а целую область, форма которой зависит от множества факторов. Поэтому задать точно её положение невозможно, а голосование за целую область вместо одной точки потребует много времени. Однако области можно строить уже после процедуры голосования, одновременно для всех гипотез в одной ячейке пространства счетчиков.

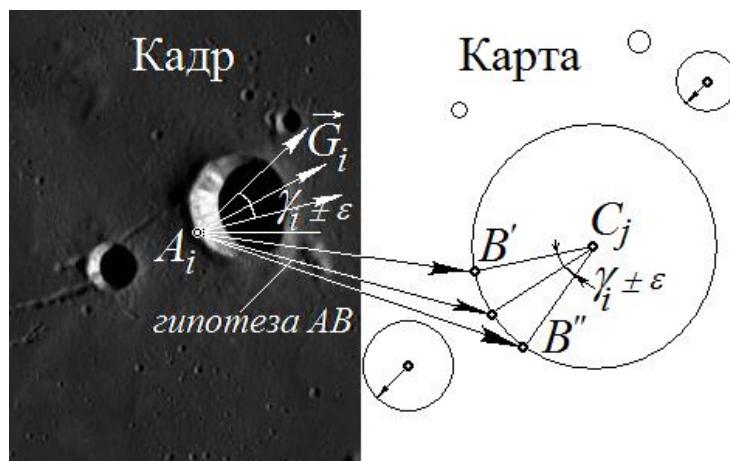


Рис.3. Схема учета ошибки градиента яркости

В качестве модели возьмём квадратную область, и будем искать суммарное количество голосов, попавших в неё. На Рис.4 показаны результаты суммирования откликов по области. Отклики, отвечающие совпадению отдельных кратеров, вновь объединяются в один, с большой величиной, а положение главного максимума соответствует положению кадра на карте.

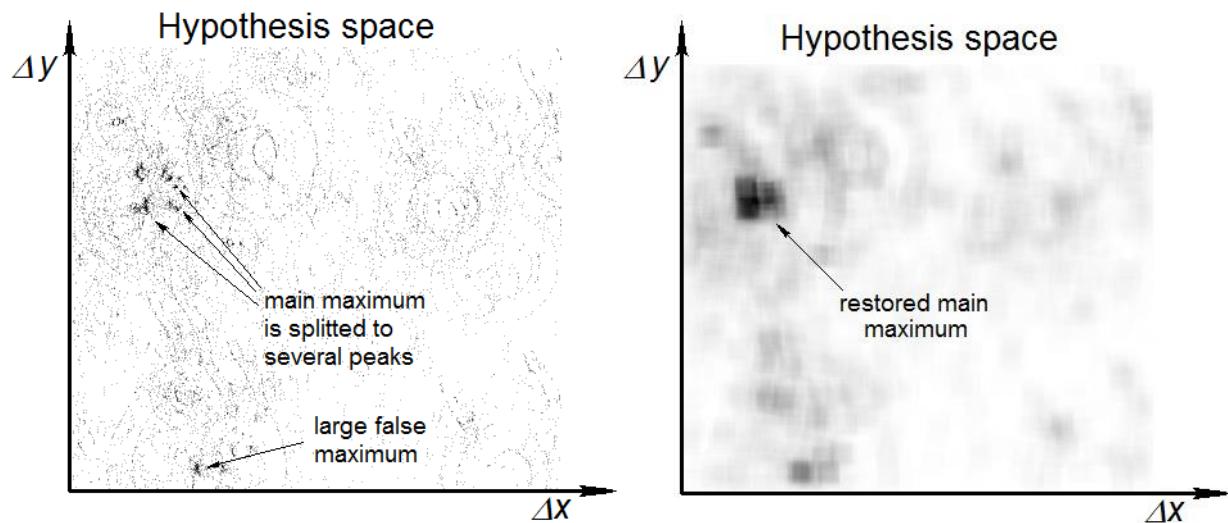
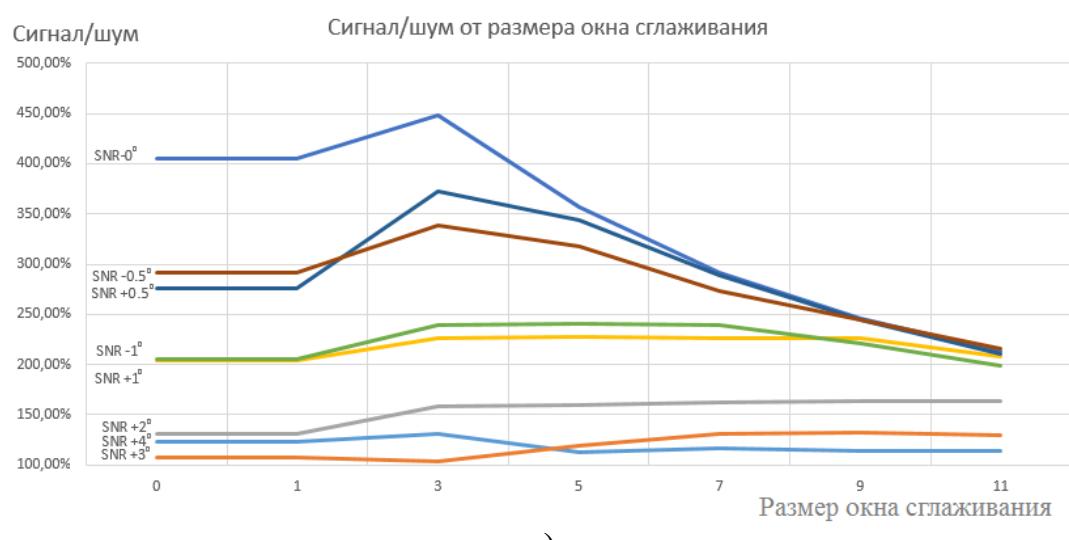
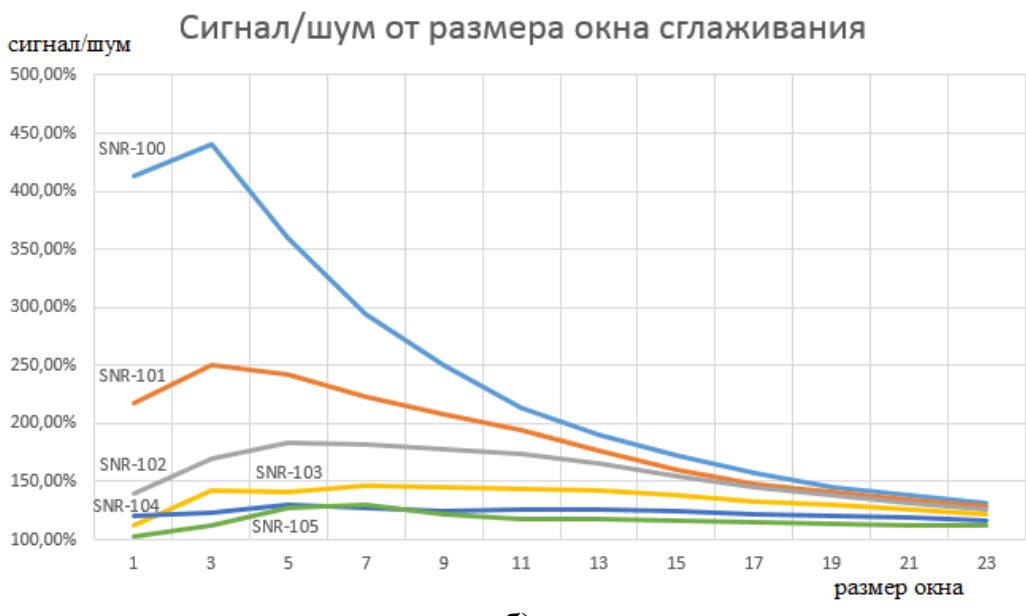


Рис.4. Результаты коррекции неучтённых геометрических искажений

Исследования показали, что суммирование по области всегда повышает надежность поиска (Рис.5, а). При этом требуемый размер окна растет с увеличением угла поворота. Аналогичная ситуация наблюдается и при несовпадении масштаба (Рис.5, б). Суммирование откликов дает существенный прирост соотношения сигнал/шум (20% и выше).



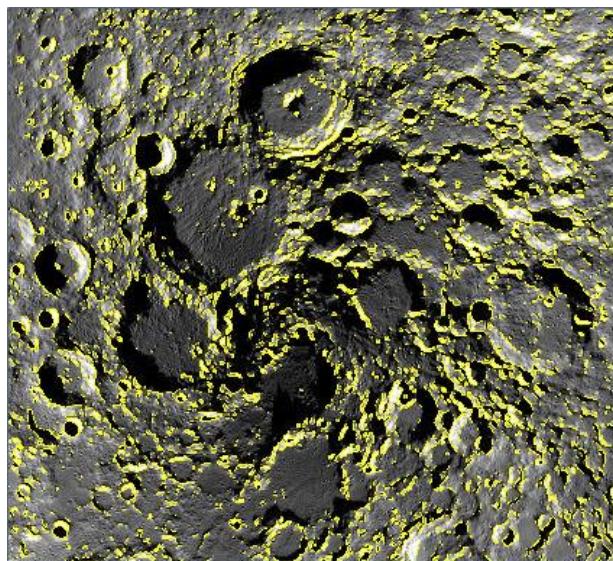
а)



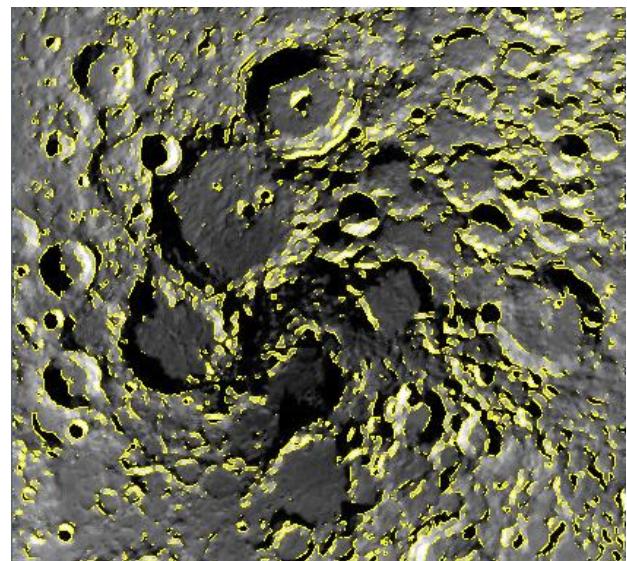
б)

Рис.5. Зависимость надежности работы алгоритма от размера окна сглаживания: а) при наличии некомпенсированных поворотов; б) при наличии некомпенсированного изменения масштаба.

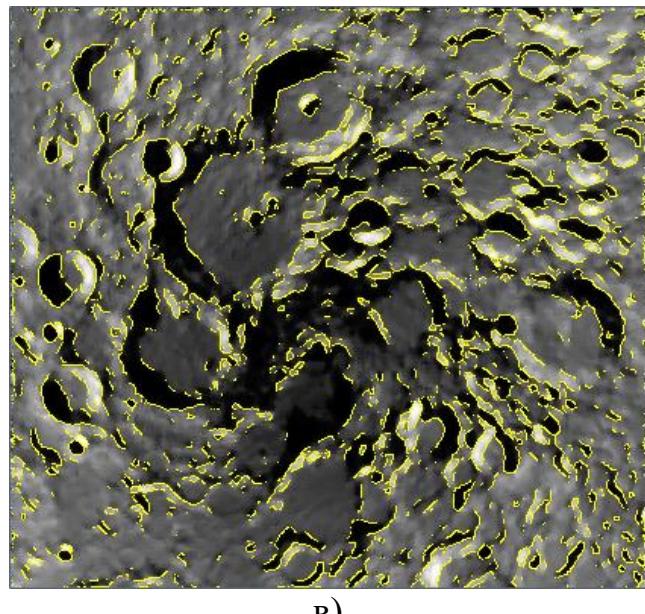
Также исследовалась возможность применения медианной фильтрации с различным размером окна (3×3 , 5×5 , 7×7). Она подавляет шум, при этом сами кратеры практически не затрагиваются, а дефекты на их гребнях – скругляются (Рис.6). Эксперименты показали, что использование медианного фильтра незначительно снижает величину главного максимума (менее 1%), тогда как ложные максимумы снижаются более существенно (на 15%), в результате чего соотношение сигнал/шум возрастает.



а)



б)



в)

Рис.6. Результат применения медианного фильтра
а) границы без фильтра; б) фильтр 3×3 ; в) фильтр 5×5 .

Далее в работе рассмотрен метод сигнатур. Сигнатурой кратера назовём набор из N радиус-векторов, пущенныхных из центра кратера в центры ближайших соседних кратеров (Рис.7). Сигнатура как характеристика кратера будет обладать определенной инвариантностью: она не изменяется при сдвигах, при поворотах – не изменяются длины радиус-векторов и углы между ними, а при масштабировании – сохраняются углы и отношения длины векторов к радиусу кратера. Это позволяет использовать сигнатуру как своего рода ключ для быстрого поиска кратера в базе.

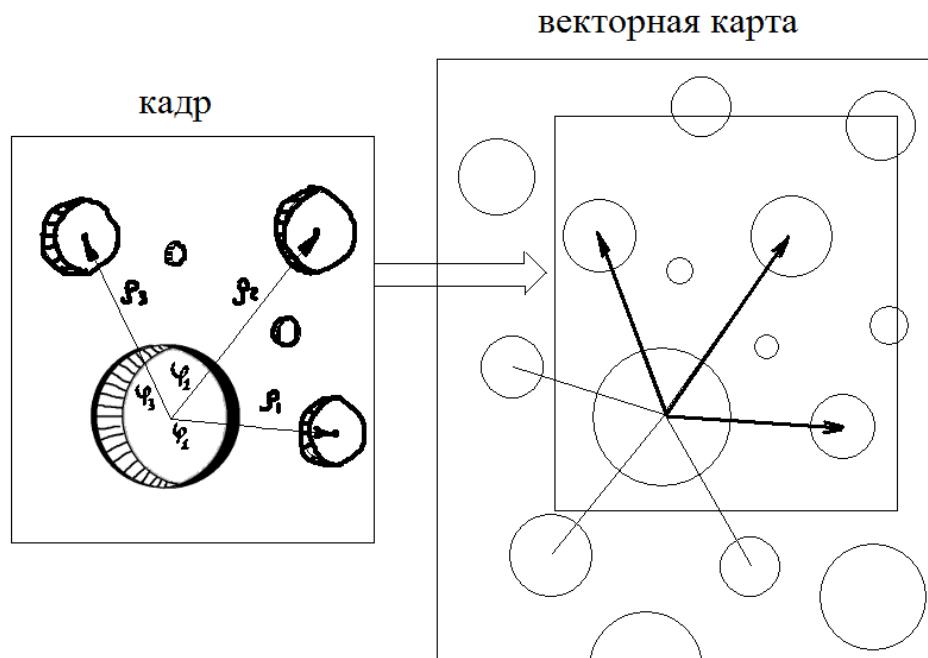


Рис. 7. Метод сравнения сигнатур

Для построения сигнатуры кратера используются его N ближайших соседей

с радиусами, отличающимися не более чем на порядок. Более мелкие и более крупные кратеры при этом исключаются – они будут плохо различимы в кадре или видны лишь частично. Количество кратеров выбирается с запасом, поскольку родительский кратер не обязательно будет находиться в центре кадра, и часть его соседей исчезнет за краем кадра.

Поиск положения работает следующим образом. Сигнатуры кратеров на карте рассчитываются заранее и помещаются в базу с индексацией по координатам и радиусу кратера. При получении кадра, на нем детектируются кратеры (любым из современных методов, например – с использованием нейросетевого детектора). Среди найденных кратеров отбираются $n = 5$ наиболее крупных и для каждого из них строятся сигнатуры.

Далее производится поиск в базе кратеров со схожей сигнатурой. В поиске участвуют только те кратеры, которые похожи на текущий по радиусу и могут находиться в поле зрения. Для них выполняется поэлементное сравнение векторов сигнатуры. Вектора считаются совпавшими, если они с допустимой погрешностью совпали по направлению, длине и радиусу дочернего кратера. Кратер с наибольшим количеством совпавших элементов считается наилучшим кандидатом.

Следующий этап – верификация совпадений. Найденная пара кратеров и их сигнатуры позволяют найти параметры сдвига, поворота и масштаба кадра относительно карты, что позволяет найти общее число совпадающих кратеров кадра и карты. Преобразование, давшее наибольшее число совпадений, принимается за наиболее правдоподобное положение аппарата.

В четвертой главе рассматривается метод выбора наилучшего места посадки и результаты экспериментальных исследований.

Равнинные области занимают существенную часть поверхности Луны. На изображении они имеют большое количество точек примерно одинаковой яркости, и их диапазон можно найти с использованием гистограммы яркости. Типовая гистограмма яркости точек лунной поверхности (Рис.8) содержит две моды (тени и ровная поверхность), и длинный правый «хвост» (блики освещенной стороны гор и склонов кратеров). Найти границы мод можно, задав процент точек, которые будут считаться тенями и бликами. Точки, отнесенные к равнинным областям, затем фильтруются, и из них изымаются области избегания и области, не являющиеся областями интереса. Оставшиеся точки являются потенциальными кандидатами для посадки.

Далее следует этап отбора самой крупной области. Для её поиска используется карта расстояний. Точка, расстояние до которой от ближайших границ области максимально, является центром наиболее крупной области.

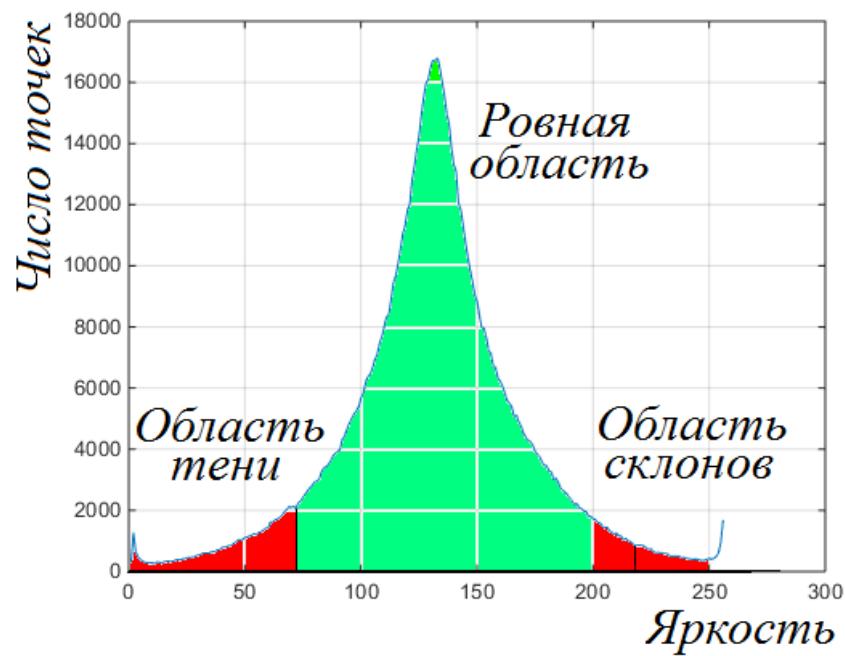
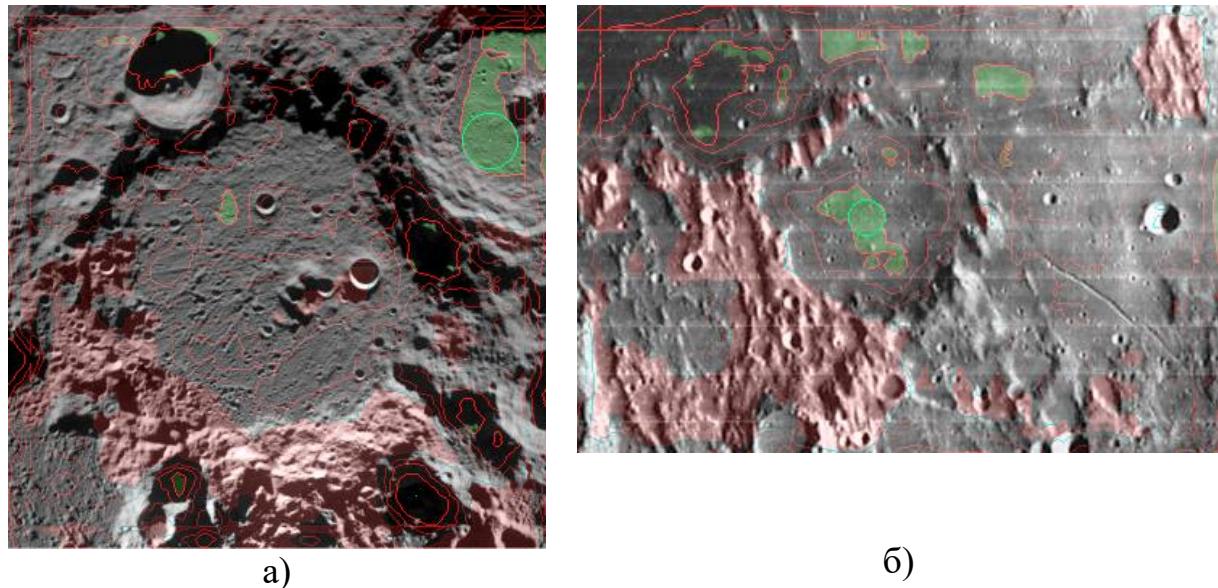
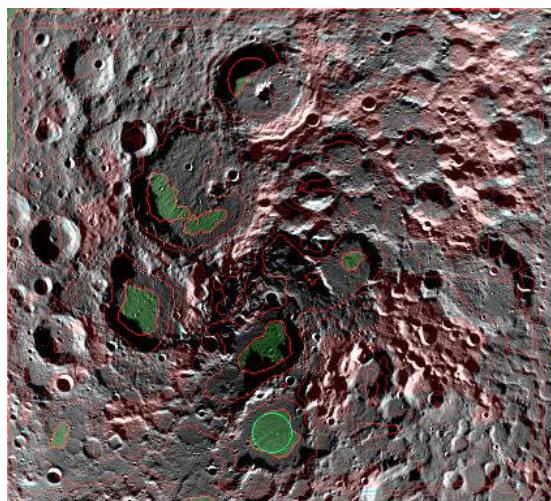


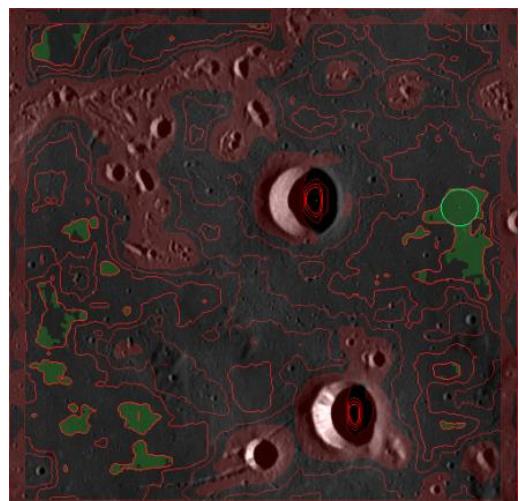
Рис. 8. Пример гистограммы яркости точек лунной поверхности

Эксперименты показали, что предложенный метод позволяет находить положения для посадки, близкие к положениям, выбранным человеком-оператором на основе своего опыта (Рис.9).

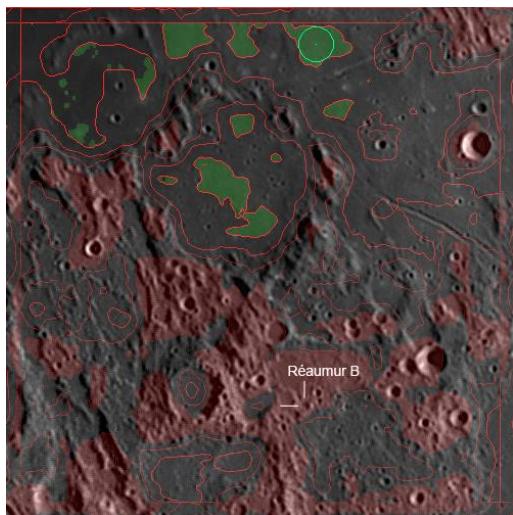




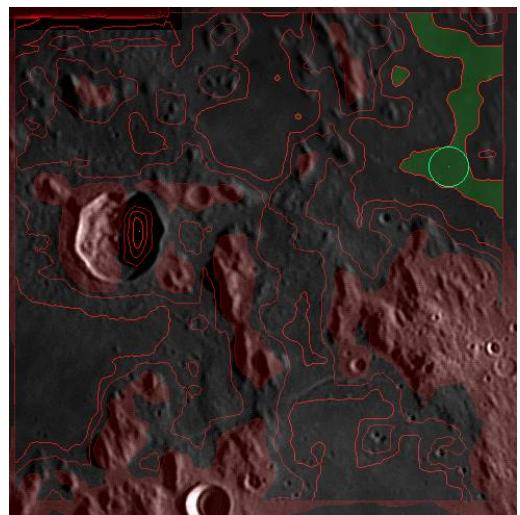
Б)



Г)



д)



е)

Рис. 9. Результаты экспериментов по определению наиболее безопасной области посадки

В заключении сформулированы основные полученные результаты.

Основные результаты работы

1. Предложен новый гибридный растрово-векторный алгоритм поиска положения кадра на карте Луны и исследованы его свойства. Метод обладает высокой производительностью и точностью, позволяет использовать векторную карту относительно небольших размеров, что очень важно при бортовой реализации, и нечувствителен к изменениям освещенности.

2. Разработан новый метод сравнения кратеров кадра и карты с использованием сигнатур. Метод показал возможность бесперебойной работы при наличии изменения ракурса съемки и расстояния до поверхности.

3. Предложен алгоритм автоматического выбора места посадки по видеоизображению. Алгоритм обладает приемлемыми характеристиками по качеству выбора места посадки и по производительности.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В дальнейших исследованиях предполагается провести сравнение характеристик полученного метода с методами, основанными на детектировании кратеров с целью определения наиболее перспективного подхода, а также добавить компоненты, отвечающие за уточнение параметров ракурса съемки.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Yang X.. Bobkov A.V. Development of a vision system for safe and high-precision soft landing on the Moon. //Procedia Computer Science, Vol. 186, 2021, P. 503-511 (7.94 п.л./1.04 п.л.)
2. Bobkov A.V, Yang X.. Methods of Visual Navigation in the Task of Moon Landing. //Procedia Computer Science, Vol. 150, 2019, P. 201-207 (7.81 п.л./0.81 п.л.)
3. Бобков А.В., Сюй Ян Исследование алгоритма управления с постоянным расходом топлива в задаче мягкой посадки на Луну. // XLVI Академические чтения по космонавтике. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2022. С.421-424. (0.23 п.л./0.46 п.л.)
4. Ян Сюй. Бобков А.В. Разработка закона управления с постоянным расходом топлива в задаче мягкой посадки на Луну. // XLV Академические чтения по космонавтике. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2021. С.372-374. (0.16 п.л./0.35 п.л.)
5. Бобков А.В., Сюй Ян. Выбор места посадки на Луну по видеозображению. // XLIV Академические чтения по космонавтике. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2020. С.242-245. (0.17 п.л./0.46 п.л.)
6. Бобков А.В., Сюй Ян. Разработка и исследование методов визуальной навигации в задаче автоматической посадки на Луну. // XLIII Академические чтения по космонавтике. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2019. С.121-123. (0.17 п.л./0.35 п.л.)
7. Bobkov A.V, Xu Y.. Research of the method of visual navigation by a vector map in the task of automatic landing on the Moon. // 19-й Всероссийской конференции с международным участием «Математические методы распознавания образов». М.: Российская академия наук, 2019. С. 230-231 (1.51 п.л./ 0.23 п.л.)