

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт наук о Земле

Кафедра картографии и геоинформатики

*ДЗЕНИШ Денис Игоревич*



**Выпускная квалификационная работа**

*Геоинформационное картографирование малых небесных тел в цилиндрической  
проекции трехосного эллипсоида*

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.03. «Картография и геоинформатика»

21.М05-нз «Геоинформационное картографирование»

Научный руководитель:

доцент кафедры картографии и геоинформатики

СПбГУ, к.г.н.,

Сидорина Инесса Евгеньевна



Рецензент: профессор РАН,

доцент кафедры картографии и геоинформатики

МГУ имени М.В. Ломоносова, д.т.н.,

Нырцов Максим Валерьевич

Санкт-Петербург

2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ГЛАВА 1. КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ВНЕЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ .....	5
1.1. ЗАРУБЕЖНАЯ ИСТОРИЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ВНЕЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ..	5
1.2. ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ИСТОРИЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ВНЕЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ .....	8
1.3. ИСТОРИЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ.....	11
1.4. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВНЕЗЕМНОЙ КАРТОГРАФИИ.....	13
ГЛАВА 2. ПРОЕКЦИЯ ТРЕХОСНОГО ЭЛЛИПСОИДА ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ.....	16
2.1. РАССЧЕТ ПРОЕКЦИЙ ТРЕХОСНОГО ЭЛЛИПСОИДА.....	16
2.2. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ .....	18
2.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЕКЦИЙ ТРЕХОСНОГО ЭЛЛИПСОИДА ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ.....	19
ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ (ГИС) ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ В ПРОЕКЦИИ ТРЕХОСНОГО ЭЛЛИПСОИДА. ....	22
3.1 ВЫБОР ОБЪЕКТОВ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ .....	22
3.2 ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ.....	23
3.3 ОБРАБОТКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И СОСТАВЛЕНИЕ КАРТ .....	25
3.4 СОСТАВЛЕНИЕ 3D МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА В ПРОГРАММЕ JMARS .....	34
3.5 АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ АСТЕРОИДОВ 242 ИДА И 951 ГАСПРА В ПРОЕКЦИИ ТРЕХОСНОГО ЭЛЛИПСОИДА В РАМКАХ ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ ПО КУРСУ «КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПЛАНЕТ» .....	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	37
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	38
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	41

## ВВЕДЕНИЕ

Космическая картография и космические карты – это реальность, которая стала особенно очевидной, когда полеты автоматических станций и пилотируемых кораблей вокруг Земли и к другим планетам открыли эру космических съемок и исследований. Человечество, по словам К. Э. Циолковского, не останется вечно на Земле, но в погоне за светом и пространством сначала робко проникнет за пределы атмосферы, а затем завоюет себе все околосолнечное пространство. В этом движении, которое уже началось, люди не смогут обойтись без карт, роль которых станет такой же значительной, какой она была и есть при освоении земных пространств (Смирнов Л.Е. 1992).

Внеземное картографирование определяется как создание картографических произведений, отображающих объекты и явления, находящиеся за пределами планеты Земля. Картографированию подлежат разные объекты от галактик, звездного неба до малых тел Солнечной системы.

К малым небесным телам (МНТ) относятся астероиды, метеороиды, ядра комет и другие. Их фигуры различны – от шарообразной (например, спутник астероида 243 Ида Дактиль) до экстремально нерегулярной (например, астероид 433 Эрос). Тела, подобные Эросу, сильно вытянуты и напоминают картофелину. Фигура является ключевым фактором для выбора референц-поверхности и соответствующих проекций для математической основы карт небесных тел. Рекомендации по использованию референц-поверхности содержатся в отчете рабочей группы по координатным системам при Международном астрономическом союзе. Большинство малых тел аппроксимируется трехосным эллипсоидом, но при этом указывается, что использование трехосных эллипсоидов усложняет вычисления картографических проекций. Усложняется их использование и исследование свойств. В результате в большинстве случаев используется сфера (Нырцов М.В., 2012).

На пути к картографированию приходится решать задачи по извлечению данных из информационных систем, посвященных небесным телам, по интеграции данных, находящихся в разных системах координат и разных форматах.

Таким образом, цель данной дипломной работы заключается в изучении методики картографирования и создании карт малых небесных тел в проекции трехосного эллипсоида.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить литературу и методики внеземного картографирования, существующие референц-поверхности и методы их отбора под конкретные МНТ на основе их параметров;

2. Выполнить поиск исходных данных: фотомозаики, shape-файлы с номенклатурой и файлы с ЦМР для выбранного объекта картографирования;

3. Осуществить картографирование МНТ согласно выбранному методу (определить способ оформления карт МНТ и принцип использования ЦМР и материалов космической съемки для картографирования МНТ).

4. Провести апробацию методики в рамках педагогической практики среди студентов СПбГУ по направлению «Геоинформационное картографирование».

Для реализации цели и задач исследования будут использоваться следующие методы:

- теоретический анализ;
- изучение материалов и обобщение опыта;
- картографический методы;
- методы геоинформационного картографирования;
- дешифрирование космических изображений.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии картографического метода исследований поверхности малых небесных тел. Практическая значимость – заключается в изучении и обобщении информации о малых небесных телах, а также возможности внедрения методики создания карт малых небесных тел в учебную программу.

Дипломная работа состоит из введения, трех глав и заключения. В первой главе рассмотрены общие данные по истории изучения внеземных объектов, картографированию планет и малых небесных тел, а также актуальные проблемы этой области. Во второй главе рассматриваются основные характеристики проекции трехосного эллипсоида. Третья глава посвящена вопросам методики создания карты малого небесного тела в проекции трехосного эллипсоида. В заключении подведены итоги и рассмотрены дальнейшие перспективы.

Объем работы составляет 42 страницы, включая 27 рисунков. Список литературы включает в себя 32 наименований, в том числе зарубежные научные статьи.

## **ГЛАВА 1. КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ВНЕЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Современная картография отчетливо делится на земную, или землеописательную (географическую), и внеземную (астрономическую). Хотя карты небесные имеют столь же почтенный возраст, как и карты земные, необходимость такого деления картографии становится очевидной только сейчас.

Астрономия, а вместе с ней астрономическая картография, пережили несколько научно-технических революций, в результате которых изменялось представление людей о Вселенной, обогащались космические карты и росло их разнообразие.

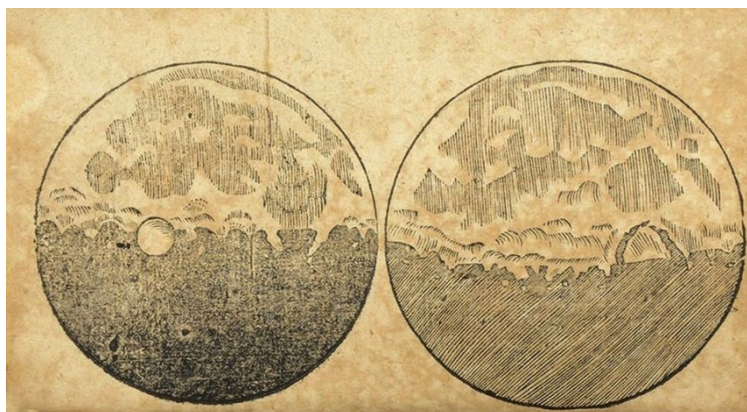
Первая такая революция произошла в XVI в.; она связана с изобретением телескопа. Благодаря появлению телескопа увеличилось число наблюдаемых на небе объектов и возникла планетарная картография. Вторая революция в астрономической картографии приходится на середину XX в.. В этот период формируется новый раздел астрономии – радиоастрономия, существенно дополнившая и даже изменившая наши знания о составе и структуре Космоса. Тогда же стала технически возможна съемка путем регистрации коротких электромагнитных волн: ультрафиолетовых, рентгеновских, а также гамма-излучения. Однако осуществить всеволновую съемку удалось только во второй половине XX в. с запуском спутников, оснащенных специальной аппаратурой. Это считается третьей революцией, открывшей перед внеземной картографией широкие горизонты (Смирнов Л.Е. 1992).

### **1.1. ЗАРУБЕЖНАЯ ИСТОРИЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ВНЕЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Международный астрономический союз (МАС) был арбитром планетарной и спутниковой номенклатуры с момента своего организационного собрания в 1919 году в Брюсселе. В то время был назначен комитет для упорядочения хаотической лунной и марсианской номенклатуры, существовавшей тогда. Комитет МАС возник на основе более раннего комитета, созданного в 1907 году Советом Международной ассоциации академий, собравшимся на Генеральной ассамблее в Вене. Этому комитету было поручено прояснить лунную номенклатуру, но он не опубликовал отчет из-за череды смертей членов. Однако большая предварительная работа была проделана Мэри Аделой Благг, волонтером, которая помогала покойному члену Совета Международной ассоциации академий Сэмюэлю Артуру Сондеру еще до того, как был сформирован МАС.

МАС назначил мисс Благг и нескольких других астрономов в недавно созданный комитет по номенклатуре под председательством Г. Х. Тернера. Отчет этого комитета «Именованные лунные образования» Благга и Мюллера (1935) был первым систематическим списком лунной номенклатуры. Позже "Система лунных кратеров, квадранты I, II, III, IV" была под руководством Джерарда П. Койпера. В этих каталогах перечислены названия и координаты объектов в текущей, значительно расширенной лунной номенклатуре; на сопроводительной карте (также состоящей из четырех частей) показано их местонахождение. Эти работы были приняты МАС и стали признанными источниками лунной номенклатуры.

Лунная картография насчитывает четыреста лет. Самая ранняя из известных нам прокарт составлена по результатам визуальных наблюдений английским физиком В. Гильбертом в конце XVI в., еще до изобретения телескопа. На этой карте показаны лишь границы между темными и светлыми участками. Первым увидел Луну в телескоп Г. Галилей, в 1610 г. он зарисовал ее в различных фазах. Рисунки были настолько схематичны, что их трудно сопоставить с натурой(рис. 1).



*Рисунок 1. Карта Луны, созданная Галилео Галилеем, 30 ноября 1609 года*

*[<https://nplus1.ru/material/2015/11/30/moon-maps>]*

Карты видимой стороны Луны за рубежом создавались с использованием только телескопической техники вплоть до 1960-х гг.. Первая американская обзорная карта, покрывающая всю видимую сторону Луны, была выполнена по телескопическим снимкам, сделанным в обсерватории Пик-дю-Миди с помощью 24-дюймового рефрактора и 43-дюймового рефлектора. Эту карту отличали большая детальность и полнота (Смирнов Л.Е. 1992).

Первые попытки составить карту Меркурия относятся к концу XIX века. В 1889 г. Такую карту нарисовал Дж. Скиапарелли. Почти через полвека, в 1934 г., более детальную карту планеты изготовил Э. Антониади. Эти карты были так же малодостоверны, как и первые рисованные карты Марса.

В 1974 г. Автоматическая межпланетная станция «Маринер-10» достигла Меркурия и с пролетной траекторией выполнила съемку планеты с различных дистанций, покрыв снимками свыше 40% ее поверхности. Было получено более 2 тыс. изображений планеты с разрешением от 4 км. до 100 м.. Ученые впервые увидели Меркурий с такой же детальностью, с какой видна Луна в телескоп с Земли.

Картографирование Венеры так же, как Луны и Марса, началось с зарисовок, впервые сделанных во второй половине XVIII в.

Ситуация оставалась неизменной в течении очень долгого времени. В 60-е гг. XX в. Стала развиваться радиоастрономия. В результате активной радиолокации твердой поверхности Венеры на волне 12,5 см., проведенной американским астрономом Р. Голстейном в 1962 г., было получено фотографически закрепленное изображение диска планеты, на котором отчетливо выделялись структуры с различным радиотражением.

Требования к внеземной номенклатуре резко изменились в 1957 году, когда эра освоения космоса началась с успешного полета спутника и последующей решимости Америки высадить человека на Луну в 1960-х годах. Когда стали доступны подробные изображения одной недавно выделенной внеземной поверхности за другой, стала очевидной необходимость давать имена особенностям этих поверхностей. И снова МАС взял на себя задачу расширения и контроля планетарной номенклатуры, чтобы усилия шли упорядоченно, справедливо и беспристрастно.

Марсианская номенклатура была уточнена в 1958 году, когда специальный комитет МАС под председательством Одуэна Дольфуса рекомендовал для принятия названия 128 характеристик альbedo (ярких, темных или цветных), наблюдаемых с помощью наземных телескопов. Эти имена были основаны на системе номенклатуры, разработанной в конце 19 века итальянским астрономом Г. В. Скиапарелли (1879) и расширенной в начале 20 века Э. М. Антониади (1929), астрономом греческого происхождения, работающим в Медоне, Франция (Смирнов Л.Е. 1992).

В 1960-е годы и в ожидании запуска Mariner 9 MarsOrbiter была сформирована рабочая группа по номенклатуре Марса под председательством Жерара де Вокулера; этой группе было предложено обозначить названия топографических деталей, показанных на новых изображениях космических аппаратов (deVaucouleurs и др., 1975). Примерно в то же время Дональд Х. Мензель возглавил специальный лунный комитет, который

предложил названия для объектов, различаемых советскими камерами «Зонд», «Американский лунный орбитальный аппарат» и «Аполлон» (IAU, 1971).

На собрании МАС 1973 года в Сиднее, Австралия, номенклатурные группы были реорганизованы и расширены. Рабочая группа по планетной системной номенклатуре (WGPSN) была сформирована с Питером Миллманом Канады в качестве своего первого президента. Были сформированы рабочие группы по Луне, Меркурию, Венере, Марсу и Внешней Солнечной системе для проведения предварительной работы по выбору тем и предложению названий для свойств на каждой недавно выделенной планете и спутнике. В 1982 году в Патрах, Греция, Гарольд Масурски из США стал президентом WGPSN; в 1991 году его сменила Кааре Акнес из Норвегии, а в 2006 году Кааре сменила Рита Шульц в Германии.

В 1984 году была сформирована новая рабочая группа для определения поверхностных особенностей небольших примитивных тел (астероидов и комет). В докладе Рабочей группы по картографическим системам координат и элементам вращения от 2003 года первый раз была представлена и рекомендована неподвижная система координат для такого типа МНТ, как астероиды и кометы. В 2009 году в поле зрения попали карликовые планеты.

Для наименования элементов рельефа на современных планетных картах используются более 15 тысяч собственных названий, публикуемых МАС в электронном газетире (<http://planetarynames.wr.usgs.gov>), поддерживаемом американской Геологической службой (USGS).

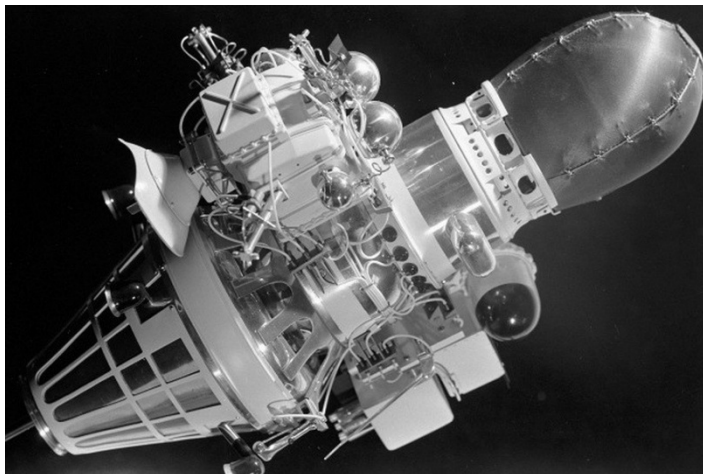
## **1.2. ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ИСТОРИЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ВНЕЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Начало космическому картографированию положил полет автоматической станции "Луна-3" запуск, которой 4 октября 1959 года был осуществлен в Советском Союзе ровно два года спустя после запуска первого в мире искусственного спутника. В результате были изготовлены: фотокарта в масштабе 1:5000000, карта на экваториальную зону Луны, геолого-морфологические карты и ряд физических карт (Смирнов Л.Е. 1992).

Второе поколение лунных космических аппаратов ("Луна 4" – "Луна 14") создаваемых в период 1960-1966 гг. К сожалению, полеты первых аппаратов этой серии были неудачными, но они позволили провести обработку новых сложных бортовых систем и, используя активные маневры на трассах полетов, обеспечить проведения ряда сложных научных экспериментов. Посадочные отсеки станций "Луна 9" и "Луна 13"



выполнили панорамную съемку лунного ландшафта в двух различных районах лунной поверхности. Космические аппараты "Луна 9,10,11,12,14" проводили исследования окололунного пространства и лунной поверхности с орбит искусственных спутников Луны (ИСЛ). Впервые была получена информация о гравитационном и магнитном полях Луны (рис. 2).



*Рисунок 2. Космический аппарат "Луна 9" [<https://scientificrussia.ru/>]*

Традиционные методы планетарной астрономии пополнились новыми высокоэффективным арсеналом средств, среди которых важнейшее место заняла фото- и телевизионная съемка с борта космических аппаратов. В ходе осуществления советской и американской космических программ изучения Солнечной системы получен огромный объем информации о морфологических свойствах поверхностей, геологии планет и их атмосферах, что способствовало формированию сравнительной планетологии, призванной, помимо совершенствования космогонических и эволюционных концепций, обеспечить лучшее понимание механизмов, лежащих в основе природы Земли, и ее места как члена Солнечной системы. Появилась возможность представления результатов исследований в виде карт различных типов с целью отразить современный уровень знаний об особенностях поверхности земной группы и их спутников и упростить получение необходимых справочных данных Земли (атлас планет земной группы).

Третье поколение автоматических космических аппаратов "Луна 15" – "Луна 24", создававшееся в 1967-1970 гг., обладало еще более широкими возможностями. И здесь уже не все запуски были успешными, но сами созданные аппараты по уровню автоматизации и степени автономности явились принципиально новым этапом в развитии космической техники, будучи прообразом будущих технических средств для исследования других небесных тел (Шингарева К.Б. 1992).

В связи с этим в СССР в 1967 году вышла "Фотокарта видимого полушария Луны" масштаба 1:5 000 000, подготовленная сотрудниками ГАИШ под руководством Ю. Н. Липского.

Основной целью проводившихся в период 1965-1968 гг. запусков автоматических межпланетных станций "Зонд" был отработка средств и подготовка к осуществлению лунной экспедиции. Кроме того, в рамках этой программы проводилось фотографирование обратной стороны Луны. "Зонд 3" дополнил и уточнил сведения об обратной стороне Луны, полученные "Луной 3"; "Зонды 6-8", совершившие облеты Луны, доставили на Землю фотопленки с изображением лунной поверхности, в том числе цветные ("Зонд 7").

Одним из примеров советского научно-справочного издания является "Атлас планет земной группы и их спутников". В нем систематизированы и проанализированы накопленные к 1990 году отечественные и зарубежные данные по материалам космических съемок и содержатся сведения сравнительно-планетологического характера, отражающие специфические черты этих небесных тел. Впервые составлены карты, характеризующие планеты земной группы и их спутников как с точки зрения строения рельефа поверхности, так и по различным тематическим признакам (Шингарева К.Б. 1992).

В связи с распадом СССР в нашей стране начались негативные процессы, которые коснулись также исследований космоса, которые были практически свернуты. Прекратила свою деятельность и существовавшая вплоть до 1992 г. комиссия по космической топонимике, которая была вновь воссоздана решением Президиума РАН лишь в 2009 г. В это время активную деятельность вела К.Б. Шингарева: благодаря ей, в работу возобновленной комиссии были вовлечены астрономы, географы, картографы, геологи, геоморфологи, геодезисты, а также историки и филологи. Кира Борисовна считала, что космическая топонимика, наряду с пространственно-координатной функцией, способствует проникновению космоса и космических достижений в сферу культуры, опираясь на духовное наследие человечества. Поэтому, занимаясь, по сути, междисциплинарной проблематикой, комиссия определила свои задачи достаточно широко: от выработки общей концепции топонимики внеземных территорий до установления сфер научной и культурной деятельности специалистов, которых следует привлекать к решению задач в качестве экспертов.

По аналогии американскому электронному газетиру, отечественные ученые создают многоязычную базу данных (МБД) на шести языках. Кроме русскоязычных, система будет включать планетные названия еще и на других языках, официально

утвержденных ООН в качестве средств международного общения (английский, французский, немецкий, испанский, китайский), с возможностью подключения в будущем других языков. В рамках подготовки к этой работе создан «Словарь терминов, употребляемых при картографировании внеземных территорий», включающий более 300 определений, согласованных с международными нормативными документами и отражающих современное развитие планетной картографии.

### **1.3. ИСТОРИЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ**

30 мая 1971 г. была запущена американская автоматическая межпланетная станция «Маринер-9», основной целью которой было изучение поверхности Марса. Кроме Марса, «Маринер-9» исследовал два его естественных спутника – Фобос и Деймос. Фобос стал первым МТ, отличающимся в своей фигуре от сферы, на которое были получены космические изображения. До Фобоса фигуры всех крупных небесных тел, таких как планета Марс, спутник Земли Луна, было принято аппроксимировать сферой. Для Фобоса такая референц-поверхность оказалась непригодна, так как его максимальный радиус приблизительно в 1,4 раза больше минимального. К тому же его фигура нерегулярна. Нерегулярность фигур МТ связана с их незначительным гравитационным полем. Фобос создал беспрецедентную проблему для картографирования (Нырцов М. В. 2014).

В 1974 г. Томас Даксбери по космическим изображениям Фобоса, полученным «Маринер-9», произвел оценку фигуры и особенностей вращения спутника Марса. Затем он создал бланковую карту Фобоса, где для центральной части тела использовалась цилиндрическая, а для полюсов азимутальная проекция сферы. Это была первая попытка картографирования МТ, отличающегося своей фигурой от сферы. В 1976 г. Ральф Тёрнер создал топографическую карту Фобоса на основе его физической модели – «глобуса». Методика определения реальной фигуры Фобоса опиралась на моделирование условий в момент съёмки тела в соответствии с имеющимися изображениями. Соответствия снимкам добивались с помощью пластилина, который добавлялся к модели. В результате, используя серию снимков Фобоса, полученных в различных ракурсах и при разных условиях освещения, Тёрнер смоделировал реальную фигуру Фобоса и определил положение форм рельефа на его поверхности (Нырцов М. В. 2014).

. В 1977 г. Майклом Ноландом и Джозефом Веверкой была создана карта, отображающая часть поверхности второго спутника Марса Деймоса. С 1976 по 1980 гг. были получены новые снимки Фобоса и Деймоса с космического аппарата «Викинг».

В 1980 г. Филипп Стук в Университете Виктория (Британская Колумбия, Канада) осуществил эксперимент с видоизменением картографических сеток регулярных референц-поверхностей под нерегулярную фигуру МТ. Используя цифровые модели, он создал новый класс видоизменённых азимутальных проекций, которые называл «проекциями с переменным радиусом» или «морфографическими проекциями». Они получились введением радиус-векторов, отсчитываемых от центра масс тела, из цифровой модели в уравнения традиционных азимутальных проекций. Результатом исследований стали новые карты спутников Марса Фобоса и Деймоса. В отличие от ранее созданных карт, карты Ф. Стука передавали реальную фигуру тела (Нырцов М. В. 2014).

.В 1988 г. профессор Л. М. Бугаевский разработал специально для картографирования Фобоса нормальную равноугольную цилиндрическую проекцию трёхосного эллипсоида. В МИИГАиК при участии МГУ в этой проекции была создана карта поверхности Фобоса (ответственные редакторы В.П. Белов, Л.М. Бугаевский, Б.В. Краснопевцева, К.Б. Шингарева). Карта поверхности Фобоса была использована в Атласе планет Земной группы и их спутников, выпущенном МИИГАиК в 1992 г. Помимо карты, был создан глобус Фобоса в форме трёхосного эллипсоида (Нырцов М. В. 2014).

В 1992 г. в своей докторской диссертации проф. К.Б. Шингарёва (МИИГАиК) разработала классификацию карт тел Солнечной Системы (планет и их спутников) на основе предложенной ею ранее классификации карт Луны. В 1993 г. на кафедре картографии МИИГАиК под руководством проф. Л.М. Бугаевского автором начаты исследования по разработке картографических проекций реальных поверхностей небесных тел с нерегулярной фигурой. Были поставлены задачи по видоизменению традиционных проекций для картографирования МТ, в частности проекций, отображающих тело в планетарном масштабе (Нырцов М. В. 2014).

В 2004 г. Институтом картографии Дрезденского Технического Университета (Германия) вместе с МИИГАиК, Институтом географии РАН и Университетом Западного Онтарио (Лондон, Канада) были выпущены многоязыковые карты Фобоса и Деймоса, которые вошли в серию многоязыковых карт планет и спутников Земной группы.

В 2013 г. была получена равноугольная проекция Якоби для трёхосного эллипсоида астероида 25143 Итокава, у которого полуоси  $a > b > c$ . Значения полуосей были взяты для астероида Итокава:  $a = 267,5$  м;  $b = 147$  м;  $c = 104,5$  м. Проекция позволила картографировать астероид целиком (Нырцов М. В. 2014).

#### 1.4. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВНЕЗЕМНОЙ КАРТОГРАФИИ

BepiColombo - первая миссия Европы к Меркурию. Запущенный 20 октября 2018 года, он находится в семилетнем путешествии к самой маленькой и наименее исследованной планете земной группы в нашей Солнечной системе. Когда он прибудет на Меркурий в конце 2025 года, он будет выдерживать температуру свыше  $350^{\circ}\text{C}$  и собирать данные в течение своей однолетней номинальной миссии с возможным продлением еще на один год. Миссия состоит из двух космических аппаратов: Mercury Planetary Orbiter (МРО) и Mercury Magnetospheric Orbiter (Мio). BepiColombo - это совместная миссия Европейского космического агентства (ЕКА) и Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA), выполняемая под руководством ЕКА.

В ноябре 2008 году был утвержден проект MAVEN. 18 ноября 2013 года стартовала с Земли ракета Atlas 5, которая доставила космический аппарат на орбиту 22 сентября 2014 года. Это первый космический корабль, который был создан для изучения и анализа состояния верхних слоев атмосферы Марса.

Космический телескоп Джеймса Уэбба был запущен 25 декабря 2021 года на ракете Ariane 5 с космодрома Куру, Французская Гвиана, и прибыл в точку 2 между Солнцем и Землей в январе 2022 года. Первое изображение Уэбба было обнародовано на пресс-конференции 11 июля 2022 года. Являясь крупнейшим оптическим телескопом в космосе, он оснащен приборами высокого разрешения и высокой чувствительности, что позволяет ему рассматривать объекты, слишком старые, удаленные или слабые для космического телескопа Хаббл. Это позволяет проводить исследования во многих областях астрономии и космологии, такие как наблюдение за первыми звездами, формирование первых галактик и подробное описание характеристик атмосферы потенциально обитаемых экзопланет (рис. 3).



Рисунок 3. Туманность Киля [<https://webbtelescope.org/>]

Телескоп Китайской космической станции (CSST) «Сюньтянь» или «Небесный часовой» — автономный орбитальный модуль с оптическим телескопом. Запуск «Сюньтянь» запланирован на 2024 год. Телескоп будет вращаться вокруг Земли по той же орбите, что и китайская модульная станция. Он сможет периодически приближаться и стыковаться с ней, чтобы экипаж проводил необходимый ремонт и менял приборы. Огромная линза делает «Небесного часового» сопоставимым с «Хабблом». При этом обзор китайского телескопа будет в 300 раз больше при таком же высоком разрешении. Благодаря широкому полю зрения он сможет наблюдать до 40% пространства в течение десяти лет.

Телескоп Китайской космической станции будет вести наблюдение в ближнем ультрафиолетовом и видимом свете, а также исследовать свойства темной материи, формирование и эволюцию галактик. Телескоп Китайской космической станции будет вести наблюдение в ближнем ультрафиолетовом и видимом свете, а также исследовать свойства темной материи, формирование и эволюцию галактик.

Орбитальная астрофизическая обсерватория «Спектр-Рентген-Гамма (Спектр-РГ)» предназначена для построения полной карты Вселенной в рентгеновском диапазоне энергий. Это проект Федеральной космической программы России с участием Германии. Обсерватория состоит из двух зеркальных телескопов: немецкого eROSITA, работающего в мягком рентгеновском диапазоне, и российского ART-XC, работающего в жестком рентгеновском диапазоне. ART-XC — первый в России телескоп с оптикой косоугольного падения.

Исследования «Спектра-РГ» продлятся 6,5 лет. Из них четыре года телескоп будет сканировать звездное небо, а оставшиеся 2,5 года — работать в режиме точечного наблюдения объектов во Вселенной по заявкам мирового научного сообщества. Местом для аппарата выбрана точка Лагранжа (L2) в 1,5 млн км от Земли.

По заверениям «Роскосмоса», за время миссии «Спектр-РГ» обнаружит около 100 тыс. массивных скоплений галактик, порядка 3 млн сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик, сотни тысяч звезд с активными коронами, десятки тысяч звездообразующих галактик и многие другие объекты, в том числе неизвестной природы, а также детально исследует свойства горячей межзвездной и межгалактической плазмы. Ожидается, что в 2025 году будет завершена и обнародована самая точная карта Вселенной (рис. 4).



*Рисунок 4. Научный космический аппарат «Спектр-Рентген-Гамма» [<http://srg.iki.rssi.ru/>]*

## ГЛАВА 2. ПРОЕКЦИЯ ТРЕХОСНОГО ЭЛЛИПСОИДА ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Если для аппроксимации фигуры Земли широко используют референц-поверхности шара и эллипсоида вращения, то для большинства малых тел Солнечной системы Международный астрономический союз рекомендует использовать трехосный эллипсоид. На сегодняшний день разработаны почти все основные классы картографических проекций трехосного эллипсоида:

1. цилиндрические и азимутальные проекции, сохраняющие длины вдоль меридианов (астероид 433 Эрос);
2. цилиндрическая проекция, сохраняющая угол между меридианом и параллелью, а также длины на экваторе (астероид 433 Эрос);
3. равноугольная проекция Якоби, пример картографирования астероида (астероид 25143 Итокава);
4. равновеликие цилиндрические проекции трехосного эллипсоида (астероид 253 Матильда);
5. конические проекции трехосного эллипсоида, различные по типам искажений (астероид 433 Эрос).

Для всех вышеперечисленных проекций необходимы систематизация, классификация и дополнительные исследования, после чего можно будет говорить о формировании теории проекций трехосного эллипсоида. В дальнейшем необходимо реализовать эти проекции в модуле картографических проекций современных ГИС-пакетов для геоинформационного картографирования небесных тел.

### 2.1. РАССЧЕТ ПРОЕКЦИЙ ТРЕХОСНОГО ЭЛЛИПСОИДА

Для получения различных проекций трехосного эллипсоида, предполагается подход, основанный на векторном описании самого трехосного эллипсоида с помощью радиус-вектора  $r$ , так и касательной к эллипсоиду плоскости, содержащей приращение  $dr$  вектора  $r$ . В касательной плоскости вводится локальная система координат  $X$  и  $Y$ .

Поскольку любая проекция использует в своем представлении элементарную длину вектора  $dr$  как бесконечно малый элемент дуги произвольной кривой на поверхности, естественным математическим аппаратом этого представления будут коэффициенты Гаусса первой квадратичной формы. В рамках такого подхода предлагается рассматривать и распределение искажений проекции (1).

$$dl^2 = |dr|^2 = (dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2 = Ed\Phi^2 + 2Fd\Phi d\lambda + Gd\lambda^2 \quad (1)$$



$x, y, z$  – прямоугольные пространственные координаты;

$E, F, G$  – коэффициенты Гаусса первой квадратичной формы (2, 3, 4).

$$E = a^2 \frac{4t^2 + \sin^2 2\Phi \left( \cos^2 \lambda + \frac{\sin^2 \lambda}{1-e_{ab}^2} - \frac{1}{1-e_{ac}^2} \right)^2}{4t^3} \quad (2)$$

$$F = a^2 \frac{\sin 2\Phi \cos^2 \Phi \sin 2\lambda \left( \cos^2 \lambda + \frac{\sin^2 \lambda}{1-e_{ab}^2} - \frac{1}{1-e_{ac}^2} \right) \left( 1 - \frac{1}{1-e_{ab}^2} \right)}{4t^3} \quad (3)$$

$$G = a^2 \cos^2 \Phi \frac{4t^2 + \cos^2 \Phi \sin^2 2\lambda \left( 1 - \frac{1}{e_{ab}^2} \right)}{4t^3} \quad (4)$$

Где  $t$  – параметр, характеризующий отклонение поверхности трехосного эллипсоида от сферы (5), а  $e_{ab}, e_{ac}$  – эксцентриситет эллипсоида соответственно сечения начального меридиана, экваториального сечения (6,7).

$$t = \cos^2 \Phi \cos^2 \lambda + \frac{\cos^2 \Phi \sin^2 \lambda}{1-e_{ab}^2} + \frac{\sin^2 \Phi}{1-e_{ac}^2} \quad (5)$$

$$e_{ac} = \sqrt{1 - \frac{c^2}{a^2}} \quad (6)$$

$$e_{ab} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (7)$$

С точностью до бесконечно малых величин более высокого порядка малости, трапецию на трехосном эллипсоиде можно принять за бесконечно малый параллелограмм на плоскости, касательной к трехосному эллипсоиду в выбранной точке  $A$  с координатами  $\Phi, \lambda$  (рис. 5).

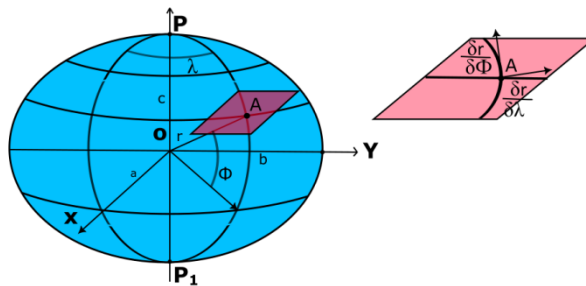


Рисунок 5. Трехосный эллипсоид в прямоугольных пространственных координатах и касательная плоскость в точке  $A$

В плоскости проекции вводится прямоугольная система координат, координатные оси которой имеют стандартное для математики и геоинформатики направление;  $X$  – горизонтально вправо,  $Y$  – вертикально вверх. Коэффициенты Гаусса представлены в планетоцентрической системе координат, координаты проекции выражаются через них.

Меридианы и параллели на трехосном эллипсоиде не ортогональны, именно в касательной плоскости можно четко задать ортогональную систему координат, которая определяется производной вектора  $r$  по широте (вдоль меридиана) - это направление оси  $Y$ .

Ось  $Y$  выбирается направленной вправо, перпендикулярно к направлению меридиана. Касательный вектор к любой линии на эллипсоиде, проходящей через точку с координатами  $\Phi, \lambda$ , будет лежать в этой плоскости. Все соотношения бесконечно малых величин и углов между направлениями на трехосном эллипсоиде сохраняются на ней.

Другой способ получения проекции трехосного эллипсоида – перспективные проекции. Для их получения используется визирный луч, идущий из точки зрения, и традиционные вспомогательные разворачивающиеся поверхности, такие как цилиндр, конус и плоскость. Формулы проекций получаются в результате совместного решения уравнений, описывающих вспомогательную поверхность и визирный луч. Такие формулы содержат тригонометрические функции и не требуют вычисления интегралов.

## **2.2. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ**

При использовании шара в качестве референц-поверхности для аппроксимации фигуры небесного тела задаются координаты точки: планетоцентрическая широта (угол между радиус-вектором точки из центра шара и плоскостью экватора) и долгота (двухгранный угол между начальным и текущим меридианом). При использовании референц-поверхности эллипсоида вращения определение долготы остается таким же, как и для шара, а помимо планетоцентрической широты появляется геодезическая (ее еще называют планетографической). Она определяется как угол между нормалью к референц-поверхности и экваториальной плоскостью. На трехосном эллипсоиде нормаль к референц-поверхности не лежит в плоскости меридианного сечения, отсюда появляется задание трех видов широт: планетоцентрической, геодезической (планетографической) и условно-геодезической.

Определение долготы аналогично таковому при использовании в качестве референц-поверхности шара и эллипсоида вращения. Планетоцентрическая широта – это угол между радиус-вектором из центра эллипсоида на данную точку поверхности эллипсоида и плоскостью экватора. Геодезическая широта задается углом между нормалью к поверхности трехосного эллипсоида и экваториальной плоскостью. Условно-геодезическая широта – это угол между нормалью к эллипсу в плоскости меридианного сечения и линией пересечения этой плоскости с экваториальной плоскостью. Для

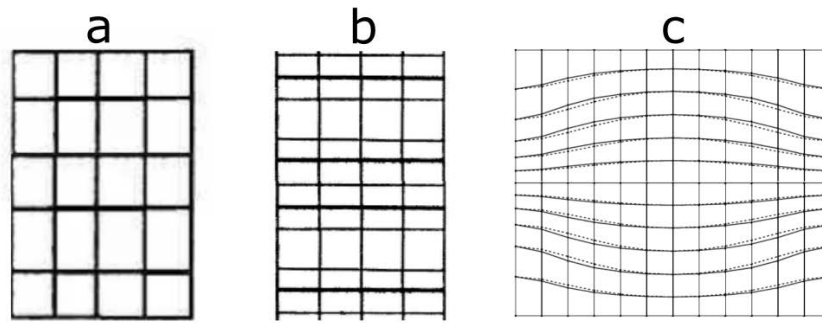
эллипсоида вращения условно-геодезическая и геодезическая широты совпадают. Проблема, которая возникает при картографировании небесных тел с использованием эллипсоида вращения и трехосного эллипсоида, состоит в том, что большинство тематических данных находится в планетоцентрической системе координат. Задав в ГИС-пакете референц-поверхность эллипсоида вращения, картографу предлагается использовать геодезическую широту, поэтому необходим предварительный пересчет из планетоцентрической широты (Нырцов М.В. 2019).

### **2.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЕКЦИЙ ТРЕХОСНОГО ЭЛЛИПСОИДА ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ**

При разработке классификаций картографической проекции трехосного эллипсоида используют существующие классификации проекций сферы и эллипсоида вращения. По виду сетки параллелей и меридианов в нормальной ориентировке выделяют цилиндрические, азимутальные и конические проекции. Для трехосного эллипсоида такие проекции не могут быть построены в соответствии с традиционным определением для сферы и эллипсоида вращения.

Цилиндрические проекции для сферы и эллипсоида вращения (рис. 6а, 6б) в нормальной ориентировке определяют как проекции, в которых меридианы – это равноотстоящие параллельные прямые, а параллели – параллельные прямые, перпендикулярные меридианам. Для трехосного эллипсоида (рис. 6с) такое определение не имеет смысла. При введении промежуточной системы координат (изометрической или эллиптической) можно добиться получения подобного вида сетки, но это не будут меридианы и параллели в привычном смысле.

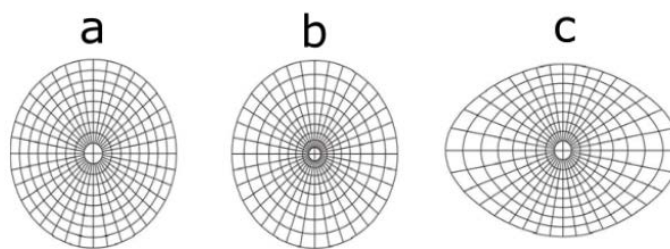
Поэтому цилиндрическими проекциями трехосного эллипсоида считаются проекции, в которых меридианы – параллельные прямые, ортогональные прямолинейному экватору, а параллели – кривые линии, построенные в соответствии с выбранным характером искажений. Необходимо заменить равноотстоящие меридианы на меридианы, позволяющие сохранить длины на экваторе, то есть применять эллиптический цилиндр, касающийся трехосного эллипсоида по экватору.



*Рисунок 6. Макет картографической сетки цилиндрической проекции, сохраняющей длины вдоль меридианов, для сферы (а), эллипсоида вращения (b), трехосного эллипсоида (с)*

Под азимутальными проекциями для сферы и эллипсоида вращения (рис. 7а, 7b) в нормальной ориентировке понимают проекции, в которых меридианы – прямые, сходящиеся в одной точке и пересекающиеся под углами, равными разности долгот соответствующих меридианов, а параллели – концентрические окружности с центром в точке схода меридианов.

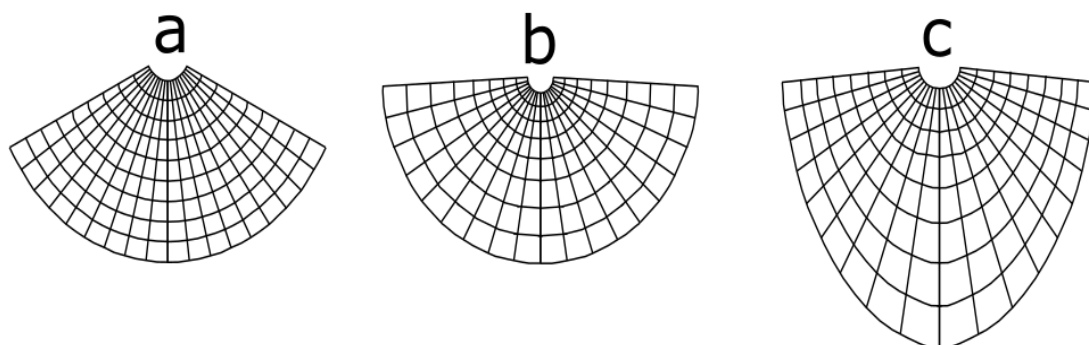
В качестве азимутальной проекции трехосного эллипсоида (рис. 7с) рассматривают проекции, в которых меридианы – пучок прямых линий, выходящих из одной точки, а параллели – кривые линии, построенные в соответствии с выбранным характером искажений. Углы в точке пересечения меридианов в азимутальной проекции равны соответствующим углам на эллипсоиде.



*Рисунок 7. Макет картографической сетки азимутальной проекции, сохраняющие длины вдоль меридианов, для сферы (а), эллипсоида вращения (b), трехосного эллипсоида (с)*

Конические проекции для сферы и эллипсоида вращения (рис. 8а, 8b) в нормальной ориентировке определяют как проекции, в которых параллели – концентрические окружности, а меридианы – пучок прямых, проведенных из центра окружности. При этом углы в точке пересечения меридианов в проекции пропорциональны соответствующим углам на эллипсоиде вращения.

В качестве поверхности, которая может быть спроектирована на плоскость без искажений, используется прямой круговой конус, секущий или касательный. Для трехосного эллипсоида (рис. 8с) в качестве такой поверхности применяют прямой эллиптический конус, касательный к поверхности. Коническими проекциями трехосного эллипсоида считают проекции, в которых меридианы – это пучок прямых линий, выходящих из одной точки, а параллели – кривые линии, построенные в соответствии с выбранным характером искажений.



*Рисунок 8. Макет картографической сетки конической проекции, сохраняющей длины вдоль меридианов, для сферы (а), эллипсоида вращения (b), трехосного эллипсоида (с)*

### **ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ (ГИС) ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ В ПРОЕКЦИИ ТРЕХОСНОГО ЭЛЛИпсоИДА.**

Многие современные карты создаются с помощью программного обеспечения ГИС. А качестве референц-поверхности для большинства малых тел Солнечной системы используется трехосный эллипсоид. На данный момент в ГИС отсутствует возможность выбора референц-поверхности и проекции трехосного эллипсоида.

Основные разработки в области трехосного эллипсоида принадлежат отечественным ученым. Разработанные проекции выполнены в виде функциональных программ, написанные на языке программирования JavaScript. При создании проекции стоит учитывать три разновидности широт – планетоцентрическую, геодезическую и условно-геодезическую.

В настоящее время занимается уточнением геодезических параметров малых небесных тел и их картографированием комплексная лаборатория исследования внеземных территорий - структурное подразделение Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК). На данный момент были созданы:

- Гипсометрическая карта Ио, составленная в видоизмененной проекции Бугаевского для трехосного эллипсоида;
- Гипсометрическая карта Энцелада, составленная в видоизмененной проекции Бугаевского для трехосного эллипсоида;
- Гипсометрическая карта Эроса, составленная в видоизмененной проекции Бугаевского для трехосного эллипсоида;
- 3D-модель поверхности Фобоса;
- 3D модель Энцелада;
- 3D модель Ио.

На данный момент введется работа по:

- Обеспечение координатной основы мест посадок миссии «Фобос-Грунт»;
- Изучению гравитационному полю Эроса;
- Изучению гравитационному полю Фобоса.

#### **3.1 ВЫБОР ОБЪЕКТОВ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ**

Основными объектами для картографирования являются астероиды, метеорные тела, ядра комет, удаленные малые тела. Несмотря на рекомендации Международного астрономического союза, многие ученые в своих работах причисляют планетарные

спутники к малым небесным телам. Фигуры малых небесных тел различны – от близких к сфере и эллипсоиду вращения до нерегулярных. Размеры их колеблются от нескольких тысяч километров до десятка метров.

В качестве субъекта картографирования МНТ могут выступать как рельеф в качестве общегеографического показателя, так и различные тематические факторы: альбедо, гравитационное поле, освещенность, геология и т.д.

При подготовке карты малого небесного тела следует учитывать, что по территориальному охвату и масштабу, такие произведения можно разделить на три основных группы: отображающие малые тела глобально, по полушариям (азимутально) и регионально (также сюда входит локальный уровень отображения, например, для визуализации площадок для приземления). Выбор проекции карты зачастую зависит от характера искажений МНТ и от положения точек полюса (ориентировка картографической сетки).

В настоящее время данные о небесных телах поступают огромными потоками, что создает потребность в их наглядной визуализации в виде карт и картографических изображений. На данный момент основная задача – разработка математических основ и расчет проекций.

Есть среди малых тел объекты, которые подлежат первоочередному исследованию и картографированию:

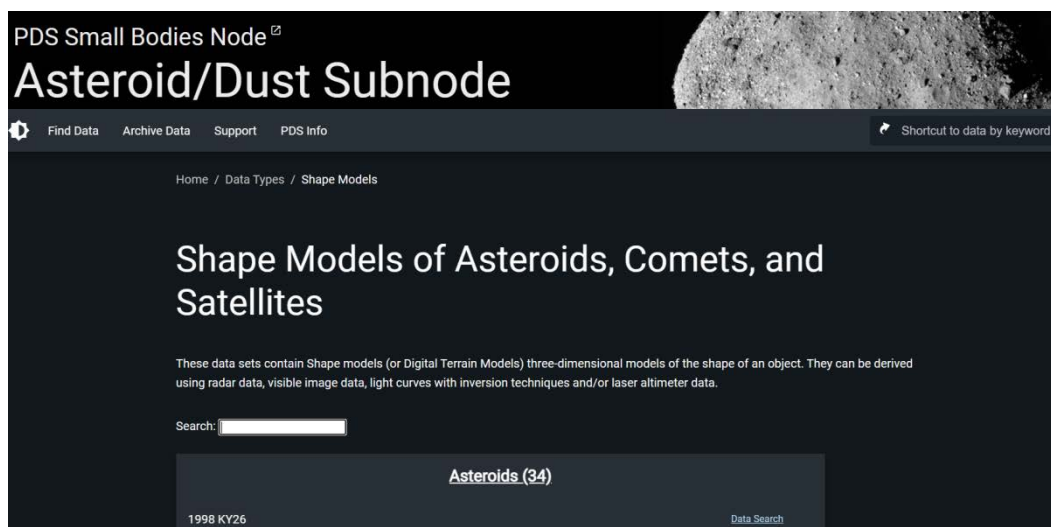
- Это потенциально опасные объекты – астероиды, которые могут приблизиться к Земле на расстояние, меньшее или равное 0,05 а. е. и астероиды, сближающиеся с Землей, орбиты которых не превосходят или равны 1,3 а.е.;
- Малые небесные тела, состав которых может быть использован в качестве добычи редких полезных ископаемых;
- А так же МНТ на поверхность которых планируется посадка космических аппаратов на их поверхность.

В настоящее время в открытом доступе имеются данные по 34 астероидам, 5 кометам и 21 планетарному спутнику.

### **3.2 ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ**

ThePlanetaryDataSystem (PDS) - планетарная система данных представляет собой долгосрочный архив цифровых данных, возвращенных из планетарных миссий НАСА, а также из других видов полетов и сбора наземных данных, включая лабораторные эксперименты. Архивные материалы готовятся исследователями под руководством сотрудников PDS. Все продукты рецензируются, хорошо документируются и легко

доступны через систему онлайн-каталогов, организованных по планетарным дисциплинам. Архивные продукты доступны в режиме онлайн ( [www.pds.nasa.gov](http://www.pds.nasa.gov) 2023).



*Рисунок 9. Портал системы The Planetary Data System*

*[URL: <https://sbn.psi.edu>]*

В PDS находятся цифровые архивы: по альтиметрии, изображения, орбитальные данные, кривые блеска, радарная съемка, гравитационные модели, физические свойства, цифровая модель рельефа малых небесных тел.

Еще одним очевидным источником исходных данных является научный узел, посвященный небесным телам и Системы планетных данных НАСА – Gazetteer of Planetary Nomenclature. В нем находится планетарная номенклатура, которая используется для уникальной идентификации объекта на поверхности планеты или спутника, чтобы этот объект можно было легко обнаружить, описать и обсудить. Этот справочник содержит подробную информацию обо всех названиях топографических объектов и объектов альbedo на планетах и спутниках (и некоторых системах планетарных колец и межкольцевых промежутков), которые Международный астрономический союз (МАС) назвал и утвердил с момента своего основания в 1919 году по настоящее время. Это издание Справочника планетарной номенклатуры заменяет собой более ранние неофициальные тома, распространенные Геологической службой США (USGS) в 1986 году как Открытый файл Отчета 84-692 (Мазурски, Гарольд и другие, 1986), а в 1994 году как Бюллетень геологической службы США 2129 (Бэтсон и Рассел, редакторы). Названные объекты изображены на картах Луны, опубликованных сначала Картографическим агентством министерства обороны США (DMA) или Центром аэронавигационных карт и информации (ACIC), а позднее - Геологической службой США; на картах Меркурия, Венеры, Марса и спутников Юпитера, Сатурна и Урана,



опубликованных Геологической службой США; и на картах Луны, Венеры и Марса, подготовленных СССР.

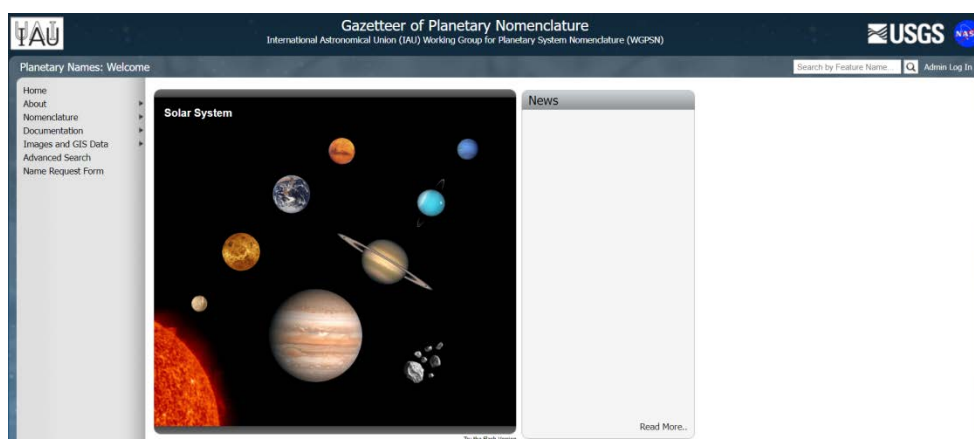


Рисунок 10. Портал системы Gazetteer of Planetary Nomenclature

[URL: <https://pds-smallbodies.astro.umd.edu>]

Помимо этого, интересным для нас является узел о картографии и изображениях (CIS) (Узел формирования изображений, IMG), отвечающий за сбор, сохранение и распространение первичных коллекций цифровых изображений НАСА из миссий во внутренние и внешние планетарные системы Солнечной системы. С помощью CIS можно получить доступ к архивам, вспомогательным данным, а также базе научных знаний в области внеземной картографии и визуализации, которые необходимы для разработки и полного использования обширной коллекции.

Не менее важными являются данные, представленные в «Отчете рабочей группы по координатным системам Международного астрономического союза» (Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2015), откуда можно взять основные параметры фигуры большинства известных небесных тел (Archinal B.A., 2015).

### 3.3 ОБРАБОТКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И СОСТАВЛЕНИЕ КАРТ

Субъект картографирования напрямую связан с типом создаваемой карты малого небесного тела. В таком случае для общегеографических карт основным субъектом является рельеф поверхности тела, как в локальном, так и в глобальном проявлении. В свою очередь для тематических карт МНТ субъектами картографирования могут быть различные гравитационные показатели, оптические свойства поверхности (альbedo), минеральный, физико-химический состав и т.д. Данные параметры являются основой для отображения различных вторичных процессов и явлений.

Одним из главных источников исходных данных является раздел базы данных НАСА, посвященный малым небесным телам и системам планетных данных – NASA

Planetary Data System. Наиболее интересные разделы – это наборы данных для астероидов, околоземных объектов и спутников планет.

Также одним из источников данных является сайт планетной номенклатуры Gazetteer of Planetary Nomenclature. Планетарная номенклатура, как и земная, используется для уникальной идентификации, поэтому данный справочник содержит подробную информацию о всех названиях объектов на планетах и МНТ.

Для выполнения научного исследования, необходимо загрузить и подготовить для погружения в ГИС файл ЦМР исследуемого небесного тела в формате \*.tab из научного узла, посвященного небесным телам, системы планетных данных НАСА. Данные в ЦМР могут иметь различное представление, одно из которых потребует дальнейшего преобразования в вид, доступный для интеграции с другими типами данных.

В первом случае данные ЦМР представляются в виде текстового файла с тремя колонками – долготами  $\lambda$ , широтами  $\Phi$  и радиус-векторами точек поверхности из центра масс тела  $R_{\Phi\lambda}$  (рис. 11).

-90.0000	360.0000	187.7578
-85.0000	0.0000	184.9019
-85.0000	5.0000	184.7734
-85.0000	10.0000	185.0341
-85.0000	15.0000	185.2947
-85.0000	20.0000	185.2789
-85.0000	25.0000	185.2630
-85.0000	30.0000	184.4514
-85.0000	35.0000	183.6398
-85.0000	40.0000	183.3570
-85.0000	45.0000	183.0743
-85.0000	50.0000	182.6479
-85.0000	55.0000	182.2216
-85.0000	60.0000	182.3751
-85.0000	65.0000	182.5286

*Рисунок 11. Представление ЦМР астероида 243 Ида в виде трех значений координат точек*

Во втором случае файл ЦМР представляет собой триангуляционную сеть с пространственными прямоугольными координатами вершин с различной частотой (64, 128, 256 или 512 ячеек) (рис. 12).

0.000000	0.000000	0.407973
0.028285	0.000000	0.383218
0.014924	0.024691	0.400146
-0.016261	0.026977	0.438253
-0.033815	0.000000	0.459077
-0.015675	-0.025813	0.417858
0.014271	-0.023637	0.382958
0.054205	0.000000	0.369090
0.049612	0.025096	0.378162
0.033312	0.046219	0.392476
0.007524	0.058822	0.413017
-0.023982	0.059922	0.447029
-0.054565	0.045717	0.481134

*Рисунок 12. Пример описания ЦМР астероида 4486 Митра в виде триангуляционной сети*

Загрузить из планетного газеттира <http://planetarynames.wr.usgs.gov/> shape-файл с номенклатурой форм рельефа исследуемого небесного тела, находящийся в архиве формата \*.zip.

Найти в Отчете рабочей группы по координатным системам Международного астрономического союза (МАС) средний радиус сферы, описывающей исследуемое

небесное тело. Если данные отсутствуют, то принять радиус сферы равным большой полуоси эллипсоида.

Загрузить фотомозаику поверхности или отмывку рельефа картографируемого небесного тела по ссылке <https://sbn.psi.edu/pds/resource/stookemaps.html>.

Традиционно в классических учебниках по математической картографии приводят параметры референц-эллипсоидов, значения радиусов кривизны меридианного сечения, сечения первого вертикала, радиусы параллелей, различные вспомогательные для вычисления проекций величины и прочие данные (Нырцов М. В. 2019).

Сейчас, когда требуются высокие скорости вычислений, большинство картографов используют онлайн калькуляторы, представляющие собой программы по вычислению необходимых для математической картографии величин, в том числе выше упомянутых. Программы, как правило, написаны на языке программирования JavaScript и требуют от пользователя лишь введения исходных данных для решаемой задачи (Нырцов М. В. 2019).

Если шире посмотреть на задачу вычислений с помощью программ, размещенных в Интернете, то становится очевидна тенденция к открытости разработок. Это касается не только программного геоинформационного обеспечения, но и идей авторов в области математической картографии. Например, выкладывают исходные коды программ, позволяющих визуализировать картографические данные в различных проекциях, или размещают программы для вычисления узлов картографических сеток проекций, не входящих в модули проекций ГИС-программ (Нырцов М. В. 2019).

С помощью программы пересчета в прямоугольные координаты/построение картографической сетки (рис. 13) необходимо подготовить файл, содержащий опорные точки для перепроецирования (трансформации). Для этого нужно ввести полуоси референц-поверхности в метрах (значения полуосей взять из Отчета рабочей группы по координатным системам МАС), установить шаг сетки в  $10^\circ$  и нажать на кнопку “result” (рис. 13). Рисунки фотомозаик, сеток и карт астероида 4 Веста выполнены с учетом значений полуосей трехосного эллипсоида  $a = 289000$  метров,  $b = 280000$  метров,  $c = 229000$  метров. Файл с вычисленными координатами скопировать, нажав на кнопку “copy”.

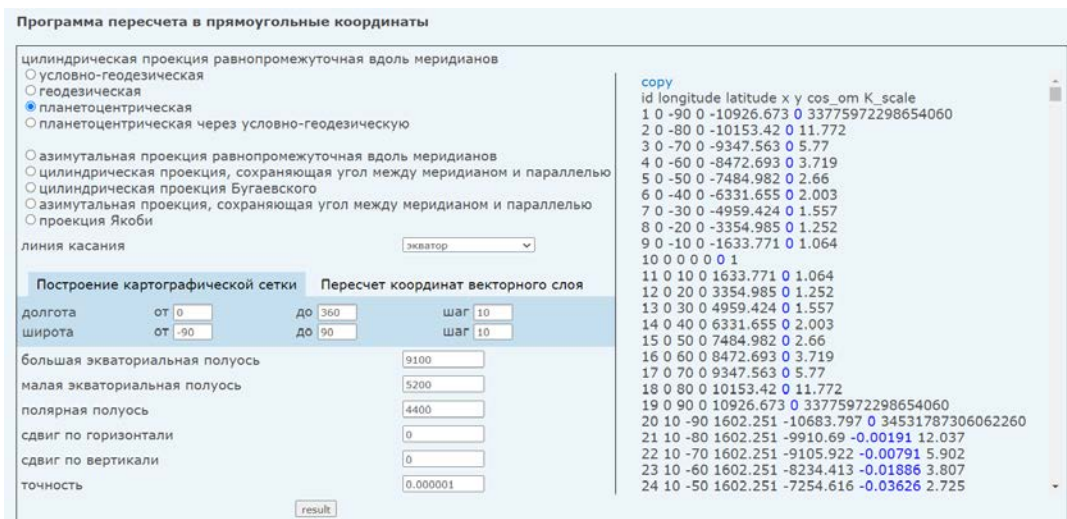


Рисунок 13. Программа пересчета в прямоугольные координаты

Для подготовки к экспорту в QGIS открыть текстовый файл в табличном редакторе, например Microsoft Excel. Разделить текст по столбцам, указав в качестве разделителя пробел (рис. 14).

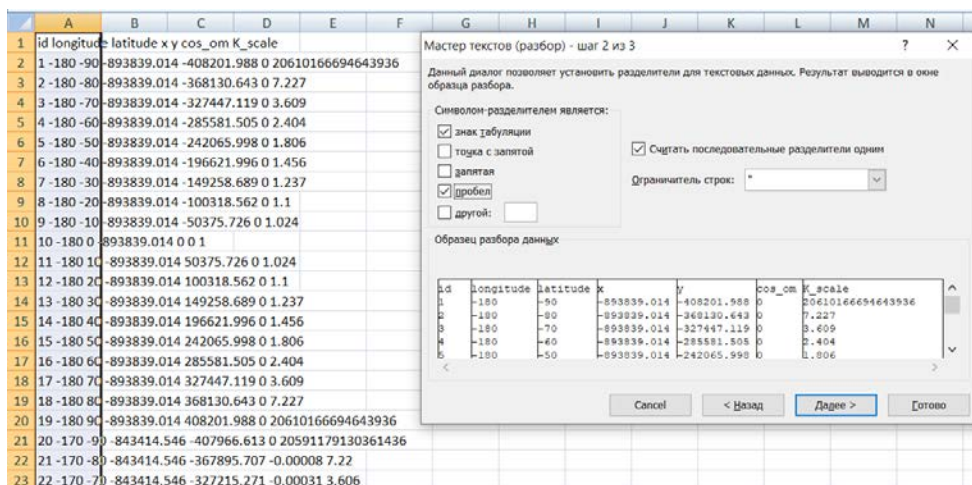


Рисунок 14. Подготовка к экспорту в QGIS

Удалить ненужные столбцы: id, cos\_om, K\_scale. Столбцы longitude, latitude поменять местами со столбцами x, y (рис 15, а). Привести таблицу к виду, соответствующему формату файла опорных точек QGIS (\*.points). Названия столбцов необходимо переименовать вместо “x” “mapx”, вместо “y” “mapy”, вместо “longitude” “pixelx”, вместо “latitude” “pixely”. Добавить столбец “enable” со значениями 1. Сохранить таблицу в файл в формате \*.csv (рис. 15, b).

Исходные точки находятся в планетоцентрической системе широт и долгот, а точки, в которые будет трансформироваться фотомозаика, находятся в прямоугольных координатах цилиндрической проекции трехосного эллипсоида, сохраняющей длины вдоль меридианов.

	A	B	C	D
1	x	y	longitude	latitude
2	-893839.0	-408201.9	-180	-90
3	-893839.0	-368130.6	-180	-80
4	-893839.0	-327447.1	-180	-70
5	-893839.0	-285581.5	-180	-60
6	-893839.0	-242065.9	-180	-50
7	-893839.0	-196621.9	-180	-40
8	-893839.0	-149258.6	-180	-30
9	-893839.0	-100318.5	-180	-20
10	-893839.0	-50375.72	-180	-10
11	-893839.0	0	-180	0
12	-893839.0	50375.726	-180	10
13	-893839.0	100318.56	-180	20

	A	B	C	D	E
1	mapx	mapy	pixelx	pixely	enable
2	-893839.0	-408201.9	-180	-90	1
3	-893839.0	-368130.6	-180	-80	1
4	-893839.0	-327447.1	-180	-70	1
5	-893839.0	-285581.5	-180	-60	1
6	-893839.0	-242065.9	-180	-50	1
7	-893839.0	-196621.9	-180	-40	1
8	-893839.0	-149258.6	-180	-30	1
9	-893839.0	-100318.5	-180	-20	1
10	-893839.0	-50375.72	-180	-10	1
11	-893839.0	0	-180	0	1
12	-893839.0	50375.726	-180	10	1
13	-893839.0	100318.56	-180	20	1
14	-893839.0	149258.68	-180	30	1

a

b

Рисунок 15. Создание опорных точек

Файл с опорными точками нужно открыть текстовым редактором и произвести замену “;” на “,”.

Присвоить имя файлу csv аналогичное имени растра, включив в него расширение, т.е. “Asteroid 253 Matilda\_modified.tif”. Поменять расширение \*.csv на \*.points.

Загружаем фотомозаику поверхности картографируемого внеземного объекта через привязку растра в QGIS. Так как фотомозаика поверхности астероида имеет размер 3600 на 1800 пикселей, то точка 1 (id = 0) будет иметь координаты (dstX = 0, dstY = 90°) и (scrX = 0, scrY = 0), точка 2 (id=1) – координаты (360°, – 90°) и (scrX = 3600, scrY = – 1800).

Устанавливаем параметры трансформации:

Тип трансформации: Линейная

Метод интерполяции: Ближайший сосед

Целевой растр: Asteroid 433 Eros\_modified.tif

Целевую систему координат оставить по умолчанию WGS 84 (EPSG: 4326)

Далее необходимо перепривязать растр в QGIS (рис. 16), в окне привязки выбрать Asteroid 253 Matilda\_modified.tif, автоматически откроются опорные точки для привязки.

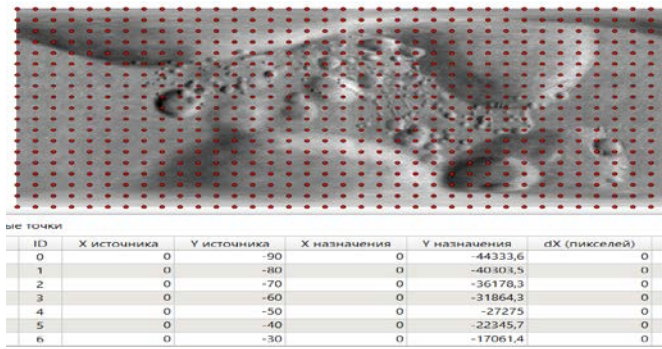
Устанавливаем параметры трансформации:

Тип трансформации: ThinPlateSpline

Метод интерполяции: Ближайший сосед

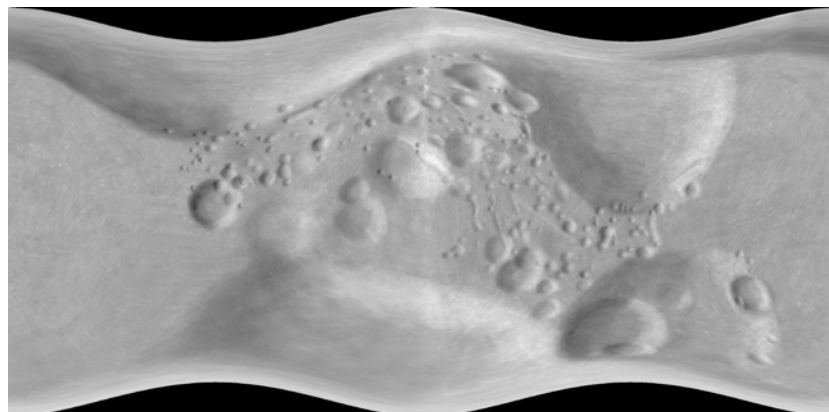
Целевойрастр: Asteroid 253 Matilda\_modified\_modified.tif

Целевую систему координат оставить по умолчанию WGS84



*Рисунок 16. Привязка растра по опорным точкам*

Перейти в окно проекта в нем отобразится фотомозаика поверхности картографируемого небесного тела, трансформированная из квадратной цилиндрической проекции сферы в цилиндрическую проекцию трехосного эллипсоида, сохраняющую длины вдоль меридианов (рис.17).



*Рисунок 17. Фотомозаика астероида 253 Матильда в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида*

С помощью программы расчета высот (рис. 18) вычислить высоты  $h$  относительно трехосного эллипсоида, отсчитываемые по нормали, подставив предварительно в форму значения полуосей трехосного эллипсоида, описывающего исследуемое небесное тело (значения полуосей взять из Отчета рабочей группы по координатным системам МАС). Файл ЦМР оформить в табличном редакторе, разделителями должны быть «;», колонки должны называться «la»; «fi»; «t». Программа расчета высот 360-й меридиан вычисляет как три точки на полюсах и экваторе. Поэтому нужно в текстовом редакторе продублировать 0-й меридиан на место 360-го. Полученные данные сохранить в формате csv и добавить в QGIS (рис. 19).

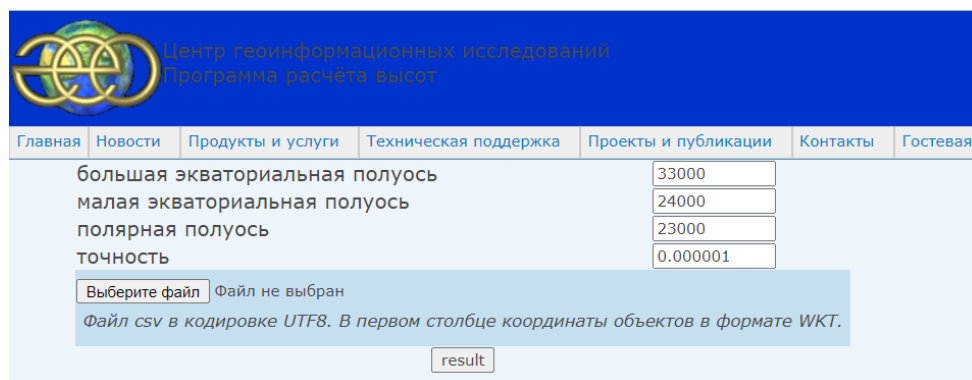


Рисунок 18. Программа пересчеты высот

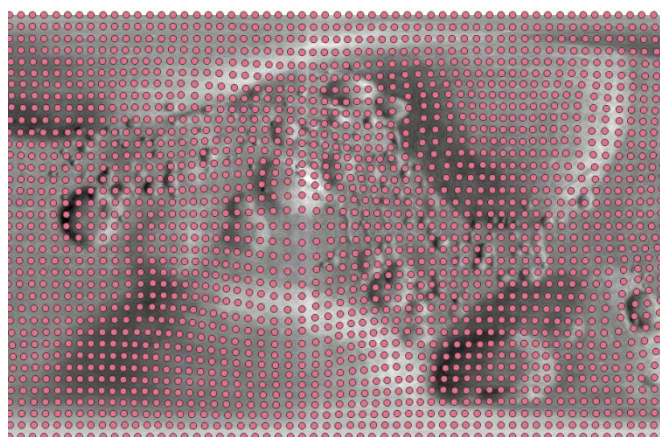


Рисунок 19. Визуализация ЦМР астероида 253 Матильда в квадратной цилиндрической проекции

Файл ЦМР сокращенный до трех колонок, загрузить в программу пересчета в прямоугольные координаты/пересчет координат векторного слоя. В результате должен сформироваться новый файл, состоящий из координат точек в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида  $x$ ,  $y$  и высот  $h$  относительно поверхности трехосного эллипсоида. Эти точки необходимо интегрировать в ГИС-проект (рис. 20).

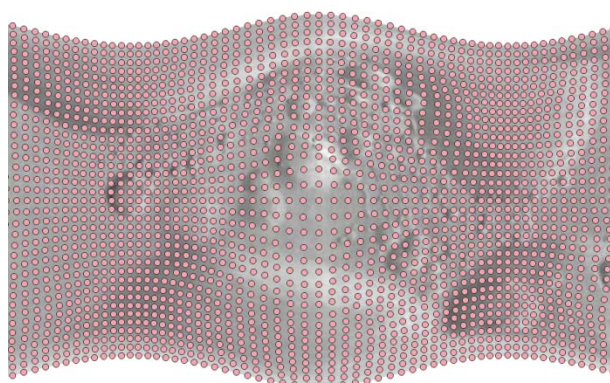
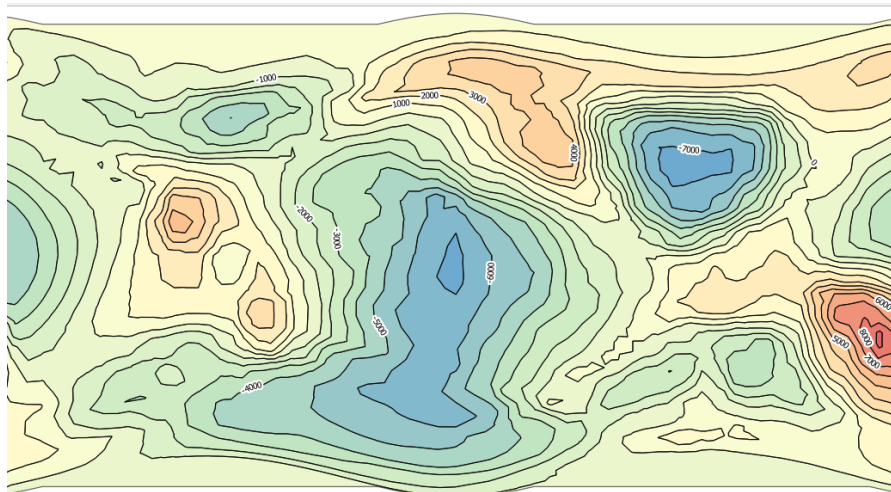


Рисунок 20. Визуализация ЦМР астероида 253 Матильда в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида

К тематическому содержанию взеземных карт, чаще всего относятся, гипсометрические карты, которые отображают общую характеристику территории: распределение форм рельефа и высотные пояса, строить профили и сравнивать абсолютные и относительные высоты.

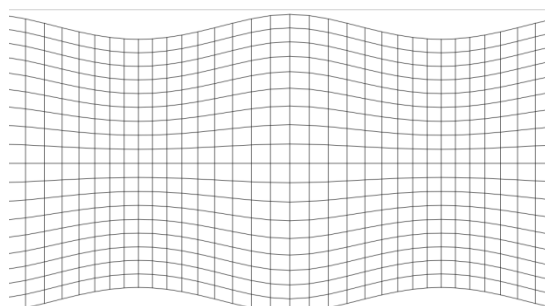
С помощью модуля Contour составим гипсометрическую карту (рис. 21).



*Рисунок 21. Гипсометрическая карта астероида 253 Матильда в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида*

Аналогично пересчету точек со значениями высот пересчитывается слой с наименованиями форм рельефа из планетоцентрических координат в прямоугольные координаты проекции трехосного эллипсоида.

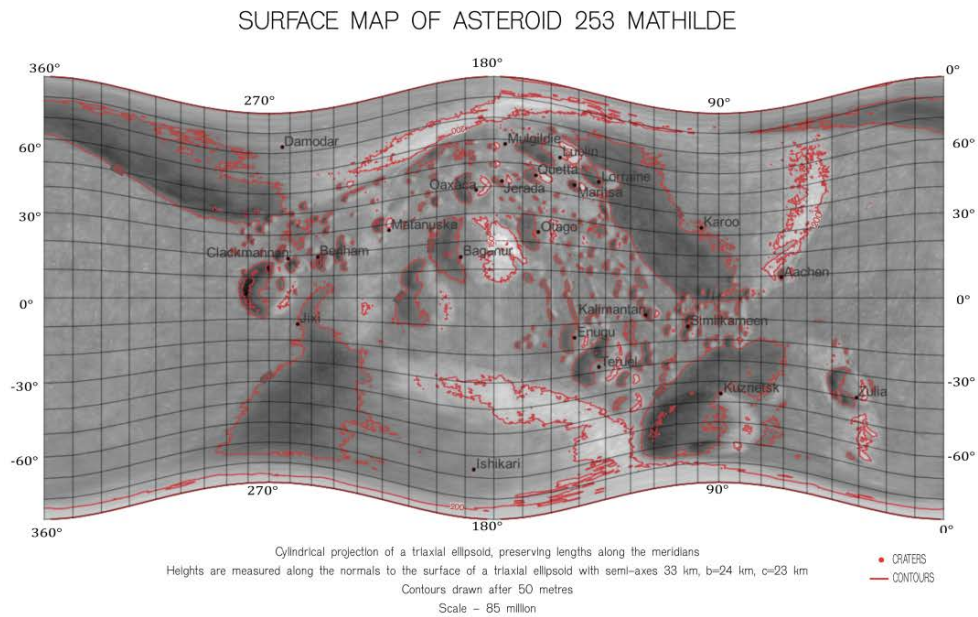
Построить картографическую сетку в проекции составляемой карты. Для этого нужно выполнить следующее. Сохранить таблицу с координатами узловых точек картографической сетки в формате \*.csv из программы пересчета в прямоугольные координаты/построение картографической сетки. Визуализировать узловые точки в QGIS. Соединить точки линиями с помощью инструмента анализа “Точки в путь”, получив картографическую сетку (рис. 22).



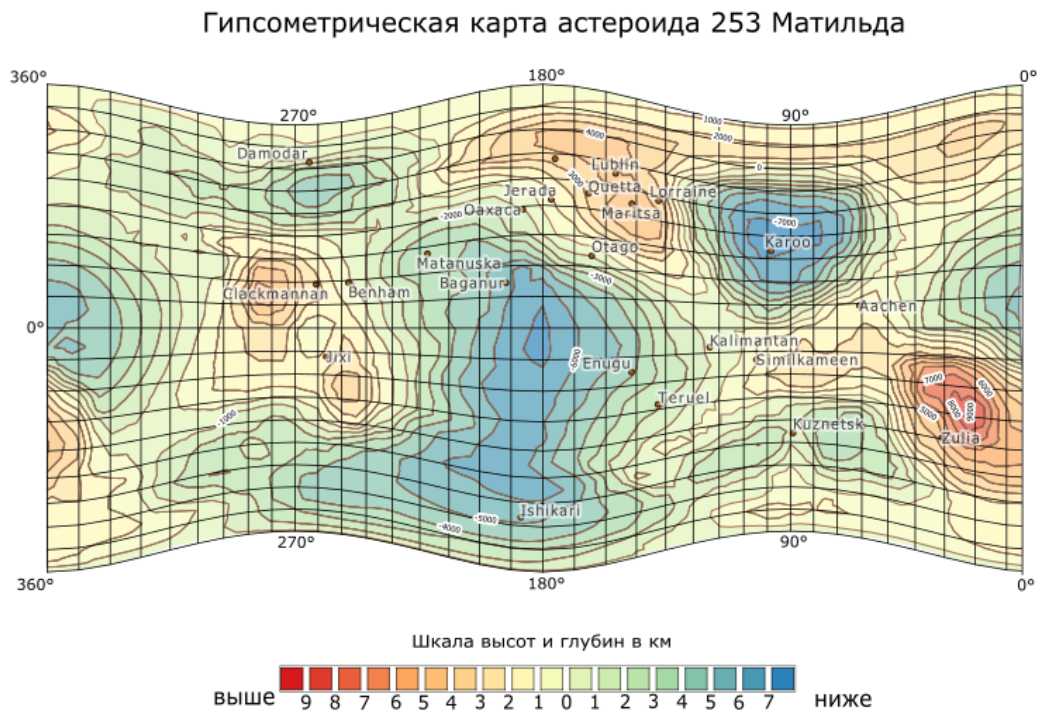
*Рисунок 22. Картографическая сетка астероида 253 Матильда в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида*



Так по результату выполненной работы были составлены: фотокарта поверхности астероида 253 Матильда и гипсометрическая карта астероида 253 Матильда (рис. 23,24).



*Рисунок 23. Фотокарта поверхности астероида 253 Матильда в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида*



*Рисунок 24. Гипсометрическая карта астероида 253 Матильда в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида*

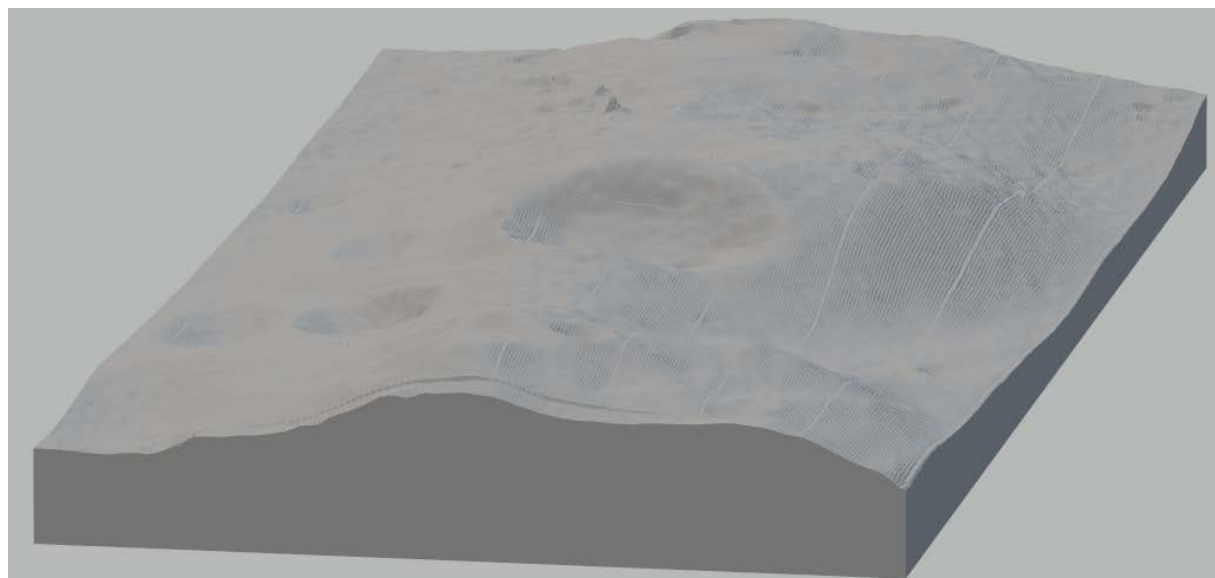
### 3.4 СОСТАВЛЕНИЕ 3D МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА В ПРОГРАММЕ JMARS

JMars - Это геопространственная информационная система, разработанная Центром космических полетов на Марс ASU для предоставления инструментов планирования миссий и анализа данных орбитальным аппаратам НАСА, членам группы по приборам, студентам всех возрастов и широкой публике. JMARS обеспечивает бесплатный и эффективный доступ к более чем терабайту данных орбитальных аппаратов НАСА и имеет базовые функции обработки изображений и векторов для удобного сравнения, построения графиков и смешивания данных.

В программу JMARS необходимо скачать и зарегистрироваться на сайте (<https://jmars.asu.edu>). После регистрации необходимо авторизоваться по логину и паролю, а также выбрать необходимое картографируемое небесное тело.

Для дальнейшей работы необходимо импортировать созданную ранее гипсометрическую карту. С помощью инструмента «Создание кратера» выбираем необходимый диаметр кратера. В настройках указываем необходимую цифровую модель рельефа (ЦМР), полученную с помощью стереокамер космических аппаратов.

С помощью инструмента «3D слой» визуализируем изображение кратера. В параметрах слоя указываем ЦМР идентичную для создания кратера. Данные необходимо скачать в формате .stl (рис. 25).



*Рисунок 25. 3D модели кратера Aachen на астероиде 253 Матильда*

### **3.5 АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ АСТЕРОИДОВ 242 ИДА И 951 ГАСПРА В ПРОЕКЦИИ ТРЕХОСНОГО ЭЛЛИПСОИДА В РАМКАХ ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ ПО КУРСУ «КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПЛАНЕТ»**

Апробация методики составления карт в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида астероидов 242 Ида и 951 Гаспра была проведена среди студентов 4 курса бакалавриата группы 19.Б04-нз образовательной программы “Картография и геоинформатика” Санкт-Петербургского университета по дисциплине «Картографирование планет». Группа состояла из 8 студентов.

Дисциплина «Картографирование планет» направлена на формирование у студентов компетенций для работы с современными методами и исследованиями внеземных объектов, поэтому к задачам освоения дисциплины относятся:

1. Ознакомление с историей и современным состоянием исследования внеземных объектов;
2. Изучение основных характеристик внеземных объектов и особенностей их картографирования.
3. Получение данных для построения карт внеземных объектов.

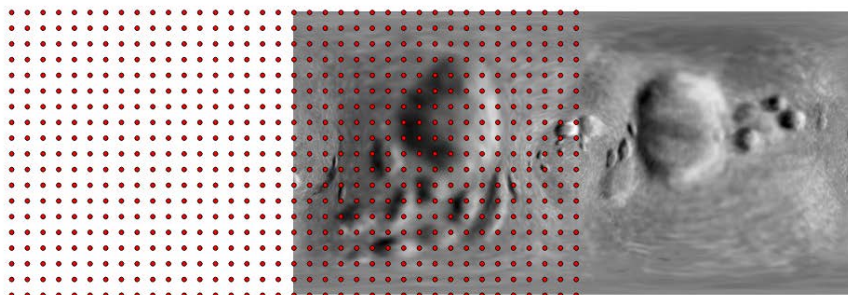
В рамках педагогической практики моя цель заключалась в помощи преподавателю в проведении теоретических, практических занятий и в апробации результатов дипломного проекта. В мои задачи входило:

1. по теоретической части - обновление информации по современному состоянию изученности внеземных объектов.
2. по практической части:
  - разработка задания по созданию 3D модели кратеров;
  - картографирование малых небесных тел в квадратной цилиндрической проекции сферы;
  - апробация методики картографирования малых небесных тел в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида.

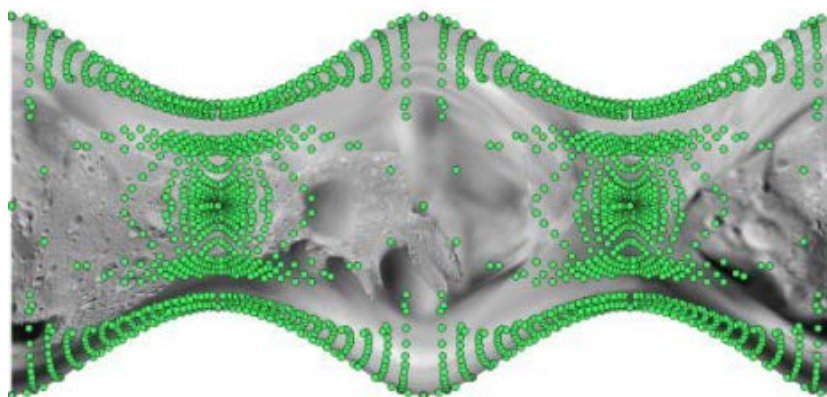
Во время прохождения практических занятий по дисциплине «Картографирование планет» студентам было необходимо помимо составленных карт поверхности и гипсометрических карт в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида, составить отчет, в котором необходимо было подробно описать поэтапное выполнение работы. В ходе работы у студентов были допущены следующие ошибки:

1. Некорректно указаны долготы для построения картографической сетки (рис. 26).

2. Значения радиус-векторов точек поверхности не были переведены из километров в метры, из-за чего программа расчета высот неточно рассчитывала значения высоты  $h$  (рис. 27).



*Рисунок 26. Ошибка в привязке раstra*



*Рисунок 27. Визуализация ЦМР с ошибкой в расчетах радиус-вектора*

В результате студенты исправили ошибки и справились с поставленной задачей - подготовили фотокарты и гипсометрические карты малых небесных тел в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида (прил. 1, 2 ,3 ,4). Таким образом, апробация методики создания карт малых небесных тел в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида, прошла успешно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения научно-исследовательской работы была достигнута ее цель – изучена методика картографирования малых небесных тел в цилиндрической проекции трехосного эллипсоида и созданы карты астероидов 242 Иды, 253 Матильды и 951 Гаспры, а также решены следующие поставленные задачи:

1. Была изучена необходимая тематическая литература по внеземной картографии, при этом основной акцент делался на расчете проекций и картографировании малых небесных тел. Также были освоены методики картографирования малых небесных тел и основные вопросы математической картографии применительно к малым небесным телам в проекции трехосного эллипсоида.

2. Были рассмотрены три основных источника исходных данных – Gazetteer of Planetary Nomenclature, PDS Small Bodies Node и Отчёты рабочей группы Международного астрономического союза.

3. Было проведено картографирование МНТ и созданы карты астероидов 242 Иды, 253 Матильды и 951 Гаспры. Также были созданы примеры оформления карт малых небесных тел и принципы использования ЦМР и материалов космической съёмки для картографирования.

4. В рамках педагогической практики успешно прошла апробация практической работы по картографированию МНТ для 4 курса бакалавриата в рамках дисциплины «Картографирование планет».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pędzich P. A low distortion conformal projection of a triaxial ellipsoid and its application for mapping of extra-terrestrial objects // Planetary and Space Science. 178, 104697.
2. Pędzich P. Equidistant map projections of a triaxial ellipsoid with the use of reduced coordinates // Geodesy and Cartography. 2017. – С. 271-290.
3. PIA17480: Touring the Giant Asteroid Vesta URL: [clk.ru/SttQN](http://clk.ru/SttQN) (дата обращения: 01.12.2021).
4. Planetary Data System Geosciences Node. National aeronautics and space administration (NASA) // URL: <http://pds-geosciences.wustl.edu>
5. STEREO NASA URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/stereo/sun/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/stereo/sun/index.html) (дата обращения 01.12.2021).
6. Атлас планет Земной группы и их спутников. М.: МИИГАиК, 1992. 208 с
7. Атлас поверхности Венеры / Под ред. В.А. Котельникова и др. М.: ГУГК; 1989. 328 с.
8. Атлас Фобоса / Коллектив авторов. М.: МИИГАиК, 2015.
9. Бугаевский Л. М., Нырцов М. В. Картографирование малых небесных тел с использованием составных эллипсоидов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2006. №. 6. С. 158-168.
10. Диссертации MaxPlanckinstitute URL: <http://www.mpia.de/study-and-career/studying-at-mpia/bachelor-and-master-theses> (дата обращения 01.12.2021)
11. Зубарев А.Э., Надеждина И.Е., Патратий В.Д. и др. Создание базы геоданных изображений для оценки изученности поверхности спутника Юпитера Ганимед по данным миссий Галилео и Вояджер-1, -2 // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2014. №. 6. С. 37-41.
12. История NASA URL: <https://www.nasa.gov/topics/history/index.html> (дата обращения 01.12.2021)
13. Карачевцева И. П. и др. Роль геодезии и картографии в исследовании внеземных территорий: современные методы и технологии изучения небесных тел // Международный год карт в России: объединяя пространство и время, 2016. С. 126- 129.
14. Кравцова В.И. Космические методы картографирования / Под ред. Ю. Ф. Книжникова М.: Изд-во МГУ, 1995. 240 с.

15. Нырцов М.В. Актуальные проблемы картографирования внеземных объектов // Картография в цифровую эпоху Т. 144 / Под ред. В.М. Котлякова и др. М.: Изд. дом «Кодекс». 2017. С. 42–51.
16. Нырцов М. В. История картографирования малых тел Солнечной системы//Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка.- 2014.-№4-С. 40-45.
17. Нырцов М.В. Математическая картография сегодня // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80, №1. – С.52-57.
18. Нырцов М.В. Проблемы математической картографии в ГИС // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», 2019. №25(1). С. 332–336.
19. Нырцов М.В. Разработка теории и методологии картографирования малых небесных тел: Дисс. на соиск. уч. степ.докт. техн. наук. 2 тома. М., 2012
20. Нырцов М.В., Флейс М.Э., Борисов М.М. Картографирование астероида 433 Эрос в равнопромежуточных вдоль меридианов цилиндрической и азимутальной проекциях трехосного эллипсоида // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 1. С. 54–61.
21. Родионова Ж. Ф. Обзорное картографирование Луны // Аспекты комплексного исследования Луны. – Москва,1986. – С. 17-29.
22. Родионова Ж. Ф. Общераспространенное картографирование Луны // Геодезия и аэрофотосъемка. – Москва,1983. – С. 24-33.
23. Савиных В.П., Смирнов Л.Е., Шингарева К.Б. География внеземных территорий. М.:Дрофа, 2009. 252 с
24. Савиных В. П. и др. Картографирование внеземных территорий: современные задачи космической топонимики. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2016. №. 5. С. 63-67.
25. Савиных В. П. и др. Научные подходы и современные технологии для сохранения исторического наследия в исследованиях космического пространства // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2019. Т. 63. №. 1. С. 5-12.
26. Смирнов Л.Е. Внеземная картография. СПб.:Изд-во С.-Петербург. ун-та,1992.160 с.
27. Флоренский К.П. Современные представления о Луне. М.: Наука, 1972.
28. Шибанова М.С., Лазарев Е.Н., Родионова Ж.Ф. Новая карта спутников Марса // Земля и Вселенная. 2012. № 6. С. 3–18.

29. Шингарева К. Б. Внеземная картография: проблемы классификации и наименований форм поверхности тел Солнечной системы // Картография и геоинформатика.- Москва.2008. – С. 106-112.

30. Электронные книги  
NASAURL:<https://www.nasa.gov/connect/ebooks/index.html> (дата обращения 01.12.2021)

31. Электронный атлас URL: <http://www.planetmaps.ru/ru/projects/onlineatlas/>  
(дата обращения 01.12.2021)

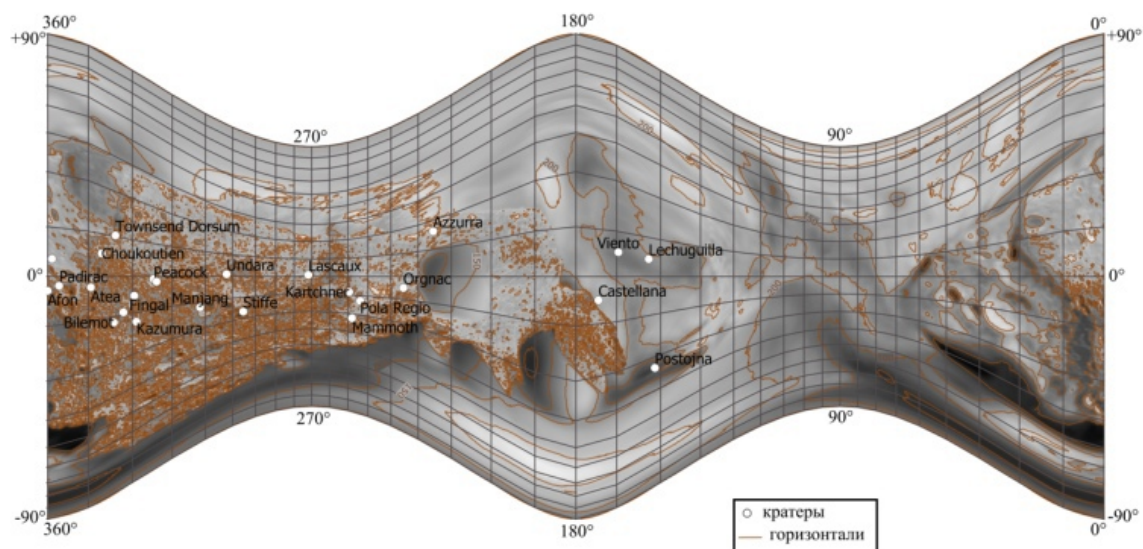
32. Сайт МИИГАиKURL: <http://miigaik.ru/eng/mexlab/> (дата обращения 01.12.2021)



# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение №1

### Фотокарта поверхности астероида Ида

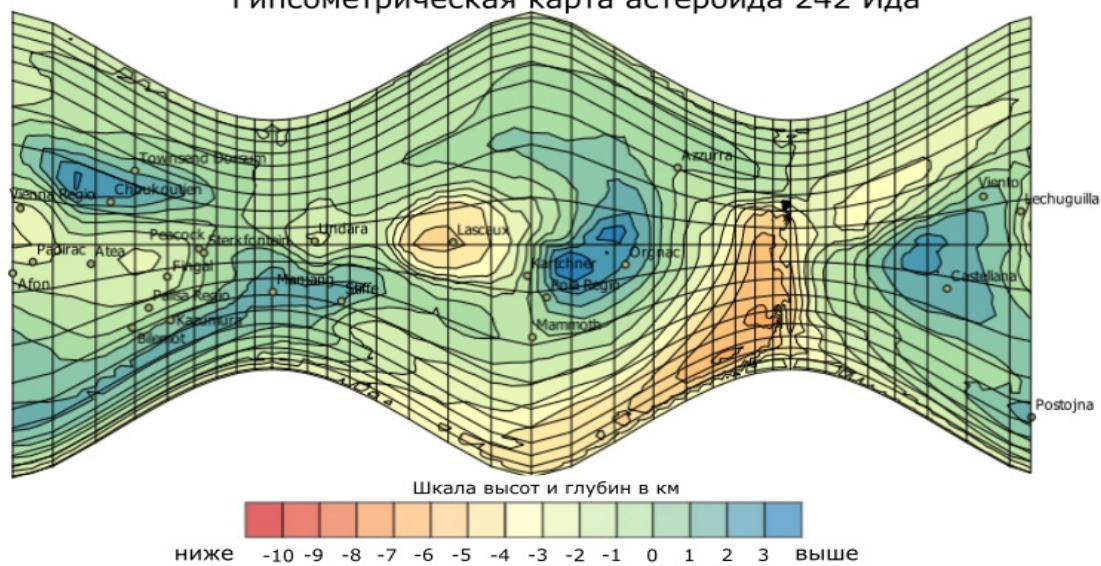


Цилиндрическая проекция трехосного эллипсоида, сохраняющая длины вдоль меридианов  
Высоты отсчитываются по нормали к поверхности трехосного эллипсоида с полуосями  $a=26,8$  км  $b=12$  км  $c=7,6$  км  
Горизонталы проведены через 50 метров

Составлено: Попова Мария по материалам из открытых источников

## Приложение № 2

### Гипсометрическая карта астероида 242 Ида

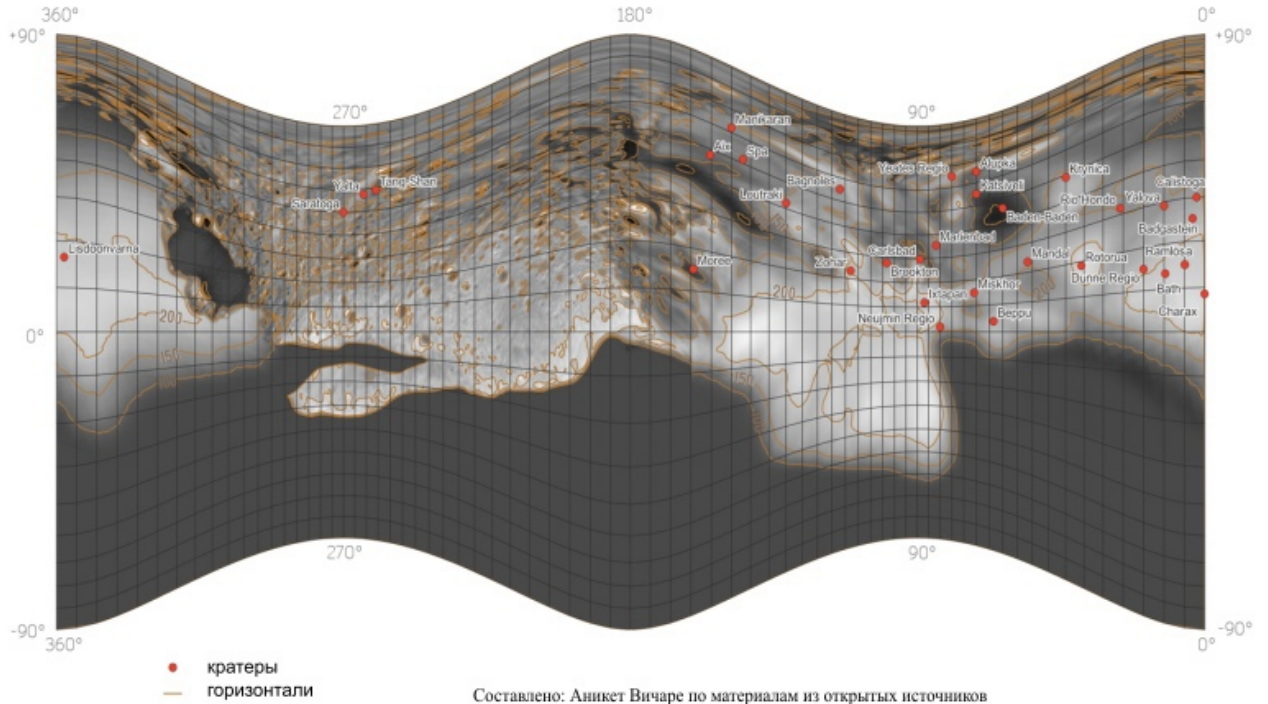


Цилиндрическая проекция трехосного эллипсоида, сохраняющая длины вдоль меридианов  
Высоты отсчитываются по нормали к поверхности трехосного эллипсоида с полуосями  $a=26,8$  км  $b=12$  км  $c=7,6$  км  
Горизонталы проведены через 50 метров

Составлено: Попова Мария по материалам из открытых источников

### Приложение №3

#### Фотокарта поверхности астероида 951 Гаспра

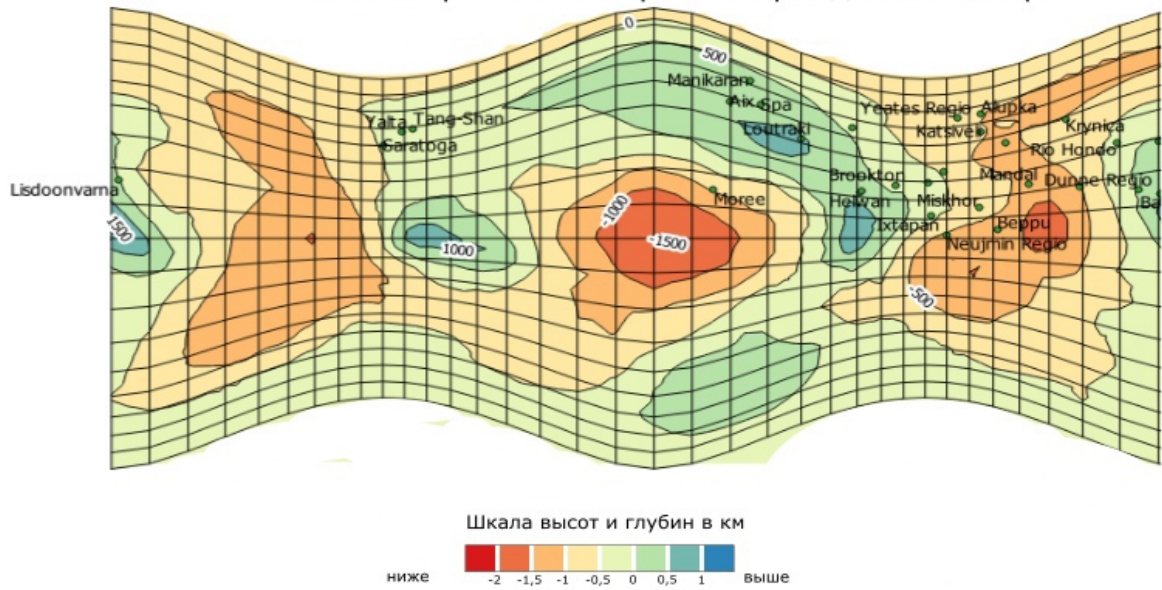


Составлено: Аникет Вичаре по материалам из открытых источников

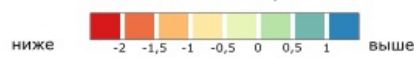
Цилиндрическая проекция трехосного эллипсоида, сохраняющая длины вдоль меридианов  
 Высоты отсчитываются по нормали к поверхности трехосного эллипсоида с полуосями  $a=9,1$  км,  $b=5,2$  км,  $c=4,4$  км  
 Горизонталы проведены через 50 метров

### Приложение №4

#### Гипсометрическая карта астероида 951 Гаспра



Шкала высот и глубин в км



Составлено: Аникет Вичаре по материалам из открытых источников

Цилиндрическая проекция трехосного эллипсоида, сохраняющая длины вдоль меридианов  
 Высоты отсчитываются по нормали к поверхности трехосного эллипсоида с полуосями  $a=9,1$  км,  $b=5,2$  км,  $c=4,4$  км  
 Горизонталы проведены через 50 метров