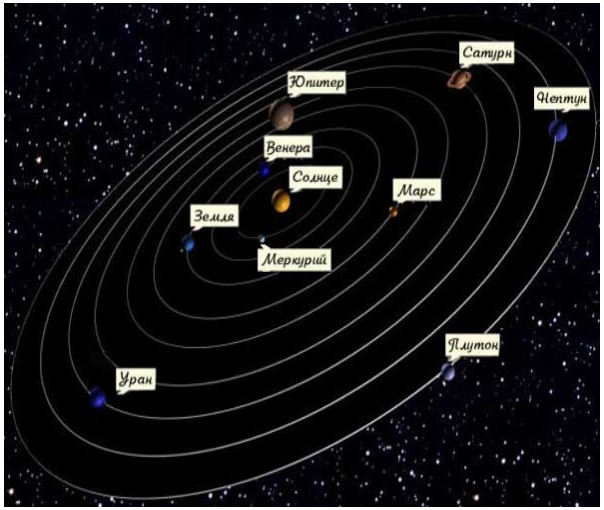
Радиолокация астероидов и комет

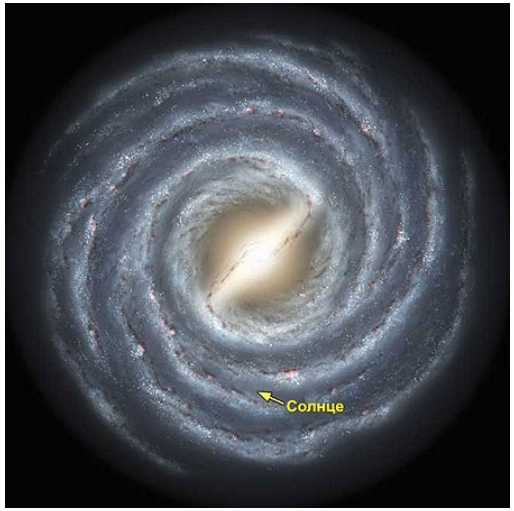
Медведев Юрий Дмитриевич
Заведующий лабораторией малых тел Солнечной системы
Института прикладной астрономии РАН

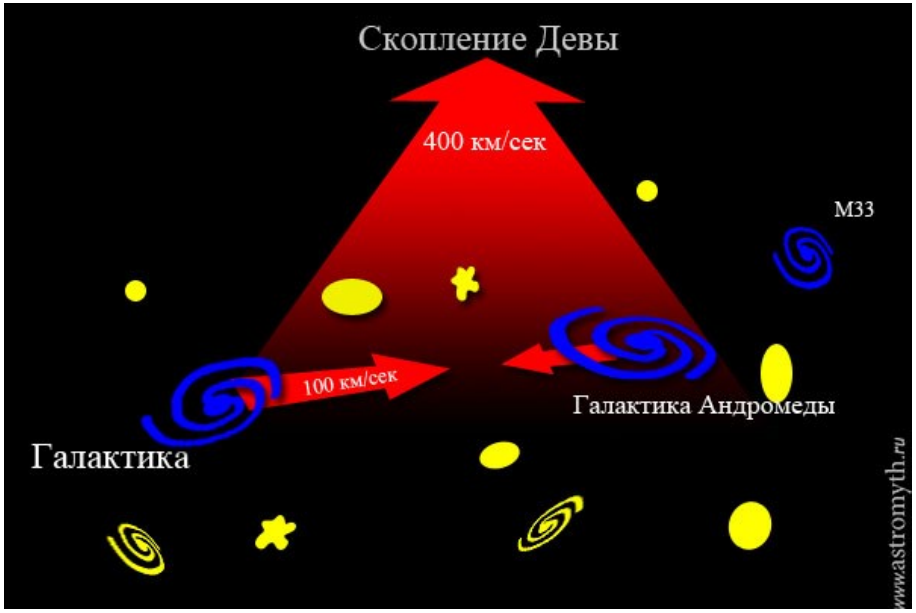
Координатно-временное и навигационное обеспечение страны

1. Построение и поддержание небесной системы координат.
2. Построение и поддержание земных систем координат.
3. Определение параметров ориентации земной системы координат относительно небесной системы координат — параметров вращения Земли.
4. Построение эфемерид тел Солнечной системы и космических аппаратов.
5. Оценка вероятности столкновения небесных тел с Землей и другими планетами.
6. Определение параметров гравитационного поля Земли.

Необходимость системы координат



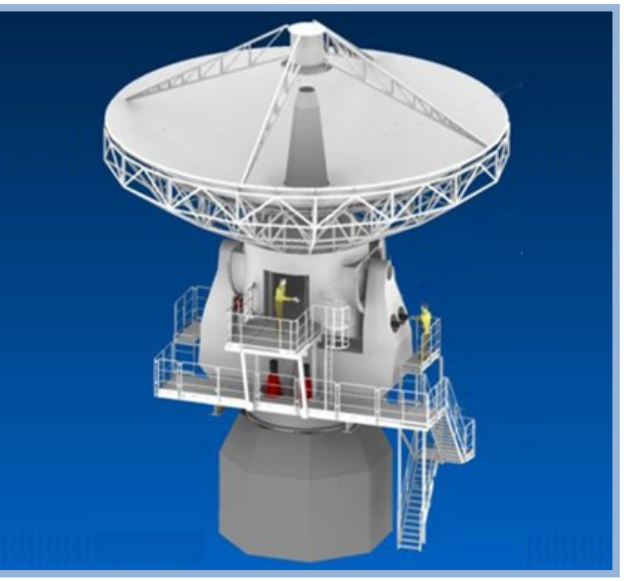




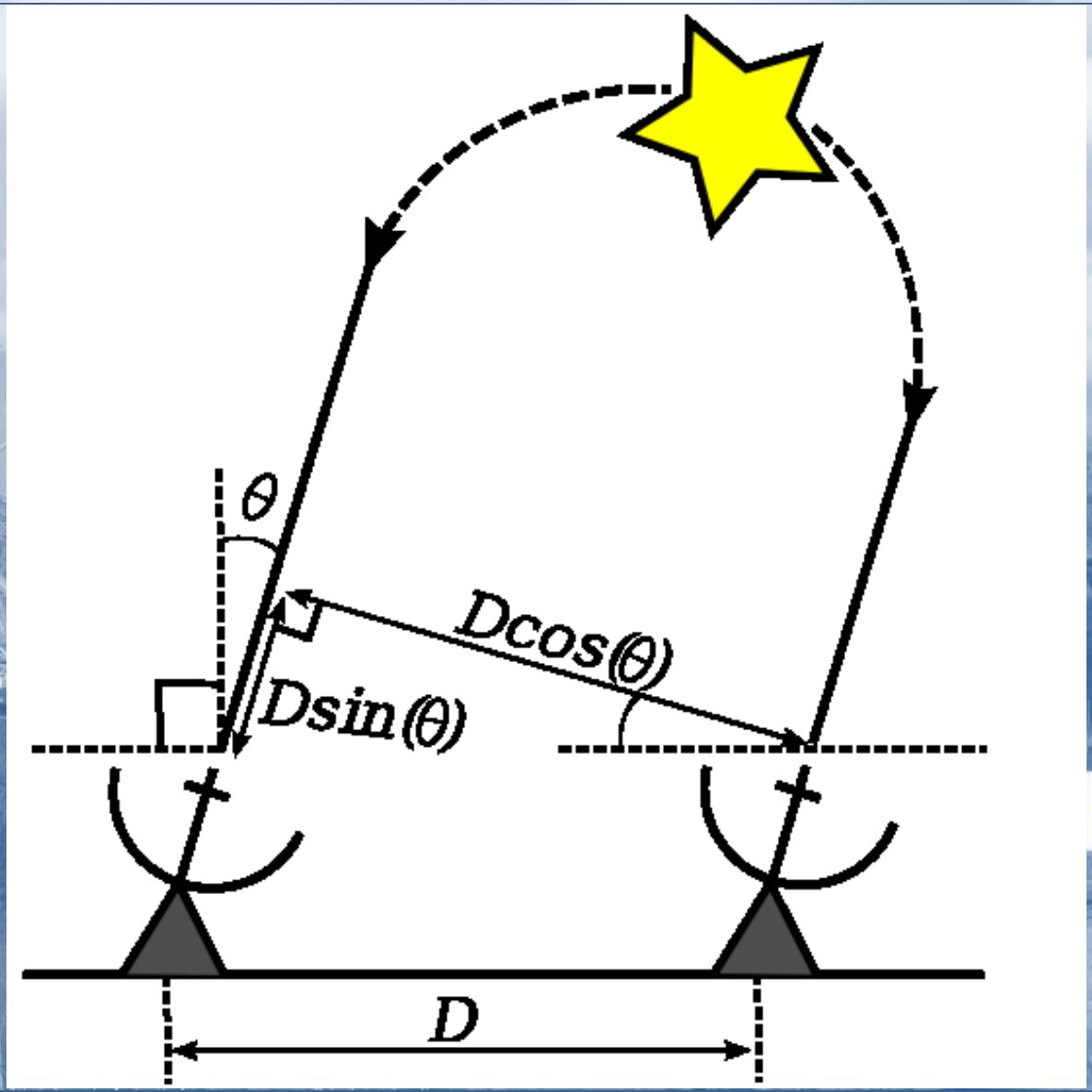
Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» — 2017 год

32 метровые радиотелескопы в обсерваториях «Светлое», Зеленчукская» и «Бадары"

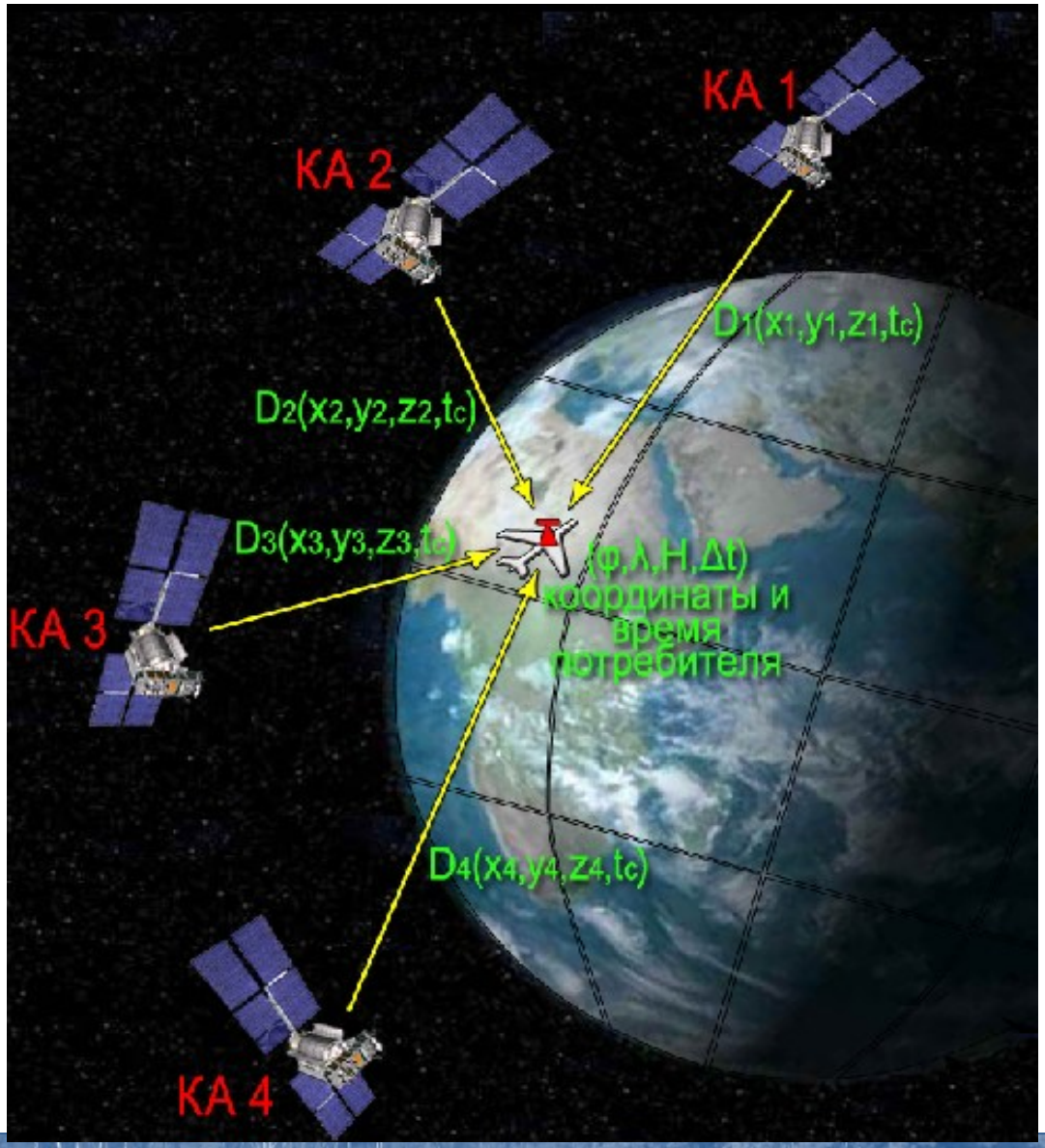
13 метровые радиотелескопы в обсерваториях «Светлое», Зеленчукская» и «Бадары"



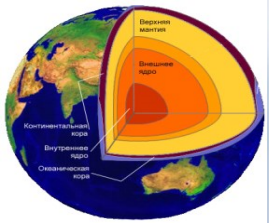
РСДБ наблюдения квазаров



Средства фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС



Применение системы ГЛОНАСС



Наука о Земле

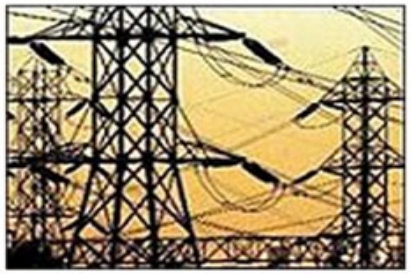
Строительство

Транспортировка нефти и газа

Картография и землеустройство

Сельское хозяйство

Геодезия



Энергетика

Связь и передача данных

Персональная навигация

Транспорт

Малые тела Солнечной системы: астероиды, кометы, естественные спутники планет и метеорные потоки.

История

1 января 1801 г. открыта первая малая планета (1) Церера

К началу 20 века известно около 1000 малых планет (МП)

1995 г. – около 5000 МП

1998 г. – 10 000 МП

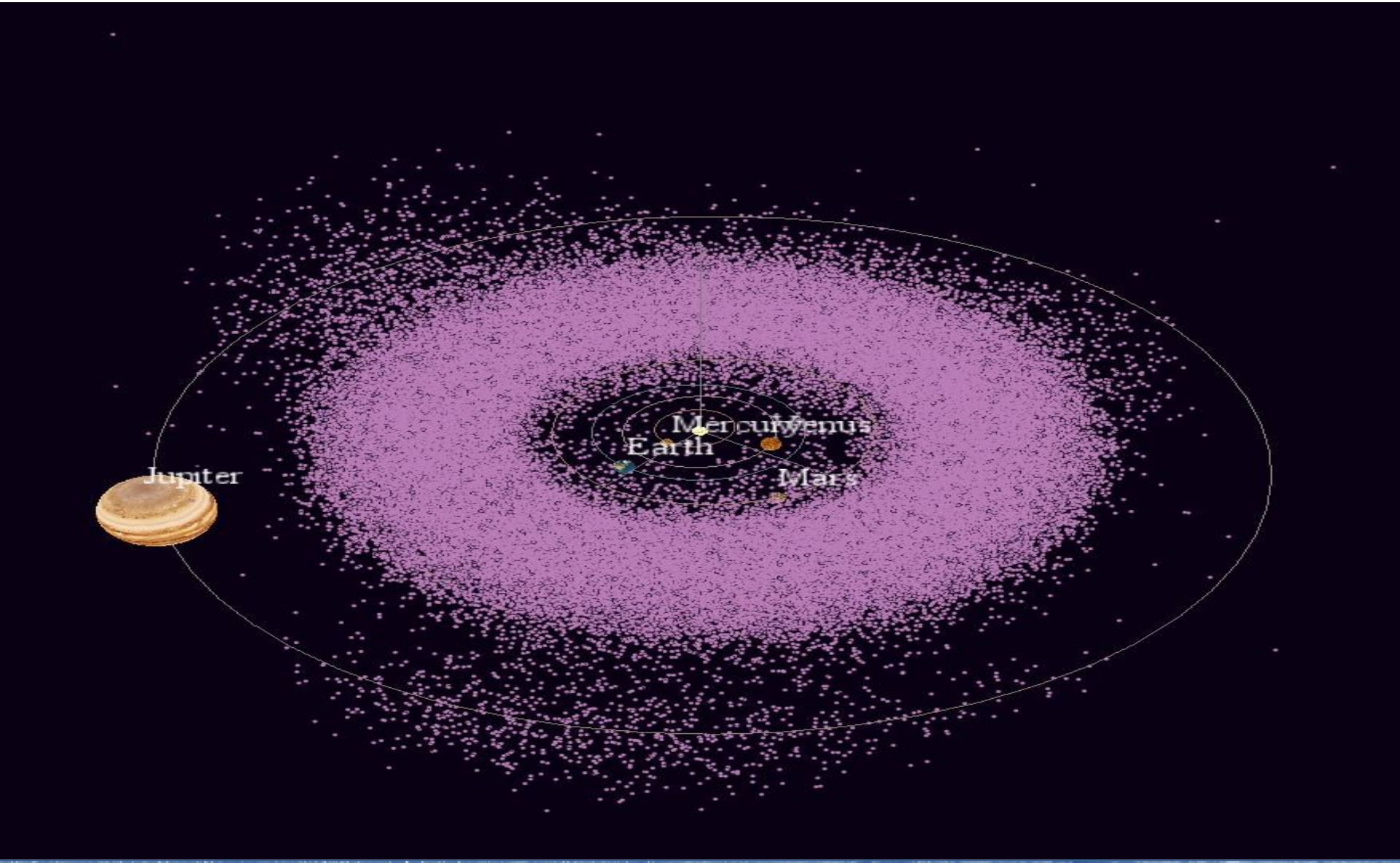
2005 г. – 100 000 МП

2017 г. – 800 000 МП

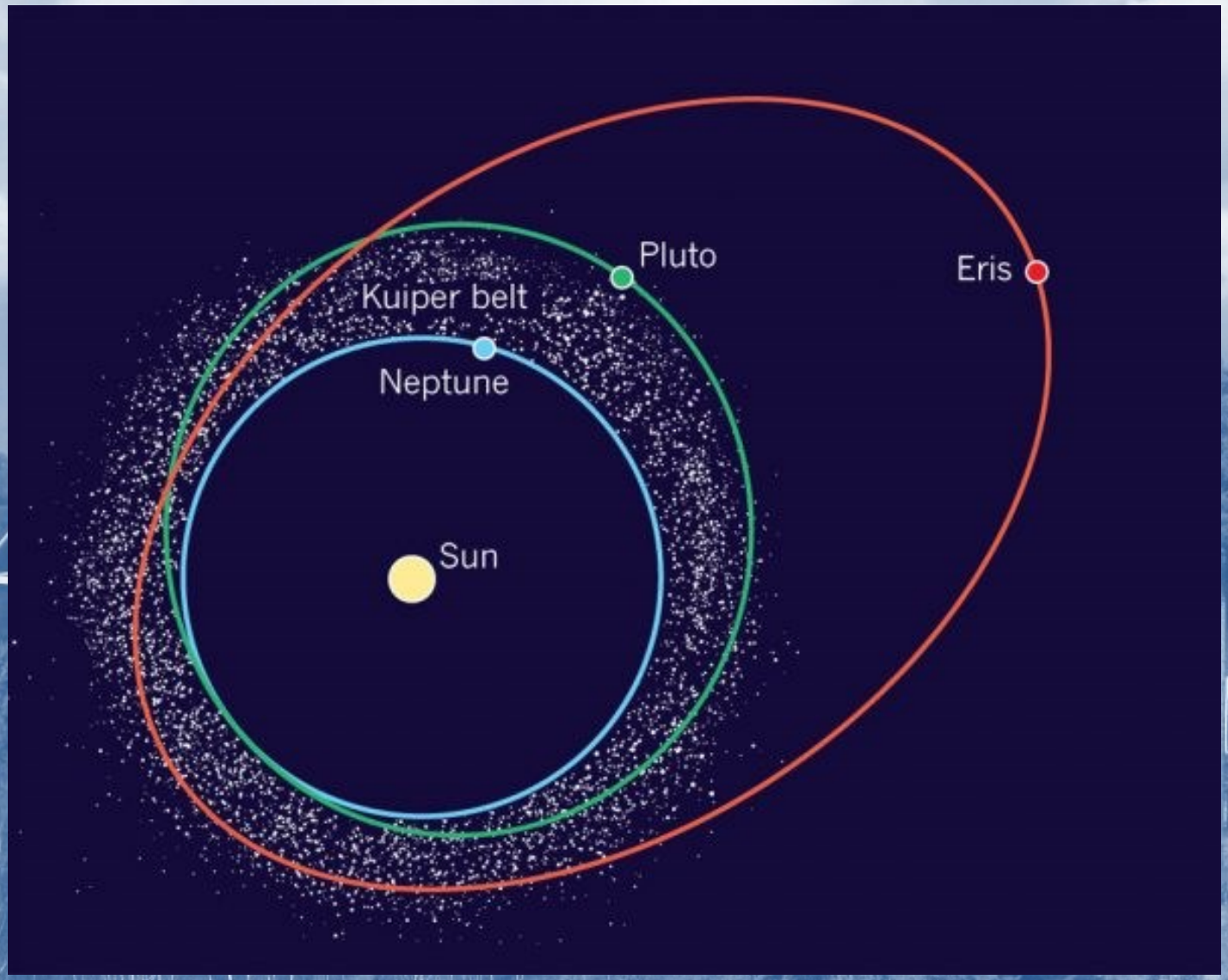
Пояса малых планет

- Главный пояс астероидов
- Пояс Эйджворта-Койпера («транснептуновые» объекты)
- Астероиды, сближающиеся с Землей

Главный пояс астероидов



Пояс Койпера

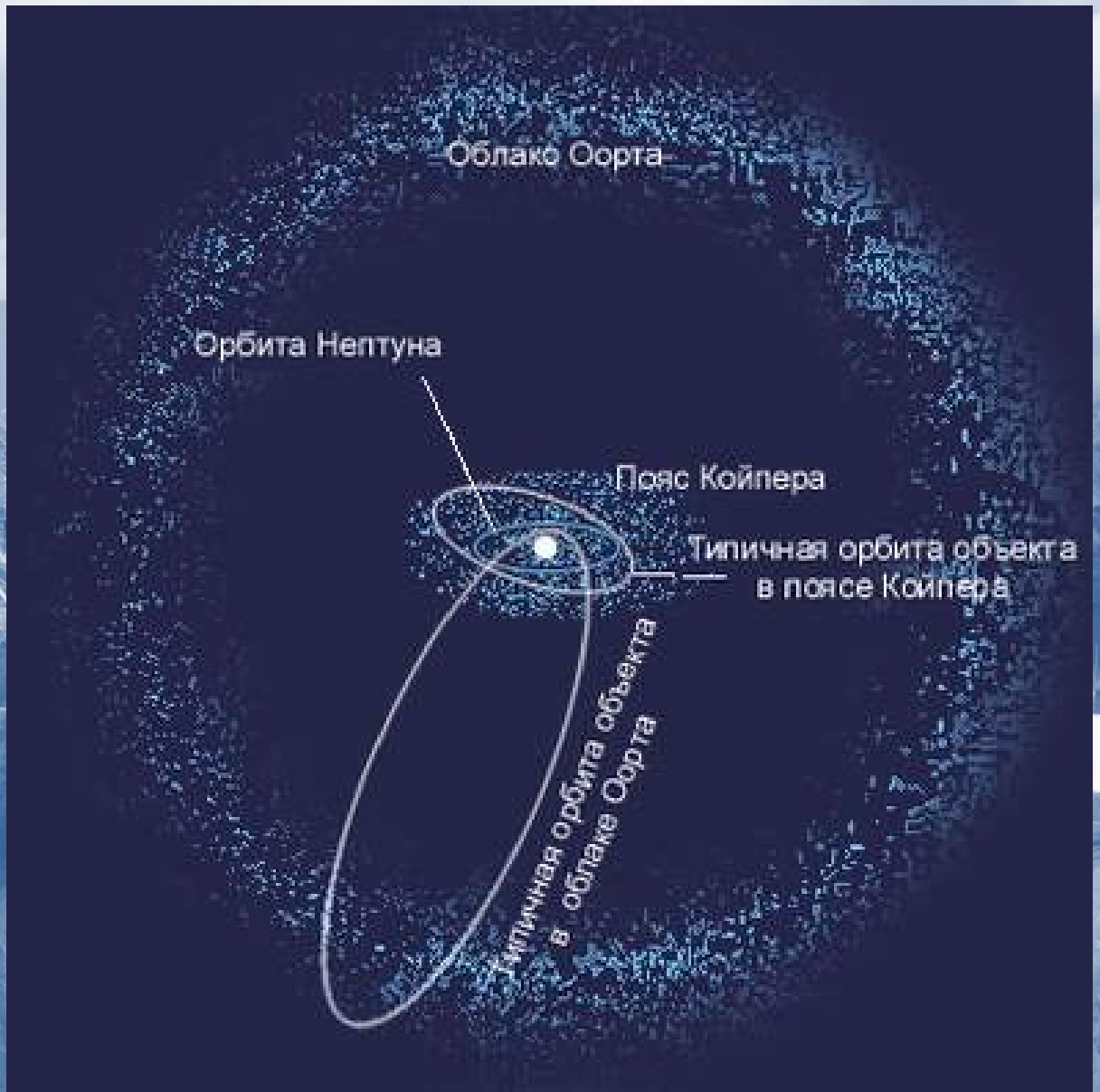


Первый межзвездный астероид 1I/Оумуамуа C/2017 U1 (PANSTARRS)

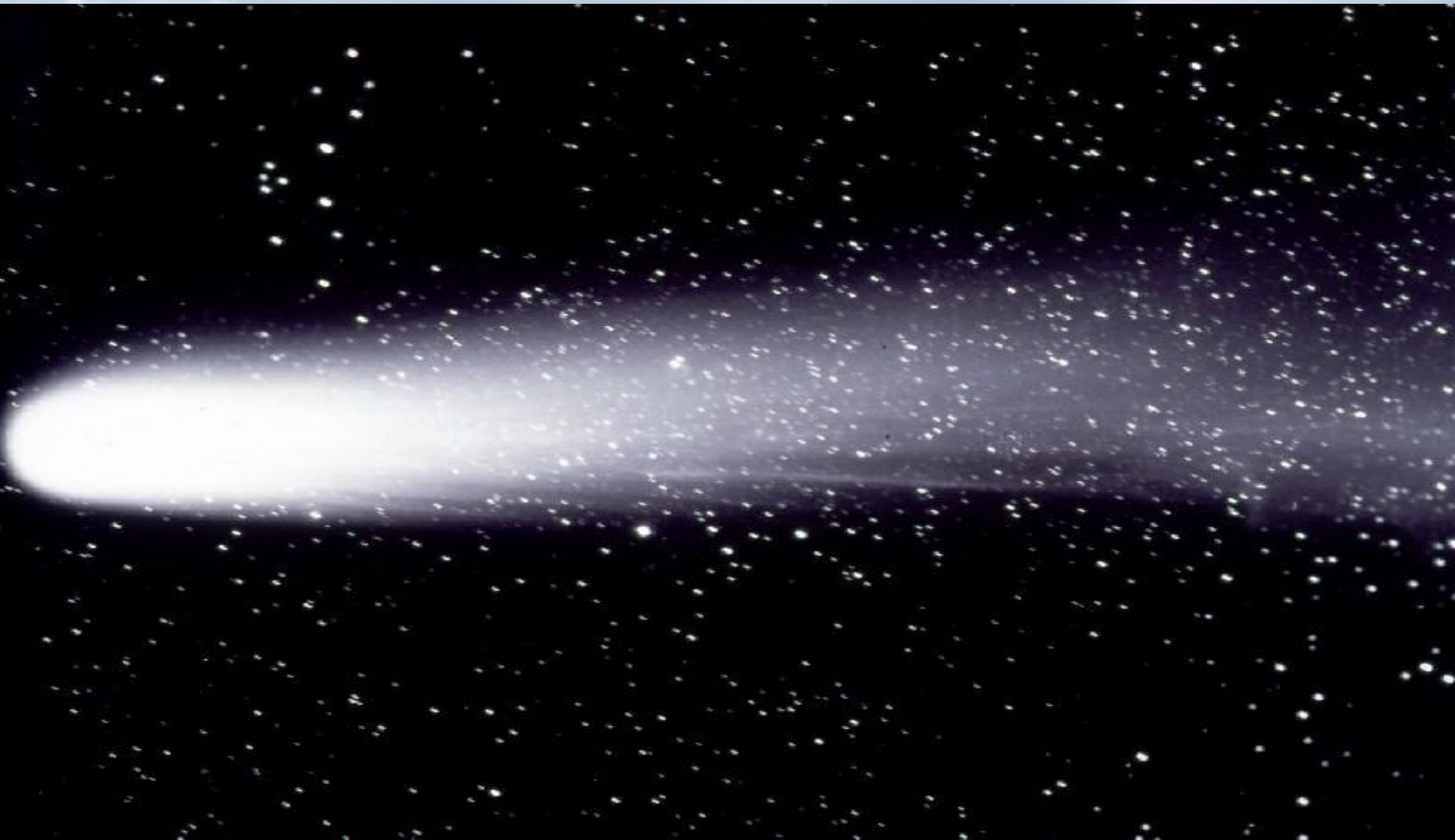
Кометы

- Кометы – относительно небольшие, рыхлые тела, состоящие из смеси нелетучих гранул и замерзших газов.
- Они становятся видимыми тогда, когда под воздействием солнечной радиации происходит сублимация газов, образующих кому кометы и хвост.

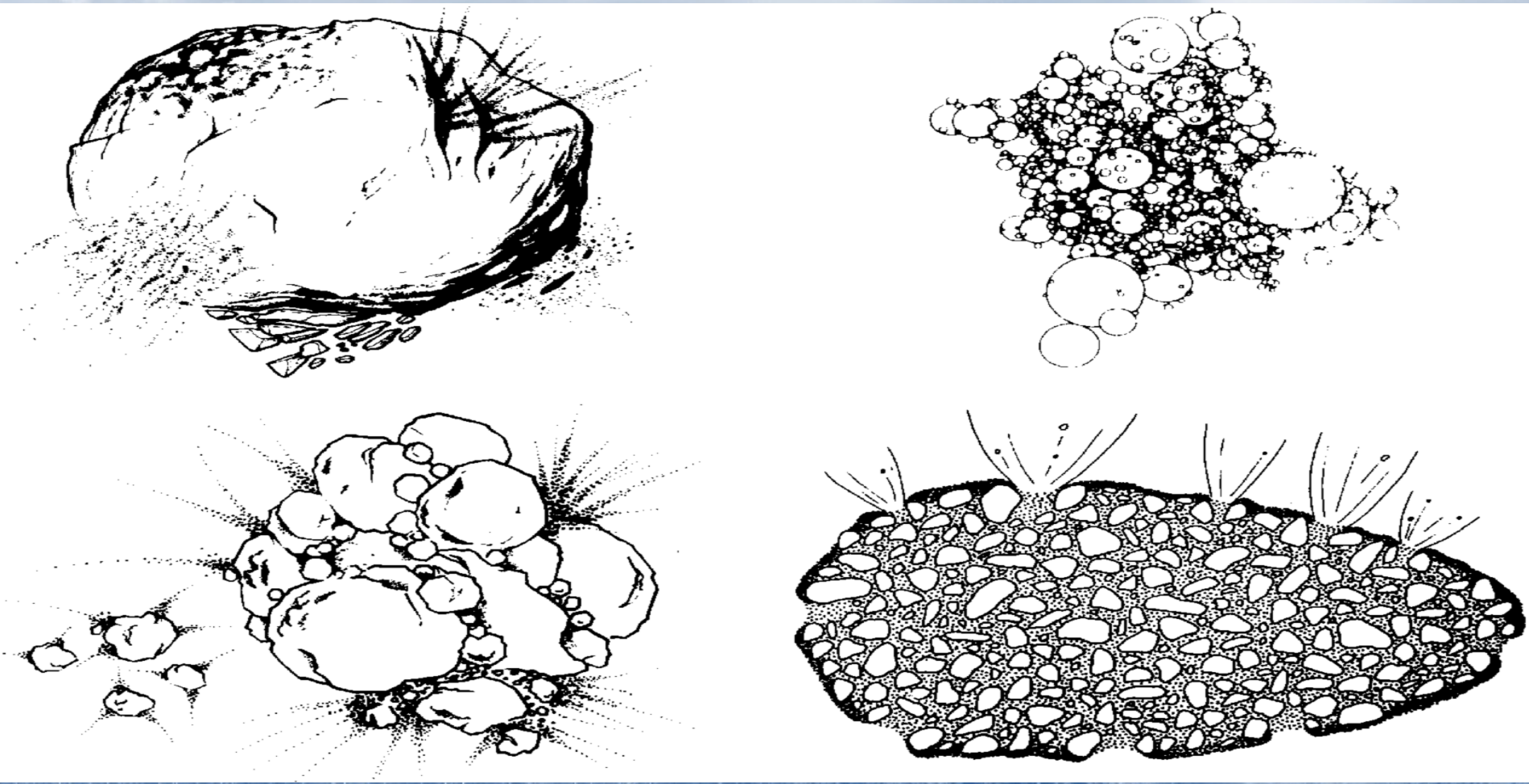
Солнечная система. Облако Оорта



Кома и хвост кометы Галлея



Физические характеристики, строение ядра



Модели: «конгломерат льдов»; «агрегат фракталов»; «изначально смерзшийся щебень»; «склеенные льды».

Негравитационные силы

Исследование комет космическими станциями

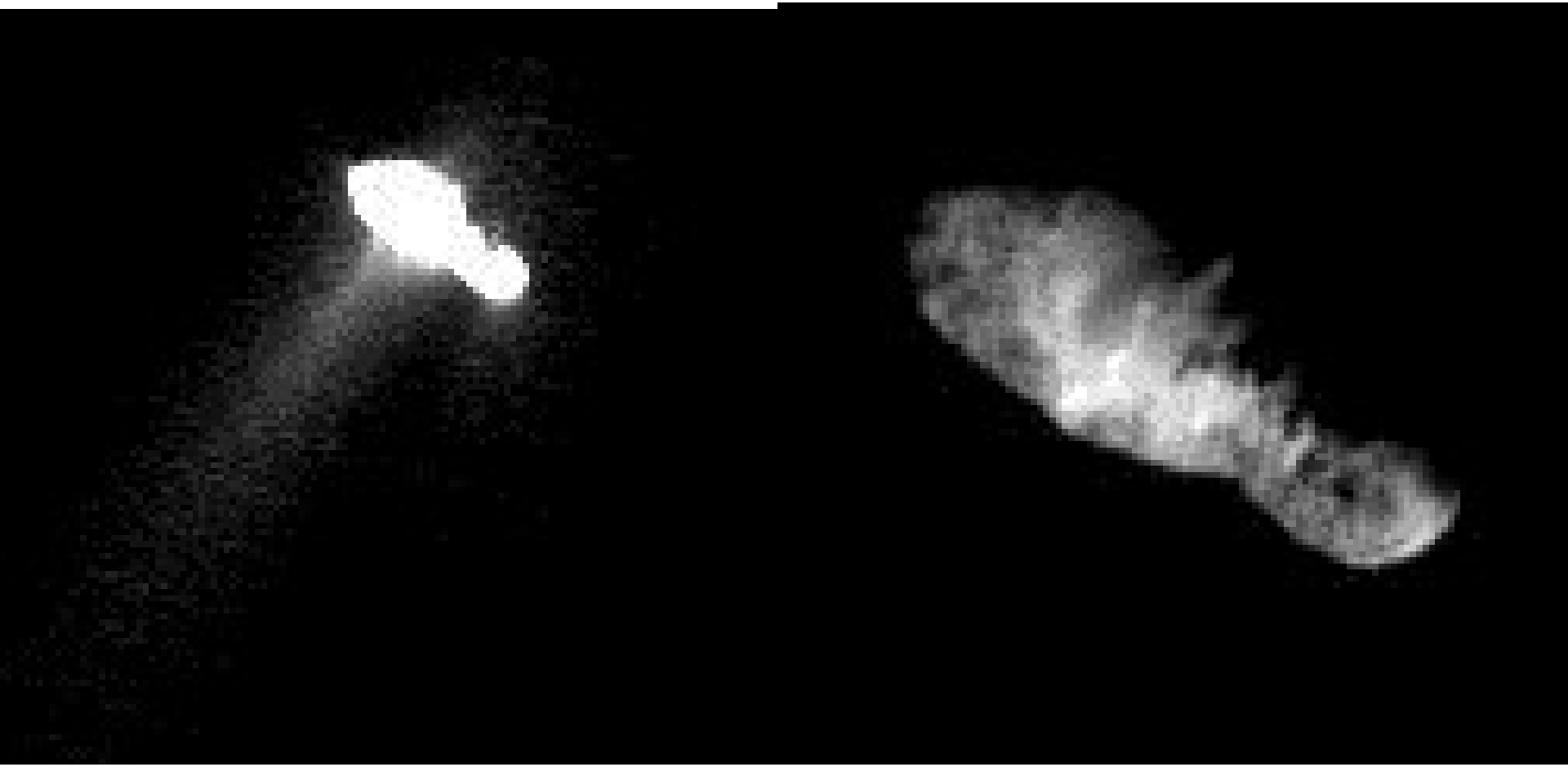
Комета	Дата	Станция	Мин.(км)
Джакобини-Циннера	11.09.1985	ICE (США)	8 000
Галлея	06.03.1986	Вега-1 (СССР)	8 900
	08.03.	Suisei (Япония)	150 000
	09.03.	Вега-2 (СССР)	8 000
	11.03.	Sakigake (Япония	7 000 000
	13.03.	Giotto (Европа)	600
	28.03.	ICE (США)	30 000 000
Григга-Шьеллерупа	10.07.1992	Giotto (Европа)	200
Боррелли	22.09.2001	Deep Space (США)	2 200
Вильда 2	02.01.2004	Star Dust (США)	240
Темпеля 1	04.07.2005	Deep Impact (США)	0
Чурюмова-Герасименко	2014-2017	Rosetta (Европа)	0

Комета Галлея КА «Вега -1 и 2», «Джотто»

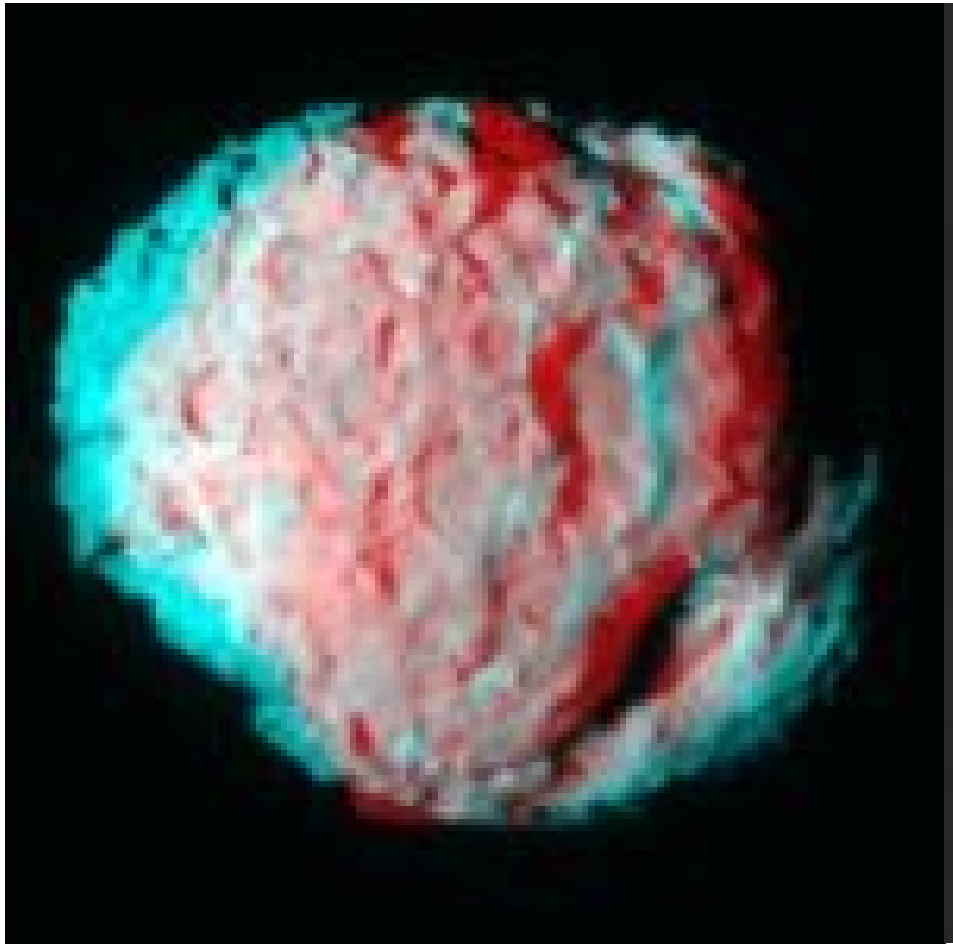
Ядро кометы Галлея

- Ядро состоит в основном из водяного льда с небольшими включениями углекислых и метановых льдов, а также пылевых частиц. Темный цвет обусловлен накоплением пыли. Ядро пористое, содержит много пустот, и его плотность – 0.3 г/см3.
- По расчетам, при каждом пролете кометы Галлея около Солнца с ее поверхности исчезает слой толщиной около 6 м. Активно около 10% поверхности.
- За время пролета КС они подвергались бомбардировке частицами. КА Джотто на расстоянии 1200 км от ядра столкнулся с кометной частицей. Удар вывел из строя телекамеру, а сама станция временно потеряла радиосвязь с Землей.

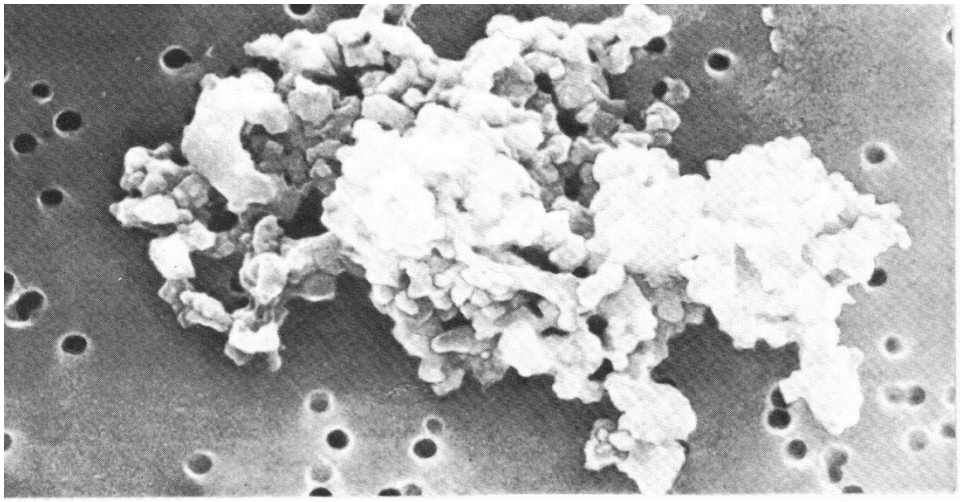
Комета Борелли

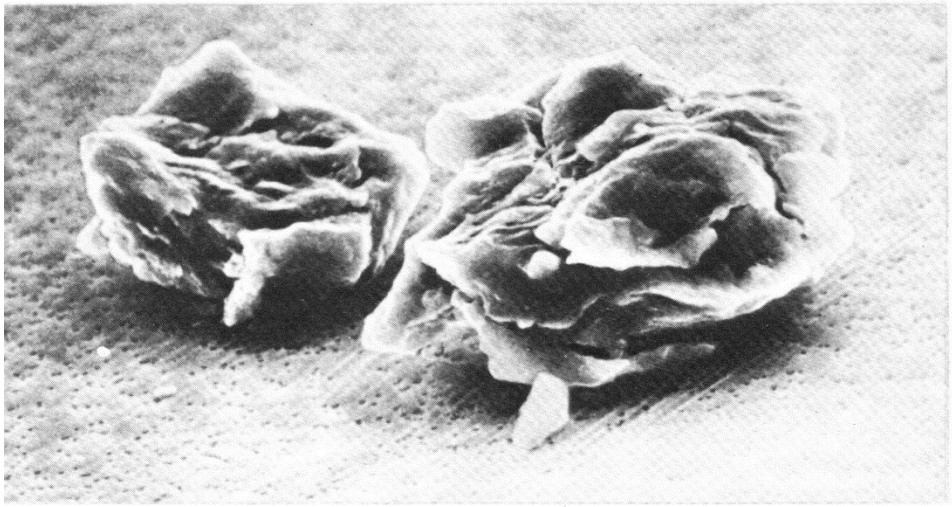


Комета Вильда 2

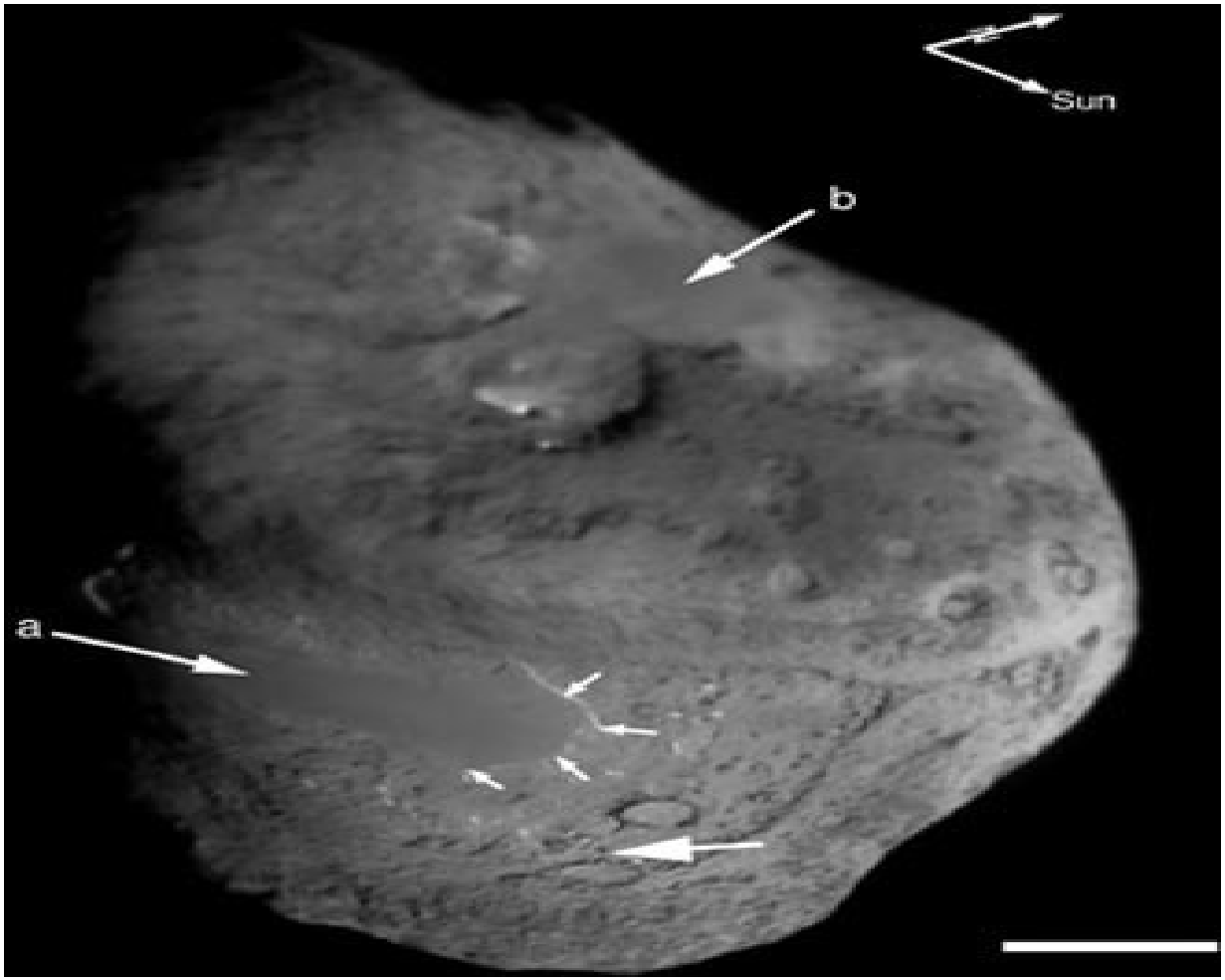


Аэрогель – улавливатель пылевых частиц КА «Star Dust» , смесь воздуха и кварца. Плотность 3 мг/см3. Кометная пыль (увеличение в 10000 раз)



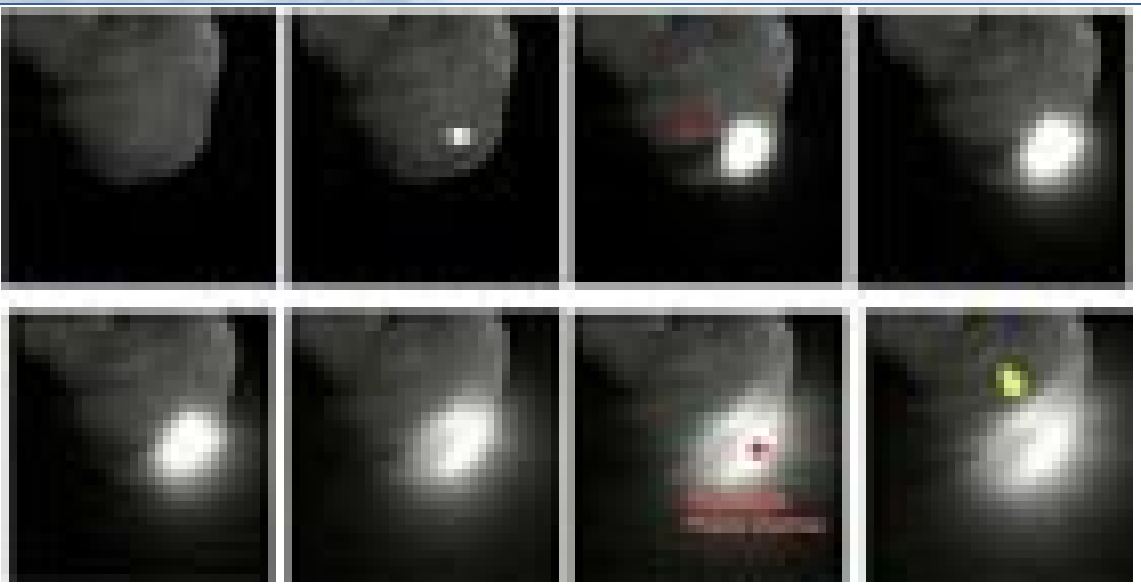


Исследование кометы Темпель 1
КА «Deep Impact»



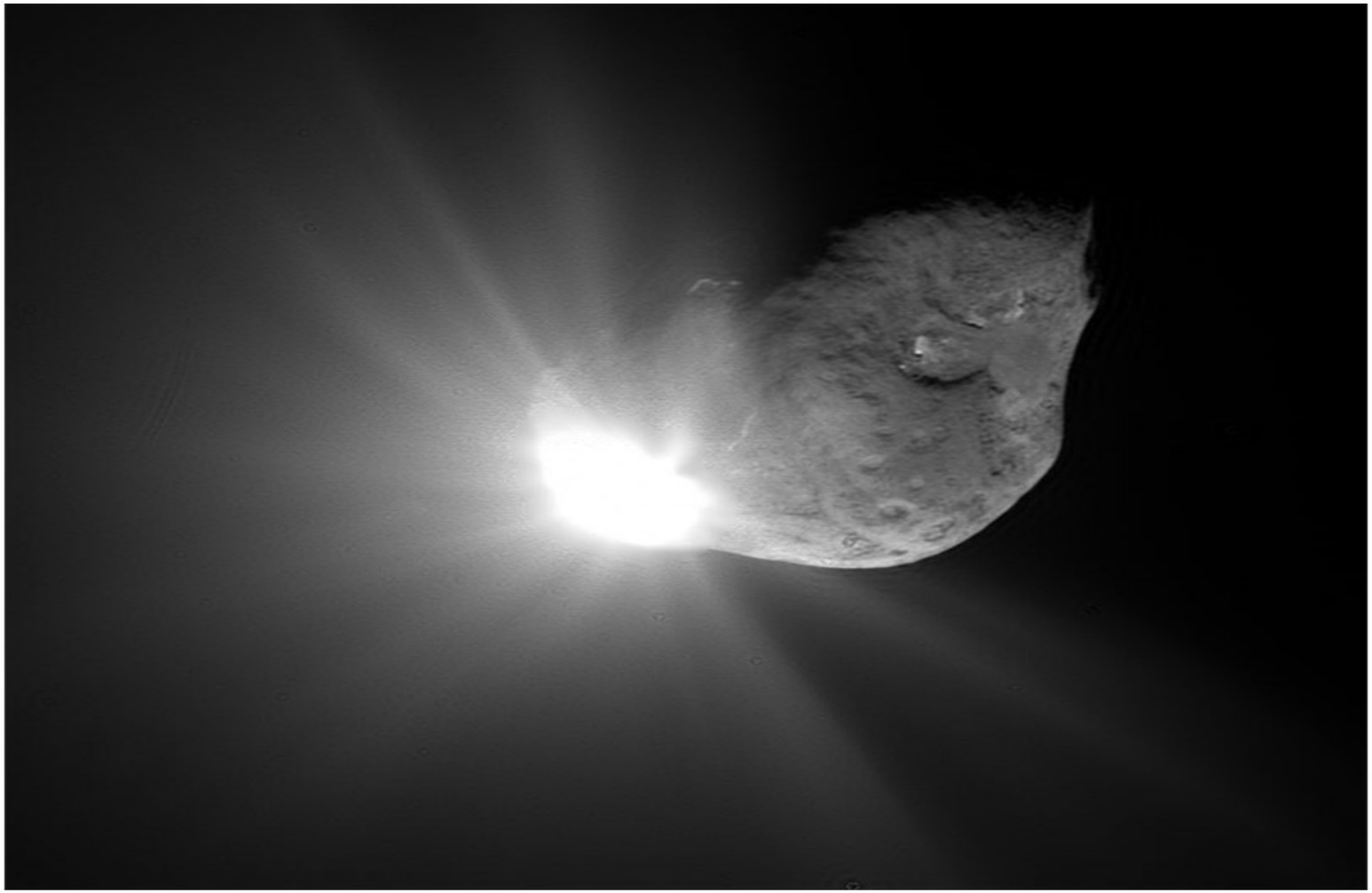
Размер ядра – 11 х 5 х 5 км Период обращения ядра – 40.7 часа. Ядро отражает 4 % света.

Выброс вещества из ядра кометы Темпель 1



Ударник – медь, вес 370 кг. Скорость встречи – 10.3 км/сек. Ударного кратера не увидели из-за выброса, внутренний состав отличается от поверхности. Вещество поверхностного слоя выбросило взрывом на большую высоту, узким высоким столбом, что возможно лишь при очень рыхлом и легком грунте.
При этом была вспышка света, удивившая исследователей, поскольку она оказалась более яркой, чем ожидалось. Выброшенный материал полностью рассеялся лишь спустя 12 часов, а предполагалось, что это произойдет через 12 м.

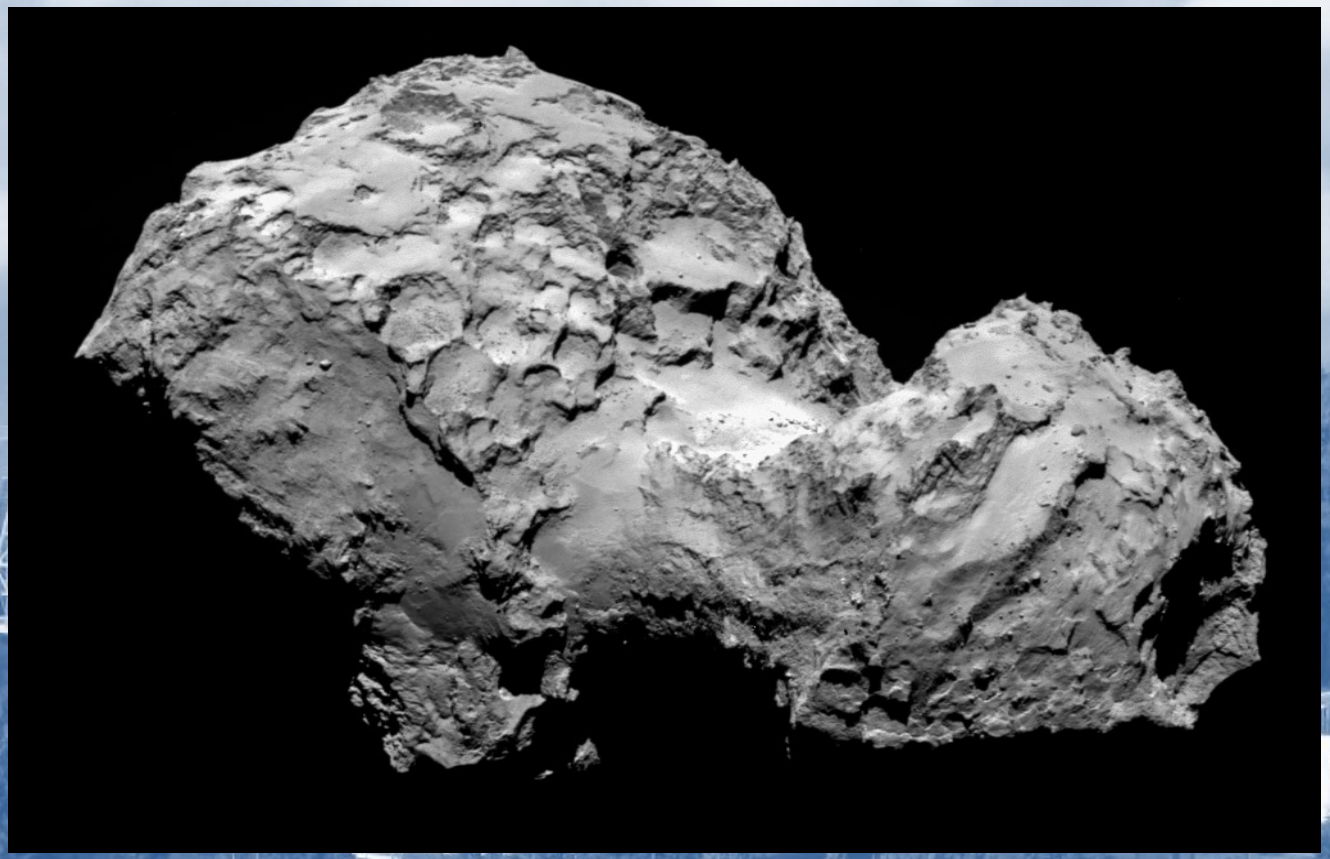
Исследование кометы Темпель 1
КА **«Deep Impact»**



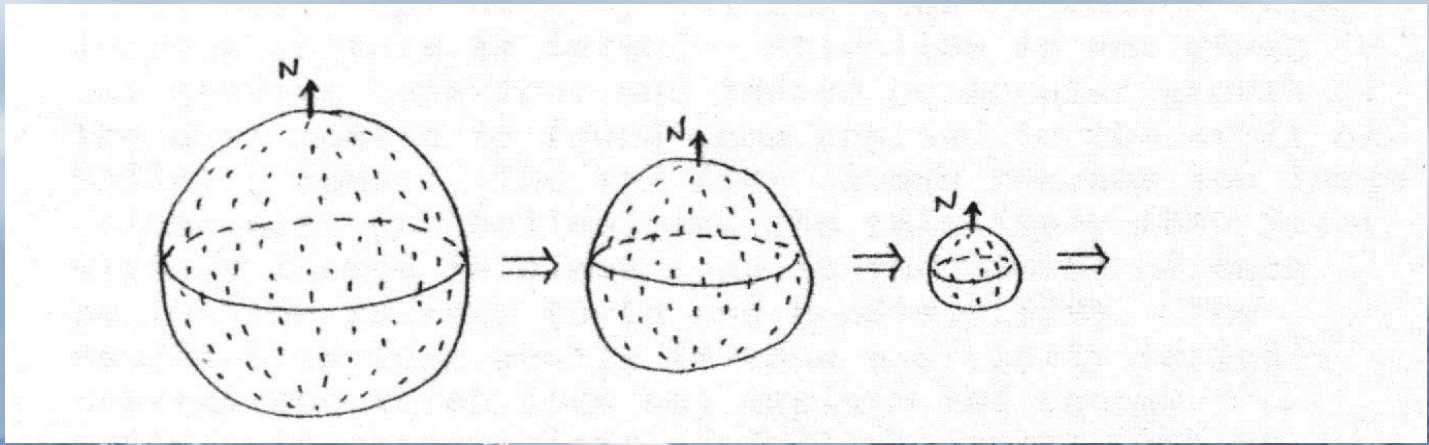
Исследование кометы Чурюмова – Герасименко проект «Rosetta»

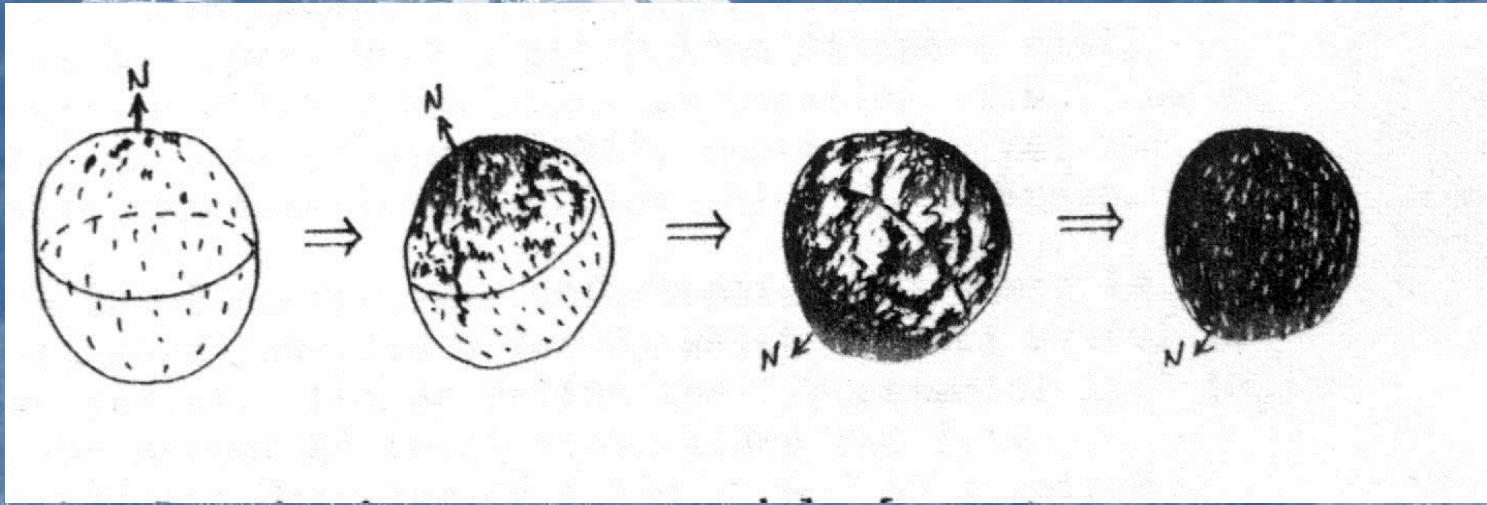
Comet 67/P Churyumov-Gerasimenko (size – 4 km, period 6.6 years)
Launched March 2, 2004.
Lands on the comet in November 2014.
Escorting the comet, November 2014 - December 2015.
Two parts: orbiter (11 instruments) and lander (9 instruments).
On its way will have three Earth and one Mars flybys
Will fly by two asteroids: 2867 Šteins and 21 Lutetia
Some observations of Deep Impact, SW-3 have been done

Ядра кометы Чурюмов - Герасименко

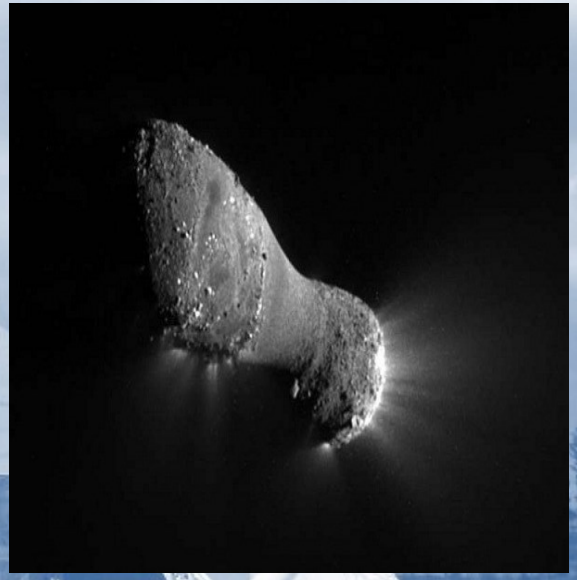


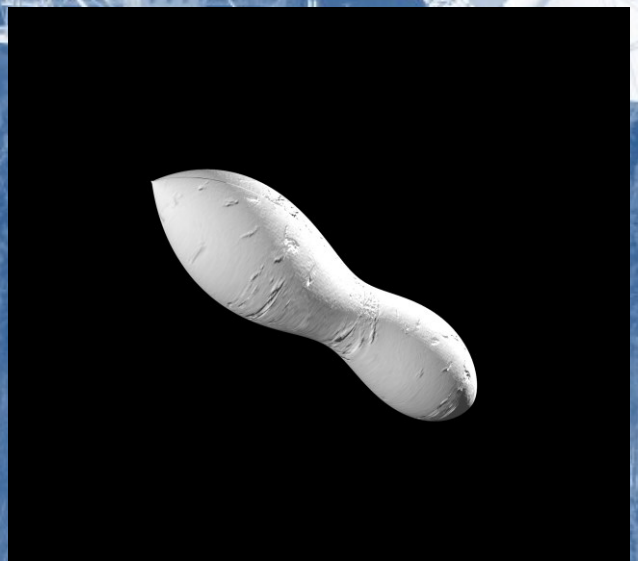
Эволюция кометных ядер:
1) ледяное ядро; 2) смесь льда, пыли, камней

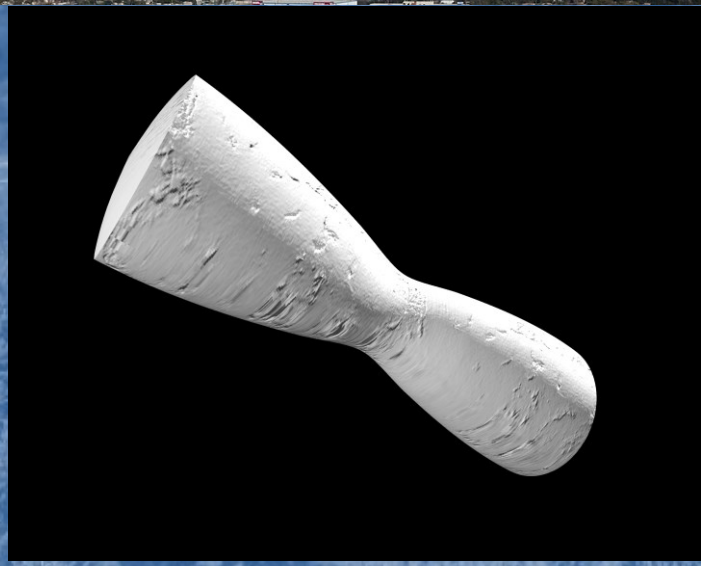




Ядра комет: Борелли, Хартли 2 и Чурюмова-Герасименко и их модели, полученные в ИПА РАН





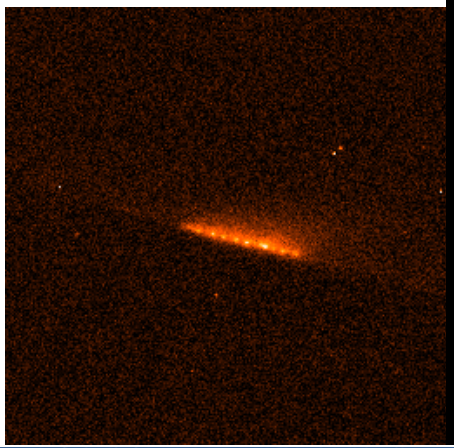


Комета Шумейкеров-Леви 9

В 1992 г. комета была разрушена с результате тесного сближения с Юпитером на 23 фрагмента размером до 2 км.

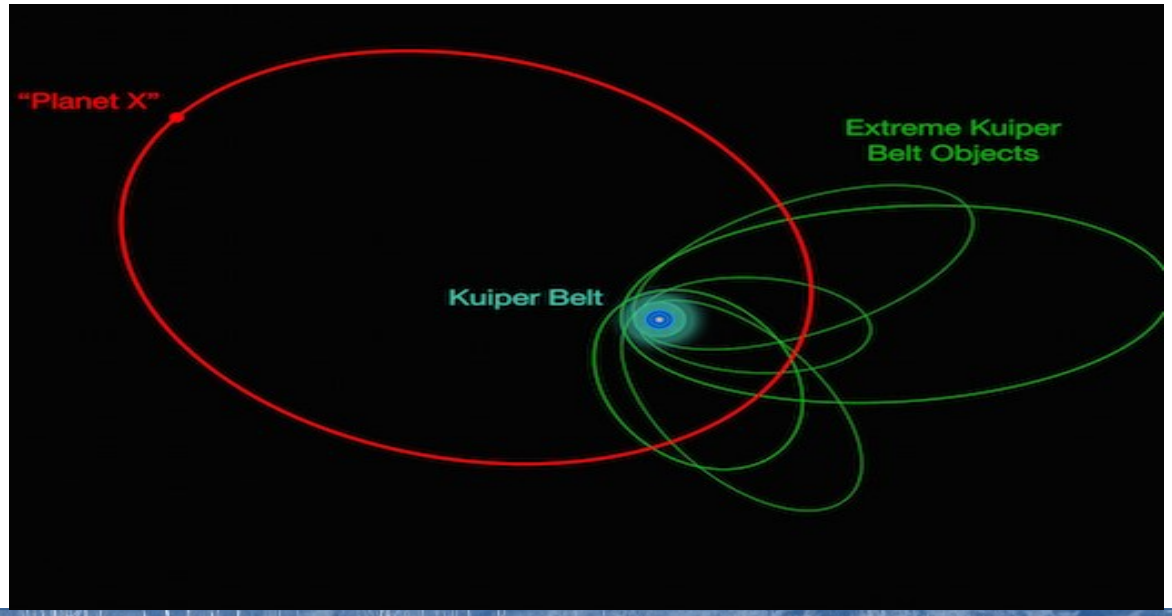
При падении на Юпитер цепочка фрагментов растянулась на 1.1 млн км.

В течение недели, 16-22 июля 1994 г., фрагменты падали на Юпитер со скоростью ~60 км/сек.



Кометы и планета X

В 2016 г. в работе Батыгина и Брауна было высказано предположение о существовании массивного небесного тела в поясе «Эджеворта – Койпера». Показано, что необычное распределение орбит открытых небесных тел в этом поясе можно объяснить гравитационным влиянием гипотетической планеты X с массой 10 земных масс.

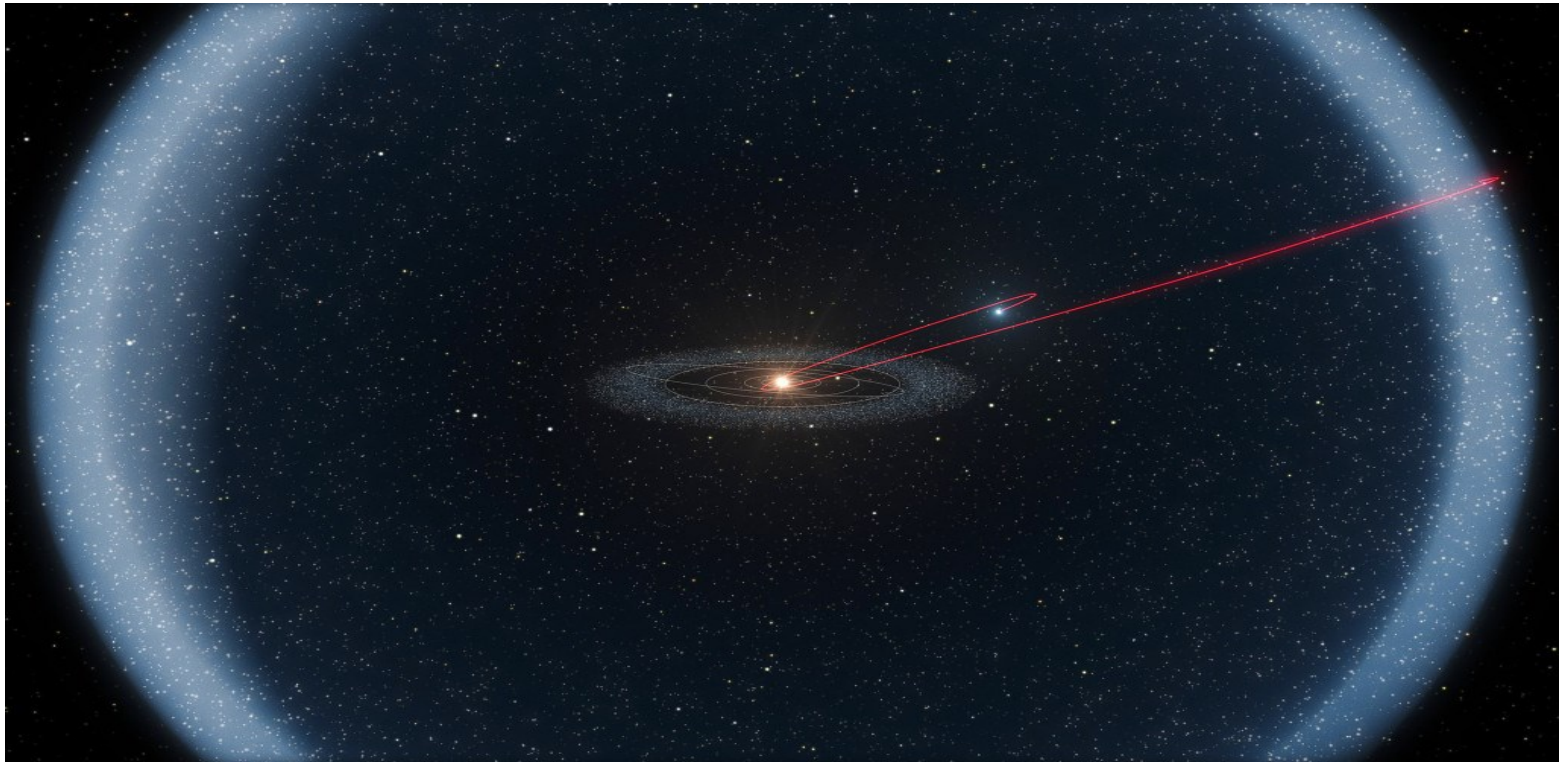


Кометы и планета X

Однако, интервалы неопределенности положения планеты на орбите – велики.

Цель работы:

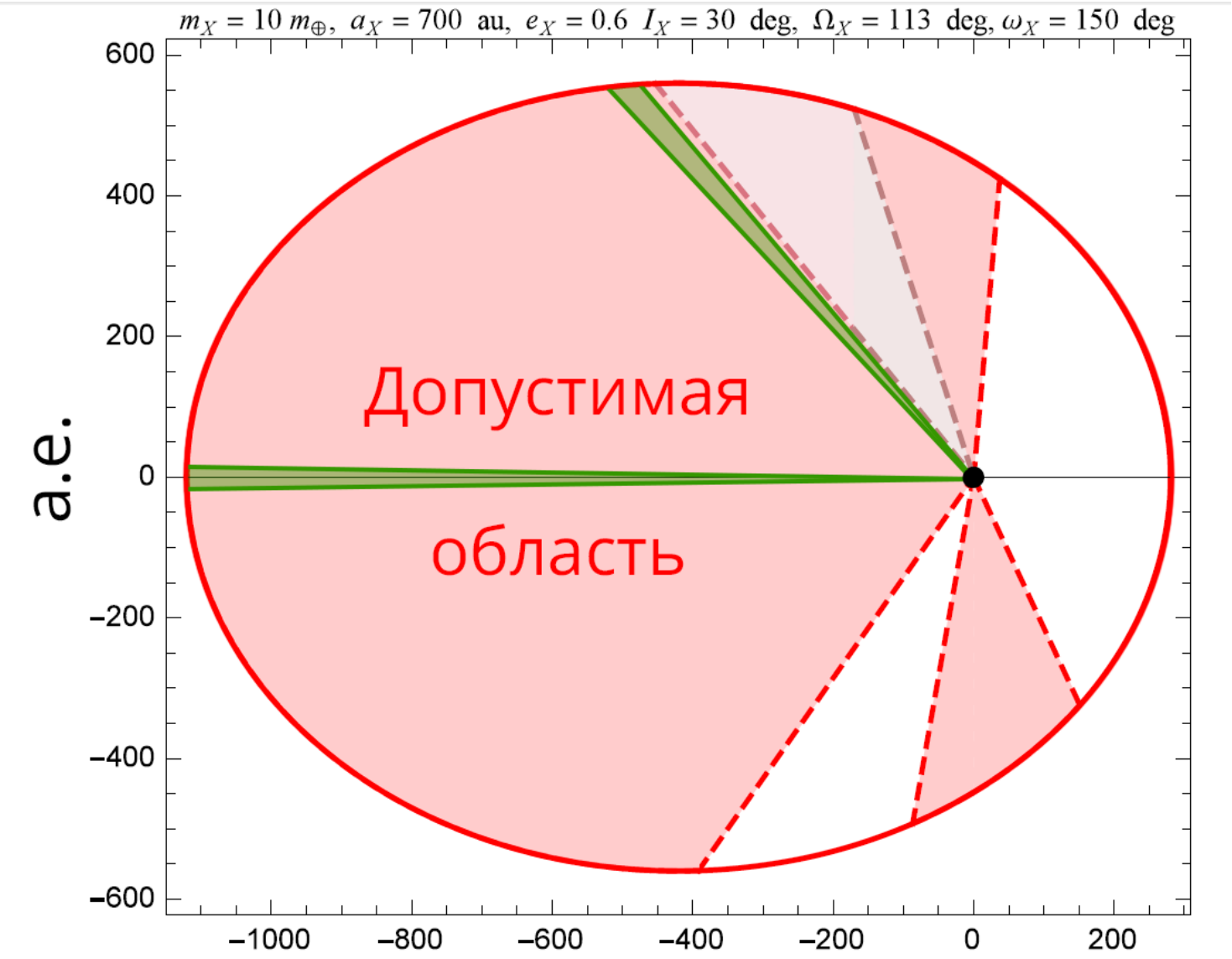
Уменьшение интервала неопределенности положений планеты на орбите



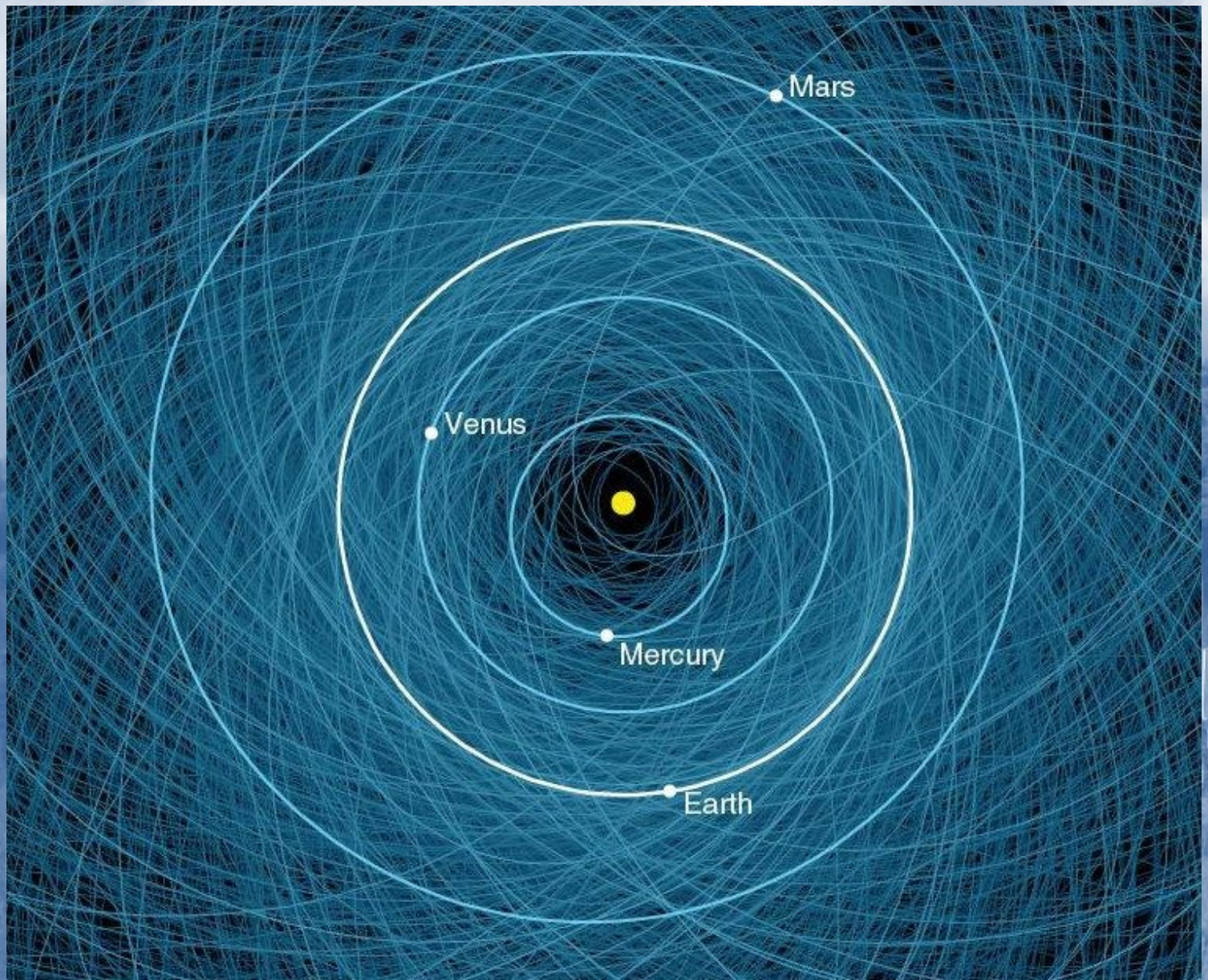
Критерии отбора комет

- Орбиты комет должны иметь небольшие значение величин минимального расстояния с орбитой этой гипотетической планетой (MOID).
- Комета должна быть «новой», т.е. попавшей в окрестность Солнца впервые (повышенная активность комет при приближении к Солнцу, большие значения наклона орбиты).
- Было найдено 5 комет, удовлетворяющих условиям.

Кометы и планета X

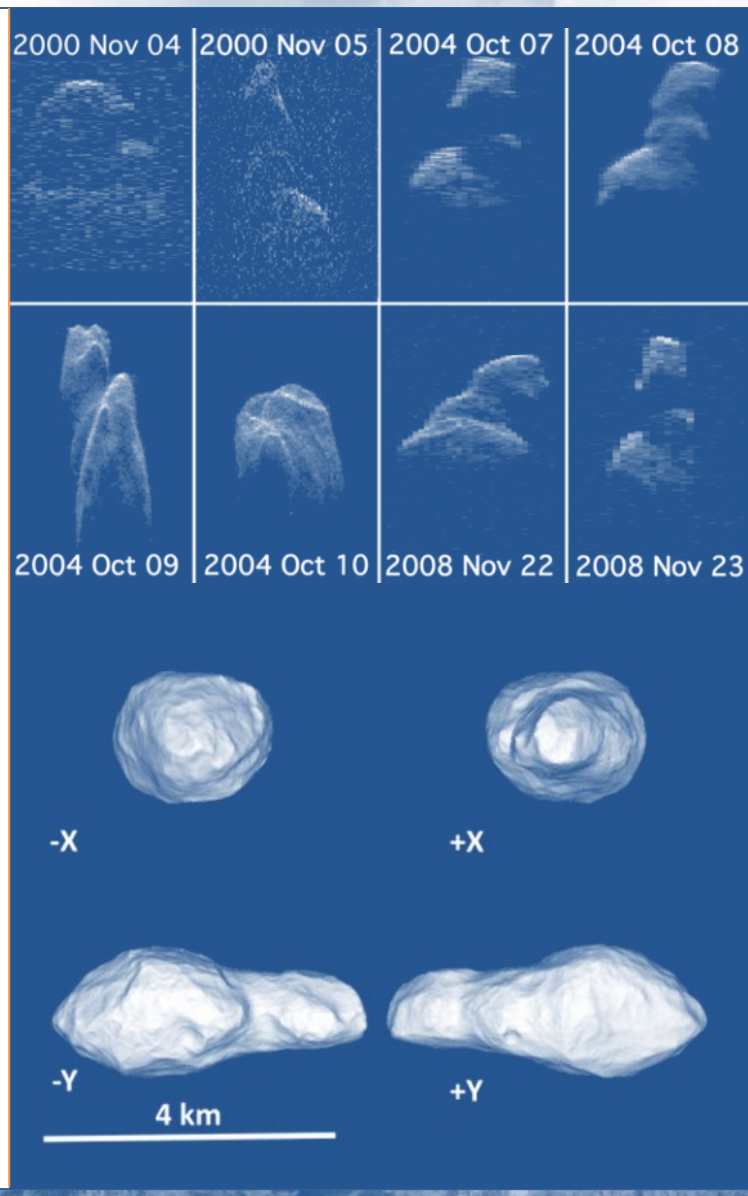


Орбиты астероидов, сближающихся с Землей

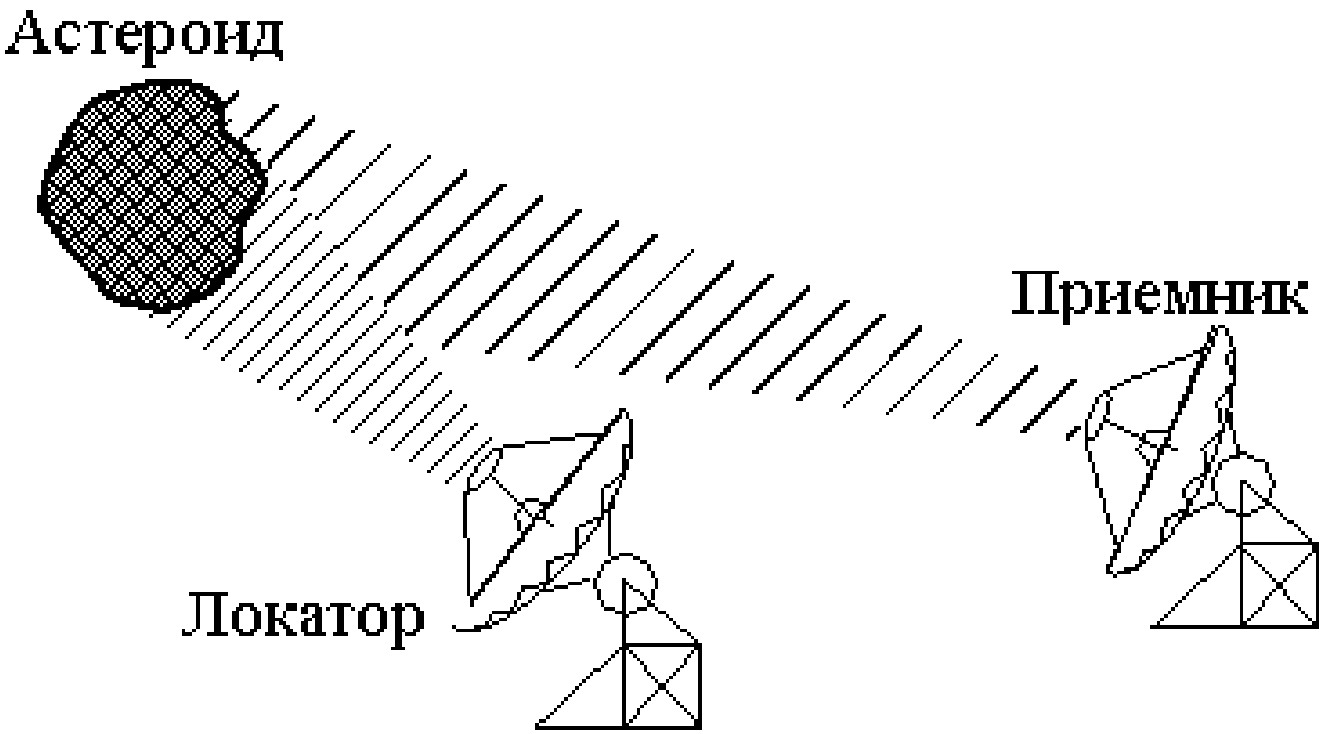


Радиолокация астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ)

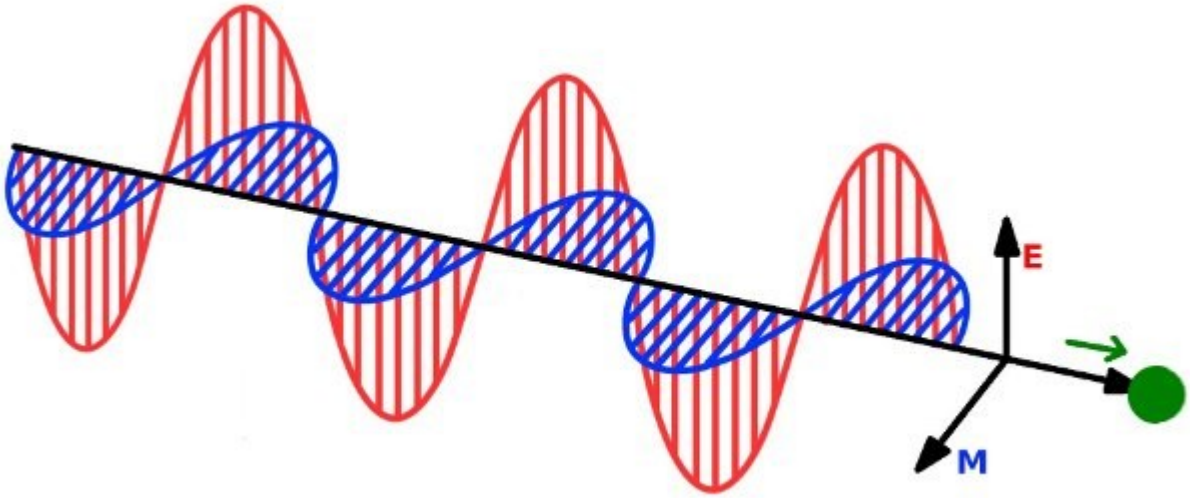
- Каменистые / Металлические объекты;
- Сфероиды / Вытянутые и нерегулярные формы;
- Монолитные куски породы / “куча щебня”;
- Гладкая / Неровная поверхность / Кратеры;
- Параметры вращения;
- Контактные двойные и двойные системы;
- Уточнение орбит (Расстояние 10м / Скорость1мм/с);
- Характеристики ядра и комы комет.



Бистатические схема



Основные характеристики радиосигнала (CW)



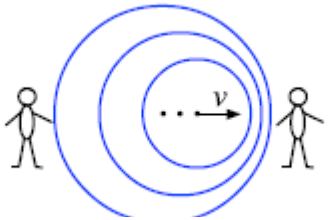
Длина волны: $\lambda = \frac{c}{\omega}$, где c – скорость света, ω – частота

Амплитуда: $A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, φ – фаза колебания

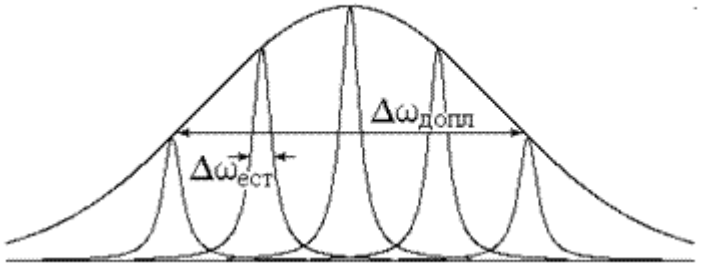
Поляризация: линейная, круговая (левая и правая)

Бистатические схема

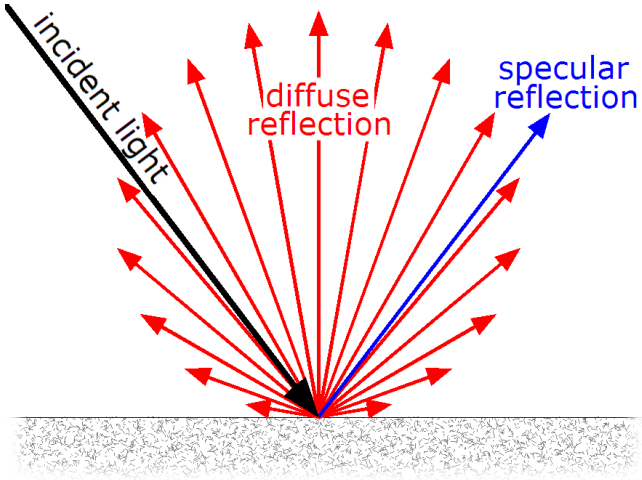
$$\nu = \nu_0 \cdot \sqrt{\frac{c-v}{c+v}}$$

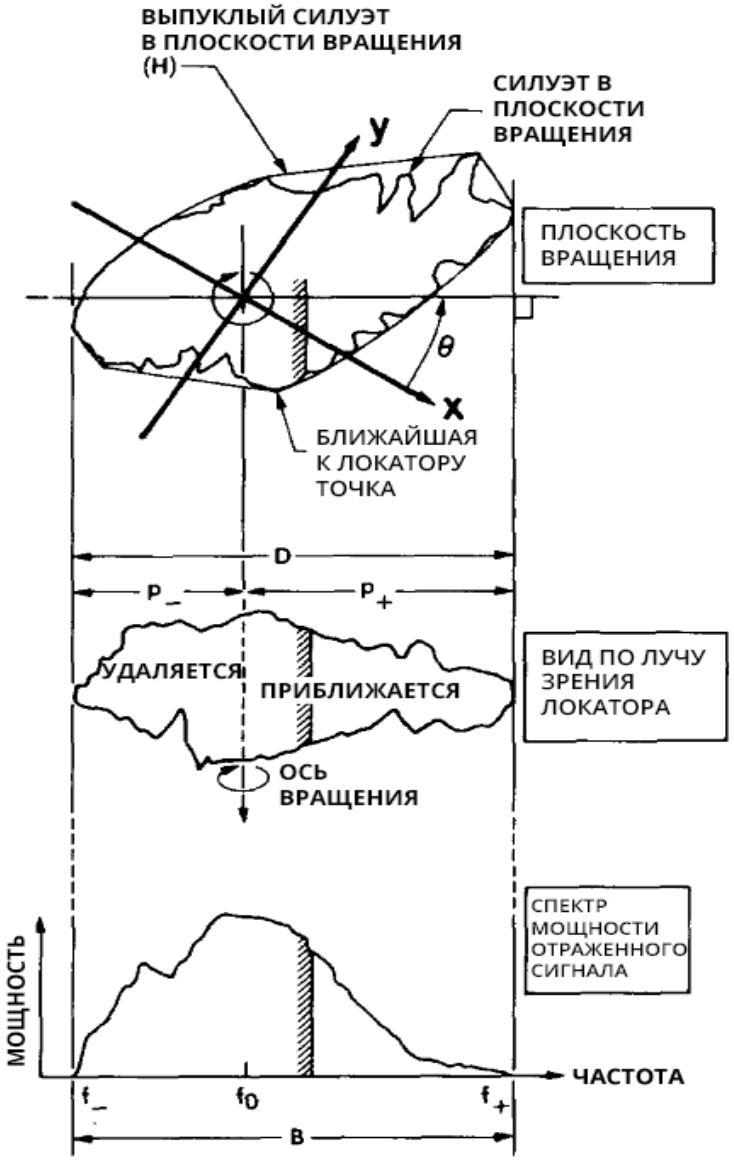


$$\nu = \nu_0 \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}},$$



SC/OC



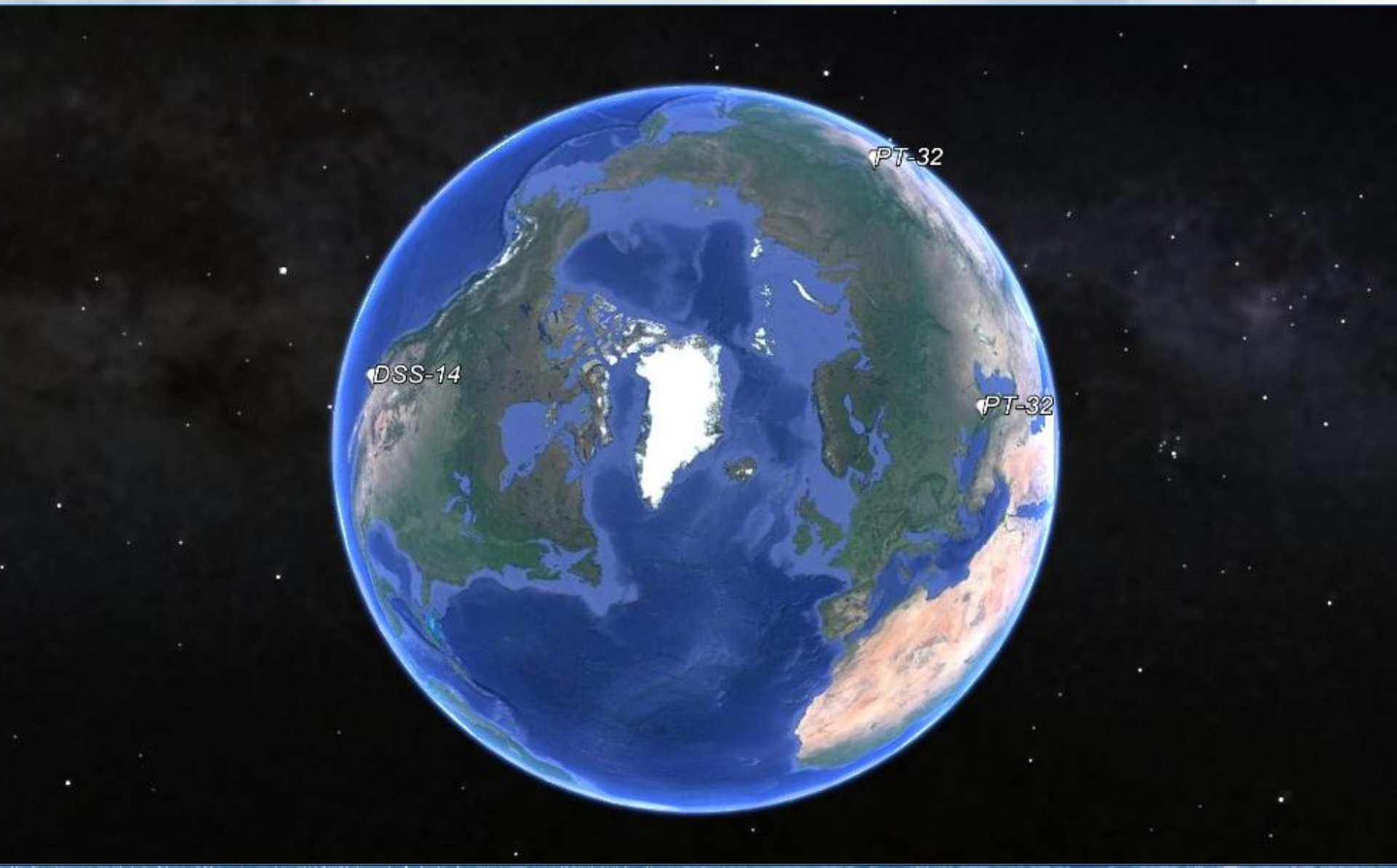


Астероид 2011 UW158

- Обнаружен 25 октября 2011 г;
- Диаметр ~500 м;
- Период вращения ~37 мин;
- 19 июля 2015 г. сблизился с Землей на расстояние $2.4 \cdot 10^6$ км (~ 6 радиусов орбиты Луны);

- 18 июля 2015 с 20:25 по 21:00 UT были проведены межконтинентальные бистатические наблюдения астероида с использованием 70-метровой антенны DSS-14 (обсерватория Голдстоун, США) в качестве излучателя и 32-метровых радиотелескопов сети «Квазар» в качестве приемников.

Сеть



Антенна дальней космической связи DSS-14 (обсерватория Голдстоун)

- D = 70 м
- P_{tr} = 450 кВт
- f_{tr} = 8560 МГц (3.5 см)
- $G_{tr} = 10^7$ $\left(G_{tr} = \frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2}\right)$
- RCP
- CW

Радиотелескоп РТ-32 (обсерватория «Зеленчукская»)

- D = 32 м
- T_{sys} = 55 K
- КИП = 0.54
- Δf_{reg} = 0.5 МГц
- RCP+LCP

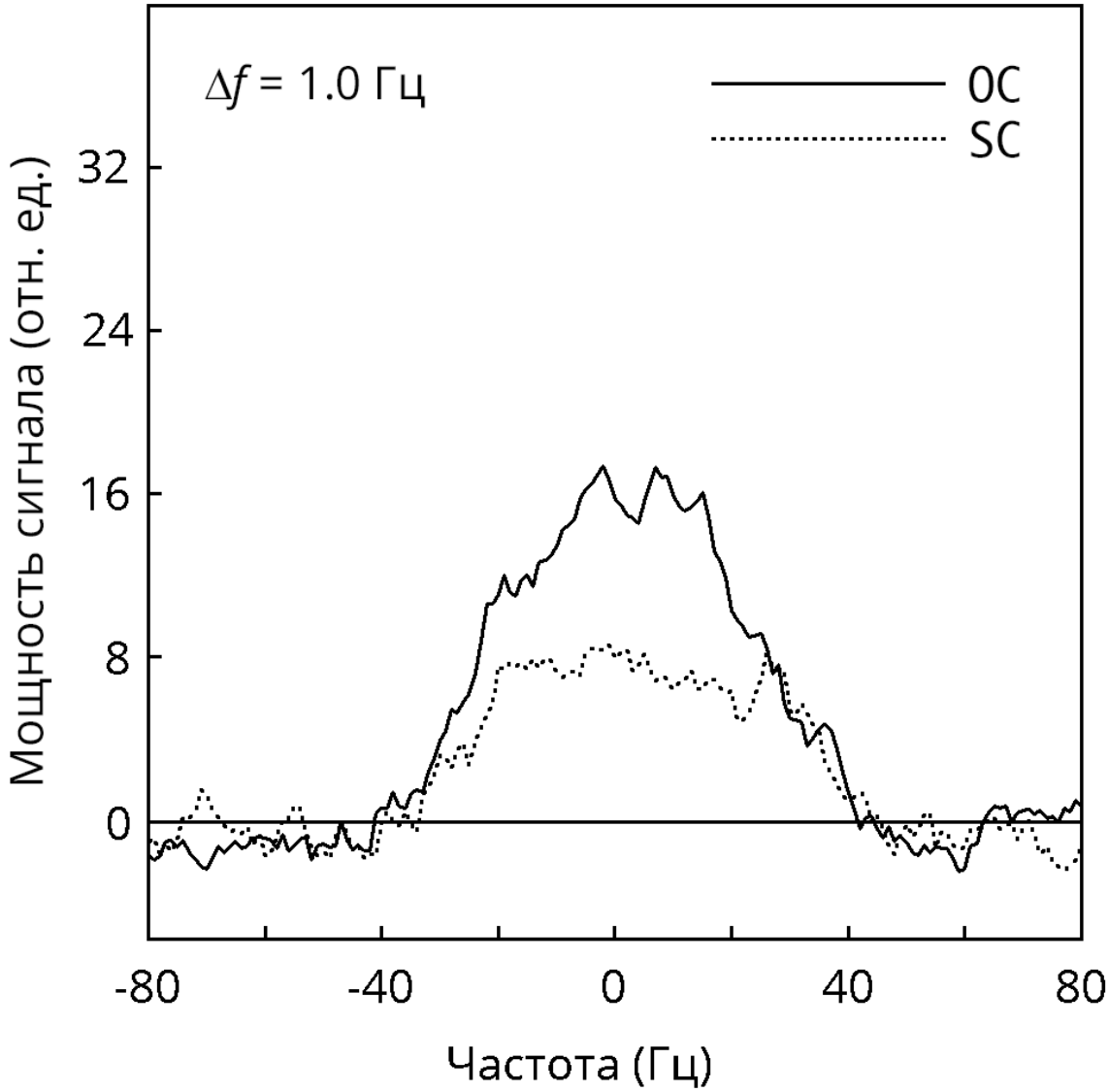
- H = ~30°
- f_{dop} = 58 – 60 кГц

Радиотелескоп РТ-32 (обсерватория «Зеленчукская»)

- D = 32 м
- T_{sys} = 40 K
- КИП = 0.48
- Δf_{reg} = 0.5 МГц
- RCP+LCP

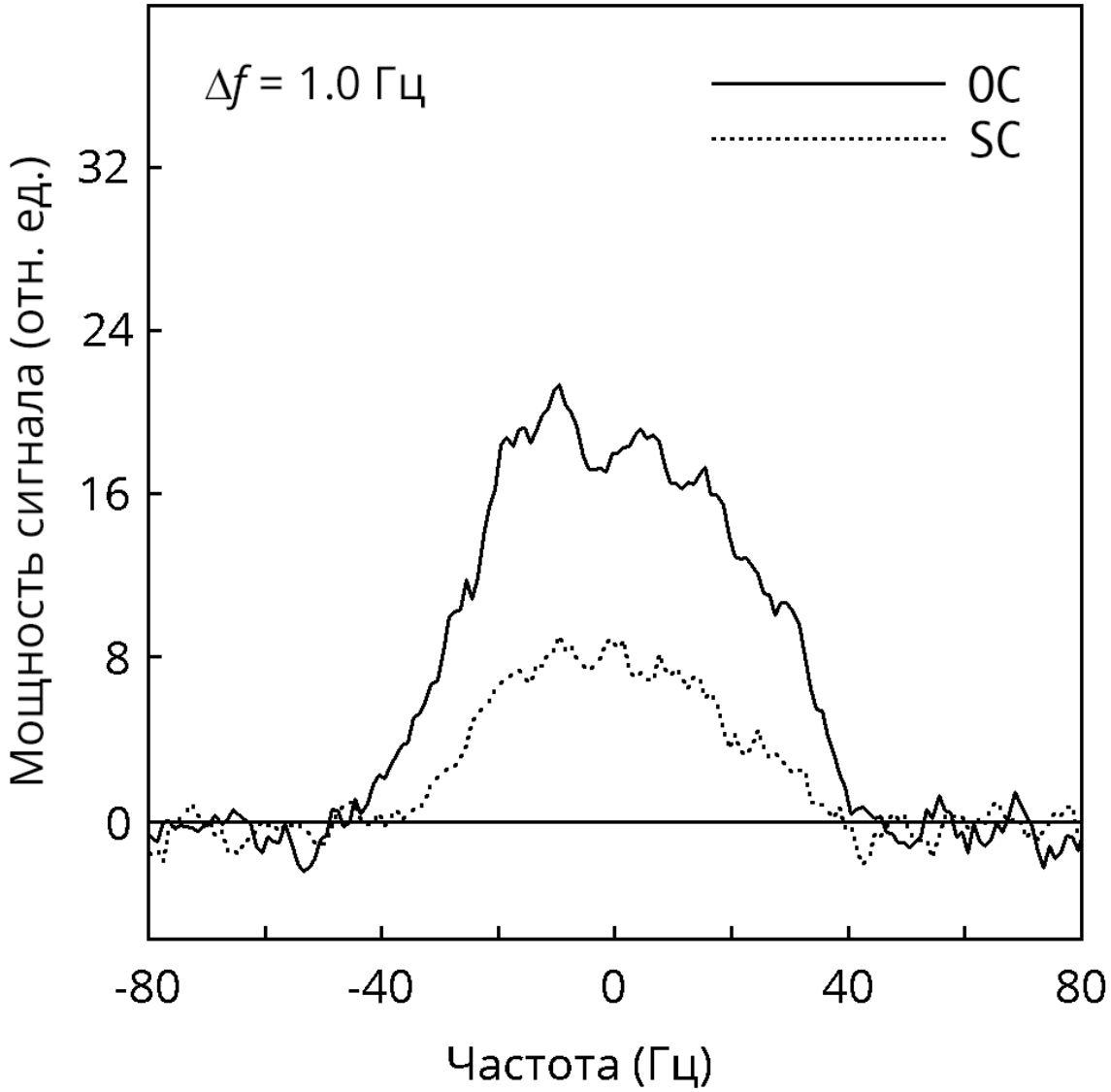
- H = ~10°
- f_{dop} = 55 – 56 кГц

Спектры мощности отраженного сигнала (Зеленчукская)



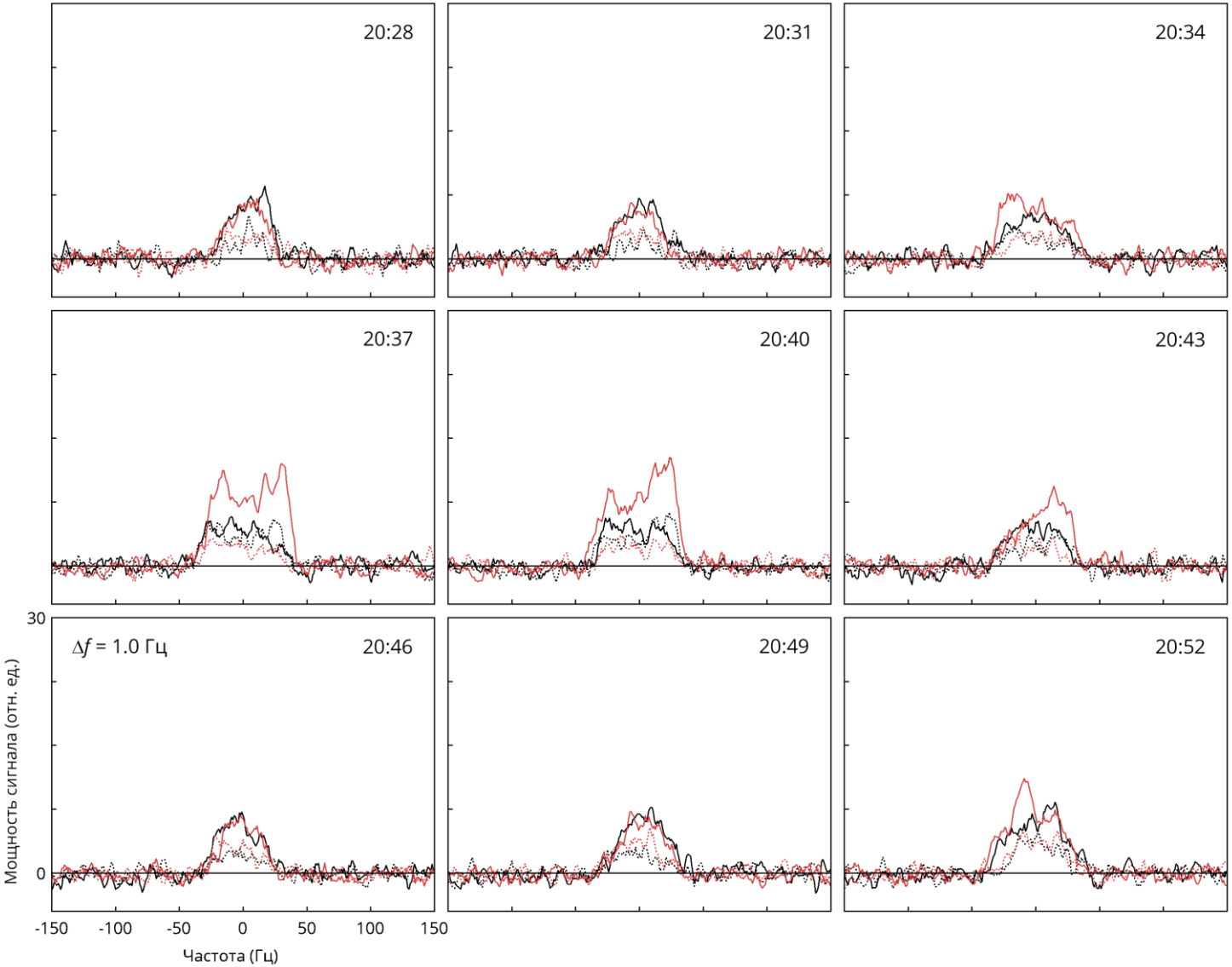
- Период накопления 35 мин
- Частотное разрешение 1Гц
- ОСШ = 191
- OC – левая круговая поляризация
- SC – правая круговая поляризация
- μ_C = SC/OC = 0.56±0.06

Спектры мощности отраженного сигнала (Бадары)

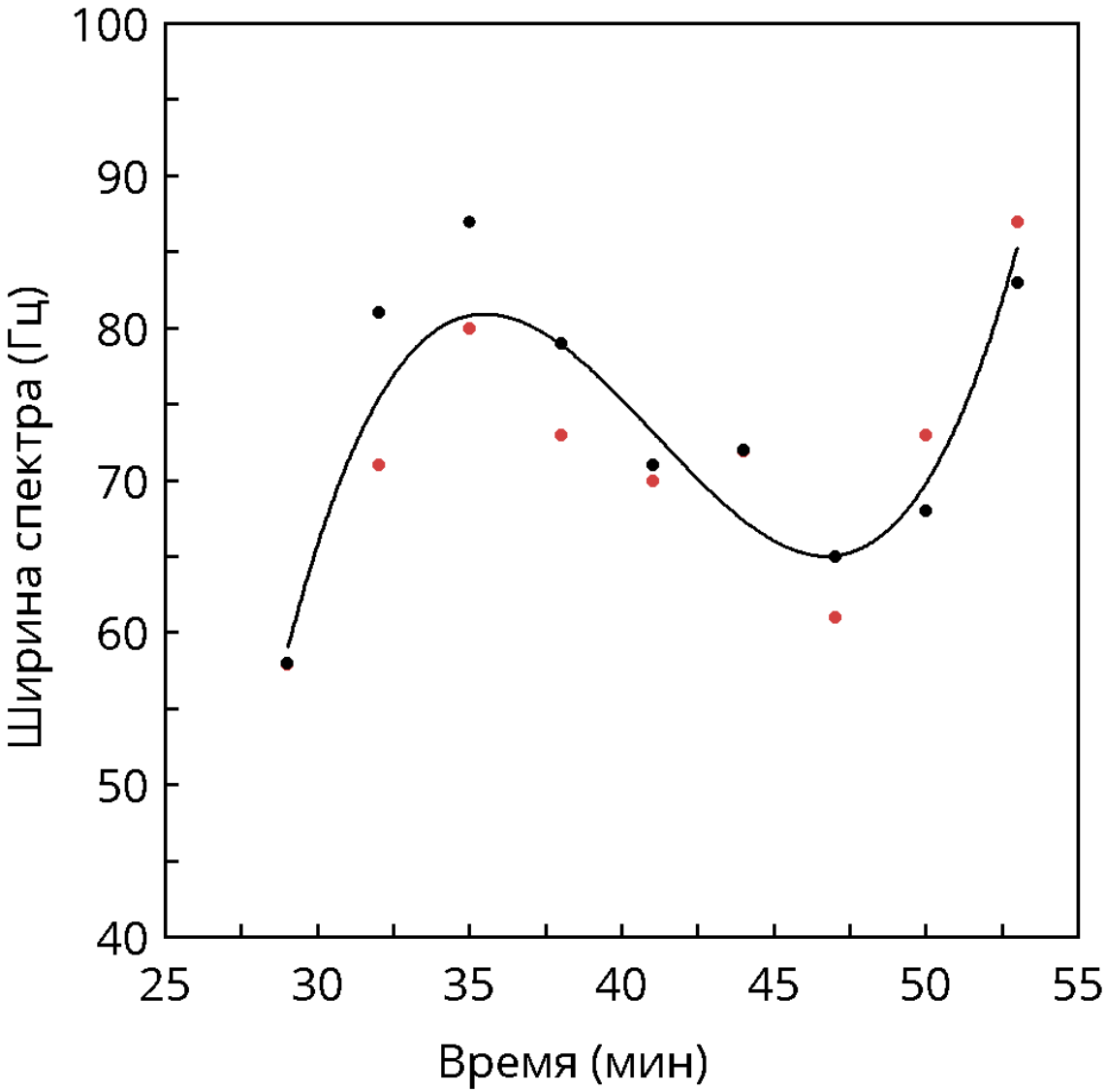


- Период накопления 35 мин
- Частотное разрешение 1Гц
- ОСШ = 178
- OC – левая круговая поляризация
- SC – правая круговая поляризация
- μ_C = SC/OC = 0.37±0.04

Серия спектров отраженного сигнала

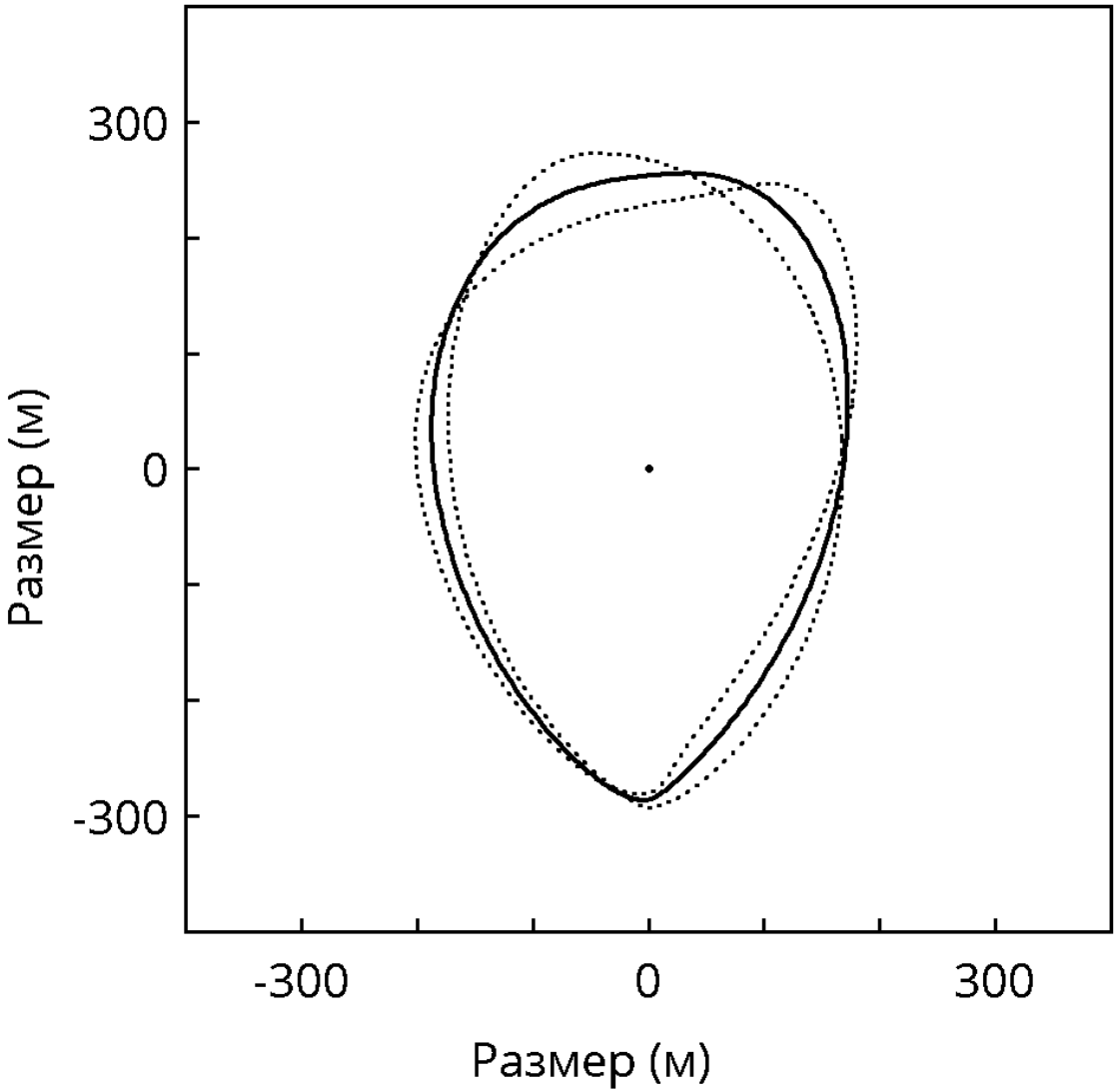


Изменение ширины спектров мощности со временем



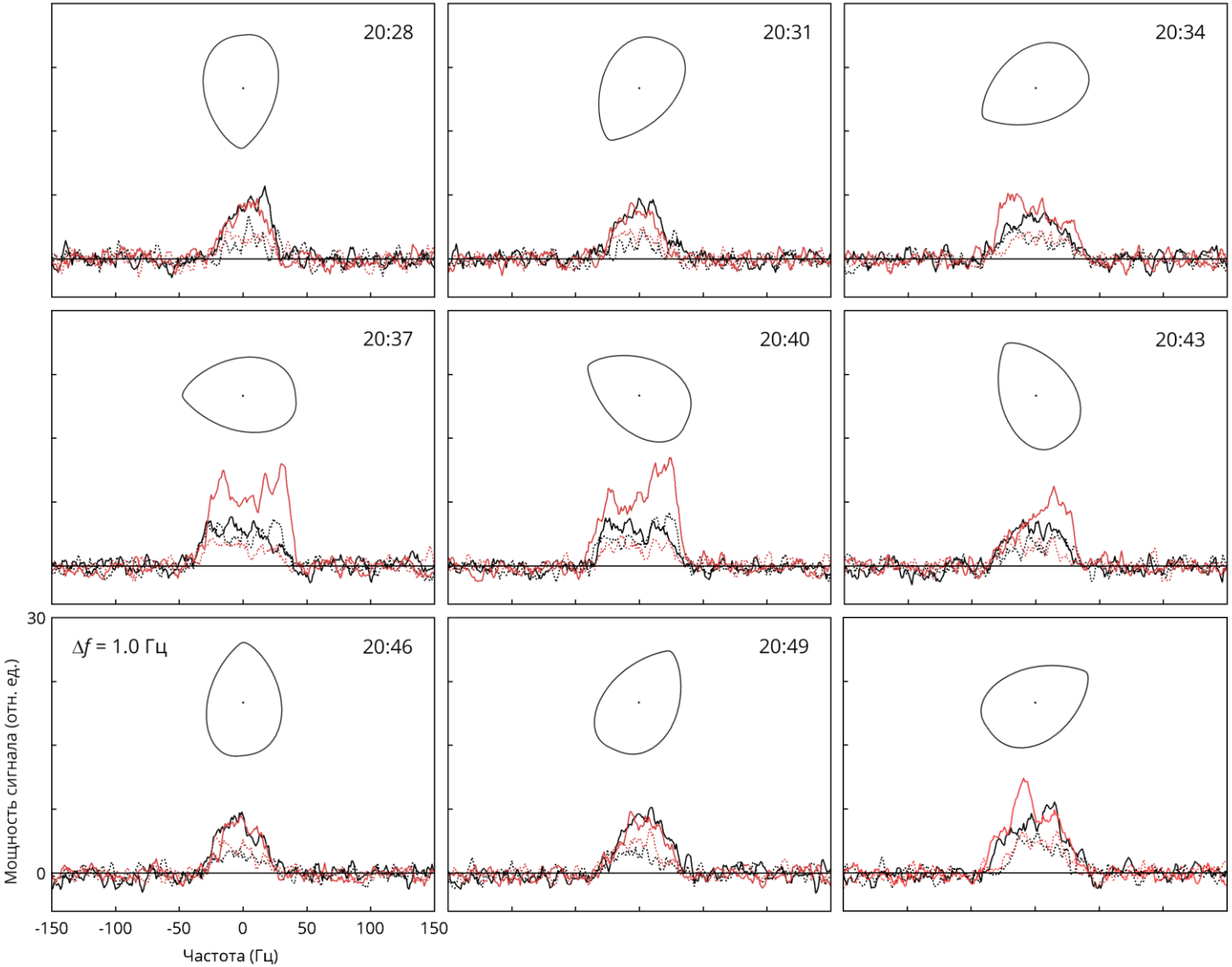
- Ширина спектра «Зеленчукская»
- Ширина спектра «Бадары»
- P = 36±3 мин

Фигура астероида в проекции на плоскость вращения



- Общее решение
- D = 350 – 520 м.

Фигура астероида в соответствующей фазе вращения



Наблюдения доплеровского смещения частоты

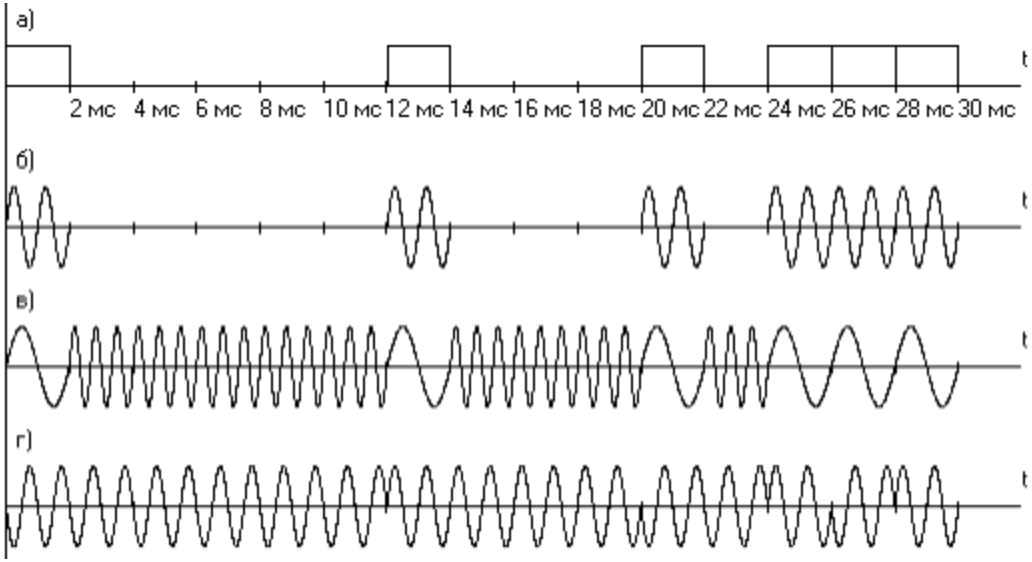
Эпоха (UT) 2015-08-18	**Зеленчукская**		**Бадары**	
	Доплер (Гц)	О–С (Гц)	Доплер (Гц)	О–С (Гц)
20:28	54903	-11	58479	-8
20:31	54727	-6	58367	-3
20:34	54550	-3	58246	-7
20:37	54373	1	58135	1
20:40	54190	-2	58016	1
20:43	54011	0	57905	9
20:46	53832	2	57783	7
20:49	53643	-6	57654	0
20:52	53463	-6	57525	-7

Орбитальные элементы астероида 2011 UW158 на 27 июня 2015 г.

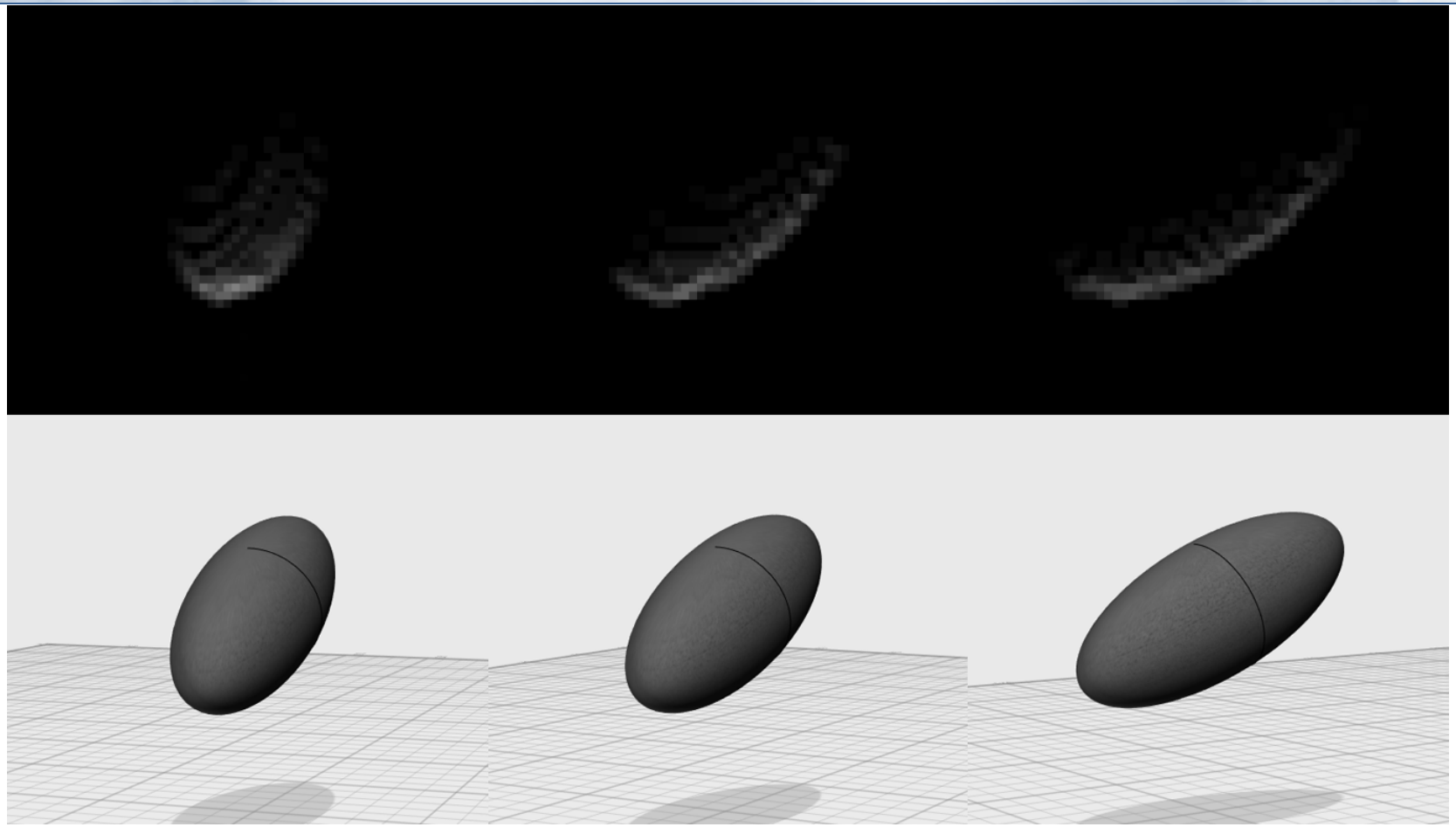
- σ = 0.29"
- MOID = 0.0026 а.е.

Величина	Значение	Ошибка
Средняя аномалия (°)	349.64421188	2.3×10^{-7}
Аргумент перигелия (°)	8.64720924	6.0×10^{-7}
Долгота восходящего узла (°)	286.27292520	3.5×10^{-7}
Наклон (°)	4.6498398	1.3×10^{-7}
Эксцентриситет	0.37513083172	7.9×10^{-10}
Среднее движение (°/сут)	0.47926460702	7.6×10^{-10}

Прием и обработка модулированного радиосигнала

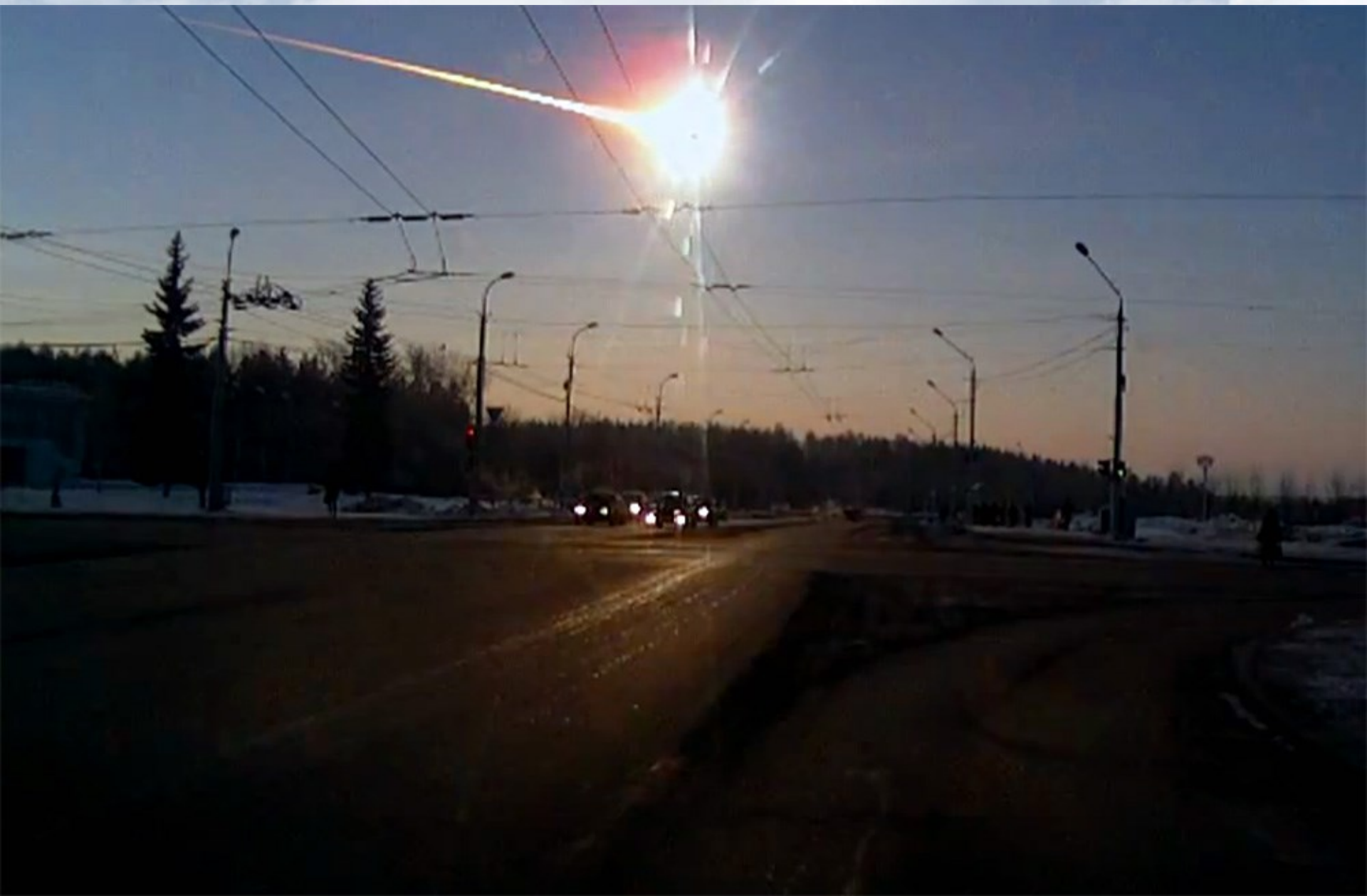


Радиоизображения астероида в сравнении с вращающейся моделью



Челябинский метеорит.
Уточнение места падения.

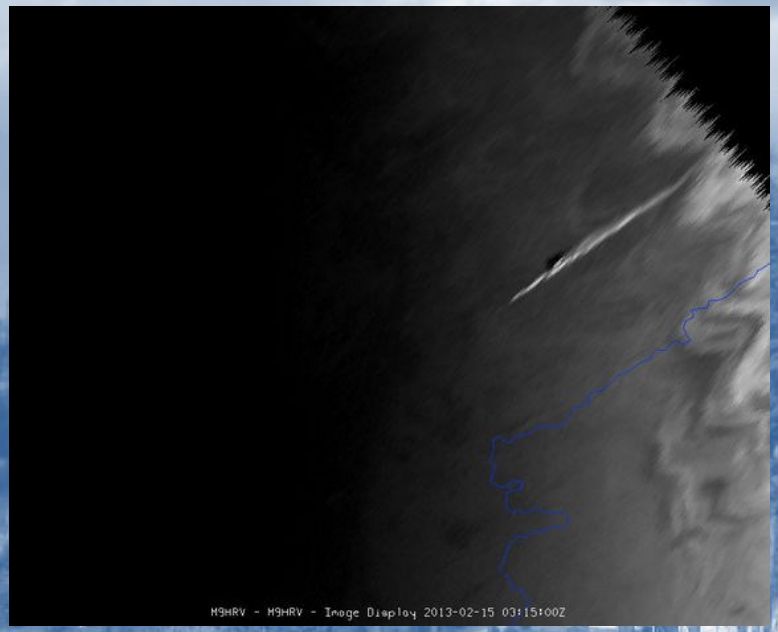
Челябинский метеорит (15 февраля 2013 г.)



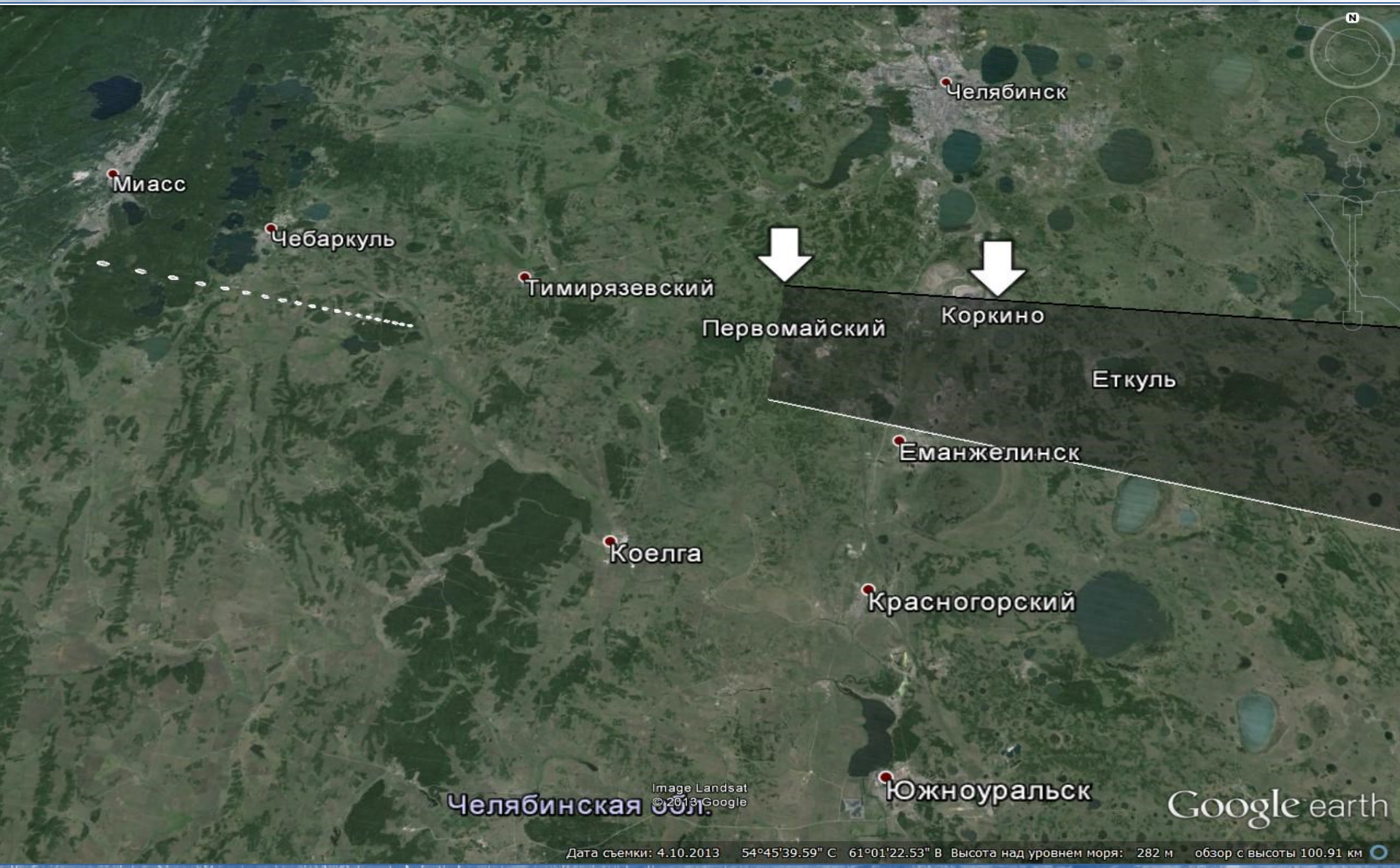
Снимки метеороида из космоса

Геостационар «Метеосат – 10»

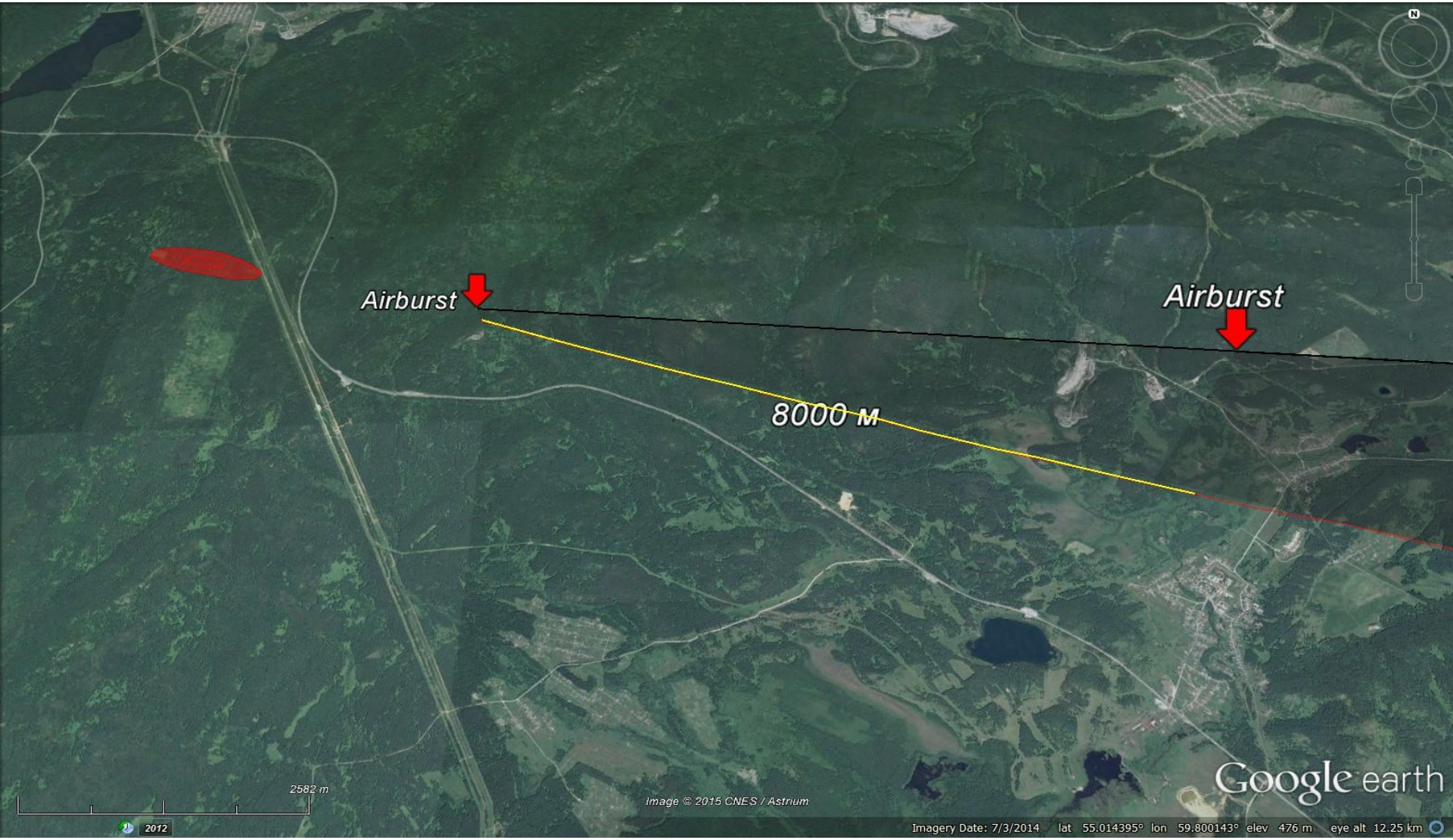
Геостационар «Метеосат – 9»



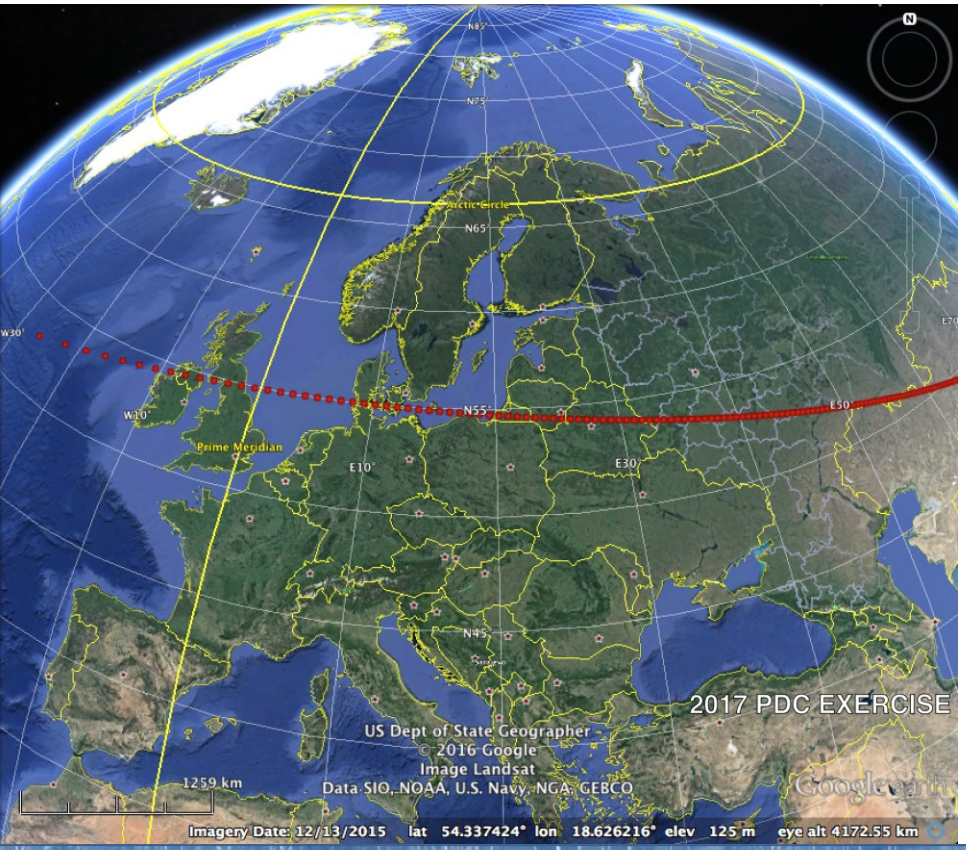
Траектория челябинского метеорита

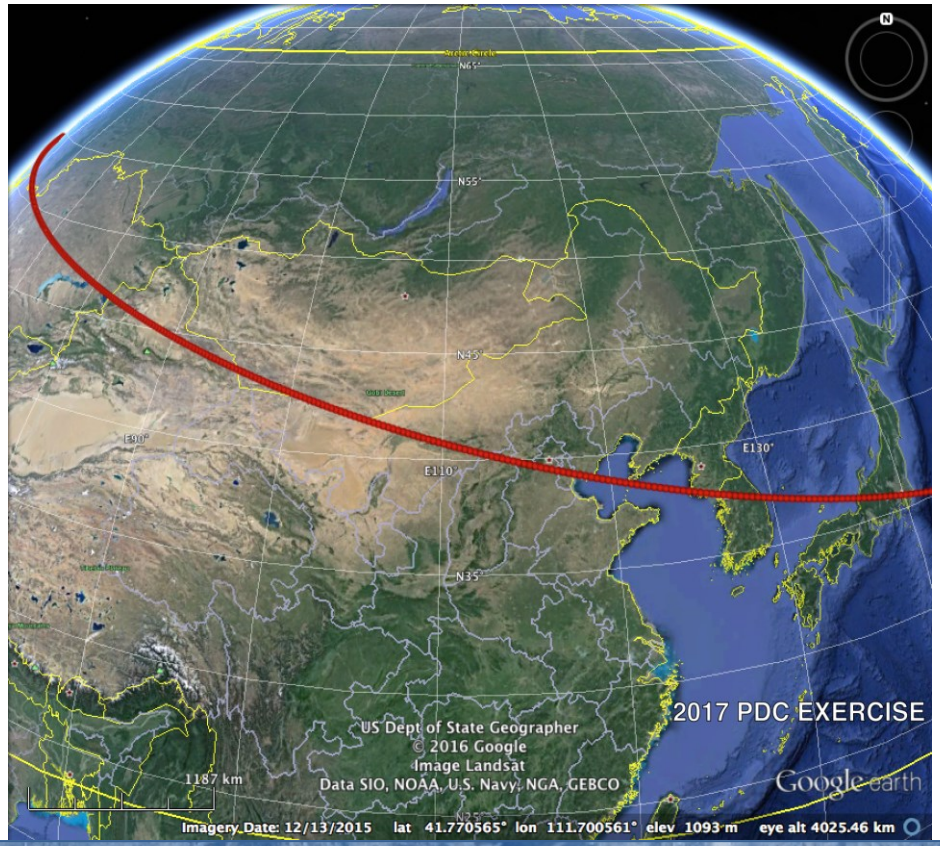


Траектории при различных углах поворота

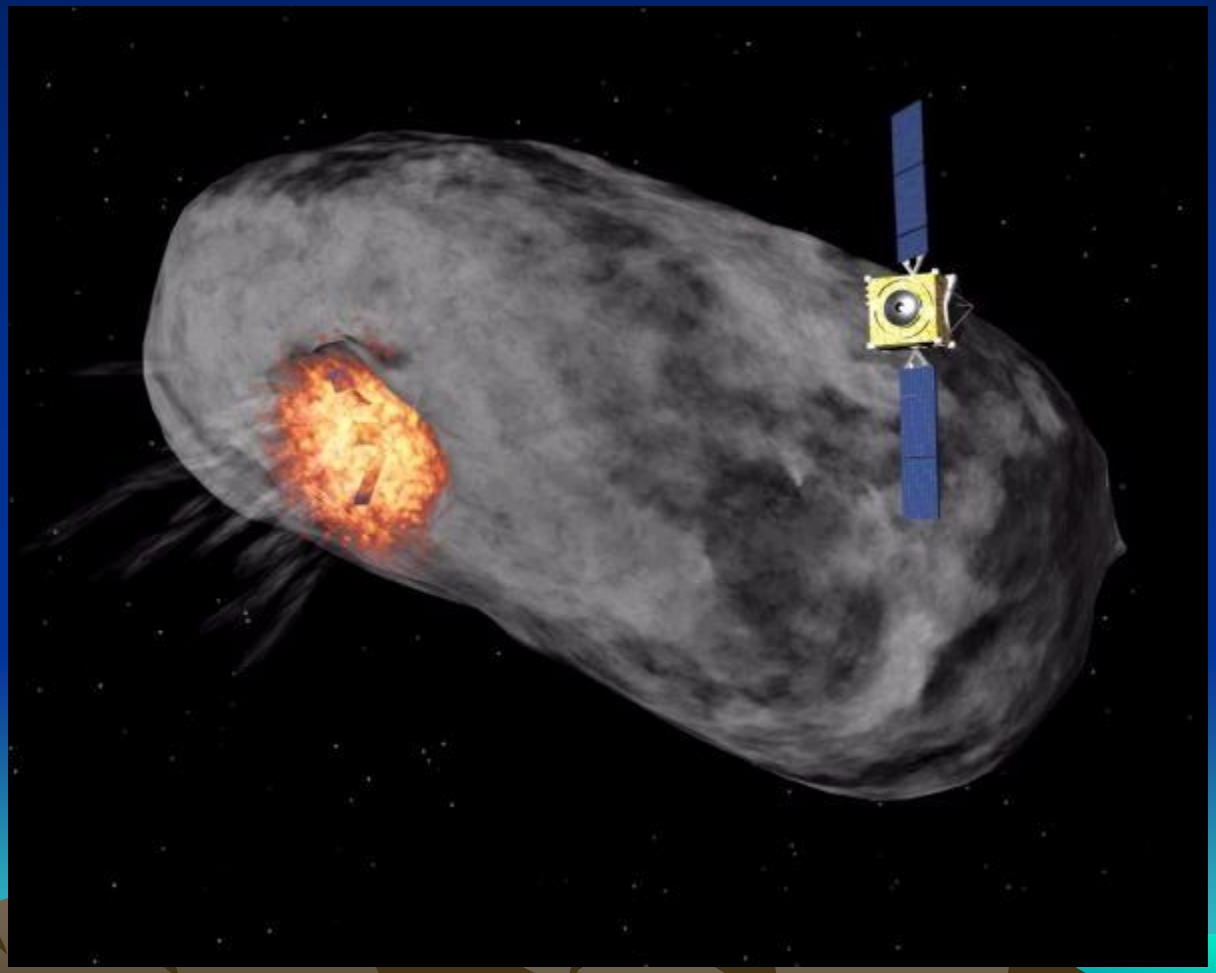


Главные вопросы: Кто решает каким способом и когда будет производиться воздействие?
Что для этого необходимо знать.





Ядерный взрыв



Результаты обработки радиолокационных наблюдений подтверждают эффективность применения радиолокации для изучения динамических и физических свойств объектов, сближающихся с Землей.

Радиолокация является мощным инструментом для уточнения траектории, формы и состава астероидов и комет.

Спасибо за внимание!