

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

**КАФЕДРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Направление: 03.03.02 Физика

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
«ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТИТАНА»**

Студент 4 курса группы 06-711

«__» _____ 2021 г. _____ (де ла Морена К.К.)

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

«__» _____ 2021 г. _____ (Ю.А.Нефедьев)

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

«__» _____ 2021 г. _____ (А.В.Мокшин)

Казань-2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТИТАНА.....	8
1.1 Происхождение дымки.....	9
1.2 Проблески далекого озера.....	11
1.3 Структура и состав Титана	12
1.4 Дождь и метановые озера.....	15
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ.....	17
2.1 Исследование макрофигуры Титана.....	17
2.2 Метод гармонического анализа.....	32
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ФИЗИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА.....	35
3.1 SRGB модели Титана.....	35
3.2 Коэффициент самоподобия Титана.....	36
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	38
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	40

ВВЕДЕНИЕ

Титан - самый большой из спутников Сатурна, и он был открыт голландским физиком Христианом Гюйгенсом в 1655 году. Его название было предложено в 1847 году англичанином Джоном Гершелем (сыном астронома Уильяма Гершеля, открывшего Мимас и Энцелад), который предположил, что Спутники Сатурна были обозначены именами титанов, сестер и братьев Кроноса, эквивалента Сатурна в греческой мифологии.

Титан долгое время считался самым большим спутником во всей солнечной системе. Однако это единственный спутник в Солнечной системе, который имеет значительную атмосферу, открытый в 1944 году голландским астрономом Джерардом Койпером с помощью спектроскопических наблюдений, которые обнаружили присутствие метана и аммиака. Независимо от толщины его плотной и непрозрачной атмосферы, истинный диаметр Титана, составляющий около 5150 километров, немного меньше, чем у Ганимеда, спутника Юпитера. Несмотря на это, Титан больше планеты Меркурий.

Актуальность этой работы заключается в том, что в настоящее время отсутствуют достоверные исследования эволюционных параметров поверхности Титана. Решение этой проблемы является современной и актуальной задачей, особенно если учитывать тот факт что Титан, по оценкам ученых, является одним из перспективных мест для будущего его освоения. Настоящее исследование позволит изучить структуру Титана более точно. Причиной отсутствия до сих пор подобных исследований объясняется их сложностью и необходимости в автоматизации процесса анализа.

Целью данной дипломной работы является создание карты распределения коэффициентов самоподобия по отношению к поверхности Титана и разработка автоматизированного программного комплекса для выполнения данного процесса. Для этого был выполнен анализ спутниковых

альтиметрических данных поверхности Титана с использованием метода гармонического разложения по сферическим функциям.

Новизна проводимых исследований состоит в том, что в процессе анализа используется авторский метод исследований и полностью автоматизирован процесс построения карт распределения коэффициента самоподобия по отношению к поверхности Титана. В результате получены новые значения эволюционных параметров для этого спутника.

Достоверность результатов, полученных в дипломной работе подтверждается тем, что в качестве наблюдательных данных использованы результаты, получены спутниковой миссией «Кассини-Гюйгенс», их обработка проведена точным авторским методом, и полученные параметры подтверждаются данными приведенными в аналогичных научных работах по исследованию планет и их спутников.

На защиту выносятся:

- Анализ планетофизических параметров Титана и их исследования
- Описание метода исследования альтиметрических спутниковых данных и алгоритм авторского метода анализа физической поверхности спутника Сатурна
- Обсуждение основных полученных в работе результатов и выводов.

ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТИТАНА.

Мало что было известно о Титане до 3 сентября 1979 года, когда это спутник наблюдали с расстояния 3,6 миллиона километров американским зондом Pioneer 11 во время его пролета над Сатурном. В связи с интересом, вызванным полученными данными в научном сообществе, диспетчеры зонда "Voyager-1", направлявшегося к Сатурну и оснащенного гораздо более совершенными инструментами, решили изменить траекторию космического корабля, чтобы иметь возможность летать над Титаном, таким образом жертвуя возможностью посещения планет Урана и Нептуна (миссия позже завершена его близнецом Voyager 2).

12 ноября 1980 года "Voyager-1" прошел менее чем 124 200 километров от южного полюса Сатурна, используя гравитационную помощь газового гиганта, чтобы покинуть плоскость эклиптики и пролететь над Титаном на расстоянии менее 4000 километров. За несколько минут, пока совершалось сближение, астрономы смогли узнать о Титане больше, чем за триста лет с момента его открытия. Зонд также подтвердил наблюдения своего предшественника Pioneer 11, которые показали, что южное полушарие Титана было немного ярче, чем его северное полушарие, из-за глобальных сезонных эффектов. Однако среди членов научной группы миссии было глубокое разочарование, поскольку зонд не смог наблюдать какие-либо детали поверхности Титана, скрытые за плотным фотохимическим «туманом», основной слой которого составляет около 300 километров в высоту.

В 1994 году группа астрономов использовала инфракрасные камеры космического телескопа Хаббл для наблюдения за поверхностью Титана. На таком расстоянии полученные изображения были не очень детализированными;

однако им удалось выявить хорошо отражающую область размером примерно с Австралию, которую называли «Занаду».

После семилетнего межпланетного путешествия 1 июля 2004 года американский зонд «Кассини» вышел на орбиту Сатурна для изучения его атмосферы, колец, магнитосферы и спутников. Основная миссия включала в себя в общей сложности 45 облетов Титана с близкого расстояния, первый из которых произошел 26 октября 2004 г. На расстоянии 1200 км зонд получил первые изображения и зондирование поверхности Титана, используя свой радар с синтезированной апертурой и камеры в инфракрасном диапазоне длин волн, чтобы прорезать «туман», закрывающий спутник.

Европейский зонд «Гюйгенс», находившийся на борту «Кассини», был выпущен 25 декабря 2004 года и направился к Титану. 14 января 2005 года зонд достиг верхних слоев атмосферы Титана, мягко приземлившись на его поверхность после 2-часового 28-минутного спуска с парашютом.

Первые четкие изображения поверхности были получены на высоте ниже 40 километров, открыв необычный мир, во многих отношениях похожий на Землю, особенно с точки зрения метеорологии, геоморфологии и активности рек. На фотографиях были явные доказательства эрозии из-за потока жидкости, возможно, метана, на поверхности Титана.

Благодаря измерениям, проведенным приборами зонда, было установлено, что ветры дуют преимущественно в направлении вращения Титана, с запада на восток, со скоростью более 450 километров в час на высоте 120 километров над поверхностью. Скорость ветров уменьшалась, когда они спускались в атмосферу, меняя направление незадолго до того, как они достигли поверхности. Неожиданный слой турбулентности был обнаружен на высоте от 100 до 60 километров.

Зонд также удивил ученых, обнаружив второй, нижний слой ионосферы, высотой от 140 до 40 километров, в котором пик электропроводности был обнаружен на высоте около 60 километров. Кроме того, инструменты Гюйгенса могли обнаруживать сигналы молний в атмосфере Титана.

Вопреки предсказаниям атмосферных моделей до посадки Гюйгенса, углеводородный «туман», характерный для Титана, обнаруживался зондом на протяжении всего спуска на поверхность. Считалось, что атмосфера будет свободна от этого «тумана» под нижними слоями стратосферы, высотой около 60 километров. К счастью, «туман» был достаточно прозрачным, чтобы дать четкое изображение поверхности с высоты 40 километров.

Гюйгенс также провел исследования атмосферы и поверхности Титана, в том числе первые анализы на глубине ниже 150 километров, которые подтвердили наличие сложной органической химии как в газовой, так и в твердой фазах. Это укрепило теорию о том, что Титан является многообещающим местом для наблюдения за химическими процессами, за которыми следуют молекулы, которые могли быть основными строительными блоками аминокислот, предшественниками появления жизни на Земле.

Зонд опустился на границу между ярким ледяным ландшафтом, размытым речной деятельностью, и более темным участком, похожим на высохшее русло реки или озера. Гюйгенс приземлился в последнем районе, где поверхность имела консистенцию, похожую на влажный песок, и сфотографировал бесчисленные гальки ледяной воды примерно до шести дюймов в диаметре, разбросанные вокруг места посадки. Пенетрометры и акселерометры показали, что зонд приземлился на один из этих камешков, выбив его, а затем проник примерно на четыре дюйма в поверхность. После приземления спектрометр обнаружил испарение метана с поверхности из-за тепла, выделяемого зондом. Кроме того, обнаружение аргона 40 на поверхности

указывает на то, что Титан испытал интенсивную внутреннюю геологическую активность, которая, возможно, продолжается и сегодня.

Одной из основных целей миссии Гюйгенс было получение измерений и наблюдений на месте атмосферы и поверхности Титана, чтобы сравнить их с данными, сделанными дистанционно с помощью зонда Кассини. Видимое и инфракрасное излучение с поверхности Титана, обнаруженное во время пролета Кассини, сильно зависит от свойств атмосферы, которая находится между датчиками и приборами орбитального аппарата и поверхностью Титана. С данными, полученными зондом Гюйгенс, астрономы в будущем смогут скорректировать наблюдения, сделанные Кассини, с учетом влияния атмосферы Титана.

До того, как Гюйгенс приземлился, мы с трудом могли представить, как будет выглядеть поверхность Титана. Изображения и данные, полученные зондом во время его спуска, были захватывающими и дали ответы на многие вопросы о Титане. Но они также оставили открытыми многие другие вопросы, анализ которых будет занимать ученых-планетологов на десятилетия.

Миссия "Кассини", которая летала над Сатурном и его спутниками в течение двадцати лет, продемонстрировала огромную сложность и красоту Титана, спутника с планетными характеристиками.

Всего двадцать лет назад мы могли подытожить в нескольких предложениях всё, что мы знали о Титане, самом большом спутнике Сатурна: что у него атмосфера (Комас Сола, 1908), что она содержит метан (Джеральд П. Койпер, 1944), что температура его поверхности 179 градусов ниже нуля, была слишком низкой для развития жизни (миссия Pioneer 11, 1979), и что весь спутник покрыт слоем плотного тумана, непроницаемого для оптических телескопов (миссия Voyager 1, 1980). Однако этот любопытный спутник с атмосферой планеты и, как считалось, метановыми озерами на его поверхности вызвал достаточно любопытства, поэтому миссия Кассини, предназначенная для полета над

Сатурном и его спутниками, включала спускаемый модуль Гюйгенс, который приземлился на него.

После запуска в 1997 году «Кассини» дважды пролетел мимо Венеры и однажды - над Землей и пересек пояс астероидов, чтобы потом пролететь над Юпитером в декабре 2000 года. С помощью этой гравитационной силы «Кассини» достиг Сатурна в середине 2004 года, а его зонд «Гюйгенс» успешно спустился на Титан. В течение 13 лет миссия отправляла бесценные данные, в том числе топографическую карту Титана. Теперь мы знаем часть того, что Титан скрывает под этой дымкой (озера, дюны, горы и реки), что составляет его атмосферу и даже то, на что он может быть похож внутри.

1.1. Происхождение дымки

Плотность атмосферы Титана превышает плотность Земной, и давление на поверхность значительно выше, чем на нашей планете, подобное давлению на дне плавательного бассейна. Как и в атмосфере Земли, в атмосфере Титана преобладает азот, но остальные компоненты, такие как метан и другие органические соединения, имеют большие различия.

Пропорция этих компонентов (98,4% азота, 1,6% метана, 0,1-0,2% водорода и небольшие количества других соединений) была хорошо изучена благодаря миссии Кассини, но именно данные одного из ее пролетов сильно удивили учёных, когда было обнаружено существование газа, еще не занесенного в каталоги верхних слоев атмосферы Титана.

Излучение этого неопознанного соединения, которое давало очень интенсивный сигнал в инфракрасном диапазоне (3,28 микрона), присутствовало в дневные часы спутника на расстоянии от шестиста до тысячи двуста пятидесяти километров от его поверхности, с пиком, особенно интенсивным на

девятисот пятидесяти километрах от его поверхности. Находка стала возможной благодаря данным спектрографа VIMS на борту Кассини.

Молекула газа, например метана, может поглощать солнечный свет, возбуждаться и впоследствии излучать свет с длиной волны, характерной для этой молекулы. Таким образом, анализируя выбросы атмосферы, в данном случае Титана, идентифицируют присутствующие соединения. И анализ этого интенсивного излучения в инфракрасном диапазоне помог решить открытые на протяжении десятилетий вопросы, связанные с густой дымкой, которая покрывает поверхность Титана и нагревает атмосферу, предотвращая ее конденсацию и рассеивание.

Десятилетия назад было высказано предположение, что слой дымки в нижних слоях атмосферы Титана образован сложными органическими молекулами, а в 2007 году было высказано предположение, что эти молекулы могут образовываться в верхних слоях атмосферы, на несколько сотен километров выше места их проживания. Современные исследования подтверждают обе гипотезы.

Эти соединения поглощают ультрафиолетовые фотоны Солнца, которые очень энергичны, и быстро перераспределяют энергию внутри и повторно излучают ее в ближнем инфракрасном диапазоне.

Используя модель перераспределения этой энергии, исследователи смогли объяснить обнаруженный сигнал на 3,28 мкм и вычислить количество полициклических ароматических углеводородов, присутствующих в верхних слоях атмосферы Титана. Это количество оказалось удивительно высоким, от двадцати до тридцати тысяч. ПАУ на кубический сантиметр.

Этот результат согласуется с обнаружением в 2007 году, также миссией Кассини, небольших концентраций бензола, а также положительных и отрицательных ионов неизвестного состава в верхних слоях атмосферы спутника, что позволяет предположить, что соединения, составляющие дымку

Титана, образовывались несколькими способами. в сотне километров над ним. Эта гипотеза предполагала образование большого количества ароматических соединений на большой высоте и теперь доказано, что ПАУ являются нейтральным аналогом и гораздо более распространены небольшого количества ионов, обнаруженных в 2007. Таким образом, предоставляются ключевые доказательства состава и происхождения дымки Титана.

1.2. Проблески далекого озера

До прибытия Кассини радиолокационные наблюдения с Земли и космического телескопа Хаббл проникли сквозь непрозрачную дымку и выявили неоднородный характер поверхности Титана. Кроме того, со времен миссий «Voyager» считалось, что низкие температуры атмосферы могут превращать метан в капли дождя, но было известно, были ли озера частью этой нерегулярной орографии.

В этом смысле данные «Кассини» поначалу разочаровали, так как не показали признаков жидкости на поверхности. Безосновательное разочарование, так как при первом пролете был изучен едва ли 1% поверхности спутника, нерепрезентативная выборка (к примеру, пустыня Сахара покрывает более 1% земного шара, и внешний наблюдатель мог бы сделать вывод, что нет ни капли воды на поверхности Земли после полета над ней).

Однако в середине 2005 года на южном полюсе Титана была обнаружена темная область площадью около 15 000 квадратных километров в форме следа. На радаре гладкие участки казались затемненными, поэтому считалось, что это может быть первый кандидат на озеро на Титане. В середине 2008 года был опубликован спектроскопический анализ, подтверждающий, что это жидкая поверхность, состоящая из этана и, возможно, метана, азота и других

углеводородов, что стало настоящей вестью, поскольку это был первый стабильный жидкий резервуар за пределами нашей планеты. Озеро, которое, как стало известно, имеет чрезвычайно гладкую поверхность с максимальным перепадом высоты в три миллиметра и средней глубиной от 0,4 до 3,2 метра и максимальной 7,4 метра.

Но до того, как это подтвердилось, количество кандидатов в озера увеличилось: пролет Кассини над северным полюсом Титана в 2006 году выявил существование более семидесяти пяти затемненных областей протяженностью от одного до семидесяти километров, которые выглядели именно так, как озера, расположенные в топографических дезориентациях и с каналами вокруг них.

Кроме того, в июле 2009 года было получено зеркальное отражение, изображение, которое искали десятилетиями и представляло собой интенсивную вспышку, создаваемую настолько гладкими поверхностями, что они отражаются, когда на них падает свет. Поскольку существование озер подтверждено, было необъяснимо, что это изображение не было получено, но позже мы узнали, почему: большинство озер Титана расположены на северном полюсе, где с момента прибытия Кассини была зима (год Сатурна, и, в более широком смысле, Титана, составляет 29,5 земных лет). Итак, у нас был один из ингредиентов зеркального отражения, озера, но света не хватало, и он начал освещать северный полюс в 2009 году. И чтобы получить зеркальное отражение необходимо правильное выравнивание между солнечным светом, озером и кораблем, что часто происходит в экваториальных и средних широтах, но реже на полюсах.

1.3. Структура и состав Титана

Когда мы думаем о спутниках на ум приходит Луна со своими огромными кратерами, похожими на древние военные раны. И вопрос очевиден: есть ли на Титане кратеры? Да, но мало. В ходе обширного исследования, в ходе которого было проанализировано 22% поверхности спутника, было выявлено существование пяти подтвержденных кратеров и сорока четырех других кандидатов, которые могли представлять собой эродированные версии первых кратеров. Также было показано неравномерное распределение со слегка кратеризованными регионами, такими как северный полюс, и другими с избыточным количеством ударов, такими как район Ксанаду (район экватора, который выделяется своим высоким альбедо).

Это небольшое количество кратеров, в отличие от других спутников, таких как Рея, на поверхности которых наблюдаются сотни следов ударов, типично для молодых геологически активных поверхностей.

На нашей планете ряд явлений (тектоника плит, извержение вулканов, образование ледников и рек ...) изменили поверхность за миллиарды лет, и аналогичные процессы могут происходить на Титане, хотя раскрыть их непросто. На изображениях «Кассини» видны русла рек, но согласно анализу, опубликованному в 2012 году, речная активность на Титане вряд ли вызывает эрозию земли, поэтому она не должна быть преобладающим фактором преобразования поверхности. Другим возможным источником омоложения поверхности являются криовулканы или вулканы, которые изгоняют воду, аммиак или метан вместо расплавленной породы. Однако у нас до сих пор нет кандидатов, которые можно без сомнения интерпретировать как криовулканы, хотя известна цепь из трех гор под названием Сотра Патера, которая кажется наиболее многообещающей. Точно так же в 2006 году было обнаружено то, что можно было интерпретировать как горный хребет длиной около 150

километров, что могло бы представлять собой возможное указание на тектоническую активность на Титане, но опять же, данные не являются однозначными.

Фактически, существуют противоречивые мнения по этому поводу и дебаты, в которых Ральф Лоренц (Лаборатория прикладной физики) и Джеффри Мур (Исследовательский центр Эймса) выдвинули аргументы в пользу и против какого-либо рода внутренней активности на Титане. В то время как первый утверждал, что Титан был геологически живым благодаря признакам вулканической и тектонической активности, Джеффри Мур утверждал, что активность на спутнике ограничивалась факторами над его поверхностью, такими как процессы, производимые жидкостью (дождь и реки), ветер и удары метеоритов.

Мур показал, что жидкая эрозия может привести к тому, что кратер в конечном итоге будет выглядеть как вулканический конус, и в отличие от версии Титана с высокой температурой и внутренней активностью, которую он объявил «гипотезой Тритона-Титана-Марса». По его словам, в прошлом на Титане (возможно, около миллиарда лет назад) метан и азот, которые сегодня составляют атмосферу, были заморожены на поверхности (по аналогии с тем, что происходит на Тритоне, самом большом спутнике Нептуна, летучие вещества которого попали в ловушку на поверхности льда). Увеличение яркости Солнца или эпизод метеоритной бомбардировки может произвести достаточно тепла, чтобы сублимировать метан и азот и сформировать атмосферу, которая изначально содержала гораздо больше метана.

Без пополнения запасов метана этот компонент в конечном итоге истощился бы примерно через миллиард лет, поскольку он разлагается на другие элементы (более тяжелые углеводороды), которые, среди прочего, образуют частицы, составляющие дюны, наблюдаемые на экваторе. Метан будет истощен, и

атмосферное давление упадет, так что конечные условия будут напоминать сегодняшние Марсианские условия.

Таким образом, и хотя миссия «Кассини» предоставила нам важную информацию для углубления нашего понимания Титана, все еще есть убедительные доказательства некоторых аспектов этого оранжевого мира.

1.4. Дождь и метановые озера

С плотной атмосферой и метановым циклом, аналогичным земному гидрологическому циклу (с облаками, дождем и жидкостью на поверхности), характеризующимся очень низкой температурой 179 градусов ниже нуля на поверхности, считается, что Титан представляет условия, похожие на те, что могла иметь первобытная Земля до появления жизни.

Однако существует проблема с метаном, центральным элементом этого цикла, которую можно подытожить следующим образом: из-за солнечной радиации метан подвергается фотодиссоциации в атмосфере, которая превращает его в этан. Метан и этан образуют облака, которые осаждаются на поверхности и заполняют озера и образуют реки. Более сложные молекулы также образуются в верхних слоях атмосферы, которые опускаются вниз и образуют туман, покрывающий весь спутник, в результате чего образуются аэрозоли, образующие экваториальные дюны.

Таким образом, метан расходуется: подсчитано, что максимум за сто миллионов лет солнечное излучение должно преобразовать метан в более сложные углеводороды, поэтому должен существовать механизм пополнения этого соединения (если только он является, как предполагают некоторые исследователи, «временным» элементом, в прошлом выделявшимся в больших количествах и со временем закончившимся).

Хотя некоторые ученые предполагают существование возможных организмов, производящих метан (на Земле от 90 до 95% метана имеет биологическое происхождение), наиболее общее мнение указывает на геологические процессы замены метана, среди которых выделяются вулканическая активность, испарение озер (хотя самые последние исследования подтверждают, что этого недостаточно для балансировки цикла) и, наконец, существование внутреннего океана, который медленно высвобождает накопленный метан.

Этот последний вариант подтверждается различными косвенными доказательствами.

В 2014 году было опубликовано исследование гравитационного поля Титана: шестнадцатидневная орбита спутника вокруг Сатурна является эллиптической, так что расстояние между ними варьируется от 1,19 до 1,26 миллиона километров; поэтому Титан испытывает колебания, вызванные гравитационным притяжением планеты. В этом случае расчеты указали на сплошные приливы высотой более десяти метров, и исследователи подсчитали, что, если бы внутренняя часть Титана была твердой, приливы не должны были бы превышать один метр в высоту. По их словам, объяснение, которое лучше всего соответствует данным, - это существование подземного океана.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

2.1. Исследование макрофигуры Титана

В подобных работах по анализу поверхности обычно проводится ручной анализ топографической карты, но с учетом большого количества необходимого времени мы посчитали такой метод слишком затратным, поэтому было принято решение получить эти данные компьютерным методом. Выбранный в итоге нами метод состоит в анализе цветов определенных точек топографической карты Венеры программой, написанной на языке программирования Python 3.

Программа придумана для того, чтобы определить на какой высоте находятся разные точки карты в определенном интервале. Она написана на языке программирования Python 3.

Эта программа является наследником программы, которая была использована для того чтобы провести подобный анализ поверхности Венеры в рамках курсовой работы.

Самым большим недостатком той программы являлся тот факт, что ее приходилось переписывать под каждое тело, что было неудобно для ее использование астрономами, не имеющими опыта в программировании.

В этом случае вычисление проводит нейронная сеть, которая тренируется по легенде. Таким образом упрощается процесс расчета но временная сложность ухудшается, так что процесс вычисления будет длиться в среднем 1 – 1.5 минута.

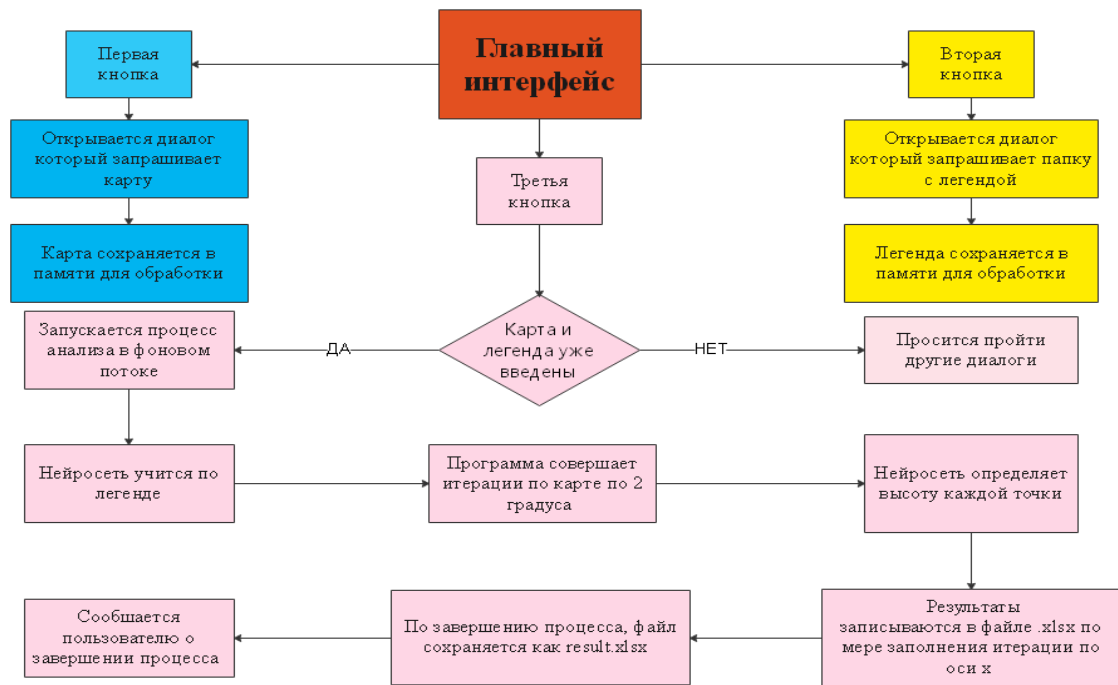


Рис. 2.1: Алгоритм работы программы

Перед тем как приступить к её объяснению следует отметить, что она состоит в основном из двух файлов, один из которых отвечает за функциональность самой программы, а другой за графическую оболочку. В этом отчёте речь только пойдёт о первом.

Работа самой программы заключается в том, что она сначала вычитывает информацию с фрагментов легенды, введённых самим пользователем, выявляет взаимосвязь с помощью алгоритмов машинного обучения и потом составляет таблицу результатов в формате excel, определив высоту на каждой точке благодаря вышеупомянутому обучению.

Для корректной работы программы необходимо заранее обработать карту к анализу, удалив на графическом редакторе лишние чёрные линии которые

могут привести нашу нейронную сеть к заблуждению, или выбрать карту на которой изначально эти линий отсутствуют.

Более того, данную карту необходимо обрезать так, чтобы программа не анализировала ничего лишнего.

Вторым и последним необходимым условием для корректной работы программы является папка, в которой будут содержаться элементы легенды, в формате .jpeg, где название файла – их высота.

Под «элемент легенды» подразумевается кусок легенды который содержит фрагмент с определённой высотой без лишних цветов.

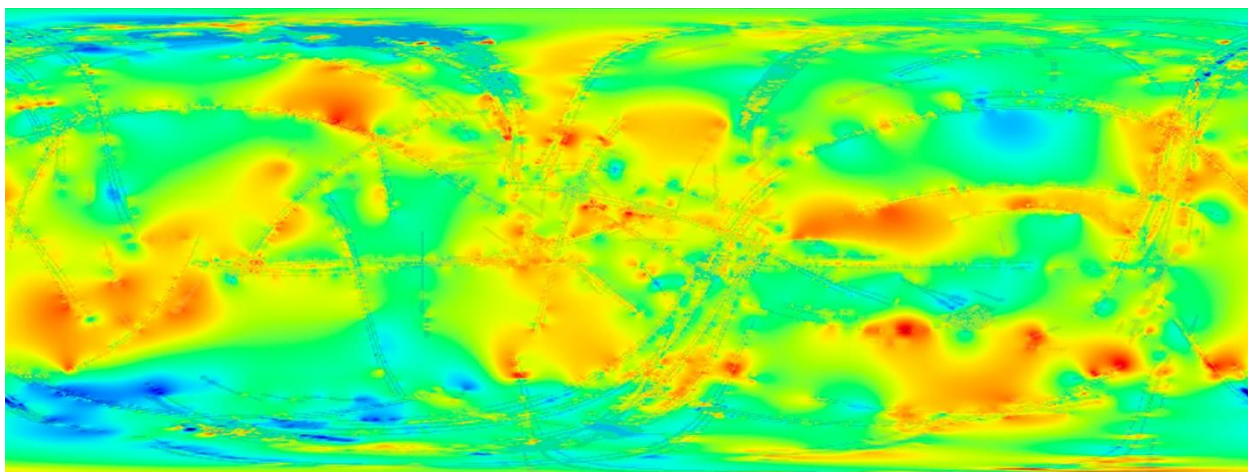


Рис. 2.2: Пример подходящей карты для корректной работы программы

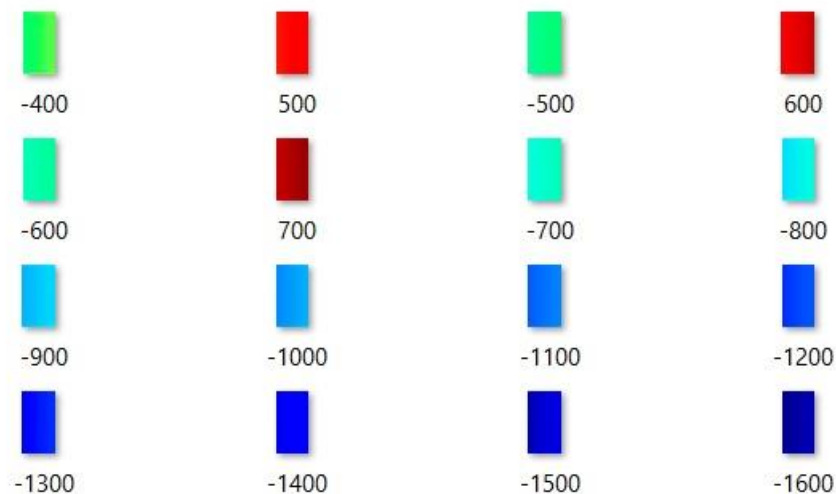


Рис. 2.3: Пример фрагмента легенды, для корректного обучения нейросети

После этих выяснений можно приступить к объяснению самой программы.

```

1  from interface_1 import Ui_Dialog
2  from PyQt5.QtGui import *
3  from PyQt5.QtWidgets import *
4  from PyQt5.QtCore import *
5  import sys
6  from matplotlib.image import imread
7  from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
8  from openpyxl import Workbook
9  import numpy as np
10 import os
11 import traceback

```

Рис. 2.4: Импортируемые библиотеки

Эти команды просто импортируют библиотеки, которые будут использованы при запуске программы. Графическая оболочка была составлена в отдельном файле под названием `interface_1`, с использованием технологий PyQt5. Поэтому от него импортируем сам класс `Ui_Dialog`. В следующие строки импортируем элементы PyQt5 которые участвуют в процессе анализа. Sys и os позволяют взаимодействовать с оперативной системой компьютера. Благодаря

imshow, топографическую карту можно представить в виде трехмерной матрицы. Ещё импортируем numpy для математических операции, и Workbook для удобной работы с excel. RandomForestClassifier является, как раз, моделью машинного обучения на который будет опираться наша программа. Traceback нам облегчит работу с разными потоками одновременно.

```
13 file_path = ''
14 folder_path = ''
15 got_file = False
16 got_directory = False
17 threadpool = QThreadPool()
18 app = QApplication(sys.argv)
19 Dialog = QDialog()
20 ui = Ui_Dialog()
21 ui.setupUi(Dialog)
22 Dialog.show()
23 ui.label_3.setText("Выбирайте, пожалуйста, карту")
```

Рис. 2.5: Глобальные переменные

Следующий фрагмент настраивает глобальные переменные которые будут отвечать за состояние программы. Программа запускается и в своём исходном состояний потребует от пользователя введение карты. За включение карты и легенды в программу отвечают следующие функции, определяемые в файле interface_1.py.

```
232 def browse_image(self):
233     fname = QFileDialog.getOpenFileName(self, 'Открывайте карту', str(Path.home()), "Image files (*.jpg)")
234     return fname
235
236 def browse_folder(self):
237     dname = QFileDialog.getExistingDirectory(self, 'Открывайте папку с легендой', str(Path.home()))
238     return dname
```

Рис. 2.6: Функции диалога

Эти функции были определены в файле в котором описывается функциональность графической оболочки. При запуске, они открывают диалог

в котором сам пользователь будет вводить вручную топографическую карту и папку с частями легенды, как показано на рисунке 7.

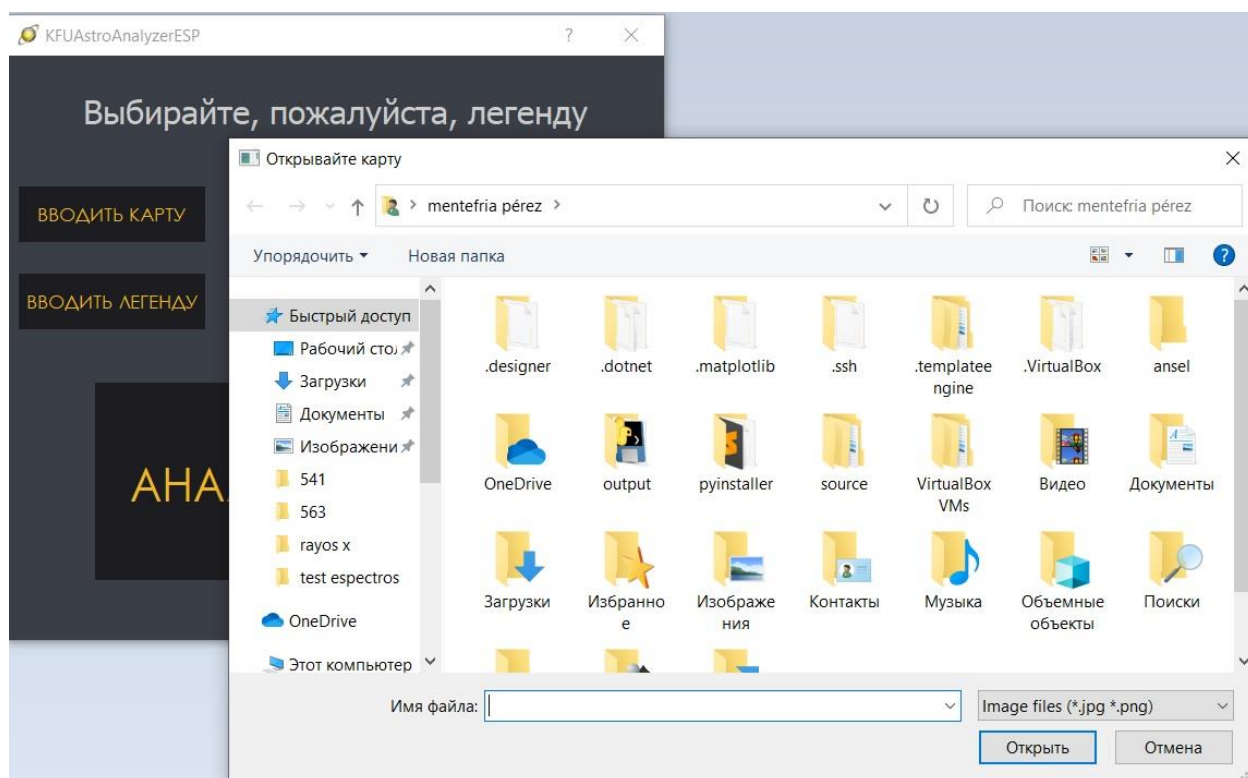


Рис. 2.7: Работа диалога

Эти функции возвращают программе ссылку на вышеупомянутые элементы в компьютере пользователя.

После их выяснений можно продолжить объяснение основного файла.

Функциональность программы разбита на разные функции, для того чтобы способствовать работе разных функции при нажатии разных кнопок и назначить выполнение сложных функции разным потокам, которые будут выполнять эти функции параллельно. Это необходимо, поскольку при выполнении сложных функции только основным потоком программы, она будет зависать во время выполнения сложных вычислений, что негативно отразится на опыт пользователя.

Сравнение работы программы при выполнении сложной функции основным потоком и параллельным потоком приведено на рисунке 8.

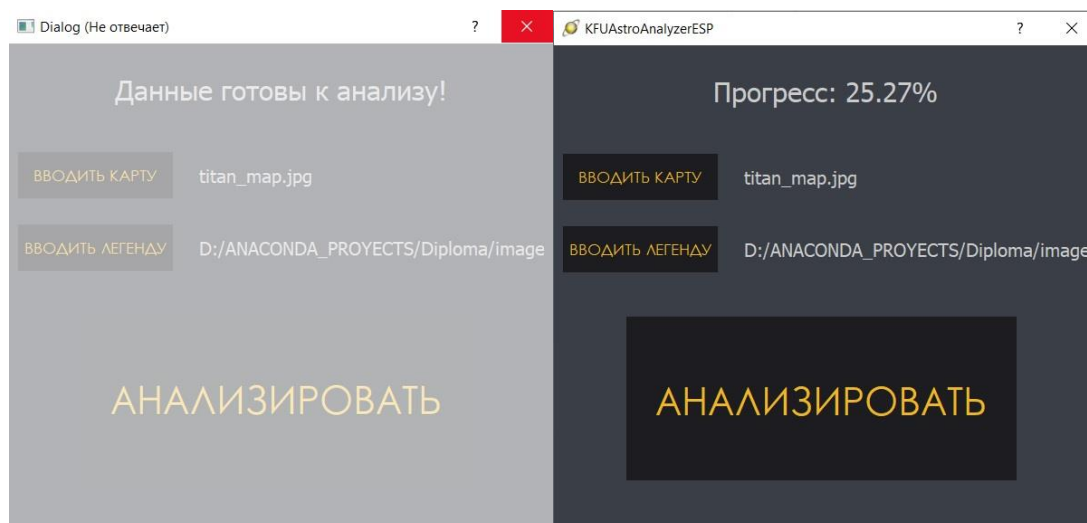


Рис. 2.8: Сравнение работы программы при сложном вычислении только основным потоком (слева) и с многопоточностью (справа)

Очевидно, функции для получения ссылок на карту и легенду будут привязаны к первой и второй кнопкам. Поскольку их работа очень простая (они просто возвращают строку с ссылкой на объекты), они не нуждаются в многопоточности.


```

25 def get_file():
26     global file_path
27     global got_file
28     path = f"{ui.browse_image()[0]}"
29     palabras = path.split('/')
30     for part in palabras:
31         file_path += part
32         if part != palabras[-1]:
33             file_path += '\\'
34     ui.label.setText(f"{palabras[-1]}")
35     if path != '':
36         got_file = True
37     if got_file and got_directory:
38         ui.label_3.setText("Данные готовы к анализу!")
39     else:
40         ui.label_3.setText("Выбирайте, пожалуйста, легенду")

```

Рис. 2.9: Функция по получению карты

Эта функция модифицирует глобальные значения которые указывают на ссылку на карту и на её присутствие, именно поэтому их необходимо включить в начале программы ключевым словом `global`. Строку, полученную вышеупомянутой функцией `browse_image`, находящейся в файле `interface_1`, модифицируем так, чтобы функция `imread` в процессе анализа (см. рис. 12) могла запускаться без проблем. Глобальные переменные `file_path` и `got_file` обновляются, и на главном тексте показываются пользователю дальнейшие шаги для обработки карты, в соответствии с введенными данными.


```

42 def get_directory():
43     global folder_path
44     global got_directory
45     path = f"{ui.browse_folder()}"
46     folder_path = path
47     ui.label_2.setText(f"{path}")
48     if path != '':
49         got_directory = True
50     if got_file and got_directory:
51         ui.label_3.setText("Данные готовы к анализу!")
52     else:
53         ui.label_3.setText("Выбирайте, пожалуйста, карту")

```

Рис. 2.10: Функция по получению дегенды

Эта функция, аналогично функции `get_file`, вызывает своего аналога с файла `interface_1` (в этом случае функцию `browse_folder`). На этот раз не требуются никаких модификации ссылки, поэтому функция просто присваивает глобальным переменным `folder_path` и `got_directory` соответствующие значения, и показывает пользователю дальнейшие шаги через главный текст.

Следующая функция является важнейшей функцией программы, и именно она будет заниматься обучением нейросети, анализом топографической карты и составлением файла `excel` с результатами. Из-за этого, запуск этой функции занимает от минуты времени, необходимо её запускать в отдельном потоке (см. рис. 19).

```

55  def modelling(progress_callback):
56      ui.label_3.setText('Пожалуйста, подождите')
57      global got_file
58      global got_directory
59      if got_file and got_directory:
60          count = 0
61          progress = 0
62          global file_path
63          global folder_path
64          wb = Workbook()
65          dest_filename = 'result.xlsx'
66          ws1 = wb.active

```

Рис. 2.11: Определение элементарных переменных функции modelling

Функция принимает в аргумент параметр `progress_callback`, который будет информировать пользователю о статусе завершения анализа. Сначала проверяет присутствие необходимых данных для анализа, и потом создаёт локально файл `.xlsx` (excel) на который будут записываться полученные результаты (см. работу класса `Workbook`).

```

67      ws1.append([])
68      ws1.append(['координаты каждой точки и их высоты'])
69      ws1.append([])
70      line = list()
71      for i in range(181):
72          line += ['долгота', 'широта', 'высота', '\t']
73      ws1.append(line)
74      x_train = list()
75      y_train = list()
76      x_pixel = 0
77      y_pixel = 0
78      data = list()
79      height = 0
80      titan = imread(str(file_path))

```

Рис. 2.12: Оформление оглавления и определение элементарных элементов

Функция добавляет в файл с результатами оглавление под названием «координаты каждой точки и их высоты», и добавляет название каждого

столбца с пробелом. Тоже объявляются переменные в которых будут храниться данные для обучения нейросети и её предсказания. Переменной titan будет соответствовать трёхмерная матрица в которой будут содержаться данные о топографической карте. Изображение в матрицу переводится благодаря функции imread.

```
82         for file in os.listdir(folder_path):
83             legend = imread(folder_path + '\\' + file)
84             for i in range(legend.shape[0]):
85                 for j in range(legend.shape[1]):
86                     x_train.append(legend[i][j])
87                     y_train.append(int(file[:-4]))
88
89         model = RandomForestClassifier(n_estimators=100)
90         model.fit(x_train, y_train)
```

Рис. 2.13: Обработка входных данных и тренировка нейросети

В этом фрагменте программа завершает итерации по каждому файлу легенды, который был включён в папке, которая была введена на анализ. Для каждой части легенды присваивается значение RGB каждого пиксела значению высоты каждой части легенды. Эти значения заполняют списки x_train (значения RGB) и y_train (значения высоты).

Самой подходящей моделью для нашего анализа стал RandomForestClassifier с параметром n_estimators=100. Для выбора модели был произведён анализ на платформе Jupyter Notebook, и выбранная модель с выбранными настройками показала лучше всех, с точностью больше 99%. В ходе данного анализа были протестированы 9 моделей с разными конфигурациями параметров для решения именно этой задачи.

С помощью функции fit тренируем её обработанными данными. Это делается довольно быстро, поскольку библиотека sklearn (в том числе, и модель

RandomForestClassifier) написана на языке программирования C, один из быстрых.

Дальше определяются переменные dx и dy, которые отвечают за размер шага итерации, которые совершаются, соответственно, по осям x и y введённой карты.

```
92     dx = (titan.shape[1] - 1) / 359
93     dy = (titan.shape[0] - 1) / 180
94     for y_degree in range(90, -91, -2):
95         line.clear()
96         for x_degree in range(-180, 180, 2):
97             data = [titan[int(y_pixel), int(x_pixel)]]
98             height = model.predict(data)[0]
99             line += [x_degree, y_degree, height, '\t']
100            x_pixel += dx
101        count += 1
102        progress = count / 91
103        progress_callback.emit(progress)
104        ws1.append(line)
105        y_pixel += dy
106        x_pixel = 0
107    wb.save(filename = dest_filename)
```

Рис. 2.14: Составление таблицы с результатами

В двойном цикле совершаются итерации по обеим осям. В каждой итерации, нейросеть предсказывает значение высоты на основе значений RGB в определённой точке. Это самый затратный и долгий процесс, именно поэтому после каждой итерации по оси y поток, завершающий эту функцию, отправляет сигнал со значением статуса основному потоку, который другой параллельный поток обрабатывает и показывает на главном тексте графической оболочки (см рис. 15 и 18).

При завершении, функция записывает результаты в файле excel и сохраняет его в такой же папке, в которой находится программа.

```

109 def progress_fn(percent):
110     ui.label_3.setText(f'Прогресс: {percent * 100:.2f}%')

```

Рис. 2.15: Обработка сигнала о прогрессе

Следующая функция занимается обработкой сигнала, подаваемого параллельным потоком, чтобы вывести на экран значение прогресса в процентах с точностью до второго знака после запятой.

```

112 class WorkerSignals(QObject):
113     finished = pyqtSignal()
114     error = pyqtSignal(tuple)
115     result = pyqtSignal(object)
116     progress = pyqtSignal(float)

```

Рис. 2.16: Определение сигналов

Дальше определяются виды сигналов, которыми потоки общаются между собой. Для этого необходимо создавать класс, который наследует от `QObject` и параметрами которого будут являться разные виды сигналов.

```

119 class Worker(QRunnable):
120     def __init__(self, function, *args, **kwargs):
121         super(Worker, self).__init__()
122         self.function = function
123         self.args = args
124         self.kwargs = kwargs
125         self.signals = WorkerSignals()
126         self.kwargs['progress_callback'] = self.signals.progress
127
128     @pyqtSlot()
129     def run(self):
130         try:
131             self.function(*self.args, **self.kwargs)
132         except:
133             traceback.print_exc()
134             exctype, value = sys.exc_info()[:2]
135             self.signals.error.emit((exctype, value, traceback.format_exc()))
136         else:
137             self.signals.result.emit('success')
138         finally:
139             self.signals.finished.emit()

```

Рис. 2.17: Определение потоков

Следующим объектом, определяемым в нашей программе является Worker, то есть основа для самых потоков. Его параметрами станут передаваемая потоку функции для её выполнения, параметры самой передаваемой функции и ранее определяемые сигналы. Тоже заранее создаётся сигнал под названием progress_callback, который будет передавать статус выполнения функции modelling (см. рис. 11). При запуске потока автоматически запускается функции run, которая стандартная для всех потоков. Она обязательно должна сопровождаться декоратором `pyqtSlot`, так как потоки и сигналы наследуют от классов библиотеки PyQt5.

```
141 def thread_complete():
142     global got_file
143     global got_directory
144     global file_path
145     global directory_path
146     if got_file and got_directory:
147         got_file = False
148         got_directory = False
149         file_path = ''
150         directory_path = ''
151         ui.label.setText("")
152         ui.label_2.setText("")
153         ui.label_3.setText('Результаты готовы!')
154     else:
155         ui.label_3.setText('Сначала, введите все данные')
```

Рис. 2.18: Определение завершающей функцией

Следующая функция занимается завершением основной функции modelling. При успешном завершении, функция обновляет переменные, содержащие

ссылки на карту и легенду и их статусы, и информирует пользователя о наличии файла с результатами.

Если функция `modelling` запустилась не успешно из-за отсутствия необходимых данных, функция `thread_complete` информирует пользователя о необходимости их введения для получения результатов.

Все разные процессы, участвовавшие в анализе разными потоками координирует функция `analyze`.

```
158 def analyze():
159     worker = Worker(modelling)
160     worker.signals.finished.connect(thread_complete)
161     worker.signals.progress.connect(progress_fn)
162     threadpool.start(worker)
```

Рис. 2.19: Функция для управления потоками

Эта функция создаёт параллельный поток на основе класса `Worker` (см. рис. 17), который запускает функцию `modelling` (см. рис. 11). Каждый раз когда подаётся сигнал об обновлении статуса, другой поток запускает функцию `progress_fn`, чтобы держать пользователя в курсе этих изменений (см. рис. 15). После завершения функции `modelling` другой поток запускает функцию `thread_complete`, чтобы проинформировать пользователя о завершении (см. рис. 18).

```
165 ui.pushButton_2.clicked.connect(get_directory)
166 ui.pushButton.clicked.connect(get_file)
167 ui.pushButton_3.clicked.connect(analyze)
168 sys.exit(app.exec_())
```

Рис. 2.20: Подключение к кнопкам

Все вышеупомянутые функции должны запускаться при взаимодействии с графической оболочкой, и именно это определяется в конце программы. При

нажатии на первую кнопку запускается функция, запрашивающая курту для анализа. При нажатии на вторую кнопку, запускается функция которая запрашивает папку с частями легенды. При нажатии на третью кнопку, запускается функция которая управляет всеми потоками и запускает раннее объясняемые функции.

Полученные результаты выглядят как показано на следующем рисунке (рис 2.21).

долгота	широта	высота		долгота	широта	высота		долгота	широта	высота
-178	88	-1000		-176	88	-1000		-174	88	-1000
-178	86	-1000		-176	86	-1000		-174	86	-1000
-178	84	-2000		-176	84	-2000		-174	84	-3000
-178	82	-1000		-176	82	-3000		-174	82	-3000
-178	80	-1000		-176	80	-1000		-174	80	-1000
-178	78	-500		-176	78	-500		-174	78	-500
-178	76	-500		-176	76	-500		-174	76	-500
-178	74	-500		-176	74	-500		-174	74	-500
-178	72	-500		-176	72	-500		-174	72	-500
-178	70	-500		-176	70	-500		-174	70	-500
-178	68	-1000		-176	68	-1000		-174	68	-1000
-178	66	-3000		-176	66	-1000		-174	66	-1000
-178	64	-3000		-176	64	-3000		-174	64	-1000
-178	62	-3000		-176	62	-3000		-174	62	-3000
-178	60	-3000		-176	60	-3000		-174	60	-1000
-178	58	-3000		-176	58	-3000		-174	58	-3000
-178	56	-2000		-176	56	-3000		-174	56	-2000
-178	54	-2000		-176	54	-3000		-174	54	-2000
-178	52	-2000		-176	52	-1000		-174	52	-3000
-178	50	-3000		-176	50	-1000		-174	50	-1000

Рис. 2.21: Фрагмент файла с результатами

Где долгота меняется от -180 до 180, широта от 90 до -90 и и высота соответствует значению для точки с данными координатами.

2.2. Метод гармонического анализа

В настоящее время основными подходами к изучению процессов в планетных системах являются статистический и фрактальный методы их описания. В частности, робастный метод позволяет исследовать структуру сложных объектов с учетом их специфики, а фрактальная геометрия позволяет изучать не только структуру, но и связь между структурой и процессами ее формирования. В связи с этим актуальна проблема разработки методов распознавания фрактальных структур планетарных объектов. Поскольку вариации физической поверхности Титана представляют собой сложную многопараметрическую систему, ее исследование должно проводиться с помощью методов анализа сложных физических систем, одним из видов которых является фрактальная геометрия. В настоящем исследовании выполнена работа по изучению фрактальных структур Венеры на основе наблюдений космического аппарата «Кассини» (ЕКА). Оборудование этого искусственного спутника позволило сканировать практически всю ее поверхность с помощью радара с синтезированной апертурой S-диапазона (12 см) и микроволнового радиометра, а также исследовать топографию с помощью специального радара - альтиметра.

Анализ карты поверхности Титана показывает, что происходило множество процессов внешнего воздействия на него со стороны других малых небесных тел. Это подтверждается наличием большого количества поверхностных образований ударного характера: холмов и кратеров.

При анализе данных о высоте Титана вся поверхность спутника была разделена на пиксели, и его среднее значение высоты было определено в каждом пикселе с использованием аппроксимации. Это послужило основой для построения 3D-модели Титана (рис. 2.22).

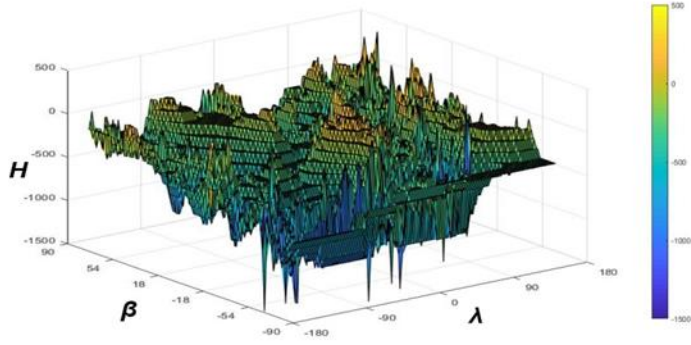


Рис. 2.22: 3D модель распределения высот поверхности Титана

Далее был проведен фрактальный анализ. Структура Титана была представлена в виде частично упорядоченного множества $A(N^2)$, где N^2 – количество компонентов a_{ij} множества $a_{ij} \in A(N^2)$, где $i, j = 1 \dots N$. В результате для множества $A(N^2)$ фрактальная размерность D_ξ согласно степени $H_\xi(a)$ определяется логарифмическим наклоном $\log \Gamma_\xi(n^2)$, где $\Gamma_\xi(n^2)$ – количество дискретных кубиков – мер.

$$D_\xi = \sum_{\gamma} \frac{\log \Gamma_\xi(n_{\gamma+1}^2) - \log \Gamma_\xi(n_\gamma^2)}{\text{abs}(\log S_\xi(n_{\gamma+1}^2)) - \text{abs}(\log S_\xi(n_\gamma^2))} * \left(\frac{\alpha_{\gamma+1} - \alpha_\gamma}{N - 1} \right) \quad (1)$$

В качестве характеристики оценки (качества) $H_\xi(a)$ приняты три цвета пикселей: красный ($\xi=R$), зеленый ($\xi=G$) и синий ($\xi=B$), которые описываются тремя фрактальными измерениями D_R, D_G, D_B . Фрактальные цветовые измерения образуют в системе координат качеств площадь треугольника SRGB.

$$\text{SRGB} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1 & D_R & 1 \\ x_2 & D_G & 1 \\ x_3 & D_B & 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} M [-2(D_R + D_B) + (D_G + D_B) + (D_R + D_G)], \quad (2)$$

где M - масштабный коэффициент.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ФИЗИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА

3.1. SRGB модели Титана

В результате были получены следующие модели.

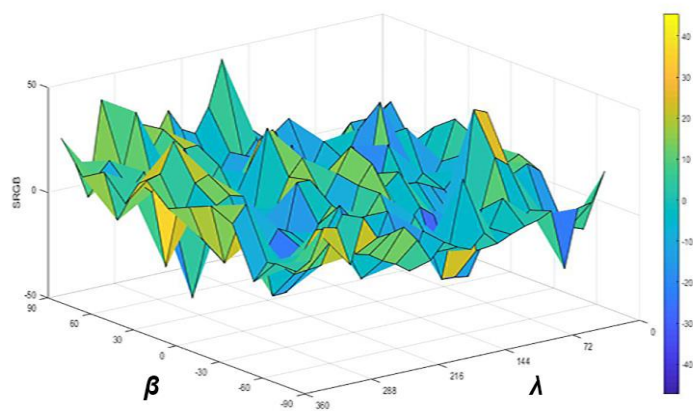


Рис. 3.1: 3D SRGB модель Титана

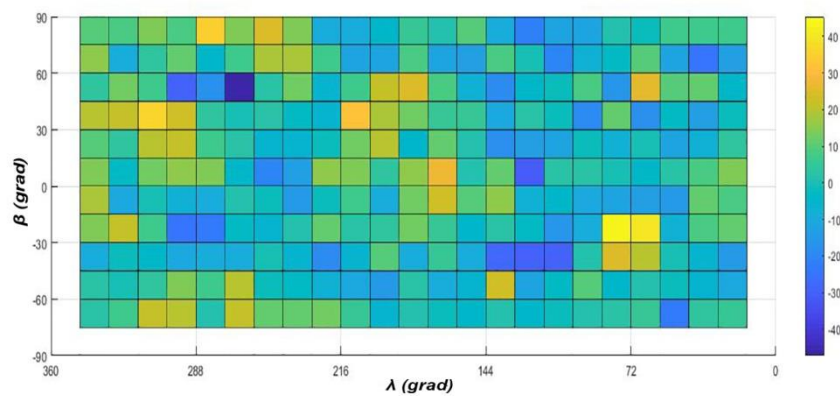


Рис. 3.2: 2D SRGB модель Титана

3.2. Коэффициент самоподобия Титана

Для коэффициента самоподобия K_ξ :

$$K_\xi = \frac{D_\xi^0}{D_\xi}, \quad (3)$$

где D_ξ^0 – фрактальная размерность самоподобного множества:

$$D_\xi^0 = \frac{\log \Gamma_\xi(N^2) - \log \Gamma_\xi(1)}{\text{abs}(\log S_\xi(N^2)) - \text{abs}(\log S_\xi(1))}. \quad (4)$$

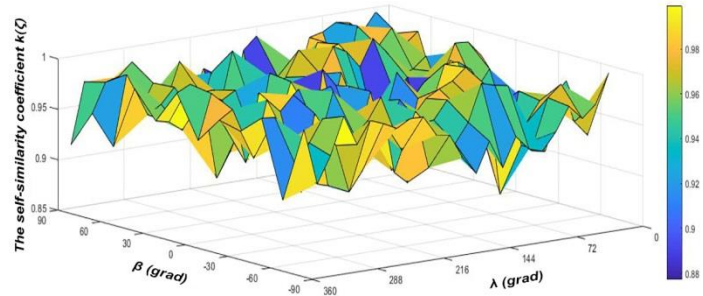


Рис. 3.3. 3D модель распределения коэффициента самоподобия для различных зон поверхности Титана

На рисунках 3.3 и 3.4 показаны 3D-модель и 2D-модель распределения коэффициента самоподобия поверхности Титана. Видны самоподобные участки поверхности спутника.

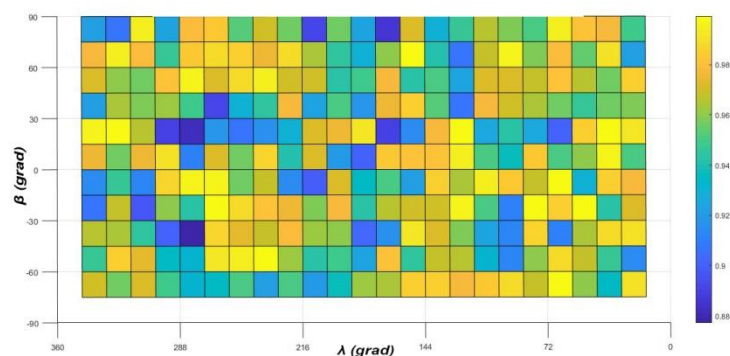


Рис. 3.4. 2D модель распределения коэффициента самоподобия для различных зон поверхности Титана

Следует отметить, что полученные модели сглажены, так как при расчетах брались средние значения высот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время актуальной задачей является изучение спутников планет Солнечной системы. Это связано с перспективой их роботизированного исследования. Вторая причина - уточнить эволюционную теорию образования Солнечной системы. Недавние исследования показали расхождение между классическими теориями и наблюдениями за экзопланетными системами. Также предстоит проделать большую работу по определению химического состава лун планет.

При выполнении данной работы был проведен анализ поверхности спутника Сатурна Титана мультифрактальным методом. Установлено, что Титан из-за большого количества взаимодействий с различными видами космических тел имеет на своей поверхности большое количество ударных образований. Построенные по спутниковым данным модели Титана структурированы пикселями, в границах которых определялись средние значения высот поверхности. Полученные параметры использовались для создания хроматической высоты с учетом коэффициента самоподобия 2D и 3D моделей поверхности Титана. Следует отметить, что построенные модели сглажены, поскольку в расчетах использовались средние значения высот.

Также был разработан и проверен на практике новый метод обработки высотных данных с использованием технологии машинного обучения, благодаря которому в разы сокращается время подобных анализов. Вместе с ним была создана графическая оболочка, которая позволит астрономам без опыта в программировании пользоваться этой программой.

Полученные результаты могут представлять определенный интерес для организаций, занимающихся изучением спутников планет Солнечной системы. Также могут быть использованы при выполнении селенографических исследований в КФУ, в институте космических исследований РАН, в отделе

планетных исследований МГУ. Полученные данные найдут свое применение при создании глобальной динамической модели поверхности Титана, которая будет служить для приземления на поверхность спутника космических аппаратов. У созданной структурной модели Титана центр располагается в центре масс, а оси совпадает с осями его инерции.

В заключении хочу выразить благодарность сотрудникам кафедры вычислительной физики и моделирования физических процессов за помощь в работе и особенно своему руководителю Ю. А. Нефедьеву и его аспиранту Алексею Андрееву за поставленную задачу и помощь в ее решении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Balint, T.** Making the Venus Concept Watch / T. Balint, J. Melchiorri // *Acta Astronautica*. — 2014. — V. 101. — 138-150 pp.
2. **Ikegawa, S.** Improved automatic estimation of winds at the cloud top of Venus using superposition of cross-correlation surfaces / S. Ikegawa, T. Horinouchi // *Icarus*. — 2016. — V. 271. — 98-119 pp.
3. **Turcotte, D. L.** A fractal interpretation of topography and geoid spectra on the Earth, Moon, Venus, and Mars / D. L. Turcotte // *Journal of Geophysical Research*. — 1987. — V. 92. — 597-601 pp.
4. **Kundu, B.** Surface gravity and crater diameter as proxies of extra-terrestrial impact / B. Kundu, B. Sepanati, M. Santosh // *Icarus*. — 2019. — V. 331. — 62-68 pp.
5. **Ferrari, A. J.** Planetary geodesy / A. J. Ferrari, B. G. Bills // *Revs. of Geophys. and Space Phys.* — 1979. — V. 17/7. — 1663-1677 pp.
6. **Head, J. W.** The geologic evolution of Venus: Insights into Earth history / J. W. Head // *Geology*. — 2014. — V. 42. — 95-96 pp.
7. **Sokolova, M.** Analysis of the Lyrids' meteor stream structure for long timeslots / M. Sokolova, Y. Nefedyev, M. Sergienko, M. Demina, A. Andreev // *Advances in Space Research*. — 2016. — V. 58. — 541-544 pp.
8. **Nefedyev, Y.** Analysis of data of “Clementine” and “KAGUYA” missions and “ULCN” and “KSC-1162” catalogues / Y. Nefedyev, S. Valeev, R. Mikeev, N. Varaksina, A. Andreev // *Advances in Space Research*. — 2012. — V. 50. — 1564-1569 pp.
9. **Nefedev, Y.** Analysis of the dynamic coordinate system using photoelectric lunar occultations / K. Churkin, A. Andreev, Y. Nefedyev, R. Mubarakshina, V. Borovskih // *Journal of Physics: Conference Series* — 2018. — V. 62. — 1015-1019 pp.

10. **Demina, N.** Analysis of the surfaces and gravitational fields of planets using robust modeling methods / N. Demina, A. Andreev, Y. Nefedyev, E. Akhmedshina, S. Demin // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2013. — V. 140. — 219 P.
11. **Andreev, A.** Analysis of topocentric and gravimetric data from modern space missions / A. Andreev, N. Demina, A. Zagidullin, N. Petrova, Y. Nefedyev, S. Demin // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2018. — V. 135. — 122 P.
12. **Bondarenko, N.** Surface properties and surficial deposits on Venus: New results from Magellan radar altimeter data analysis / N. Bondarenko, M. Kreslavsky // *Icarus*. — 2018. — V. 309. — 162-176 pp.
13. **Zhikov, V.** Harmonic expansion of the “Magellan” mission altimetry data into spherical functions / V. Zhikov // *Soros Educational Journal*. — 1996. — V. 12. — 109 P.
14. **Gilmore, M.** Venus Surface Composition Constrained by Observation and Experiment / M. Gilmore, A. Treiman, J. Helbert, S. Smrekar // *Space Science Reviews*. — 2017. — V. 212. — 1511-1540 pp.
15. **Rizvanov, N.** Photographic observations of solar system bodies at the Engelhardt astronomical observatory / N. Rizvanov, Y. Nefedjev // *A&A*. — 2005. — V. 444. — 625-627 pp.