

АСТЕРОИДНО-КОМЕТНАЯ ОПАСНОСТЬ ПРОБЛЕМА И РЕШЕНИЯ

Б.М. Шустов

Институт астрономии РАН,
Экспертная группа по космическим угрозам при
Совете РАН по космосу



Основные космические угрозы

Космический мусор (КМ) - все искусственные объекты и их фрагменты в космосе, которые никогда более не смогут служить никаким полезным целям, но являются опасным фактором воздействия на функционирующие космические аппараты, особенно пилотируемые, а в отдельных случаях представляющие опасность для Земли.

Космическая погода - влияние на распространение радиоволн, геоиндуцированные токи, изменение орбит спутников и т.д.

Астероидно-кометная опасность (АКО) - угроза нанесения серьезного ущерба человечеству в результате столкновения малых тел Солнечной системы размером более десяти метров (т.е. астероидов и комет) с Землей.

Биологическое заражение.

«Астрофизические» угрозы.

Определения

малые тела Солнечной системы

Класс	Размер	Состав
астероиды	от нескольких м	каменные железокаменные железные
кометы	от нескольких м	льды с вкраплениями камней и пыли
метеороиды	от 1 мм	см. астероиды, кометы
межпланетная пыль	менее 1 мм	см. астероиды,

Границы размеров довольно условны!

Определения

объекты, сближающиеся с Землей, потенциально опасные объекты, опасные небесные тела

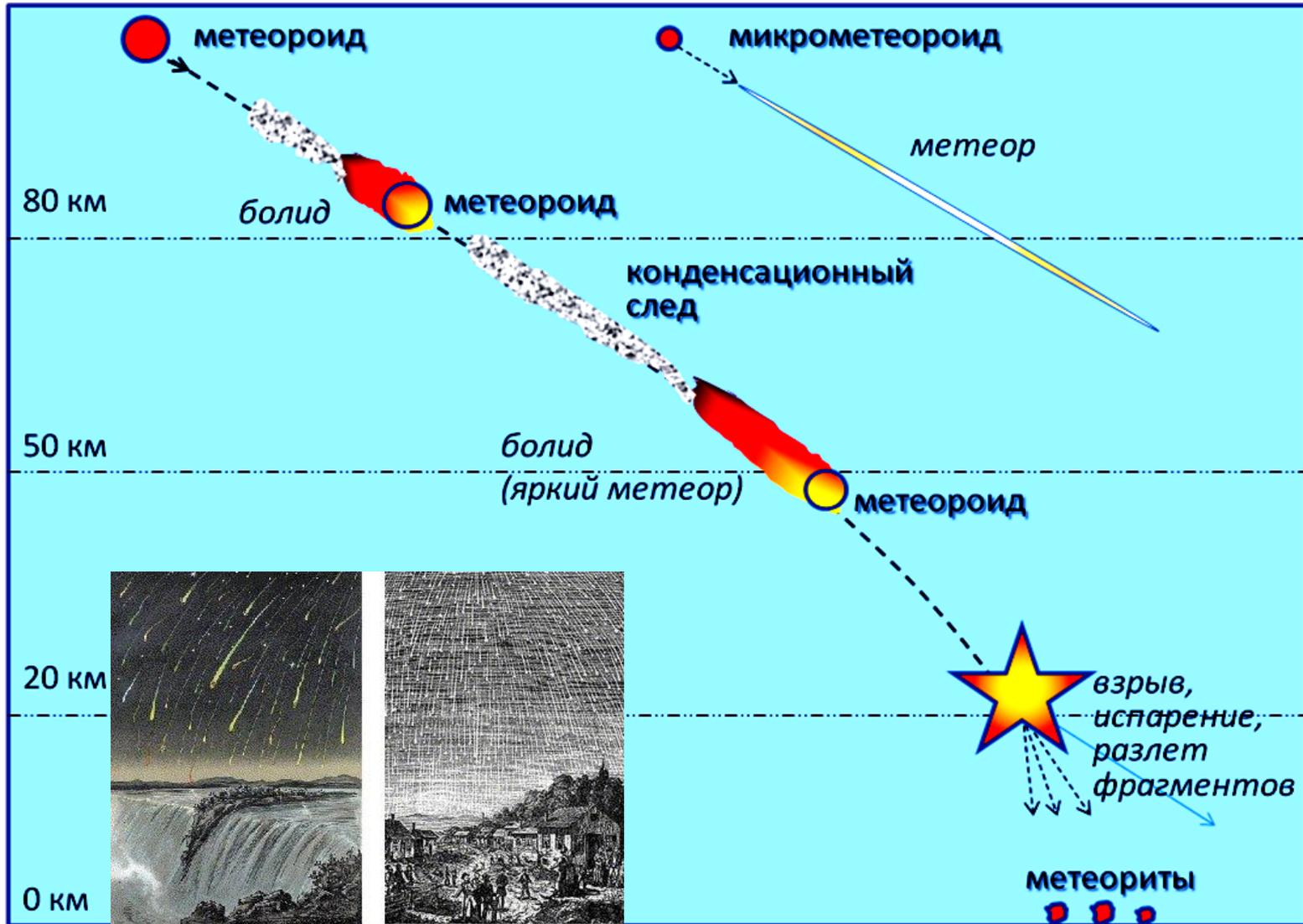
Международная терминология

Объекты, сближающиеся с Землей (ОСЗ, Near Earth Objects - NEO) - астероиды и кометы, чьи орбиты имеют перигелийные расстояния $q < 1.3$ а.е., АСЗ (NEA) – астероиды. КСЗ (NEC) – кометы. В основном ОСЗ – это АСЗ.

Потенциально опасные объекты (ПОО, Potentially Hazardous Objects - PHO) – тела с MOID < 0.05 а.е. (7.5 млн. км). $H < 22^m$ (размер > 140 м).

Опасные небесные тела (ОНТ) – часто используемое название, нет точного общепринятого определения.

А propos: определения метеор, болид, метеорит



Малые тела в Солнечной системе

THE MIDDLE SOLAR SYSTEM

This animation shows the motion of the middle part of the solar system over a two-year time period. The sun is at the center and the orbits of the planets Mercury, Venus, Earth Mars and Jupiter are shown in light blue (the locations of each planet are shown as large crossed circles). Comets are shown as blue squares (numbered periodic comets are filled squares, other comets are outline squares). Main-belt minor planets are displayed as green circles, near-Earth minor planets are shown as red circles.

The individual frames were generated on an OpenVMS system, using the PGLOT graphics library. The animation was put together on a RISC OS 4.03 system using !InterGif.

Аризонский метеоритный кратер

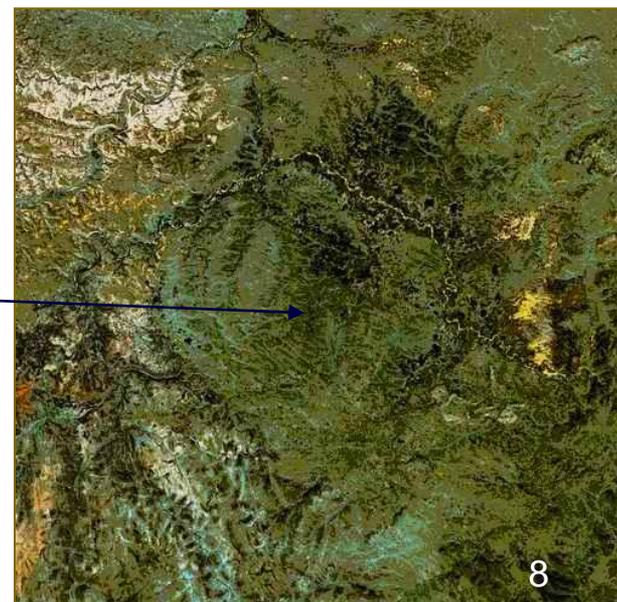
(Барринджера кратер, кратер Метеор)



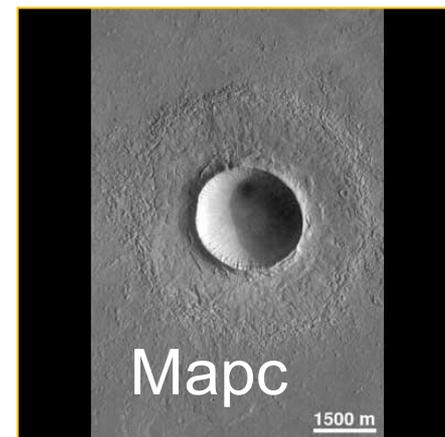
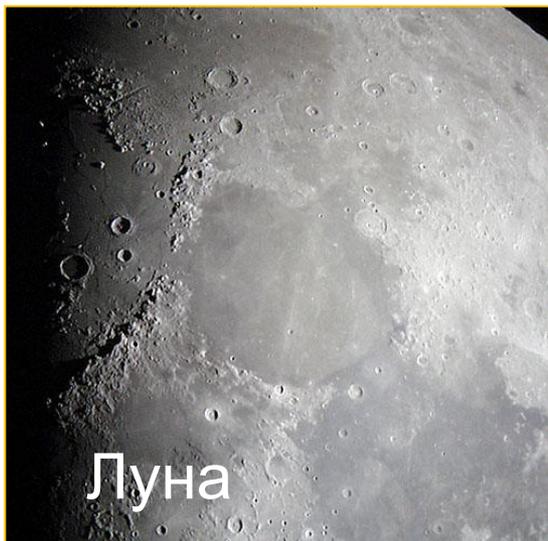
Возраст около 50 тысяч лет. Диаметр 1240 м, глубина 170 м. Результат падения тела размером ~60 м (~300 тысяч тонн) со скоростью ~20 км/с. Мощность взрыва ~ 20 миллионов тонн ТНТ. Внутри и вокруг кратера найдены осколки метеоритного никелистого железа.

Крупные метеоритные кратеры на территории России

Наименование кратера	Координаты		Диаметр, км	Возраст, млн. лет
	широта	долгота		
Попигай	71°38'	111°11'	100	35.7 ± 0.2
Кара	69°06'	64°09'	65 ?	70.3 ± 2.2
Пучеж- Катунский	56°58'	43°43'	80	167 ± 3
Каменский	48°21'	40°30'	25	49.15 ± 0.18
Логанча	65°31'	95°56'	20	40 ± 20
Эльгыгытгын	67°30'	172°05'	18	3.5 ± 0.5
Калужский	54°30'	36°12'	15	380
Янисъярви	61°58'	30°55'	14	700 ± 5
Карлинский	54°55'	48°02'	10	5 ± 1



Кратеры на других телах Солнечной системы



<i>Объект</i>	<i>Размеры</i>	<i>Частота (раз в ... лет)</i>	<i>Размер кратера (км)</i>	<i>Результат столкновения с Землей</i>
Пылинка	$D < 0.1$ см	непрерывно		Сгорает, оседает
	$0.1 \text{ см} < D < 0.5$ м	0.05 (0.1 м)		Сгорает
	$0.5 \text{ м} < D < 20-30$ м	~1 (5 м)		Сгорают, малая доля долетает до поверхности
Астероид	30 м	~ 250	Нет	Типа Тунгусского события
Комета			> 0.5	Аризонский кратер
	100 м	~ 3 тыс.	2	Региональная катастрофа
	1 км	1 млн.	20	Глобальная катастрофа
	> 10 км	100 млн.	> 200	Конец цивилизации

Направления фундаментальных исследований, важных для решения проблемы АКО

1. Изучение эволюционной динамики ансамбля малых тел Солнечной системы и уточнение прогноза столкновений;
-  2. Изучение механизмов воспроизводства популяции объектов, сближающихся с Землёй;
3. Исследование физико-химических свойств малых тел Солнечной системы, сближающихся с Землёй;
4. Построение точных моделей взаимодействия малых тел с атмосферой и поверхностью планеты;
5. Фундаментальные аспекты проблемы оценки рисков;
6. Фундаментальные аспекты изучения возможных мер предотвращения столкновения с Землёй и уменьшения ущерба.

Темы для многих диссертаций!!!

Население АСЗ постоянно пополняется!

Интенсивность столкновений была высокой в прошлом, затем существенно понизилась. Для Луны согласно работе (*Neukum, Ivanov, 1994*) история бомбардировки (ударного кратерообразования) описывается формулой

$$\varphi(> 1km) = 3.77 \times 10^{-13} \exp(6.93t) + 8.38 \times 10^{-4}$$

где φ - число кратеров > 1 км, образовавшихся на поверхности Луны за 1 год. Время t в млрд. лет от нашей эпохи в прошлое.

Вывод – последние 2 млрд. лет темп бомбардировки Луны, а значит и Земли, телами > 50 м менялся мало.

Вывод 2 - Поскольку время жизни населения АСЗ - несколько миллионов лет, население АСЗ должно постоянно пополняться!

Резонансы

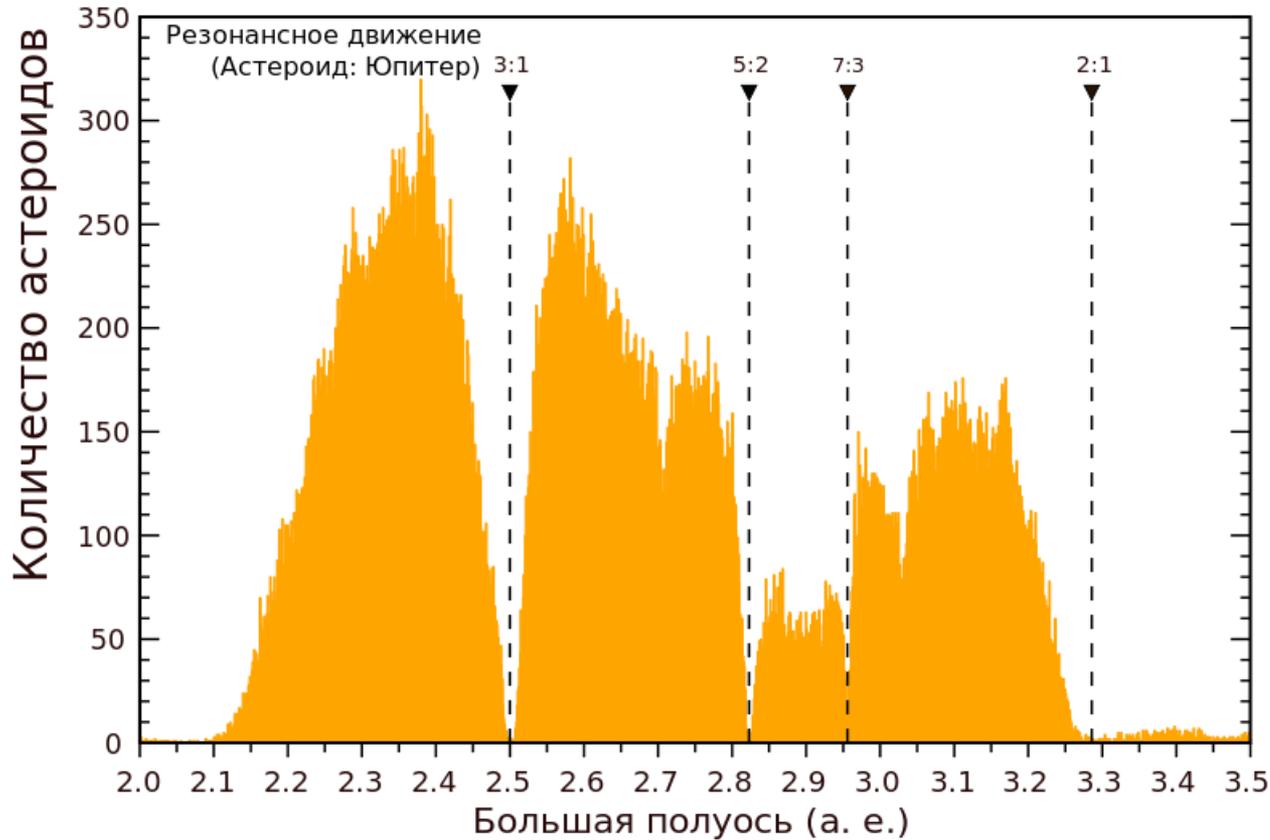
Орбиты астероидов могут меняться из-за различных резонансов (*Wetherill 1979; Wisdom 1983*). *Bottke and Morbidelli 2004* классифицируют резонансы в две категории «мощные» и «диффузионные (“powerful” and “diffusive”)

Мощные:

- ν_6 вековой резонанс (частота прецессии долготы перигелия орбиты астероида равна шестой средней частоте прецессии долготы перигелия Сатурна), работает на внутреннем краю Главного пояса астероидов;
- Несколько резонансов по среднему движению с Юпитером (e.g., 3:1, 5:2, and 2:1 на 2.5, 2.8, 3.2 а.е. соответственно). Резонансы 5:2 и 2:1 приводят к выбросу тел из внутренней Солнечной системы.

Диффузионные: много слабых резонансов высокого порядка по среднему движению с Юпитером, Марсом...Работают на шкалах 0,1 – 1 млрд лет.

Распределение астероидов главного пояса Щели Кирквуда



Астероиды Главного пояса могут входить в зону резонансов, например, из-за эффекта Ярковского (*Bottke+2002*).

Судьба АСЗ

Среднее время необходимое, чтобы стать АСЗ, пересекающим орбиту Земли, начиная с квазикруговой орбиты составляет около 0,5 Млн.лет. Дальнейшая эволюция АСЗ-области характеризуется средним временем жизни ~ 2 млн.лет, а типичными конечными состояниями являются столкновения с Солнцем (80% случаев) и выброс на гиперболическую орбиту через сближение с Юпитером (12%). Столкновения с Землей - 1% случаев (*Gladman и др. 1997*).

А propos: о «родине» метеоритов

подавляющее большинство объектов в Главном поясе (ГП) составляют астероиды трёх основных классов:

класс C — их ~75%; альbedo 3-9%; исходный состав, близки к углеродистым хондритным метеоритам; встречаются во внешней зоне ГП; пример - Гигея

класс S — ~17%; альbedo 10-23%; переработанный состав - силикаты Fe, Mg, отсутствие каких-либо углеродных соединений; во внутренней части пояса, до 2.5 а.е; Юнона.

класс M — ~10 %; альbedo 10-19%; богаты Ni и Fe; могут быть фрагментами металлических ядер крупных планетезималей; преимущественно в центральных областях ГП на расстоянии 2,7 а. е. от Солнца; Клеопатра.

Комплексный характер проблемы АКО: практический аспект

Основные составляющие проблемы АКО, требующие практического решения:

- Обнаружение (выявление) и мониторинг «всех» опасных небесных тел (ОНТ) размером > 50 м. Время упреждения ~ 1 месяц. (т.е. **на дальних подступах**).

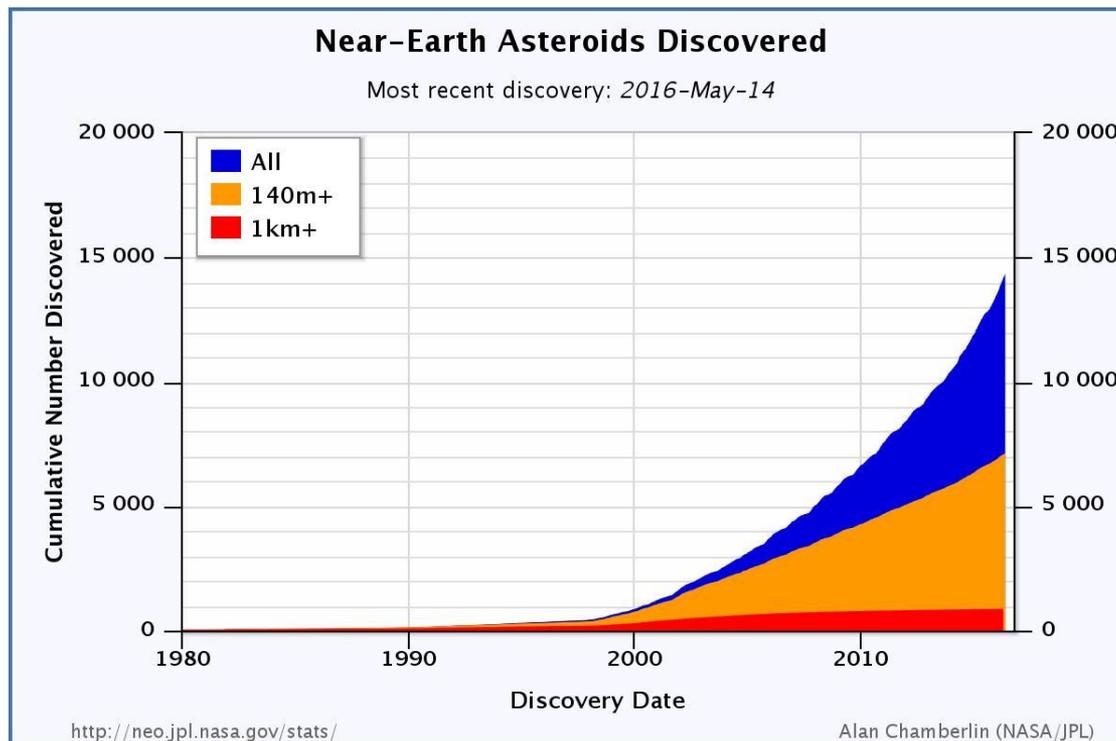
Обнаружение **в ближнем космическом пространстве** ОНТ размером > 10 м. (типа Челябинского) с целью своевременного предупреждения о событии. Время упреждения $\sim 3-4$ часа.

- Определение степени угрозы (оценка рисков) и принятие решений.
- Противодействие и уменьшение ущерба.

Обнаружение – первоочередная задача.

Обнаружение

Рост числа обнаруженных астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) за период 1980-2016 гг. .



На 17.05.16 обнаружено 14454 АСЗ, и 106 КСЗ. Из них потенциально опасных объектов 1547 (> 140 м), около 3500 (> 10 м).

~ 98% информации дают средства США!

АКО: уровни знания - текущий и требуемый

	<i>текущий</i>	<i>требуемый</i>
% обнаруженных ПОО > 1 км > 140 м (на 03/02/15 известно 1547 ПОО) > 50 м > 10 м (на 03/02/15 известно ~ 3700)	~ 90% ~ 20% ~ 1% ~ 0.001%	> 90% > 90% > 90% > 90% в ОКП
точность элементов орбит	10^{-7} (лучшая)	10^{-10}
точность определения физических параметров (D , M , V и т.д.)	~0,1 (лучшая)	0,1
форма исследуемого тела наземные средства космические миссии	приближенная	детальная
внутренняя структура	неизвестна	достаточная для выбора способа противодействия
состав	поверхность	состав по объему



NASA's NEO Search Program

(Current Systems)



Minor Planet Center (MPC)

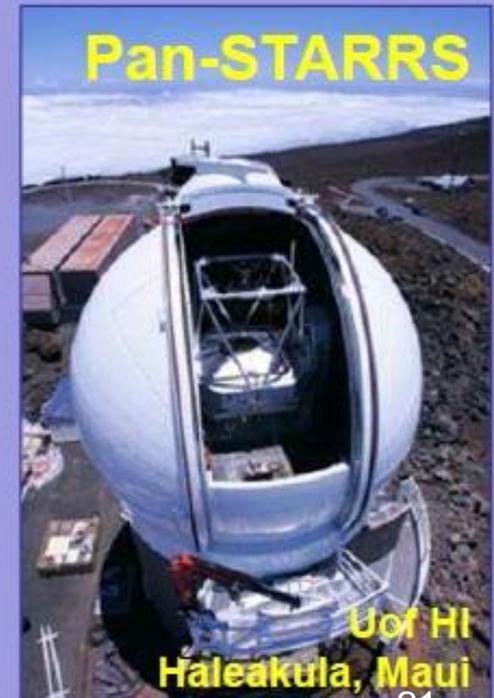
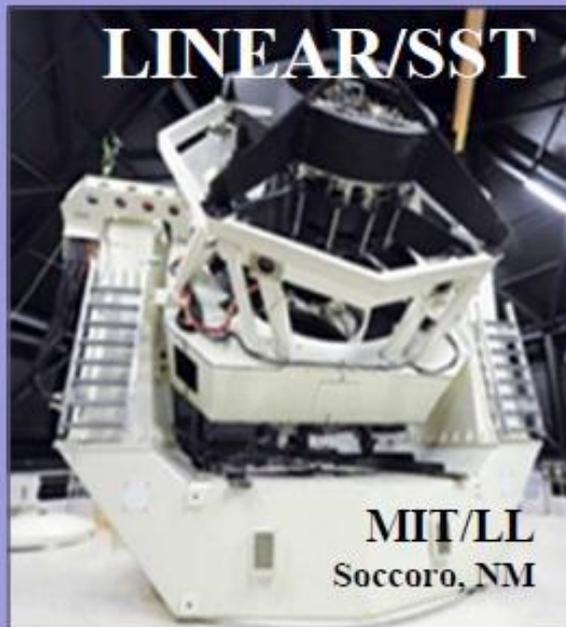
- IAU sanctioned
- Int'l observation database
- Initial orbit determination

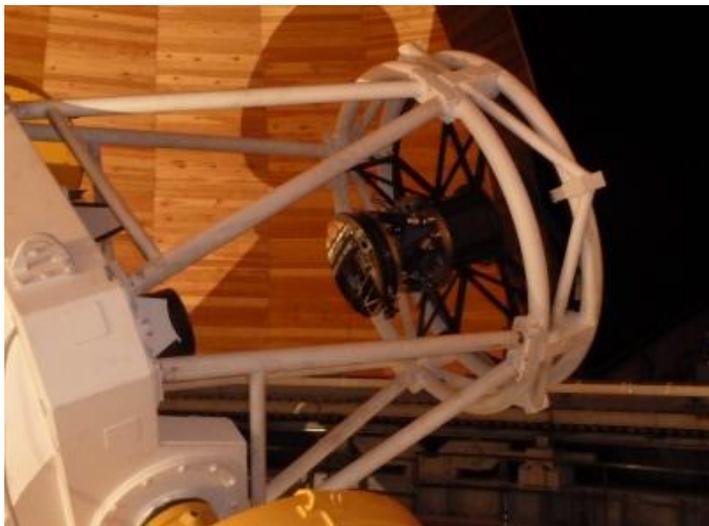
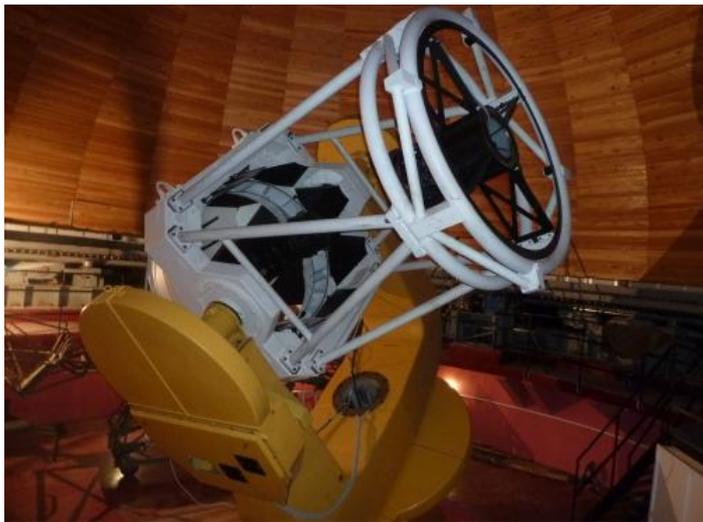
<http://minorplanetcenter.net/>

NEO Program Office @ JPL

- Program coordination
- Precision orbit determination
- Automated SENTRY

<http://neo.jpl.nasa.gov/>



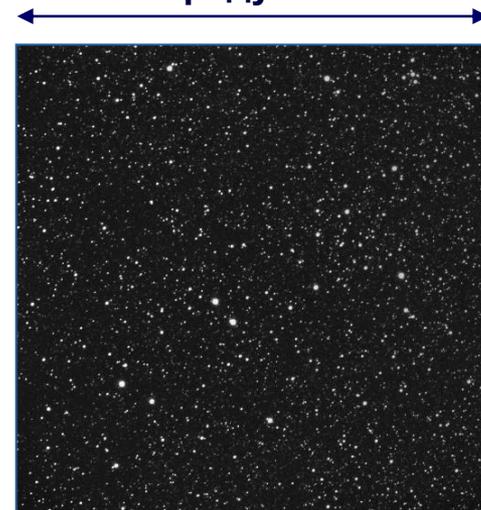


В России (ИСЗФ СО РАН) появился свой телескоп для обнаружения ОНТ в дальнем космосе. Это проект крупного (1.6 м) широко-угольного (2.8°) обзорного телескопа АЗТ-33ВМ. Введен в опытную эксплуатацию в декабре 2015 г.

M33

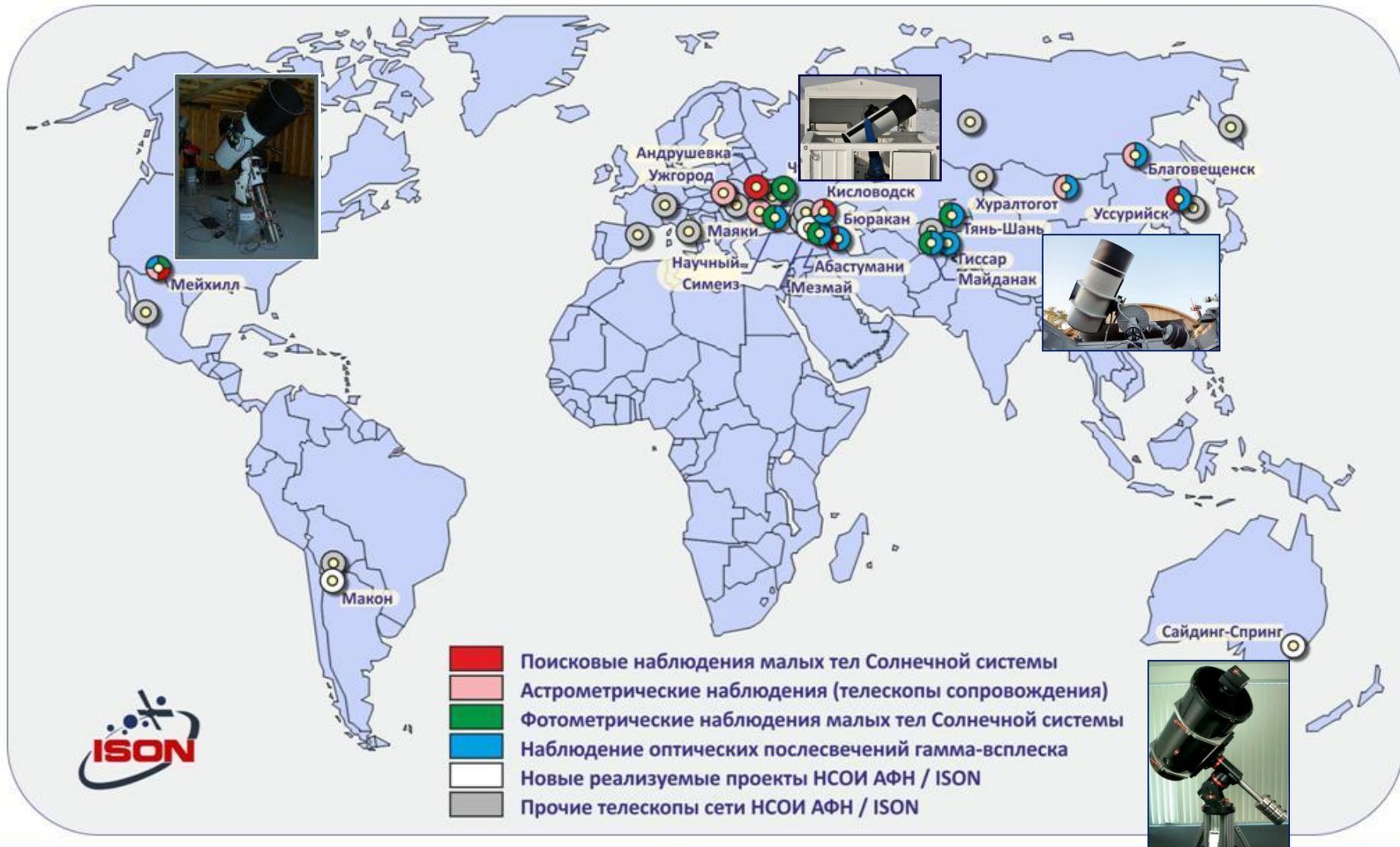


0.5 градуса



Проблема – нет эффективного детектора.

Российские сети: ISON



Российские сети: МАСТЕР

Network of twine 40-cm telescopes for search of optical transients of GRB is to be used for NEO observation



Сравнение результативности российских обзоров

<i>Название проекта</i>	<i>Количество открытых АСЗ (2015/всего)</i>
НСОИ АФН (коорд. ИПМ РАН)	7 (1 ПОО)/14
МАСТЕР (коорд. ГАИШ МГУ)	2 (1 ПОО)/5
Частные обс. (ЕЛЕНА, МАРГО)	2 (1 ПОО)/4

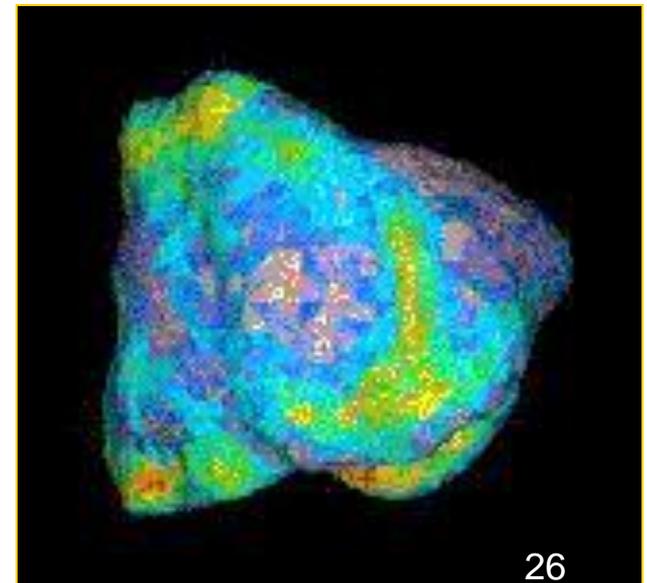
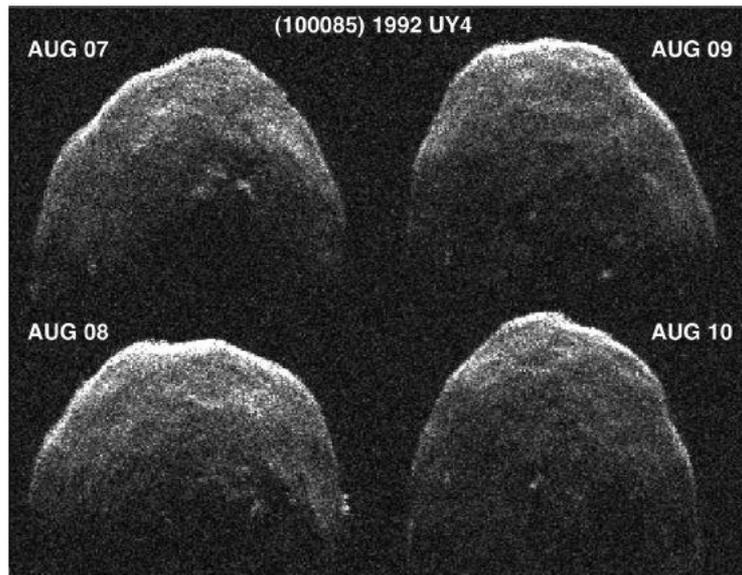
Есть рост количества российских наблюдений, но их доля в мировой статистике весьма мала (~ 0.1%). Эти средства более эффективны для обнаружения в ОКП.

Проблема – почти полное отсутствие сотрудничества между командами !!!

Радарные наблюдения малых тел

Ограниченное число объектов
2 радара (США): Голдстоун и
Аресибо

Точное определение орбит,
формы, вращения, состава
поверхностных слоев



Необходимость развития средств космического базирования для обнаружения и изучения опасных небесных тел

Основные преимущества космических систем:

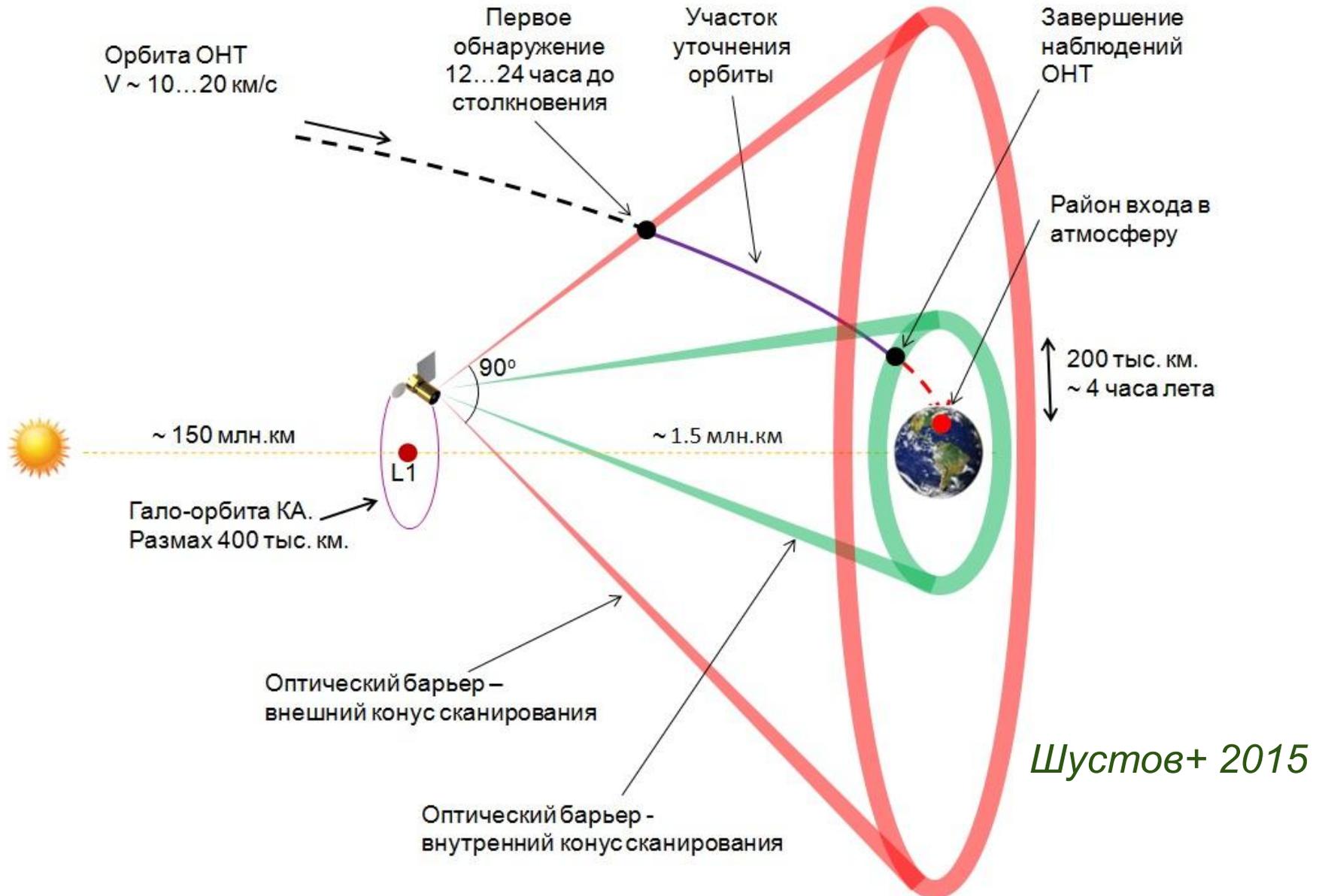
- Возможность проводить наблюдения в гораздо большей области неба, в т.ч. внутри орбиты Земли, и даже в области за Солнцем (при использовании удаленного от Земли КА);
- Меньший фон неба;
- Возможность круглосуточной работы.

Недостатки:

- Относительная дороговизна;
- Меньшая надежность.

Системы космического и наземного базирования могут работать параллельно и дополнять друг друга.

Система Обнаружения Дневных Астероидов



Проблема оценки рисков

риск = вероятность события × последствия

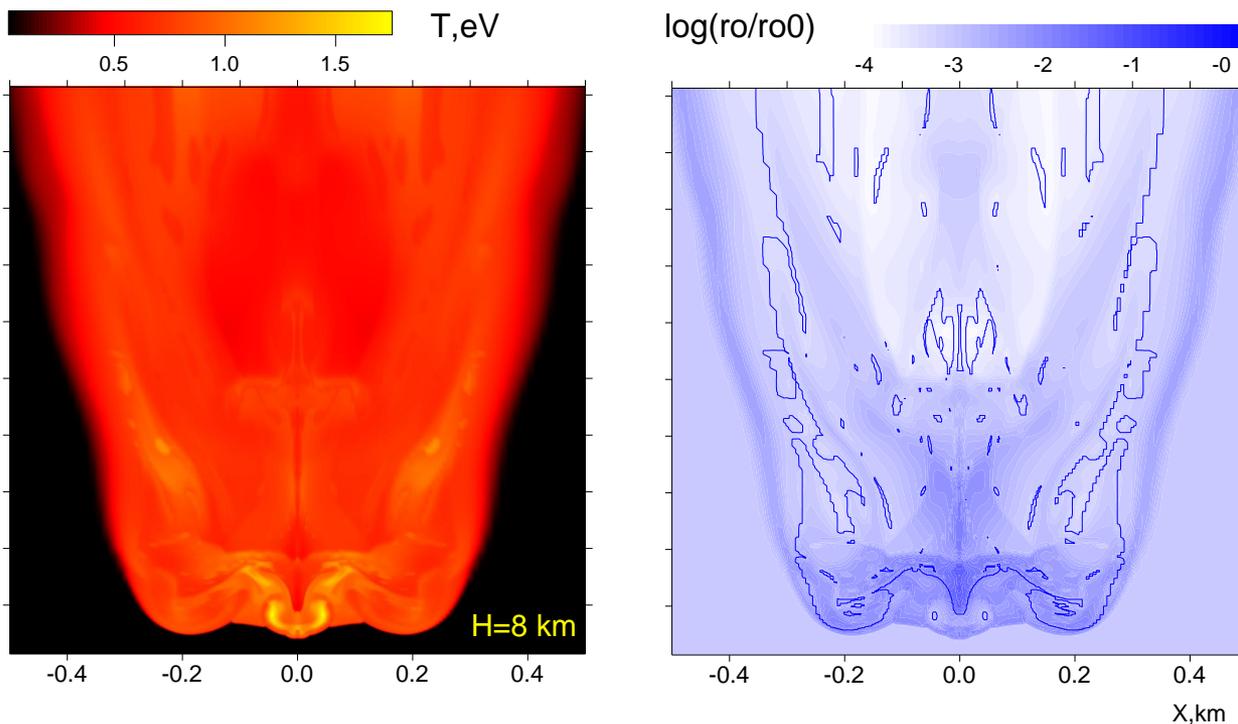
$$0 \times \infty = ? \text{ 😊}$$

Основные задачи:

- Расчет вероятности столкновения;
- Оценка последствий;
- Выработка критериев для принятия решений;

Надежная и своевременная оценка степени риска конкретного события (столкновения) – главный результат, который обязана дать наука, занимающаяся проблемой АКО.

О банке данных последствий столкновений



Шувалов 2009

Разработки средств противодействия

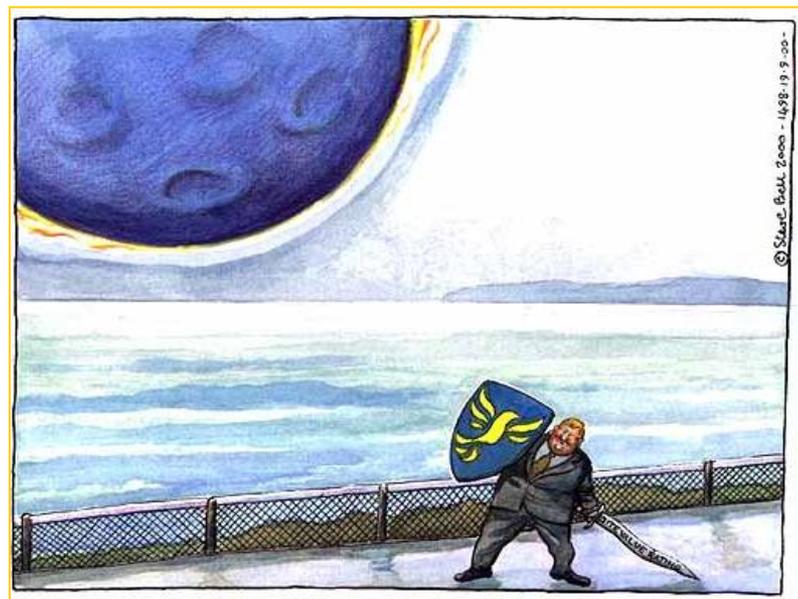
Пока на уровне НИР!

Возможности противодействия угрожающим объектам

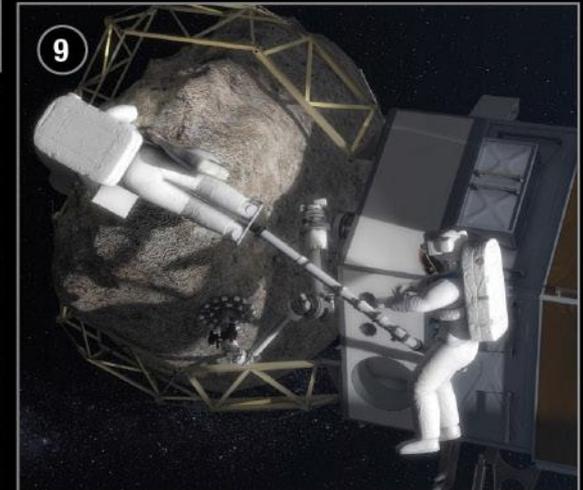
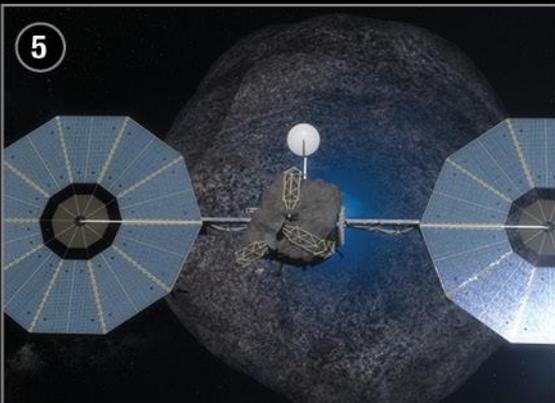
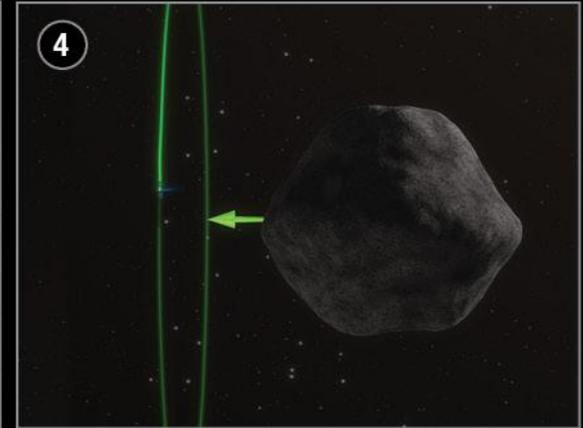
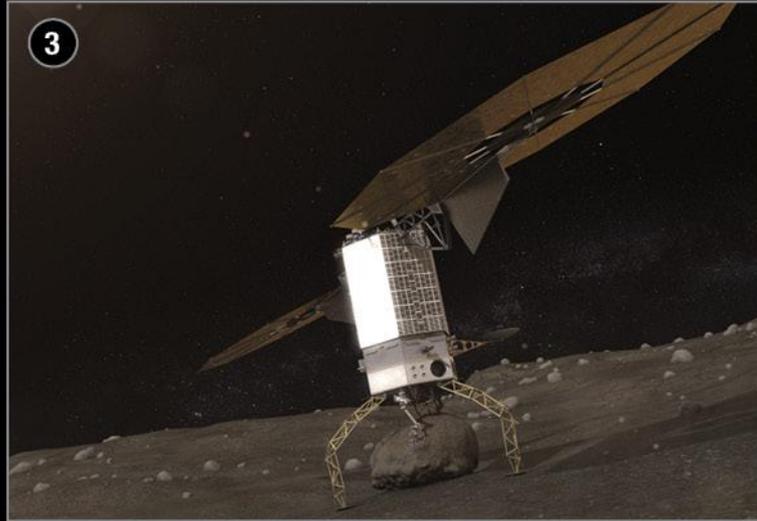
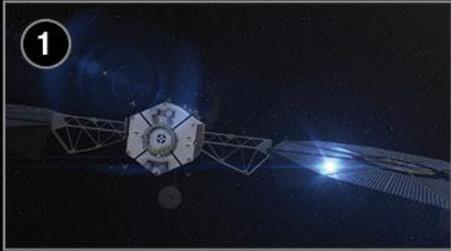
Уничтожение (дисперсия) или отклонение?

Отклонение – предпочтительнее, но нужно применять задолго до сближения.

Уничтожение - более реализуемо (для небольших тел), но последствия плохо предсказуемы.



ASTEROID REDIRECT MISSION HIGHLIGHTS

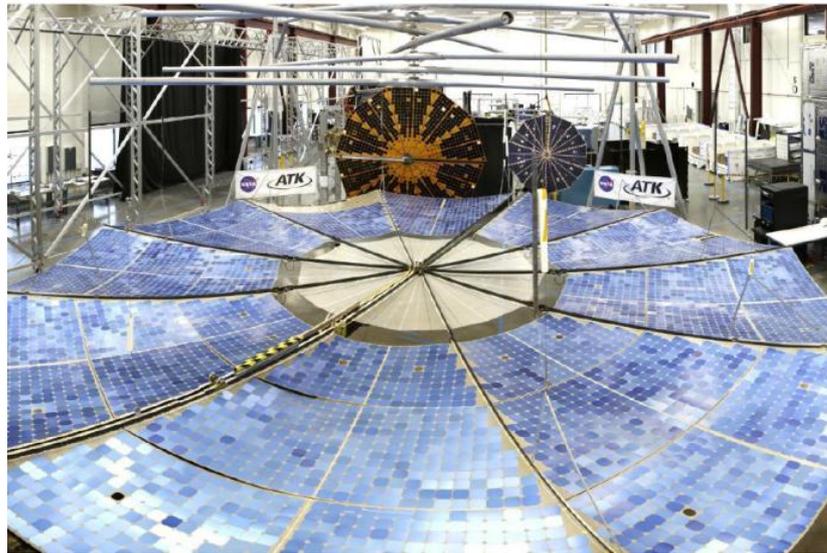


(1) The Asteroid Redirect Vehicle (ARV), powered by advanced Solar Electric Propulsion, is deployed to rendezvous with a large asteroid. (2) The ARV prepares to descend to the asteroid surface. (3) The ARV captures a boulder from the asteroid's surface. (4) The ARV demonstrates planetary defense on a hazardous-size asteroid before it (5) begins its transit toward a stable orbit around the moon. (6) The powerful Space Launch System rocket leaves Earth (7) with two crew members (8) aboard the Orion spacecraft. (9) The astronauts conduct spacewalks to investigate the asteroid boulder before returning to Earth with samples.

DE-STAR: Directed Energy System for Targeting of Asteroids and exploRation

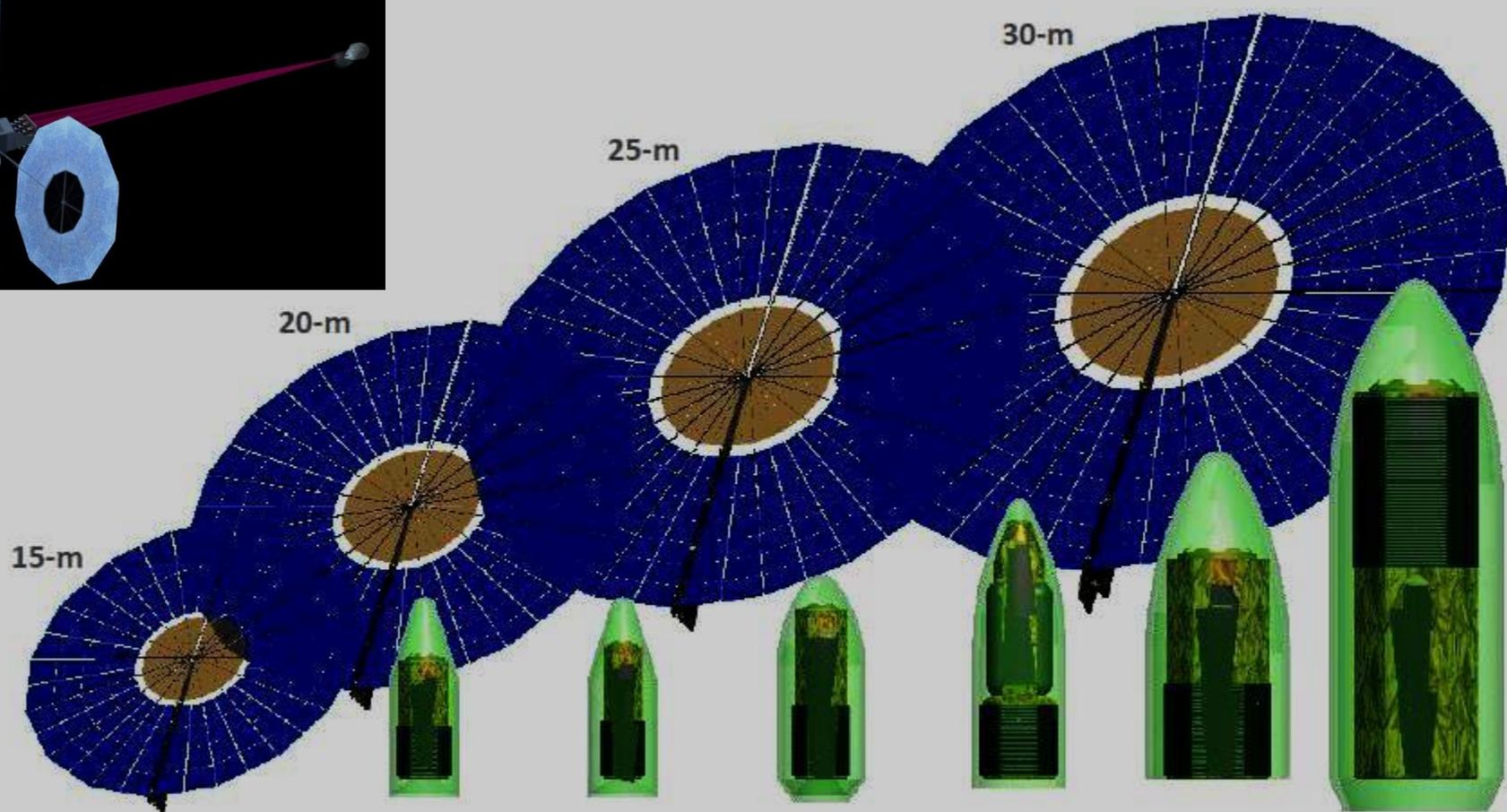
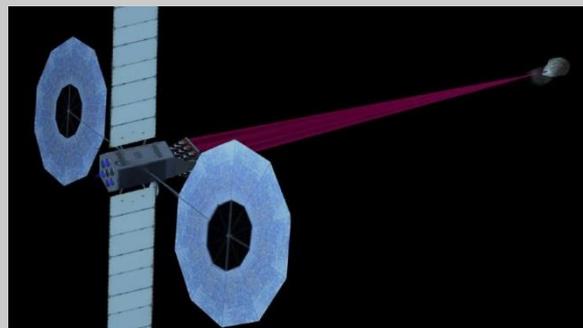
University of California, Santa Barbara, CA

ATK Megaflex – 10m diam – Near UCSB



DE-STAR

Launcher Options

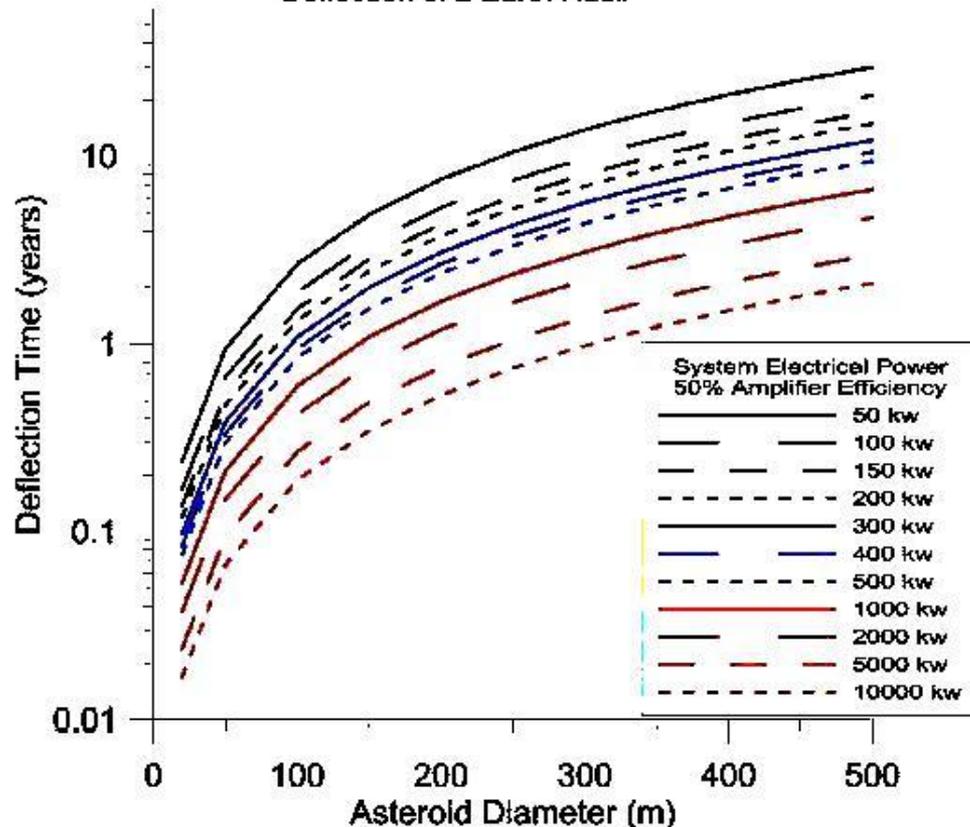


Fairing Class	Delta IV	Delta IV	Falcon 9	Ariane5	SLS PF1B	SLS PF2
Fairing Diameter	4-m	4-m	5.2-m	5.4-m	8.4-m	10-m
Wing Diameter (m)	15	20	25	25	30	30
Array Power Class (kW, IMM)	105	190	300	300	450	450

Orbital Deflection Capabilities

Mission Planning

Deflection Time vs. Asteroid Diameter
Assume 50% Laser Amplifier Efficiency
Deflection of 2 Earth Radii



Estimated deflection time vs. target diameter and DE-STARLITE electrical power input from PV

True mission planning requires detailed knowledge of the target orbit and the detailed interdiction scenario.

A 200 m diameter asteroid could be deflected in ~1 year using a MW class laser; larger asteroids require more time.

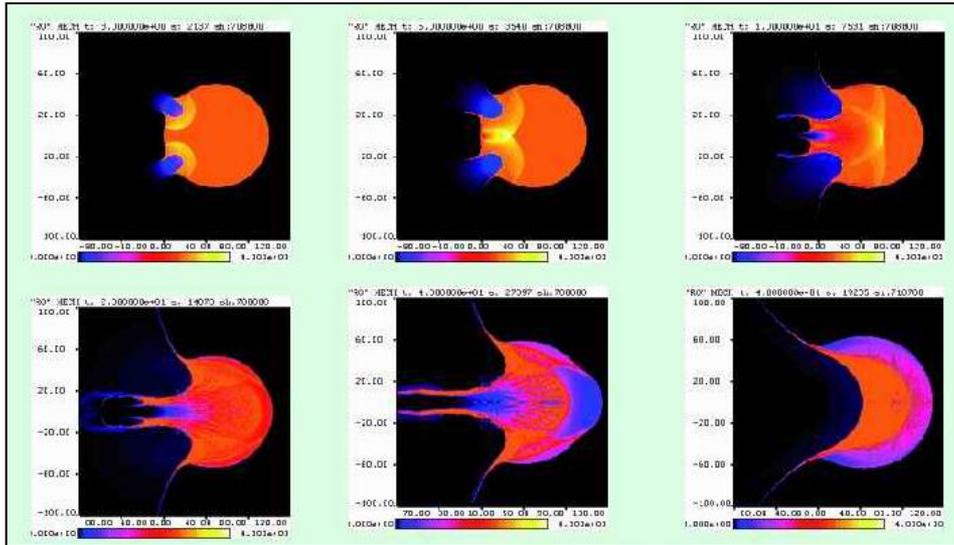
Assuming a $3\Delta v$ approximation often over estimates the deflection (miss) distance.

Проект AIDA

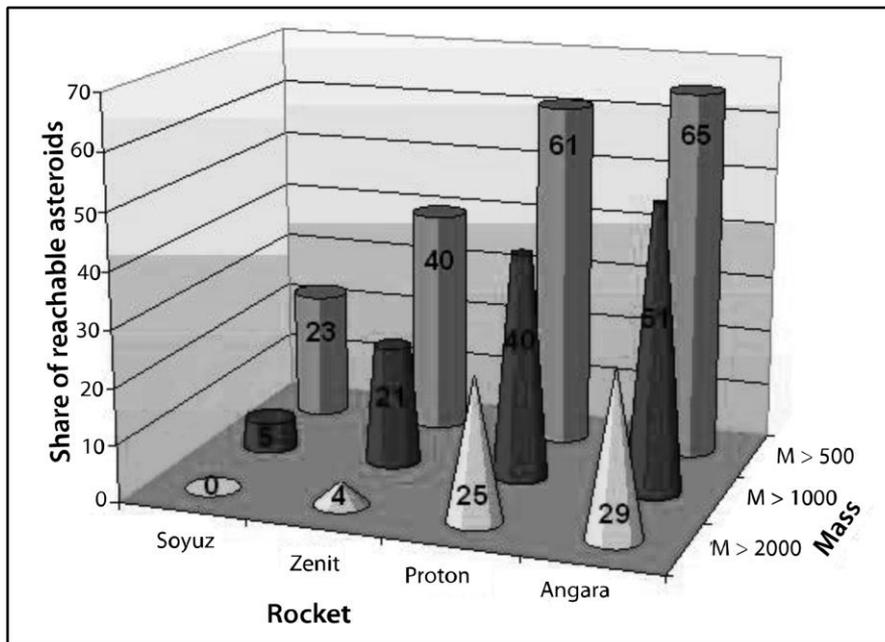
AIDA (The Asteroid Impact & Deflection Assessment) - совместный проект ESA-NASA, который включает в себя космический аппарат ЕКА **AIM** (Asteroid Impact Mission) и КА **DART** (Double Asteroid Redirection Test). Оба AIM и DART были одобрены для фазы исследования A/B1, начиная с начала 2015. В 2019 году аппарат отправится к астероиду Дидим (NEA (65803)) которого достигнет в 2022 г. Дидим в этот момент приблизится к Земле на расстояние ~ 11 млн.км.

Почему для эксперимента выбран Дидим? Он двойной: вокруг астероида диаметром около 800 метров на расстоянии 1.1 километра вращается "спутник" диаметром в 150 метров. В этот спутник и должен врезаться на скорости ~ 6.5 км/с зонд DART массой 300 кг. Преимущество двойной системы - ожидаемое относительное изменение скорости спутника существенно ~ 0,4 мм/с (его орбитальная скорость ~ 17 см/с), если момент просто передается цели. Изменение же в гелиоцентрической орбите (скорость ~ 23 км/с) относительно незначительно.

О средствах доставки и ядерного разрушения

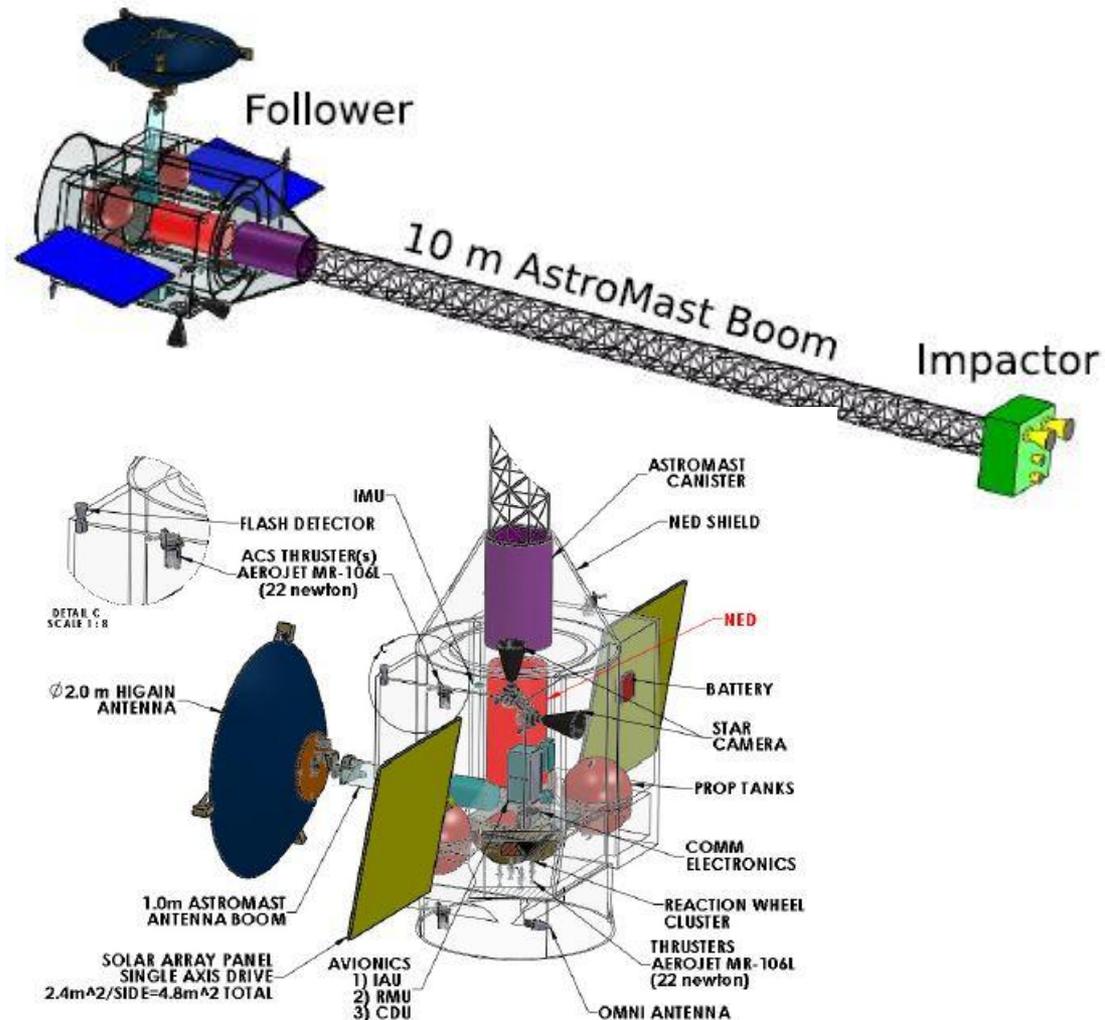


Simonenko 2008



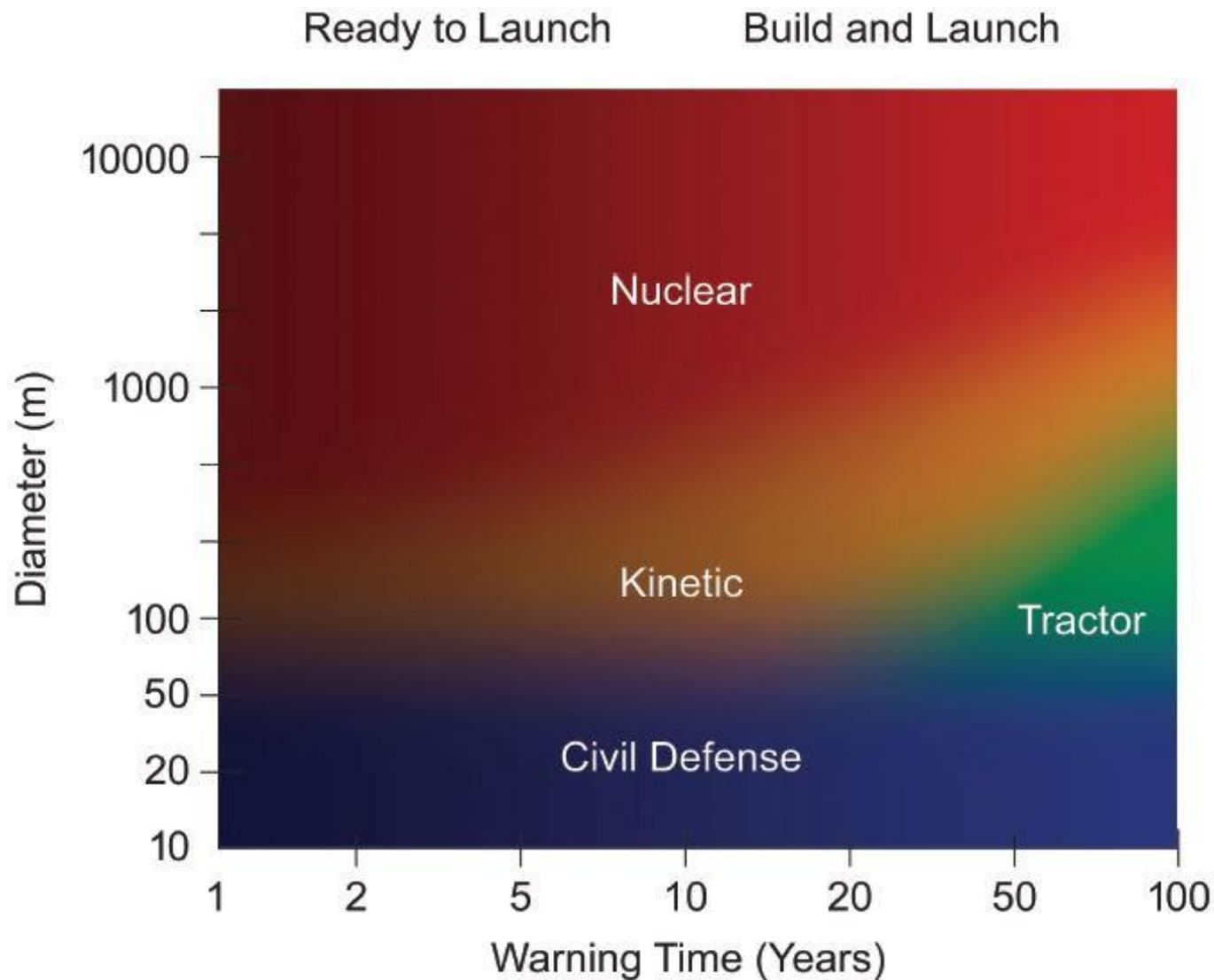
Pol' et al 2009

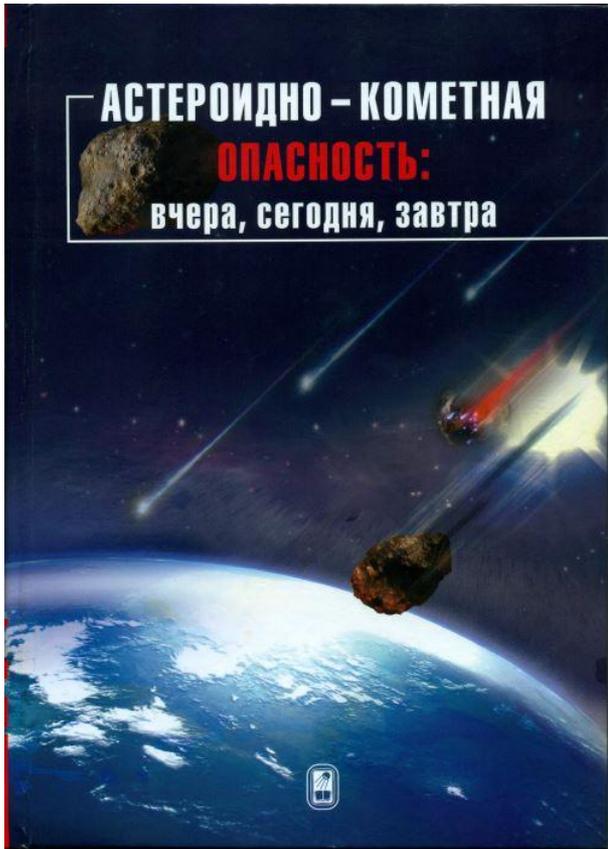
HAIV (Hypervelocity Asteroid Intercept Vehicle) mission



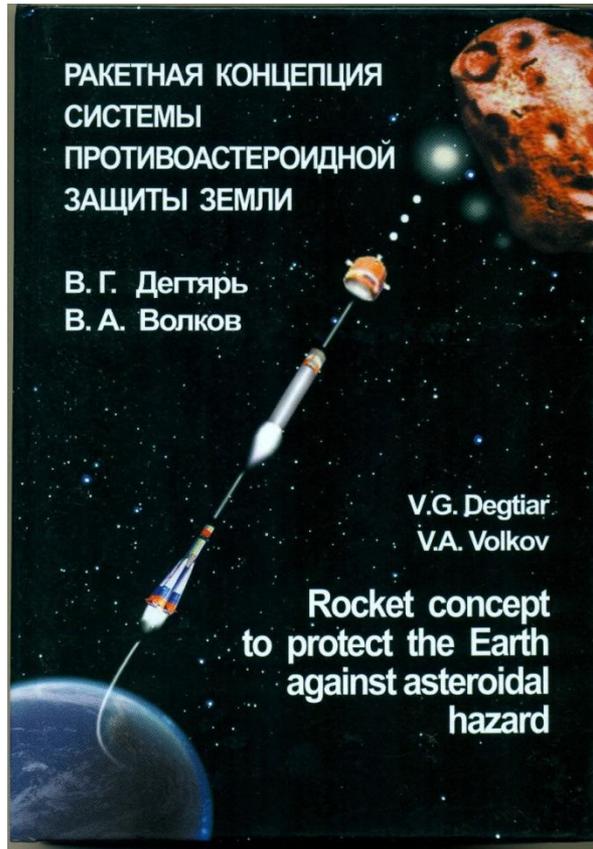
Mission Design Laboratory (MDL) of NASA Goddard Space Flight Center's Integrated Design Center (IDC)

Рекомендуемые средства противодействия

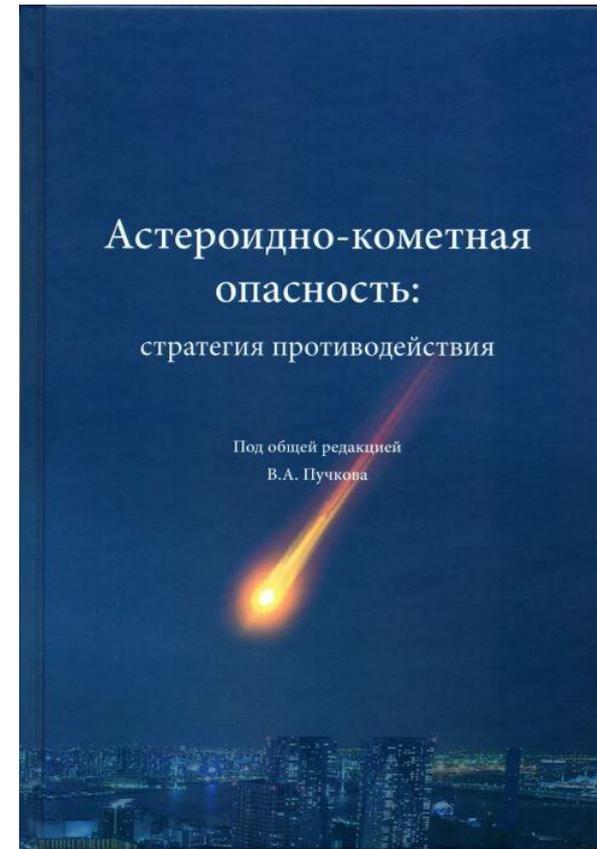




2010



2014



2015