

На правах рукописи

Дьячкова Майя Викторовна

**АНАЛИЗ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ
ВЫБОРА РАЙОНОВ ПОСАДОК ПЕРСПЕКТИВНЫХ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЛУНЫ И
МАРСА**

1.3.1 Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Москва 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), г. Москва

Научный руководитель:

Митрофанов Игорь Георгиевич

доктор физико-математических наук
заведующий отделом Института космических исследований (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:

Нефедьев Юрий Анатольевич

доктор физико-математических наук
директор Астрономической обсерватории им. В. П. Энгельгардта
профессор Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета

Слюта Евгений Николаевич

кандидат геолого-минералогических наук
заведующий лабораторией геохимии Луны и планет Института геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского (ГЕОХИ РАН)

Ведущая организация:

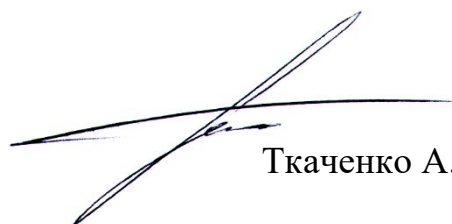
Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ)

Защита состоится « 8 » декабря 2023 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.481.01 на базе Института космических исследований Российской академии наук по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2023/dyachkova.htm>

Автореферат разослан « 3 » ноября 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Ткаченко А.Ю.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Изучение Луны и Марса являются одними из приоритетных направлений в исследовании Солнечной системы. В течение последнего десятилетия стартовало более десятка различных международных экспедиций по изучению этих небесных тел. При этом в ближайшем будущем Луна станет объектом изучения российскими автоматическими космическими аппаратами «Луна-25, 26, 27», автоматическими и пилотируемыми американскими аппаратами программы НАСА «Артемида», китайскими космическими аппаратами «Чанъэ», космическими аппаратами Кореи, Индии и Японии. Наряду с этим множество частных компаний готовят свои технические средства по изучению поверхности Луны, а также доставке образцов лунного грунта. Успех посадочных миссий во многом зависит от того, насколько намеченный район посадки соответствует техническим требованиям безопасности, энергетики и связи, а также удовлетворяет научным и исследовательским целям, стоящим перед миссией.

На настоящее время на орбитах вокруг Марса находятся американские космические аппараты «Mars Odyssey» [1], «Mars Reconnaissance Orbiter» [2], «MAVEN» [3], европейские «Mars Express» [4] и «Trace Gas Orbiter» [5], а также арабский «Аль-Амаль» [6] и китайский «Тяньвэнь-1» [7]. На поверхности планеты работают американские марсоходы «Curiosity» [8] и «Perseverance» [9] и автоматическая станция «InSight» [10], а также китайский марсоход «Чжужун» [11]. На орбите вокруг Луны находятся американский космический аппарат «Lunar Reconnaissance Orbiter» [12] и корейский аппарат «Danuri» [13], а на поверхности спутника Земли работает китайский луноход «Юйту-2» [14]. В результате этих наблюдений накоплен большой объем данных, обработка которых позволила расширить наши представления о формировании Луны и Марса, о физических

условиях на их поверхностях. Между тем, еще остается много открытых вопросов, на изучение которых могут потребоваться многие годы.

Наряду с современными фундаментальными научными исследованиями, Луна и Марс изучаются как наиболее вероятные кандидаты для освоения и даже в удаленной перспективе – колонизации. Марс рассматривается как более подходящий кандидат для выхода человечества за пределы Земли [15]. Теоретически эта планета может быть подвержена терраформированию, что позволит создать условия, близкие к земным.

Данная диссертационная работа посвящена изучению поверхности Луны и Марса на основе совместного анализа данных орбитального картографирования и исследований на борту посадочных аппаратов. Она имеет высокую актуальность в связи с интересом к изучению Луны и Марса в мировом научном сообществе, а также соответствует стратегической цели по выделению наиболее интересных районов для будущих исследований.

Предмет исследования

Предметом исследования данной работы являются научные данные, полученные при изучении поверхностей Луны и Марса. Исследования в рамках диссертационной работы были проведены по теме «Освоение» (№ 122042500014-1) в отделе «Ядерной планетологии» Института космических исследований РАН. Предмет исследований данной диссертационной работы увязан с общей исследовательской программой отдела. Исследования по теме диссертации основаны на таких ранее полученных в Отделе результатах, как орбитальные исследования Луны в эксперименте «ЛЕНД», исследованиях собственного нейтронного излучения Марса в экспериментах с прибором «ДАН». В выполненных при подготовке диссертации исследованиях также использовались публично доступные научные данные других космических проектов, таких как «LOLA», «LROC» на «LRO», «TC» на «Kaguya», «CRISM» на «MRO».

Условия проведения и предпосылки научного исследования

Одной из целей современной российской космической программы является изучение Луны, в том числе ее полярных областей, так как именно там возможно обнаружить воду в виде льда под слоем реголита либо на поверхности в затененных областях лунных полярных кратеров [16]. Отечественный космический аппарат «Луна-25» (см. напр. [17]) станет продолжением одноименной серии советских лунных станций, последней из которых была «Луна-24» в 1976 г., и планируется к запуску в 2023 г. Приборы на его борту предназначены для исследований в окрестности южного полюса Луны состава, структуры и физико-механических свойств лунного реголита, пылевой и плазменной экзосферы.

Затем будет запущен следующий лунный аппарат «Роскосмоса» – лунный спутник «Луна-26», целью которого является проведение дистанционных исследований с орбиты поверхности Луны и окололунного пространства (см. напр. [18]). Для достижения этой цели будут выполнены следующие научные задачи: построение топографической карты лунной поверхности, определение структуры и состава недр, поиск богатых водородом регионов на Луне, определение химического и элементного состава реголита, определение неоднородности лунного гравитационного поля, а также изучение состава и динамики экзосферы, исследования взаимодействия солнечного ветра и Луны, исследования лунных магнитных аномалий и соответствующей динамики плазмы.

Космический аппарат «Луна-27» должен стать первым в череде будущих научных исследований Луны в районе, потенциально пригодном для развертывания будущей российской лунной научной станции. «Луна-27» представляет собой спускаемый аппарат, предназначенный для посадки на широтах южнее 80° ю.ш (см. напр. [19]). Основной целью научной миссии «Луны-27» является обнаружение и *in situ* изучение летучих веществ в грунте Луны, в том

числе водяного льда, вблизи южного полюса. Для достижения этой цели должны быть решены следующие научные задачи: анализ грунта и исследования его физических (механических, тепловых и др.) свойств, исследования минералогического, элементного и изотопного состава лунного реголита в образцах, доставляемых с различных глубин от 1 м до поверхности, взятых в непосредственной окрестности космического аппарата. Работа по выбору мест посадки для космического аппарата «Луна-27» находится на первом этапе. Предполагается, что окончательное утверждение кандидатов будет принято в том числе по результатам картографирования поверхности Луны орбитальным аппаратом «Луна-26». Опыт и результаты миссии «Луна-25» также будут приняты во внимание.

Основной практической предпосылкой данного диссертационного исследования стала необходимость выбора районов на лунной поверхности в окрестности Южного полюса, в которые будут направлены описанные выше посадочные аппараты «Луна-25» и «Луна-27». Эта предпосылка определила условия проведения данного исследования – его неразрывную связь с требованиями к районам посадки со стороны космического аппарата и с научными задачами этих лунных миссий.

Второй предпосылкой представленного диссертационного исследования стал российский космический эксперимент «ДАН» по активному нейтронному зондированию вещества Марса на дне кратера Гейл с борта марсохода «Curiosity». Целью исследований марсохода является поиск локальных районов на дне кратера, в которых могут сохраниться древние минералы, состав которых может указывать на существование на раннем Марса условий для зарождения примитивной жизни (см. напр. [8]). Общепринято, что водная среда является наиболее благоприятной для поддержания примитивной жизни, поэтому в состав научной аппаратуры марсохода был включен прибор «ДАН», данные измерений которого позволяют оценить массовую долю воды в веществе Марса непосредственно под колесами марсохода. Однако локальные условия таких измерений не позволяют построить

оптимальную трассу движения марсохода, приводящую в наиболее интересные районы с максимальным содержанием воды в составе вещества.

В представленной диссертационной работе был проведен совместный анализ результатов измерений прибором «ДАН» на борту марсохода «Curiosity» и данных орбитального картографирования распространенности гидратированных минералов на дне кратера Гейл в эксперименте «CRISM» на борту марсианского спутника «MRO». Полученные результаты позволяют предсказать наиболее интересные районы для посещения марсоходом, а также они важны для выбора районов посадок будущих посадочных аппаратов.

Цели и задачи работы

Целями данной работы являются изучение геоморфологических свойств поверхностей Луны и Марса с помощью методов пространственного анализа данных орбитального картографирования, а также разработка метода выбора мест районов посадки космических аппаратов, учитывающего предъявляемые научные и инженерные требования.

Для достижения указанных целей в рамках представленной диссертационной работы были поставлены и решены следующие научные задачи.

Задача 1: Анализ данных орбитальных наблюдений полярных областей Луны, характеризующих пригодность территорий для посадки и работы космических аппаратов с точки зрения требований безопасности и научного потенциала.

Задача 2: Разработка на основе проведенного анализа (Задача 1) метода выбора мест посадки на поверхность Луны с учетом технических особенностей посадочного аппарата и его научных задач.

Задача 3: С применением разработанного метода (Задача 2) выработка так называемого длинного списка районов-кандидатов для посадки космического

аппарата «Луна-25» и выработка критериев для формирования короткого списка на основе приоритизации.

Задача 4: На основе имеющихся данных о лунной поверхности построение геоинформационных численных моделей поверхности для приоритетных районов-кандидатов, отобранных для космического аппарата «Луна-25» (Задача 3).

Задача 5: Применение разработанного по результатам решения Задачи 2 метода для формирования списков кандидатов для мест посадки для космического аппарата «Луна-27».

Задача 6: Выявление связи между присутствием гидратированных минералов и содержанием воды на основе совместного анализа орбитальных данных о составе грунта с прибора «CRISM» и данных о массовой доле воды в грунте с прибора «ДАН» на борту марсохода для выбора наиболее перспективных районов для проведения в будущем детальных исследований вещества поверхности этих районов.

Научная новизна работы

Все результаты, представленные в данной диссертационной работе, являются новыми.

Впервые был разработан метод выбора мест посадки космического аппарата на поверхность Луны на основе данных орбитального картографирования с использованием методов пространственного анализа. Впервые была произведена комплексная оценка южной полярной области Луны на предмет ее пригодности для посадки аппарата «Луна-25». Разработанный метод позволил выбрать основное и запасное места посадки в южной полярной области Луны для космического аппарата «Луна-25» из сформированного длинного списка района-кандидатов на основе приоритизации. При выборе мест посадки были использованы данные, полученные за последние 13 лет космическим аппаратом «LRO», в том числе

данные по содержанию воды в лунном реголите на основании данных измерений российского прибора «LEND», установленного на его борту.

Впервые для выбранных основного и запасного мест посадки были созданы геоинформационные модели на основе имеющихся данных о лунной поверхности. Была произведена оценка качества имеющихся цифровых моделей рельефа, а также созданы дополнительные модели на основе сырых данных лазерного альтиметра «LOLA». На основе всех имеющихся цифровых моделей рельефа были рассчитаны морфометрические характеристики поверхности. Цифровая модель рельефа, созданная на основе снимков узкоугольной камеры «LROC NAC» с разрешением до 2 м, сравнимым с размером космического аппарата, позволила верифицировать остальные модели рельефа.

Впервые была произведена оценка южной полярной области Луны на предмет ее пригодности для посадки космического аппарата «Луна-27» с учетом возможной точности посадки от 0,5 до 5 км. Были предложены районы-кандидаты для посадки в зависимости от используемой точности посадки.

Впервые был проведен совместный анализ данных измерений прибора «ДАН» на борту марсохода «Curiosity» по содержанию воды в верхнем слое кратера Гейл на Марсе и содержанию гидратированных минералов. Выявленная корреляция между содержанием воды и присутствием полигидратированных сульфатов и филлосиликатов в верхнем слое кратера подтверждает значимость использования орбитальных данных для выбора мест посадки перспективных исследовательских аппаратов на поверхность планет.

Научная и практическая значимость работы

Разработанный метод выбора мест посадки был использован для выбора районов посадки космического аппарата «Луна-25» в южной полярной области Луны. На основании полученных автором результатов были намечены основной и резервный районы посадок указанного космического аппарата.

Созданная геоинформационная модель поверхности выбранных мест посадки обеспечивает возможность детального планирования будущих исследований на поверхности. Предлагаемые районы-кандидаты для посадки космического аппарата «Луна-27» рассматриваются в качестве основных претендентов для осуществления этой научной миссии на поверхности Луны.

Результат совместного анализа орбитальных данных о поверхности марсианского кратера Гейл и данных, полученных непосредственно на его поверхности, подтвердили важность использования орбитальных данных при выборе мест посадки космических аппаратов и при планировании трасс движения мобильных исследовательских станций. Установленная связь между локальными данными нейтронного зондирования поверхности и орбитальными спектрометрическими измерениями ее верхнего слоя позволили интерпретировать всю совокупность этих данных и предложить наиболее перспективные районы для посадки перспективных марсианских аппаратов.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность диссертационной работы обеспечена использованием публично доступных экспериментальных данных, полученных в течение последнего десятилетия в научных исследованиях на борту космических аппаратов «Lunar Reconnaissance Orbiter», «Kaguya», «Martian Reconnaissance Orbiter», «Mars Science Laboratory». Эти данные прошли апробацию в рамках их широкого использования научной планетной общественностью по планетным исследованиям.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в четырех статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в базы данных РИНЦ, а также Scopus/Web of Science.

Кроме этого, результаты диссертации были представлены на научных семинарах в ИКИ РАН и ИНАСАН РАН, а также на следующих международных и отечественных научных конференциях:

- European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria (2016, 2017, 2018);
- Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, USA (2019, 2020, 2021, 2022);
- European Planetary Science Congress, Berlin, Germany (2018);
- Moscow Solar System Symposium, ИКИ РАН, Москва, Россия (2016, 2017, 2018, 2019, 2021, 2022);
- Конференция Молодых Ученых, ИКИ РАН, Москва, Россия (2017, 2018, 2019, 2021, 2022).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработан метод выбора мест посадки космических аппаратов на поверхность Луны на основе пространственного анализа данных орбитальных измерений с учетом требований безопасности посадки и научных задач, стоящих перед миссией (Решены Задачи 1–2, результат опубликован в [МД1]).
2. Предложен список районов-кандидатов для посадки космического аппарата «Луна-25», на основе приоритизации этих кандидатов с учетом научных и инженерных требований отобраны основной и запасной районы посадки (Решена Задача 3, результат опубликован в [МД1]).
3. Созданы геоинформационные модели выбранных основного и запасного районов посадки космического аппарата «Луна-25» на основе актуальных данных о поверхности Луны, включающие данные о рельефе поверхности и его морфометрических показателях (Решена Задача 4, результат опубликован в [МД2]).

4. Предложены районы-кандидаты для посадки космического аппарата «Луна-27» в зависимости от предполагаемой точности посадки от 0.5 до 5 км и с учетом их потенциальной пригодности для посадки последующих миссий и размещения на них лунной космической инфраструктуры (Решена Задача 5, результат опубликован в [МД3]).
5. Для вещества поверхности марсианского кратера Гейл обнаружена связь повышенного содержания воды по данным эксперимента «ДАН» на борту марсохода «Curiosity» и присутствия в нем полигидратированных сульфатов по данным эксперимента «CRISM». Отождествлены районы вдоль трассы движения марсохода, для которых такая корреляция наблюдается (Решена Задача 6, результат опубликован в [МД4]).

Список публикаций с изложением основных результатов в рецензируемых журналах

- [МД1]. Дьячкова М. В., [и др.]. Выбор мест посадки космического аппарата Луна-25 в окрестности южного полюса Луны // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. – 2017. – Т. 51. – №3. – С. 204–215. DOI: [10.7868/S0320930X17030021](https://doi.org/10.7868/S0320930X17030021)
- [МД2]. Дьячкова М. В., [и др.]. Характеристика мест посадки космического аппарата Луна-25 // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. – 2021. – Т. 55. – №6. – С. 522–541. DOI: [10.31857/S0320930X21060037](https://doi.org/10.31857/S0320930X21060037)
- [МД3]. Дьячкова М. В., [и др.]. О выборе района посадки космического аппарата Луна-27 // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. 2022. – Т. 56. – №3. – С. 158–168. DOI: [10.31857/S0320930X22030021](https://doi.org/10.31857/S0320930X22030021)
- [МД4]. Djachkova, M. V., [et al.]. Testing Correspondence between Areas with Hydrated Minerals, as Observed by CRISM/MRO, and Spots of Enhanced

Subsurface Water Content, as Found by DAN along the Traverse of Curiosity // *Advances in Astronomy*. – 2022. – Id. 6672456. DOI: [10.1155/2022/6672456](https://doi.org/10.1155/2022/6672456)

Список публикаций с изложением основных результатов в трудах конференций

1. Дьячкова М. В., [и др.]. Сопоставление данных эксперимента ДАН о распространённости воды в грунте кратера Гейл вдоль трассы марсохода Curiosity с данными эксперимента CRISM на борту у марсианского спутника MRO // *XVI Конференция Молодых Учёных: Сборник Трудов. Сер. “Механика, Управление и Информатика”*. – 2019. – С. 24–33. DOI: [10.21046/KMU-2019-24-33](https://doi.org/10.21046/KMU-2019-24-33)
2. Дьячкова М.В., [и др.]. Характеристика основного и запасного районов посадки космического аппарата «Луна-25» // *Фундаментальные и прикладные космические исследования. Сборник трудов XVIII конференции молодых учёных*. — 2021. – С. 25–30. DOI: [10.21046/KMU-2021-25-30](https://doi.org/10.21046/KMU-2021-25-30)
3. Дьячкова М. В., [и др.]. Вариации содержания воды и хлора в грунте Марса вдоль трассы марсохода «Кьюриосити» по данным измерений прибора ДАН // *XVI Конференция Молодых Учёных: Сборник Трудов. Сер. “Механика, Управление и Информатика”*. – С. 37–42. DOI: [10.21046/KMU-2022-37-42](https://doi.org/10.21046/KMU-2022-37-42)

Личный вклад автора

Научно-исследовательская работа, которая легла в основу диссертации, выполнена автором самостоятельно.

Автор самостоятельно разработала метод выбора мест посадки космических аппаратов на поверхность Луны на основе пространственного анализа данных орбитальных измерений.

Автор составила список районов-кандидатов для посадок космических аппаратов «Луна-25» и «Луна-27» и критерии приоритизации для выбора основного и запасного районов. Автор организовала широкое обсуждение предложенных районов-кандидатов среди отечественной лунной научной общественности.

Также автор участвовала в постановке задач, выборе методов их исследования, анализе данных и интерпретации результатов эксперимента ДАН на борту марсохода «Curiosity» совместно с данными марсианского спутника «MRO».

По результатам диссертации опубликовано четыре статьи в рецензируемых изданиях, в написании которых автор сыграл ключевую роль. В основных результатах, выносимых на защиту, роль автора – определяющая.

Работы 1–3 из списка публикаций автора получили премию «Лучшая работа, выполненная молодыми учёными» на конкурсе научных работ Института космических исследований РАН.

Всего автор диссертационной работы является соавтором 15 научных статей по тематике диссертационной работы в реферируемых научных журналах, среди которых 4 публикации в журналах первого квартиля (Q1).

Также автор является членом научной группы космического эксперимента «ДАН» на борту марсохода «Curiosity».

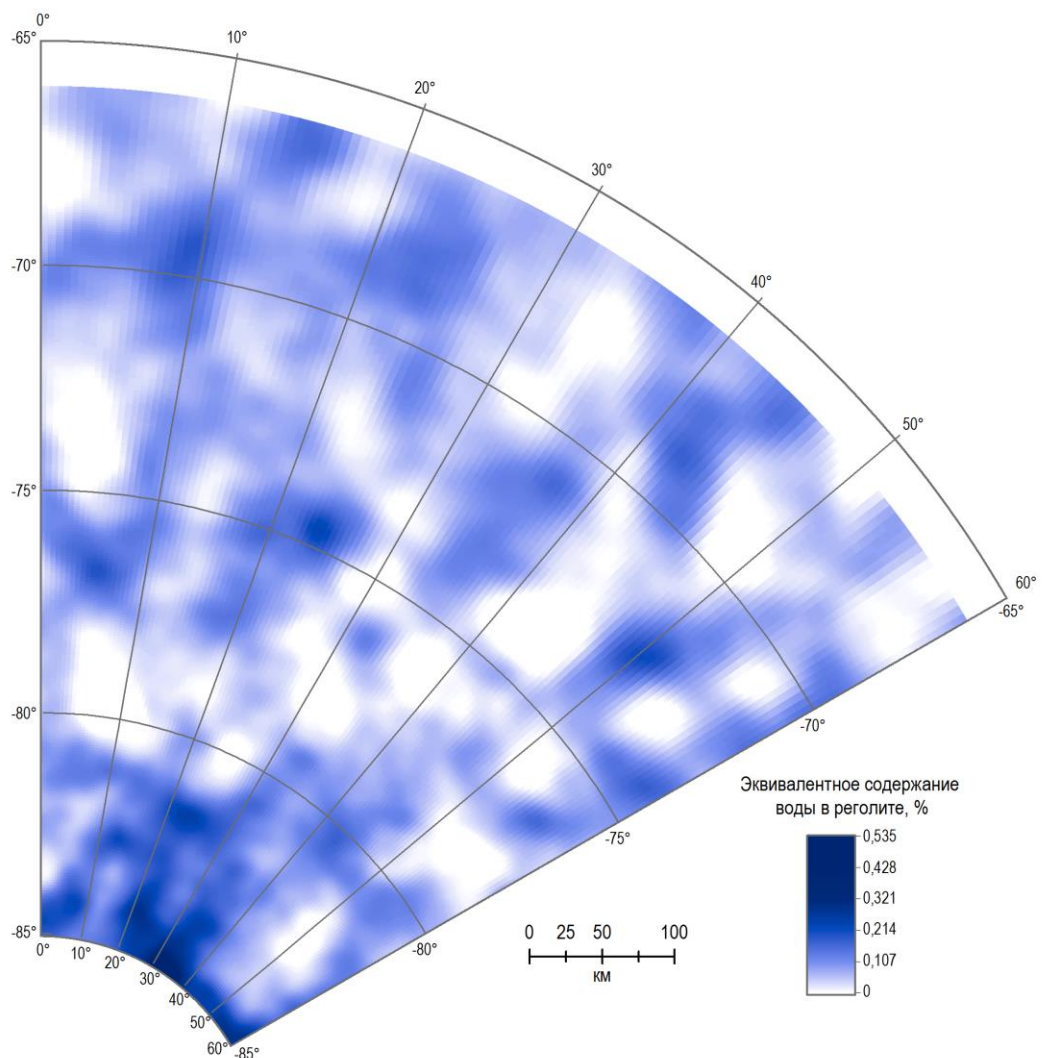
Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 158 страниц текста, 46 рисунков и 18 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 74 наименования.

Основное содержание диссертации

Во **Введении** обсуждается актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы и положения, выносимые на защиту. Также во введении изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Глава 1 посвящена разработанному методу выбора мест посадки. В разделе 1.1 обсуждаются научные предпосылки, сформировавшие интерес к южному полярному региону Луны. Долгое время предполагалось, что Луна является



практически безводным небесным телом, однако исследования, проводившиеся в последние 30 лет, в том числе данные, полученные с помощью телескопа «ЛЕНД»,

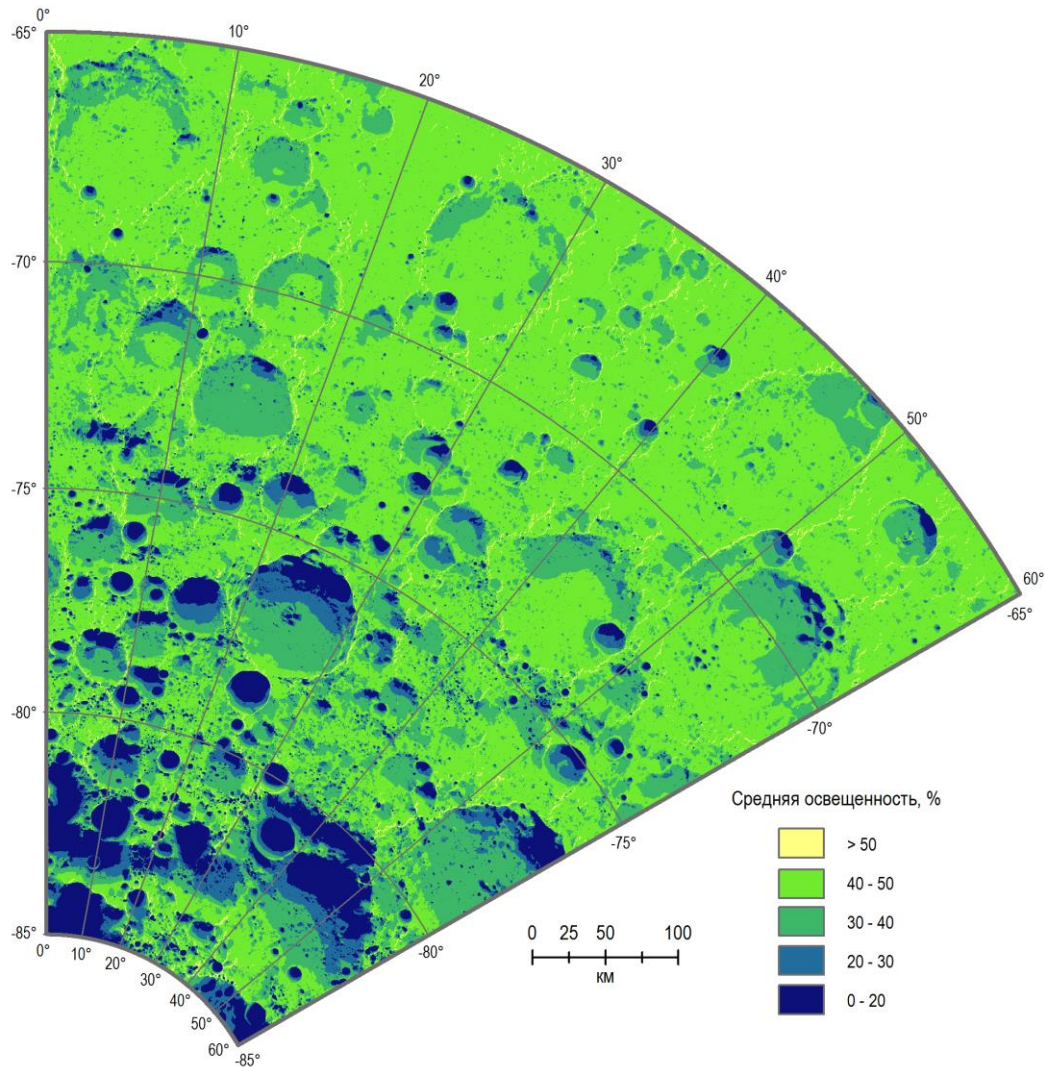
установленного на борту «LRO», позволили подтвердить факт повышенной концентрации воды в полярных областях Луны и построить карты ее распространенности в реголите в окрестностях северного и южного (Рисунок 1) полюсов [16].

Рисунок 1. Карта содержания воды в реголите для посадочного сектора космического аппарата «Луна-25»

Карты распространенности воды, построенные на основе анализа данных нейтронных измерений прибора «ЛЕНД», предлагается использовать в качестве научного критерия для выбора места посадки. Очевидно, что области с максимально высокой оценкой воды в реголите могут иметь очень сложный для посадки рельеф и неблагоприятные условия освещенности, и поэтому они не могут быть выбраны для посадки. Но среди всех приполярных районов, которые удовлетворяют инженерным требованиям безопасной посадки и обеспечения работы аппарата на поверхности, будут выбираться именно те, для которых наблюдается самое высокое ожидаемое количество воды в реголите. Раздел 1.2 посвящен рассмотрению инженерных ограничений при выборе мест посадки на примере миссий «Луна-25» и «Луна-27», а также данных, характеризующих эти ограничения. Показано, что основными факторами являются уклоны поверхности, освещенности и радиовидимости, причем основным лимитирующим фактором при выборе мест посадки в полярном регионе Луны является освещенность поверхности Солнцем.

Для успешного выполнения научных исследований необходимо, чтобы продолжительность светлого времени лунации была максимальной относительно полного периода лунации в 29,53 земных суток. Условие освещенности 50% (лунный день равен лунной ночи) соблюдается на экваториальных широтах, тогда как в полярных в связи с низким положением Солнца над горизонтом и значительной расчленённостью рельефа его соблюдение оказалось основным фактором, ограничивающим выбор районов посадки. В посадочном секторе для

космического аппарата «Луна-25» не удалось найти вариант расположения эллипса разброса со средним значением периода освещенности 50%. Для поиска



допустимых районов посадки значение доли светлого времени было понижено до 40%, что соответствует светлой лунации продолжительностью 11.8 земных суток. Карта освещенности южного полярного сектора представлена на Рисунке 2.

Рисунок 2. Карта освещенности посадочного сектора космического аппарата «Луна-25»

Продвижение посадочного сектора в сторону южного полюса для «Луны-27» накладывает значительные ограничения на максимальный период освещенности поверхности Солнцем. Продолжительность средней освещенности поверхности Солнцем снижается до 35%, что соответствует продолжительности светлого

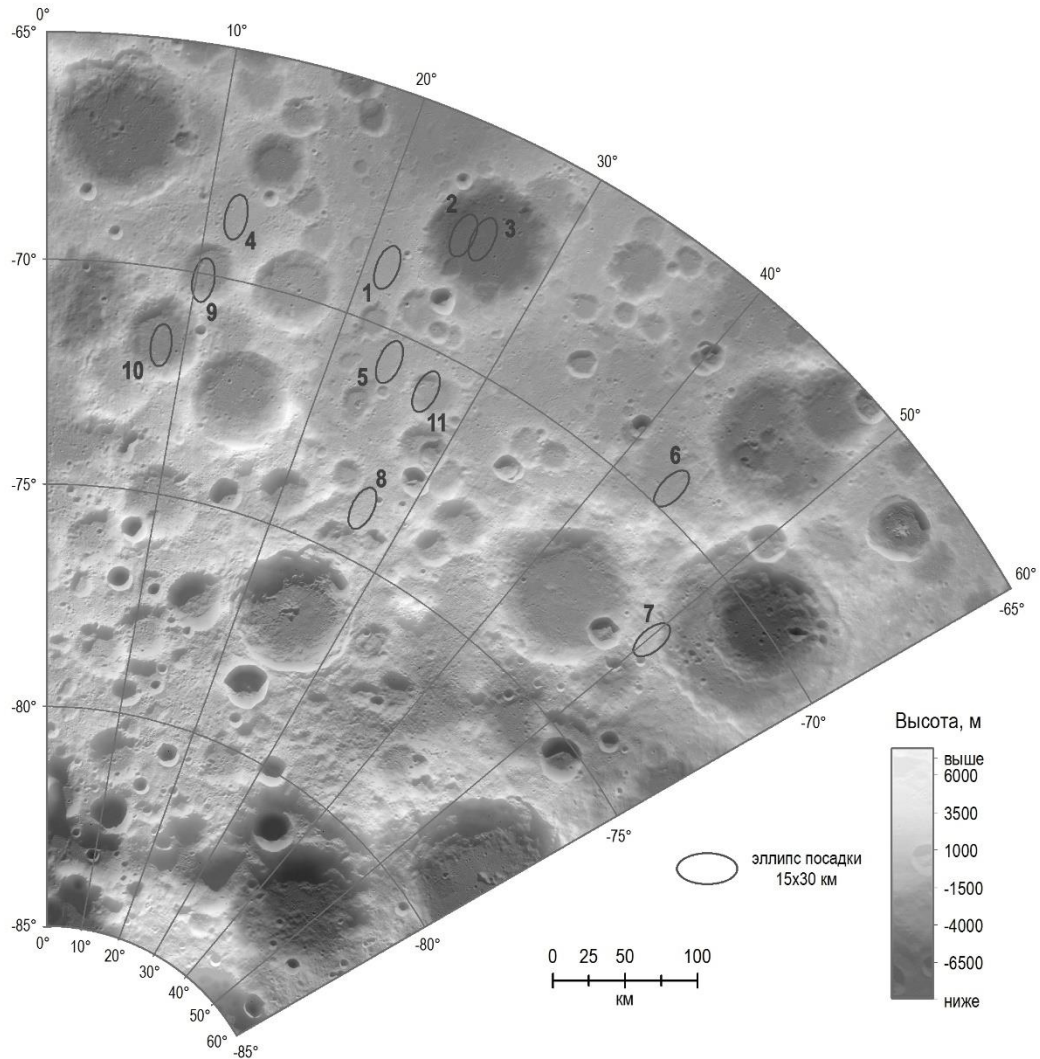
периода лунации в ~ 10 земных суток. Вместе с тем допустимость такого значения в качестве критерия $>35\%$ для выбора района посадки представляется целесообразной ввиду значительного увеличения площади к югу от параллели 80° ю.ш., пригодной для посадки по этому критерию, по сравнению с критерием $>40\%$, который использовался для выбора районов посадки для «Луны-25» в пределах посадочного сектора, ограниченного параллелями 65° ю. ш. и 85° ю. ш.

В разделе 1.3 описан процесс выбора мест посадки для «Луны-25». Совокупность баллистических и инженерных ограничений определили допустимый южный полярный сектор расположения районов посадки космического аппарата «Луна-25», ограниченный параллелью 65° ю. ш. и меридианами 0° и 60° в. д. Поверхность, лежащая в этом секторе, принадлежит к материковому типу и характеризуется сильно пересеченным рельефом, что обуславливает сложные условия освещённости и радиовидимости. Совокупная погрешность данных траекторных измерений и тормозного импульса маршевого двигателя космического аппарата определяет «эллипс разброса» ожидаемых точек посадки относительно «точки прицеливания», который имеет главные оси 30 км вдоль местного меридиана и 15 км вдоль местной параллели. Задача выбора районов-кандидатов для посадки состояла в поиске «точек прицеливания», для которых районы «эллипсов разброса» в наибольшей степени удовлетворяют перечисленным выше инженерным ограничениям и требованиям научных исследований. Для решения этой задачи был разработан метод, использующий технологии пространственного анализа. Разработанный метод предполагает совместную обработку карт лунной поверхности, представляющих доступные данные о рельефе поверхности, условиях освещенности и распространенности летучих соединений в реголите.

На основе разработанного метода был обоснован выбор 11 районов-кандидатов (Рисунок 3).

В разделе 1.4 рассматривается приоритизация полученных кандидатов на основе выбранных критериев. По ее результатам для дальнейшего анализа

поверхности на масштабе, сопоставимом с базой космического аппарата, было предложено 2 кандидата в места посадки для «Луны-25». Основное место посадки район № 6 ($-69,545^\circ$; $43,544^\circ$) к северу от кратера Богуславский и запасное место



посадки – район № 1 ($-68,773^\circ$; $21,210^\circ$), расположенное к юго-западу от кратера Манцини, соответствуют критериям безопасности посадки и имеют повышенное содержание воды в реголите, что должно обеспечить успех миссии «Луна-25».

Рисунок 3. 11 районов-кандидатов в места посадки «Луны-25»

Выполненный анализ показал, что очень низкая точность расположения точки посадки относительно точки прицеливания, соответствующая эллипсу с

осями 30 и 15 км, не позволила наметить для посадки аппарата «Луна-25» наиболее интересные в научном отношении полярные районы.

В **Главе 2** описано создание геоинформационной модели выбранных мест посадки. На основе имеющихся данных о поверхности Луны, полученных с космического аппарата «LRO», был произведен анализ районов посадки космического аппарата «Луна-25», выбранных ранее на основе методов пространственного анализа. Проведенный анализ позволил создать инженерные модели выбранных районов посадки, содержащие сведения о рельефе поверхности, о ее основных морфометрических параметрах, а также об условиях освещенности Солнцем и радиовидимости Земли. Для создания инженерных моделей использовались цифровые модели рельефа, полученные с помощью камер «WAC» и «NAC» инструмента «LROC» на борту «LRO», камеры космического аппарата «Кагуя», а также с помощью лазерного альтиметра «LOLA» на «LRO». Максимальное пространственное разрешение инженерной модели, созданной для центральной части основного района посадки, достигает 2 метров (около 30% района посадки) и сравнимо с размерами космического аппарата «Луна-25». Максимальное пространственное разрешение для запасного района посадки достигает 30 метров.

В разделе 2.1 рассмотрены основные характеристики цифровых моделей рельефа, использовавшихся при построении геоинформационных моделей выбранных мест посадки космического аппарата «Луна-25». Модели «GLD100», «LOLA DEM», «SLDEM2013» показали согласованность между собой, а также были верифицированы по наиболее точной модели рельефа «NAC DTM» (Рисунок 4), полученной на основе съемки поверхности узкоугольной камерой «LROC NAC».

Раздел 2.2 посвящен расчету морфометрических характеристик рельефа. Основными морфометрическими параметрами поверхности являются уклон и экспозиция склонов. Фундаментальные морфометрические параметры уклона и экспозиции поверхности взаимосвязаны. Оба показателя характеризуют градиент

поверхности, то есть интенсивность изменения значений ее высот в пространстве, которая может быть выражена первой производной. Как производная поверхности первого порядка, градиент характеризуется величиной (уклоном) и направлением (экспозицией).

Исходя из инженерных требований, «Луна-25» может успешно сесть на поверхность с пологим уклоном до 7° . Посадка на покатый склон с уклоном $7-15^\circ$ возможна, но сопряжена с риском опрокидывания. Посадка на более крутой склон $>15^\circ$ приводит к вероятному опрокидыванию аппарата. Кроме этого экспозиция склона поверхности определяет величину солнечной энергии, приходящей на поверхность. Увеличение уклона поверхности в направлении к Солнцу увеличивает угол их падения солнечных лучей, и, следовательно, количество энергии, которое поглощает поверхность. Это определяет микроклиматические особенности участка, в частности температуру грунта.

Уклоны поверхности были вычислены по всем описанным выше цифровым моделям рельефа. Основной вклад в разницу параметров вносит не алгоритм их вычисления, а используемая цифровая модель рельефа. Основным результатом исследования уклонов поверхности стали значения доли крутых склонов, имеющих уклон более 15° . Эти значения составили менее 1% для основного района посадки и менее 3% для резервного района. Этот результат характеризует территорию выбранных районов, как безопасную для посадки.

Для основного и запасного районов посадки наиболее благоприятными для тепловых условий космического аппарата являются склоны южной, юго-восточной и юго-западной экспозиции. Такие склоны в окрестности южного полюса характеризуются меньшими потоками энергии от солнечных лучей по сравнению с северными склонами. Необходимость уменьшения потока солнечной энергии связана с конструкцией системы обеспечения теплового режима космического аппарата, плоскость радиатора которой расположена наверху аппарата перпендикулярно его вертикальной оси. Рекомендуемый угол падения солнечных лучей на радиатор не должен превышать 20° , что для идеальной сферической

поверхности соответствует широте места посадки 70° ю. ш. Широта основного запасного мест посадки составляет $69,545^\circ$ и $68,773^\circ$ ю. ш. соответственно, что приводит к небольшому превышению угла падения солнечных лучей относительно требуемого. Южная, юго-восточная и юго-западная экспозиция склона фактического участка места посадки компенсирует это увеличение. С другой стороны, северная экспозиция склона ухудшает тепловой режим космического аппарата во время лунного полдня.

Оказалось, что в пределах основного и резервного районов преобладают склоны с северной и западной экспозицией, являющейся более «горячими» с точки зрения температурного режима. Однако благодаря небольшим значениям средних уклонов, преобладание склонов северной и западной экспозиции не должно привести к значительному увеличению угла падения солнечных лучей на поверхность участка посадки.

Созданные инженерные модели подтвердили безопасность посадки в выбранные районы как с точки зрения морфометрических параметров (уклонов и экспозиции), так и с точки зрения условий освещенности и радиовидимости в предполагаемый период работы космического аппарата «Луна-25».

Было проведено сравнение существующих цифровых моделей рельефа и проведена их верификация на основе эталонной модели – модели, созданной на основе снимков узкоугольной камеры «НАС» (Рисунок 4). Показано, что существующие цифровые модели рельефа согласуются между собой, а также дают адекватное представление о рельефе поверхности в предполагаемых местах посадки.

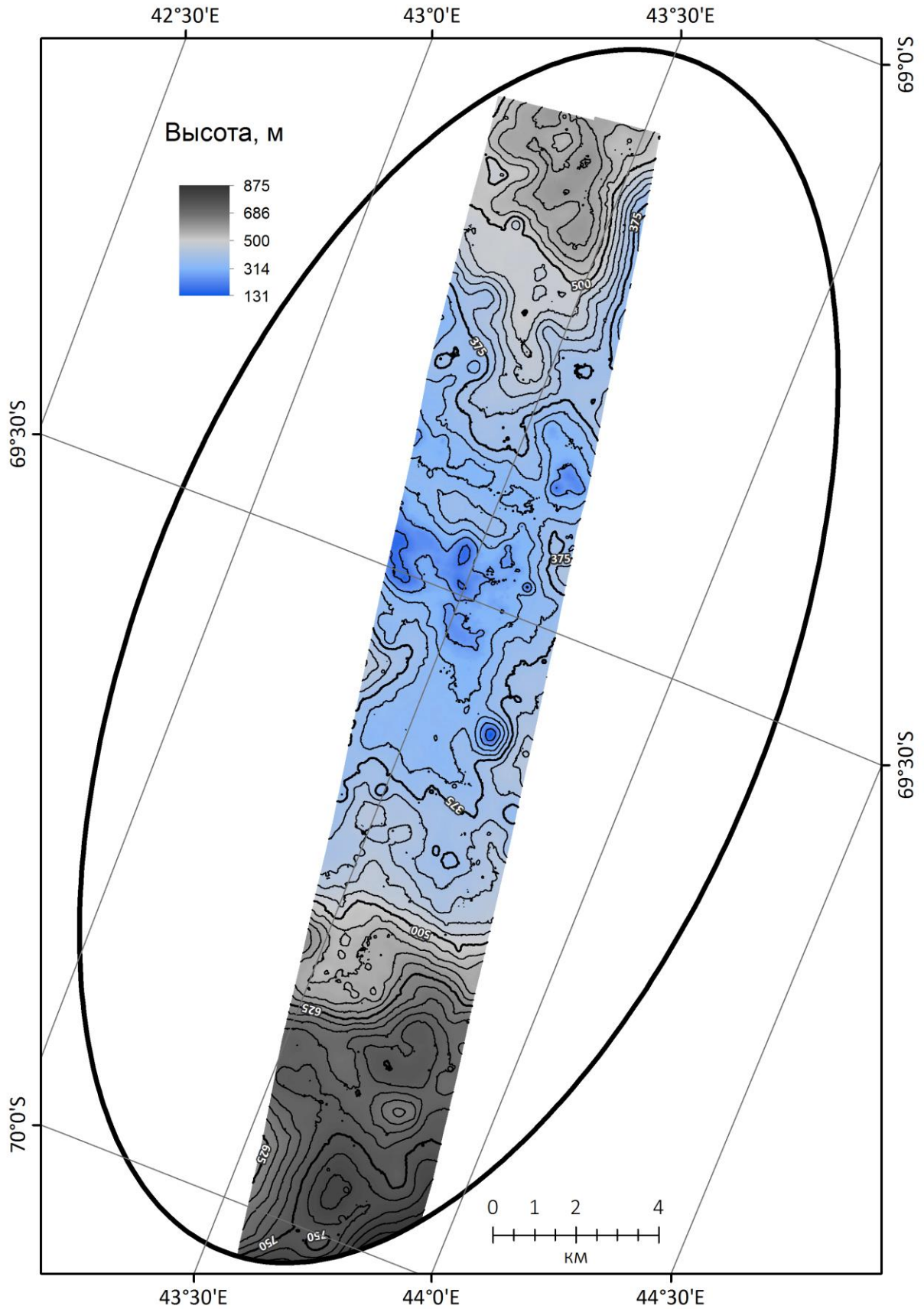


Рисунок 4. Визуализация ЦМР «NAC_DTM_BOGUSLAWSKY1» в виде гипсометрической карты для части поверхности выбранного основного места посадки. Горизонталы проведены через 25 м. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 22° в. д.

Глава 3 посвящена выбору мест посадки для космического аппарата «Луна-27» в зависимости от предполагаемой точности посадки. Задача выбора мест посадок для космического аппарата «Луна-27» обеспечена большим количеством актуальных данных, часто имеющих более высокое пространственное разрешение по сравнению с данными, использовавшимися для выбора мест посадки аппарата «Луна-25».

Раздел 3.1 содержит предварительные оценки условий лунной поверхности в южном полярном регионе южнее 80° ю. ш. для посадки «Луны-27». Эти оценки показали необходимость серьезно повышать точность посадки по сравнению с эллипсом области посадки аппарата «Луна-25». Размер этого эллипса посадки (15x30 км) южнее 80° ю. ш. делает безопасную посадку практически невозможной: поверхность в окрестности южного полюса Луны не располагает ни одной ровной и освещенной площадкой такого размера. Повышение точности посадки уже до 5 км приводит к возможности выбора района посадки среди шести кандидатов. Дальнейшее повышение точности посадки до 3 км может обеспечить широкий выбор из 15 районов-кандидатов, в каждом из которых возможно осуществить как безопасную посадку, так и выполнение научной миссии проекта «Луна-27». Наконец, при точности посадки около 500 м можно наметить обширные области в окрестности южного полюса, в которых присутствуют многочисленные районы с благоприятными условиями как для безопасной посадки, так и для проведения обширной программы научных исследований (Рисунок 5).

В разделе 3.2 предложены наиболее предпочтительные кандидаты для посадки космического аппарата «Луна-27» в зависимости от предполагаемой точности посадки. Рассмотрены геологические особенности территории и сделаны выводы о наиболее перспективных кандидатах для изучения.

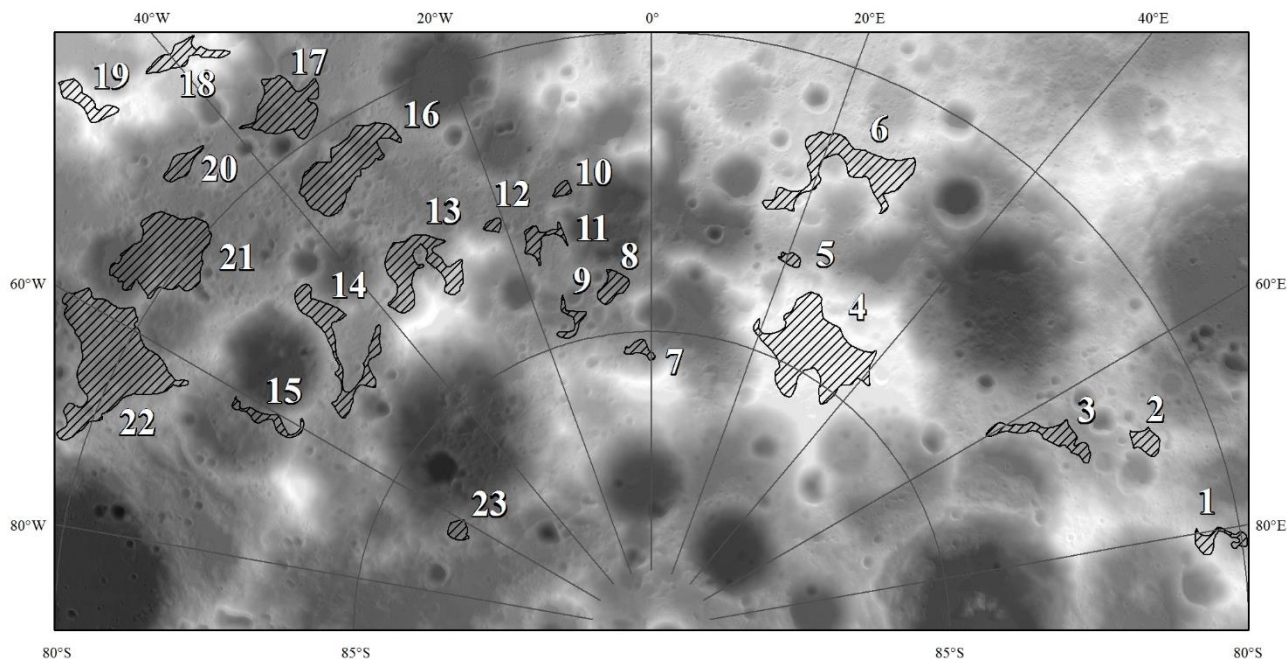


Рисунок 5. Области, внутри которых могут быть выбраны места посадки КА Луна-27, имеющие радиус 0.5 км. Нумерация областей проведена в произвольном порядке.

Выбор окончательного места посадки будет зависеть от итоговой точности посадки. В случае наиболее высокоточной посадки представится широкий выбор из множества районов, допустимых с инженерной точки зрения, и решающим фактором при выборе станут научные критерии, такие как геологические особенности поверхности в месте посадки, температуры поверхности, предполагаемое максимальное значение содержания воды в реголите.

Глава 4 содержит обзор кратера Гейл на Марсе, в который была осуществлена посадка марсохода «Curiosity». Его характеристики рассмотрены в разделе 4.1. Выбор места посадки «Curiosity» в кратере Гейл был обусловлен в том числе орбитальными данными спектрометра «CRISM», показавшим, что на его поверхности обнаруживаются несколько типов гидратированных минералов, в том числе гидратированные сульфаты и филлосиликаты, которые, как считается, образовались в разные эпохи геологической эволюции Марса. Свидетельства о присутствии обоих типов гидратированных минералов на поверхности кратера Гейл и определили его выбор в качестве перспективного места посадки.

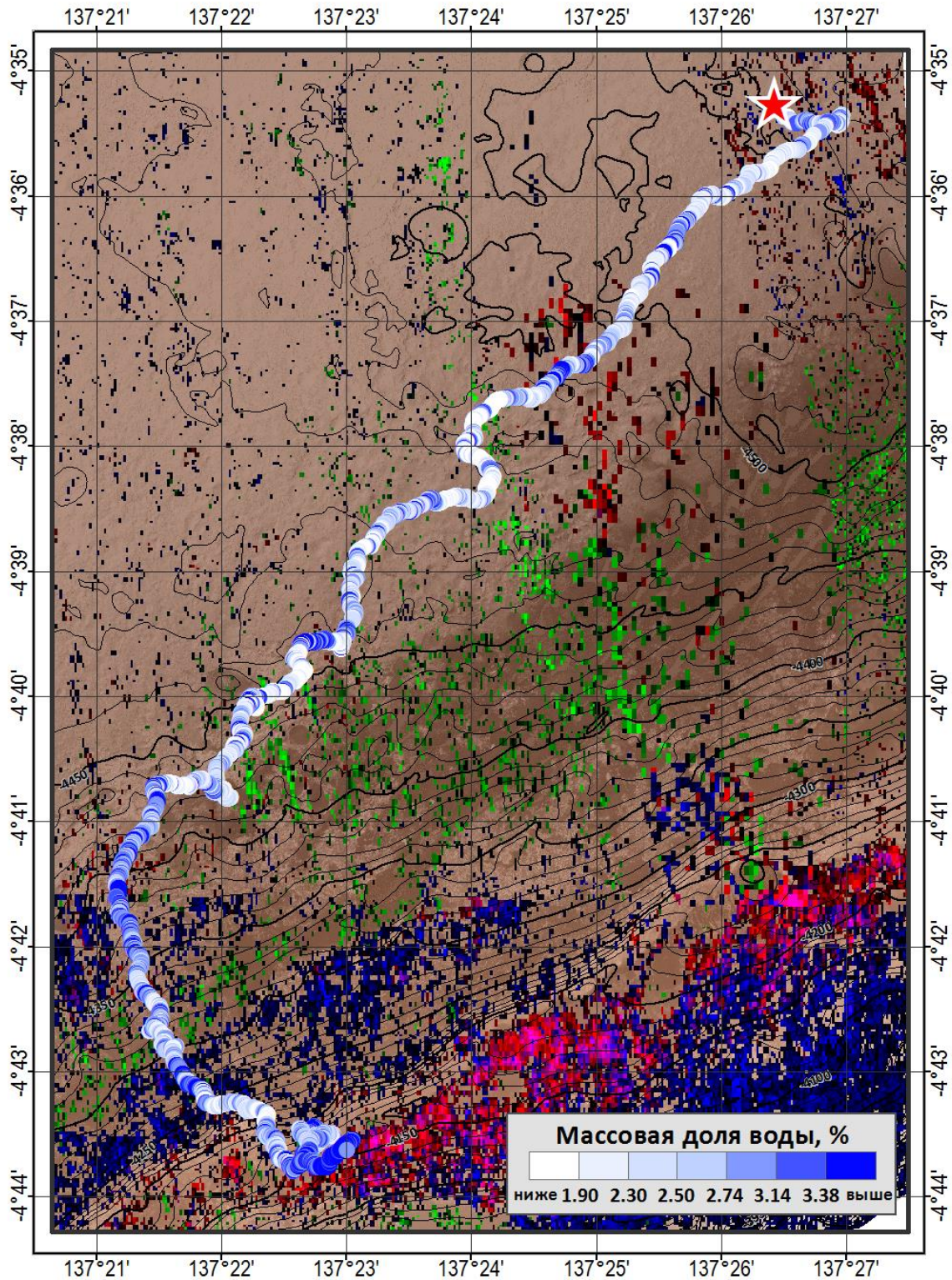


Рис. 6. Карта распределения значений содержания воды от места посадки до марсианских суток 2218 марсохода «Curiosity». Градациями синего указано содержание воды. Цветные пиксели соответствуют гидратированным минералам на поверхности по данным инструмента «CRISM»: зеленые – моногидратированным сульфатам, синие – полигидратированным сульфатам, красные и розовые – филлосиликатам. Звездочкой отмечено место посадки марсохода.

Благодаря работе прибора «ДАН», продолжающейся уже более 10 лет на борту марсохода «Curiosity», стало возможным оценить корреляцию между орбитальными данными и данными *in situ*. Описанию данных прибора «ДАН» посвящен раздел 4.2.

Раздел 4.3 содержит описание данных прибора «CRISM», использованных для совместного анализа с данными прибора «ДАН».

В **Главе 5** рассматривается эффект корреляции, который наблюдается между измерениями прибора «ДАН» на поверхности кратера Гейл и присутствием гидратированных минералов, наблюдаемым орбитальным прибором «CRISM» на борту аппарата «Mars Reconnaissance Orbiter».

Метод перекрестного анализа данных «ДАН» и «CRISM», описанный в разделе 5.1, был основан на сравнении распределения средних значений содержаний воды для тестируемой группы пикселей «CRISM», приписываемых конкретной тестируемой минеральной группе, с распределением средних значений содержаний воды для контрольной группы пикселей «CRISM».

В качестве теста сравниваются средние значения и дисперсии содержания воды для тестируемой и контрольной групп. Кроме того, критерий хи-квадрат Пирсона используется для более точного тестирования статистической разницы между ними. Обнаруживается, что нет различий в распределении содержания воды для групп пикселей «CRISM», связанных либо с филлосиликатами, либо с моногидратированными сульфатами и контрольной группы. Для обоих случаев оценки содержания воды, с использованием подхода долго- или короткопериодического изменения «эффективного хлора» указывают на довольно хорошее соответствие между распределениями содержания воды для тестовых и контрольной групп. Обнаружено, что нет различий в распределении содержания воды для групп пикселей «CRISM», связанных либо с филлосиликатами, либо с моногидратированными сульфатами и контрольной референц-группы. Для обоих случаев оценки «эффективного хлора» значения содержания воды указывают на

довольно хорошее соответствие между распределениями содержания воды для тестируемых и контрольной групп.

С другой стороны, очевидный эффект отличия от контрольной группы обнаруживается для тестовой группы со спектральной характеристикой полигидратированных сульфатов (Рисунок 7). Различия между средними значениями содержания воды составляют $0,2 \pm 0,1\%$ для длительнопериодного подхода и $0,4 \pm 0,1\%$ для короткопериодного подхода. Таким образом, среднее значение содержания воды для тестируемой группы пикселей «CRISM», связанных с наличием полигидратированных сульфатов, достоверно больше, чем среднее значение содержания воды для контрольной группы пикселей, не имеющих спектральной характеристики данного типа минералов.

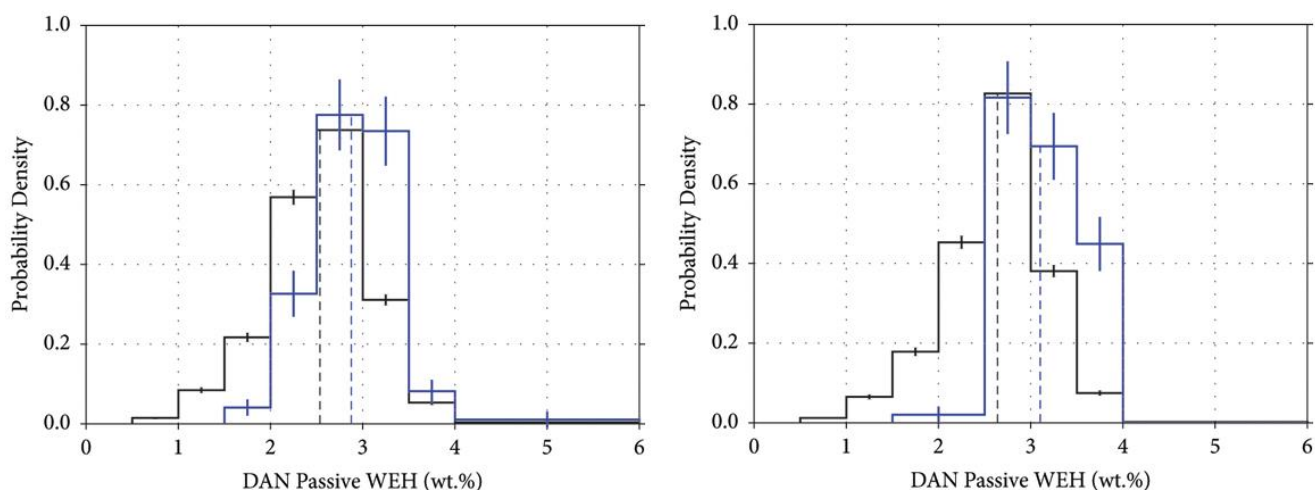


Рис. 7. Распределение значений содержания воды для случаев долго- (слева) или короткопериодического (справа) изменения «эквивалентного хлора» вдоль маршрута марсохода. Черная линия показывает распределение содержания воды для контрольной группы пикселей «CRISM», не имеющих признаков гидратированных минералов. Синяя линия представляет собой распределение содержания воды для группы пикселей «CRISM» со спектральной характеристикой полигидратированных сульфатов «высокой интенсивности». Пунктирные линии показывают средние значения содержания воды распределений.

В разделе 5.2 обсуждается связь повышения содержания воды по данным «ДАН» и выраженность спектральных характеристик гидратированных минералов. Разумно ожидать, что более сильный спектральный признак присутствия минералов на поверхности (видимый как более высокие значения в плоскости

изображения) может соответствовать более высокому содержанию воды, обнаруженному прибором «ДАН». Для проверки этого предположения тестовая группа из пикселей «CRISM», связанного с полигидратированными сульфатами, была разделена на две подгруппы. Для этих двух подгрупп были построены распределения воды и проведено их сравнение с эталонным распределением (рис. 7). Более выраженный сдвиг в сторону больших значений наблюдается для распределений воды подгруппы «высокая интенсивность» по сравнению с распределением воды для контрольной группы. Их средние значения содержания воды становятся равными $2,9 \pm 0,1\%$ и $3,1 \pm 0,1\%$ для случаев долго- или короткопериодического изменения «эффективного хлора» соответственно.

В разделе 5.3 обсуждается возможная интерпретация полученных результатов совместного анализа. Отсутствие каких-либо различий между распределениями содержания воды для интервалов расстояний без спектральных признаков исследованных типов гидратированных минералов и для интервалов расстояний со спектральными признаками филлосиликатов и моногидратированных сульфатов не обязательно приводит к расхождению между наблюдениями «CRISM» и «ДАН». Можно предположить, что по какой-то причине верхние слои с полигидратированными сульфатами имеют достаточную толщину для обнаружения с помощью прибора «ДАН», а верхние слои филлосиликатов и моногидратных сульфатов — нет.

Полученные результаты могут использоваться для применения методов нейтронного зондирования с целью поиска наиболее перспективных районов на Марсе для изучения процессов гидрологической эволюции планеты и образования на ее поверхности гидратированных минералов.

В **Заключении** приведены основные результаты выбора районов посадок космических аппаратов «Луна-25» и «Луна-27» для исследований физических условий в полярных областях Луны и также результатов совместного анализа орбитальных данных и данных с поверхности Марса.

Список литературы

1. *Saunders R. S., [et al.]*. 2001 Mars Odyssey Mission Summary // *Space Science Reviews*. – 2004. – Volume 110. – Issue 1. – P. 1–36. – DOI: [10.1023/B:SPAC.0000021006.84299.18](https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000021006.84299.18).
2. *Graf J. E., [et al.]*. The Mars Reconnaissance Orbiter Mission // *Acta Astronautica*. – 2005. – Volume 57. – Issue 2–8. – P. 566–578. – DOI: [10.1016/j.actaastro.2005.03.043](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2005.03.043).
3. *Jakosky B. M., [et al.]*. Initial results from the MAVEN mission to Mars // *Geophysical Research Letters*. – 2015. – Volume 42. – Issue 21. – P. 8791–8802. – DOI: [10.1002/2015GL065271](https://doi.org/10.1002/2015GL065271).
4. *Schmidt R.* Mars Express-ESA's first mission to planet Mars // *Acta Astronautica*. – 2003. – Volume 52. – Issue 2–6. – P. 197–202. – DOI: [10.1016/S0094-5765\(02\)00157-1](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(02)00157-1).
5. *Wilson C., [et al.]*. ExoMars Trace Gas Orbiter – science highlights // *44th OSPAR Scientific Assembly*. – Held 16–24 July, 2022. – Abstract B4.2-0003-22.
6. *Amiri H. E. S., [et al.]*. The Emirates Mars Mission // *Space Science Reviews*. – 2022. – Volume 218. – Issue 1. – Article id. 4. – DOI: [10.1007/s11214-021-00868-x](https://doi.org/10.1007/s11214-021-00868-x).
7. *Wan W. X., [et al.]*. China's first mission to Mars // *Nature Astronomy*. – 2020. – Volume 4. – P. 721–721. – DOI: [10.1038/s41550-020-1148-6](https://doi.org/10.1038/s41550-020-1148-6).
8. *Grotzinger J. P.* Mars Science Laboratory Mission and Science Investigation // *Space Science Reviews*. – 2012. – Volume 170. – Issue 1-4. – P. 5–56. – DOI: [10.1007/s11214-012-9892-2](https://doi.org/10.1007/s11214-012-9892-2).
9. *Farley K. A. [et al.]*. Mars 2020 Mission Overview // *Space Science Reviews*. – 2020. – Volume 216. – Issue 8. – Article id. 142. – DOI: [10.1007/s11214-020-00762-y](https://doi.org/10.1007/s11214-020-00762-y).
10. *Banerdt W., [et al.]*. Initial results from the InSight mission on Mars // *Nature Geoscience*. – 2020. – Volume 13. – Issue 3. – P. 183–189. – DOI: [10.1038/s41561-020-0544-y](https://doi.org/10.1038/s41561-020-0544-y).
11. *Tian H., [et al.]*. Features and mission of China's first Mars rover // *The Innovation*. – 2021. – Volume 2. – Article id. 100121. – DOI: [10.1016/j.xinn.2021.100121](https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100121).
12. *Vondrak R., [et al.]*. Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO): Observations for Lunar Exploration and Science // *Space Science Reviews*. – 2010. – Volume 150. – Issue 1–4. – P. 7–22. – DOI: [10.1007/s11214-010-9631-5](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9631-5).

13. *Mallapaty S.* 'Everybody is so excited': South Korea set for first Moon mission // *Nature*. – 2022. – Volume 608. – Issue 7922. – P. 252–253. – DOI: [10.1038/d41586-022-02066-3](https://doi.org/10.1038/d41586-022-02066-3).

14. *Lai J., [et al.]*. First look by the Yutu-2 rover at the deep subsurface structure at the lunar farside // *Nature Communications*. – 2020. – Volume 11. – Article id. 3426. – DOI: [10.1038/s41467-020-17262-w](https://doi.org/10.1038/s41467-020-17262-w).

15. *McKay C. P., Marinova M.* The Physics, Biology, and Environmental Ethics of Making Mars Habitable // *Astrobiology*. – 2001. – Volume 1. – Issue 1. – P. 89-109. – DOI: [10.1089/153110701750137477](https://doi.org/10.1089/153110701750137477).

16. *Sanin A. B., [et al.]*. Hydrogen distribution in the lunar polar regions // *Icarus*. – 2017. – Volume 283. – P. 20–30. – DOI: [10.1016/j.icarus.2016.06.002](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.06.002).

17. *Митрофанов И. Г., [и др.]*. Луна-25: первая полярная миссия на Луну // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. – 2021. – Т. 55. – № 6. – С. 497–508. – DOI: [10.31857/S0320930X21060098](https://doi.org/10.31857/S0320930X21060098).

18. *Petrukovich A. A., [et al.]*. Russian Lunar orbiter mission Luna-26 // *43rd COSPAR Scientific Assembly*. – Held 28 January – 4 February 2021. – Abstract B3.1-0014-21, id.350.

19. *Mitrofanov I. G.* Update on Luna 25 and Luna 27 Polar Landers // *21st EGU General Assembly, EGU2019*. – Proceedings from the conference held 7–12 April, 2019 in Vienna, Austria. – Id.8924.