

Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
Факультет прикладной математики и кибернетики
Кафедра «Механика и математическое моделирование»

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

На тему: «Способы предотвращения астероидной опасности»

Студент группы № МТ-71

Тукмаков Андрей Владимирович

(подпись)

Руководитель ВКР

К.т.н. доцент Логашина И.В.

(подпись)

Москва, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Страницы
Введение	3
1. Общие моменты АКО	10
1.1 Опасные для Земли астероиды	17
1.2 Российские и зарубежные программы по защите Земли	22
2. Способы предотвращения астероидной опасности:	29
2.1 Уничтожение опасного астероида с помощью ядерного заряда	29
2.2 Смещение астероида с опасной траектории:	31
2.2.1 Удар другим астероидом	32
2.2.2 Гравитационный маневр как основной инструмент наведения астероида-снаряда на опасный объект.	34
2.2.3 Использование тормозящего «облака»	37
2.2.4 Гравитационное воздействие КА	40
2.2.5 Использование YORP-эффекта	42
Заключение	48
Список использованной литературы	50

ВВЕДЕНИЕ

Цель данной работы заключается в освещении проблемы астероидной опасности и рассмотрении современных методов её предотвращения, а так же в выделении сильных и слабых сторон данных методов, в проекции на наше время и ближайшее будущее.

Проблема астероидно-кометной опасности в XXI веке стала актуальной темой научных конференций, регулярно рассматривается в ООН, правительствами и парламентами ведущих стран мира, влиятельными неправительственными организациями. Естественно, что ведущие страны, прежде всего США, вкладывают всё более серьёзные средства в разработку методов обнаружения и мониторинга объектов, сближающихся с Землёй, и в поиск способов противодействия угрозе столкновений таких тел с нашей планетой.

Столкновения Земли с малыми телами происходили всегда. На ранних стадиях интенсивные столкновения привели к росту массы протопланет – сгустков в протосолнечной системе – и появлению в результате роста одного из сгустков нашей планеты. Интенсивность столкновений в более близкие к нам эпохи существенно снизилась, но всё-таки не стала пренебрежимо малой. В геологической истории сохранилось много свидетельств падения на Землю крупных и очень крупных (размером более 1 км) тел. Такие события приводят к выделению колоссальной энергии. В результате на поверхности планеты образуются кратеры, диаметр которых в 15–20 раз превышает размеры упавшего тела. На Земле – на суше и дне океана – обнаружено около 200 кратеров – следов подобных катастроф. Диаметр некоторых кратеров более 200 км. Кратер Чиксулуб (Рис.1) в Мексике (диаметр 180 км) образовался 65 млн. лет назад при падении 10-километрового тела. Считается, что это событие послужило причиной вымирания более 80% всех видов живых существ, в

том числе полного вымирания динозавров, и ознаменовало переход от мелового периода мезозойской эры к третичному периоду кайнозоя.



Рисунок 1. Кратер Чиксулуб (Мексика)

Конечно, большая часть космических тел, сталкивающихся с Землёй, падает в моря и океаны. К настоящему времени обнаружено не более 20 кратеров, возникших при падении тел в море. Причина малочисленности подводных кратеров связана как с относительной молодостью морского дна, так и с его малой исследованностью. Большая часть некогда образовавшихся ударных кратеров – и на суше, и на морском дне – исчезла вследствие различных эрозийных процессов. На поверхности Луны и других планет, спутников планет и астероидов, где интенсивность этих процессов мала, наблюдаются многочисленные ударные кратеры, которые можно рассматривать как историческую летопись последствий столкновений в далёком и не очень далёком прошлом.

Падение относительно крупных тел на планеты Солнечной системы – процесс, далёкий от завершения, о чём свидетельствуют падение в 1994г. кометы Шумейкера–Леви 9 на Юпитер и, конечно, Тунгусская катастрофа. Она случилась 30 июня 1908г. в труднодоступном и весьма малонаселённом районе Сибири, но стала серьёзным предупреждением для

жителей всей планеты. Мощный взрыв на высоте около 6–8 км привёл к вывалу леса (примерно 80 млн. деревьев) на территории более 2 тыс. км². Как было показано позднее, энергия взрыва составила 15 мегатонн в тринитротолуоловом эквиваленте. Лишь спустя почти 20 лет к месту взрыва были организованы профессиональные экспедиции во главе с советским специалистом по минерологии Л.А. Куликом. Изучение этого феномена убедило большинство исследователей в том, что Земля столкнулась с небольшой кометой, состоявшей в основном из льдов. Именно поэтому пока не удалось отыскать остатки Тунгусского тела. Часто используемое название "Тунгусский метеорит" некорректно, поскольку метеорит, по определению, – это сохранившийся остаток небесного тела, а в случае Тунгусского события остатки не найдены. Более удачно называть Тунгусское тело "метеороидом". Тунгусский метеороид мог быть и каменным. Согласно численным экспериментам, при типичных прочностях каменных метеоритов и аэродинамических нагрузках в сотни атмосфер дробление метеороида могло быть настолько эффективным, что он фрагментировал на мелкие осколки, которые подверглись при движении в земной атмосфере полной абляции.

Особенность современной оценки этого события 100-летней давности состоит в том, что, по-видимому, при падении на сушу именно тела размером 50–100м (200 м при падении в океан) представляют наибольшую угрозу на шкале существования человечества, то есть 100–300 тыс. лет. Для оценки такой угрозы нужно определить разрушительный эффект от падения тела и частоту столкновений. Разрушительный эффект столкновения зависит от ряда факторов: размера тела, скорости относительно Земли, угла падения, минералогического состава, места падения (океан, суша) и т.д. Относительно мелкие тела (несколько десятков метров в диаметре) обычно полностью или частично разрушаются в атмосфере. Но образующаяся при этом взрывная волна

способна вызывать серьезные локальные разрушения (последствия примерно такие же, как и при взрыве мощной термоядерной бомбы). Падения тел размером в сотни метров приводит уже к региональным катастрофам, охватывающим площади в десятки и сотни тысяч квадратных километров. Наконец, если размеры тела превышают несколько километров, последствия столкновения будут носить характер глобальной катастрофы. При этом уже не имеет большого значения, в каком именно месте земной поверхности произойдет столкновение. В результате первичного удара и последующей каскадной бомбардировки возникнет "букет" катастрофических последствий, таких как ураганы, пожары, землетрясения, мощнейшие цунами, грязевые и кислотные ливни, сильный (сотни градусов) перегрев атмосферы. Подобное столкновение приведет к длительному (многие месяцы) нарушению климата всей планеты (эффект "ядерной зимы"). Жертвами подобной катастрофы может оказаться большая часть населения Земли. Тела размером более 10 км способны безвозвратно погубить человеческую цивилизацию (Табл. 1). Однако такие события весьма редки. Статистика уже открытых астероидов подтвердила и дополнила ранее сделанный на основе подсчета числа кратеров в разных районах Луны вывод о том, что частота падения на Землю космических тел сильно зависит от их размеров. Так, падения тел размером от 1.5 км и более случаются в среднем раз в 1 млн. лет. Региональные катастрофы разных масштабов, вызываемые падениями космических тел размером в сотни метров, происходят в среднем раз в несколько десятков – сотен тысяч лет.

Таблица 1. Частота и результаты столкновений малых тел с Землей [1]

Объект	Размеры	Частота, Раз в ... лет	Размер кратера, км	Результат столкновения с Землей
Пылинка	$D < 0.1$ см			Сгорает в атмосфере или выпадает на планету
Метеороид	$0.1 \text{ см} < D < 0.5$ м			Сгорает в атмосфере
	$0.5 \text{ м} < D < 20 -$ 30 м			Долетает до Земли с малой скоростью
	$D > 30$ м	250	Нет	Гунгусское событие
Астероид (комета)	$D > 100$ м	5 тыс.	> 0.5	Аризонский кратер
	$D > 1$ км	600 тыс.	> 2	Региональная катастрофа
	$D = 10$ км	100 млн.	> 20	Глобальная катастрофа Конец цивилизации

Осознание проблемы

По мере накопления наблюдательных данных и теоретических разработок проблема астероидной опасности начинает привлекать к себе все больше и больше внимания. Как уже отмечалось, гипотеза о падении крупного тела как причине гибели динозавров, вызвала широкий интерес и способствовала дальнейшему изучению проблемы. В июле 1981 г. Национальное управление по космическим исследованиям США (НАСА) провело Рабочее совещание на тему "Столкновение астероидов и комет с Землей: физические последствия и человечество". Обзор главных выводов этого Совещания был дан в книге [11].

Следующим событием, привлечшим внимание ученых и общественности к данной проблеме, явилось прохождение трехсотметрового астероида вблизи Земли 23 марта 1989 г. Минимальное расстояние до астероида составило всего около 700 тысяч км (для

сравнения: среднее расстояние от Земли до Луны составляет 384 тысячи км). Особенно тревожным обстоятельством этого тесного сближения явился тот факт, что тело было обнаружено только лишь во время его удаления от Земли (заметим в скобках, что в настоящее время орбита этого тела - малой планеты 4581 Asclepius определена весьма надежно). Американский Институт аэронавтики и космонавтики опубликовал в 1990г. меморандум, призывающий к изучению астероидной опасности и способов предотвращения столкновений. Палата Представителей Конгресса США в ответ на этот меморандум поручила НАСА изучить проблему обнаружения опасных космических объектов и проблему их перехвата и активной защиты от них. В июне 1991 г. в Сан Хуан Капистрано (Калифорния, США) было проведено международное совещание (The NEO Detection Workshop) по первой из указанных проблем. На Совещании было рассмотрено текущего состояния поиска и слежения за АСЗ (астероиды сближающиеся с Землей) и выработаны рекомендации по их интенсификации. Совещание организовало Международную рабочую группу НАСА по данной проблеме из представителей американских и зарубежных специалистов во главе с Д. Моррисоном. От России в группу вошел А.Г.Сокольский[13].

Целью второго совещания (The Near-Earth-Object Interception Workshop), состоявшегося 14-16 января 1992 г. в Лос-Аламосе, США, явилось исследование путей уменьшения опасности в случае, если то или иное космическое тело окажется на траектории столкновения с Землей.

В августе 1991 г. XXI Генеральная Ассамблея Международного астрономического союза (МАС) в Буэнос-Айресе приняла специальную резолюцию в поддержку исследования астероидной опасности и организовала Рабочую группу по объектам, сближающимся с Землей, из представителей ряда Комиссий МАС. Председателем Рабочей группы был избран А. Карузи. От Комиссии 20 (положение и движение малых планет,

комет и спутников) в нее вошел директор Института теоретической астрономии РАН (ИТА) А.Г.Сокольский[5]. В резолюции Генеральной Ассамблеи МАС, одним из инициаторов которой был ИТА, содержится призыв к астрономам принять участие в изучении потенциальной угрозы от сближающихся с Землей астероидов и комет, а странам - членам МАС кооперировать имеющиеся инструменты и материальные ресурсы для открытия новых и слежения за известными АСЗ.

В России это обращение Генеральной Ассамблеи МАС было встречено с должным вниманием. Уже в октябре 1991 г. в Петербурге было проведено Всесоюзное совещание с международным участием "Астероидная опасность". В феврале 1992 г. в Санкт-Петербурге на базе ИТА РАН был создан Международный институт проблем астероидной опасности (МИПАО) - общественная научная организация под эгидой Международного центра научной культуры - Всемирной лаборатории. Спонсорская финансовая помощь позволила МИПАО уже в 1992 г. начать активную научную и организационную работу по проблеме астероидной опасности, используя систему предоставления грантов. В 1992 - 1993 гг. МИПАО был осуществлен проект "Тютатис" - всестороннее изучение астероида (4179) Toutatis в период его сближения с Землей в декабре 1992 г. (позиционные и физические наблюдения, радиолокация астероида, теоретические исследования и т.д.). В мае 1993 г. по итогам работы МИПАО в 1992-1993 гг. в С.-Петербурге была проведена Комплексная конференция "Астероидная опасность-93". В настоящее время МИПАО осуществляет создание в Крыму специализированного телескопа со светоприемником на ПЗС-матрице (Прибор с Зарядовой Связью). Телескоп предназначен для наблюдений АСЗ, слежения за ними и поиска новых объектов. Предполагается, что данные, считываемые с ПЗС-матрицы, будут поступать в ЭВМ, где автоматически будет производиться анализ информации с целью обнаружения движущихся объектов и вычисления их координат в режиме реального времени [4].

1. Общие моменты Астероидно - Кометной Опасности

Астероидно-кометная опасность – понятие, введенное в 80-х годах XX века, которое обозначает совокупность вопросов, связанных с угрозой столкновения Земли с космическими телами (кометами, астероидами, метеороидами). О вероятности столкновения Земли с кометами говорил еще Гаусс, когда разработал метод вычисления орбит комет из наблюдений. Камни, падающие на Землю с небес, были известны еще в глубокой древности. Первый астероид, прошедший вблизи Земли (Аполлон) был обнаружен в 1932 г. и с тех пор такие астероиды регулярно обнаруживаются астрономами.

По современным представлениям наибольшую вероятность столкновения Земля имеет с астероидом. Существует небольшая вероятность (около 1%) столкновения Земли с долгопериодической кометой (с периодом обращения более 200 лет). Вероятность столкновения Земли с короткопериодическими кометами (период обращения вокруг Солнца менее 200 лет), по сравнению с первыми двумя источниками, ничтожна.

На сегодня неизвестно точное количество астероидов. Вероятно число малых планет доступных наблюдению с Земли, около 100 000, а их общее число должно составить сотни миллионов. 98% всех астероидов находится между орбитами Марса и Юпитера на расстоянии от Солнца (2,6-3,6) а.е. и образуют так называемый главный пояс астероидов (Рис.2.). Большинство объектов Пояса Астероидов сосредоточено ближе к Юпитеру, поскольку мощное гравитационное поле Газового Гиганта переманивает их на свою сторону. В области между орбитами двух планет Марса и Юпитера насчитывается около 800 тыс. астероидов – небесных тел с диаметром более 30 км. Крупных тел в поясе астероидов очень мало, так, астероидов с диаметром более 100 км насчитывается всего около 200.

Хотя Пояс Астероидов насчитывает большое количество объектов, все же из-за большого объема пространства они находятся на больших расстояниях друг от друга. Поэтому, попав в область Пояса, можно годами в нем находиться, но так и не встретить ни одного астероида или комету. У Области Астероидов существует своя своеобразная атмосфера, которая состоит из микрочастиц пыли, радиусом в несколько сотен микрометров. Пылинки образовались в период длительной эволюции Солнечной системы, при бомбардировки и столкновении астероидов. Некоторые объекты сталкиваются с такой силой, что покидают свои орбиты и начинают путешествие по Солнечной системы. Рано или поздно, они близко пролетают мимо планет, и попадая в зону притяжения падают на поверхность.

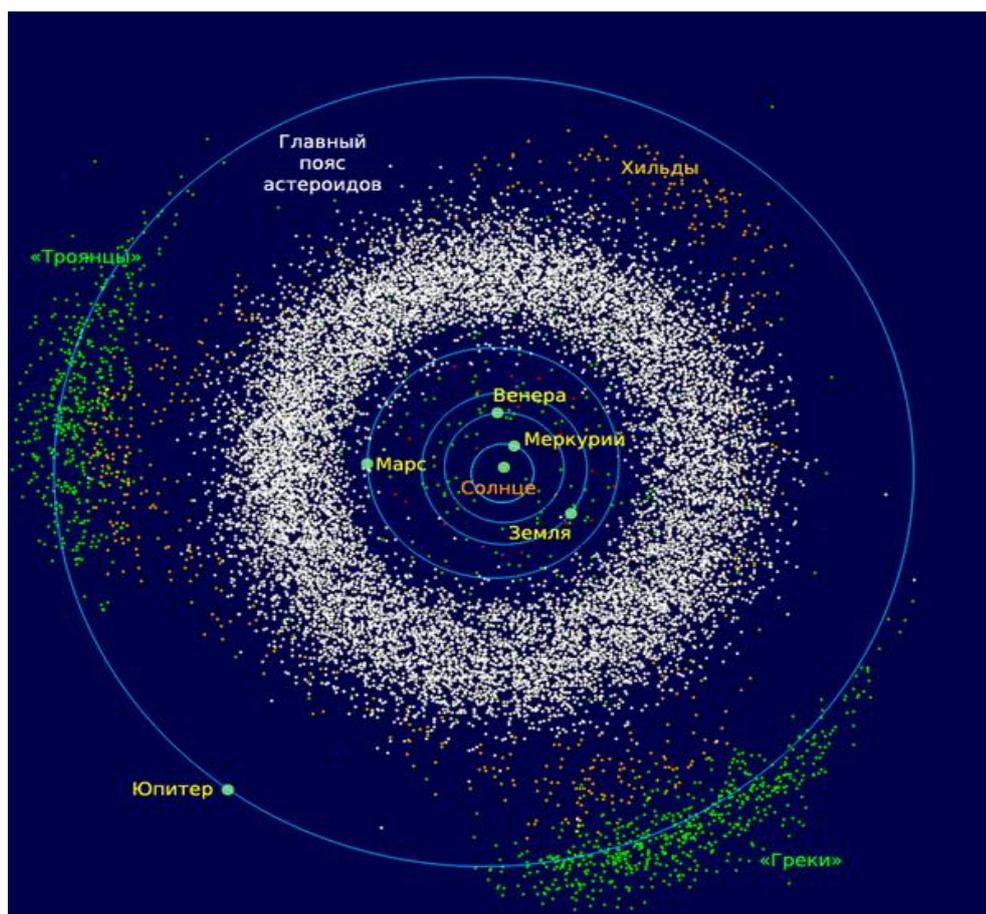


Рисунок 2. Иллюстрация Пояса астероидов

Большинство из астероидов пояса близко к Земле и Солнцу почти не подлетают. Но есть и нарушители. Например, астероид Икар, подлетает к Солнцу на расстояние, 0,19 а.е. . Имеются три группы астероидов, сближающихся с земной орбитой: группа Амура – астероиды, лишь приближающиеся к земной орбите с внешней стороны, группа Аполлона астероиды, небольшая часть орбиты которых лежит внутри орбиты Земли, и группа Атона – астероиды, большая часть орбиты которых лежит внутри земной.

Около 2% астероидов не принадлежат к главному поясу, они рассеяны по всей Солнечной системе. Большинство из них находится за орбитой Нептуна. Первое такое тело открыли в 1992 году. Сейчас их известно более 300 – они получили название «пояса Койпера», по имени астронома, который впервые выдвинул гипотезу о его существовании ещё в 50 годах XX века [16].

С Земли астероиды наблюдать очень трудно, т. к. в телескоп их диски не видны, и только с появлением космических аппаратов и орбитальных телескопов стал доступен внешний вид астероидов. Это тела неправильной формы покрытые кратерами. Многие астероиды очень малы, по этому их сила тяжести ничтожна, она не в состоянии придавать им форму шара, по этому большинство астероидов имеет неправильную форму, так же это подтверждается и тем, что их блеск очень быстро совпадает с ростом фазового угла. Столкновения с мелкими телами не могут существенно изменить форму астероида, результатами подобных столкновений являются многочисленные кратеры на поверхности всех астероидов. Все открытые до сих пор астероиды обладают прямым движением, то есть движутся вокруг Солнца в ту же сторону что и большие планеты. И поэтому почти все астероиды движутся в пределах тороидального кольца. Объём этого кольца составляет порядка $1,6 \cdot 10^{26}$ км. Что касается состава астероидов, то он до сих пор плохо изучен. О

веществе астероидов мы можем судить по обломкам, падающим на Землю в виде метеоритов, и по их спектрам. По спектрам выделяют следующие группы астероидов: силикатные -15%, металлические — 10 %, углистые - 75%. 98%. процентов всех астероидов Солнечной системы находятся в главном поясе между орбитами Марса и Юпитера.

Под объектами, сближающимися с Землей, понимают астероиды и кометы, чьи орбиты имеют перигелийные расстояния менее 1.3 астрономической единицы (а.е.), или около 195 млн. км. Из их числа выделяют потенциально опасные объекты, орбиты которых в настоящую эпоху сближаются с орбитой Земли до минимального расстояния, не превышающего 0.05 а.е. (7.5 млн. км). Основанием для того, чтобы считать тела на орбитах, проходящих от Земли на расстоянии до 20 радиусов лунной орбиты, потенциально опасными, являются следующие обстоятельства. Во-первых, в таких пределах можно ожидать в обозримом будущем изменения расстояний между орбитами под влиянием планетных возмущений, а во-вторых, это же расстояние соответствует характерному масштабу области неопределённости орбиты малого тела при прогнозировании на несколько сотен лет вперёд вследствие неточного знания параметров его движения в настоящую эпоху. При весомой вероятности встречи астероида с Землёй такой объект считается угрожающим.

Число астероидов, сближающихся с Землёй и являющихся потенциально опасными, ежегодно уточняется. На Рис. 3 видно, как резко возрос темп обнаружения астероидов, сближающихся с Землёй, после 1998 г. Это связано с началом американской программы “Космическая стража” ("SpaceguardSurvey"), которая получила поддержку, в том числе заметную финансовую (не менее 50 млн. долл.), со стороны Конгресса США. При

этом НАСА поручалось приложить усилия к тому, чтобы в течение 10 лет открыть не менее 90% астероидов, сближающихся с Землёй, размером свыше 1 км. Сейчас эта задача практически выполнена.

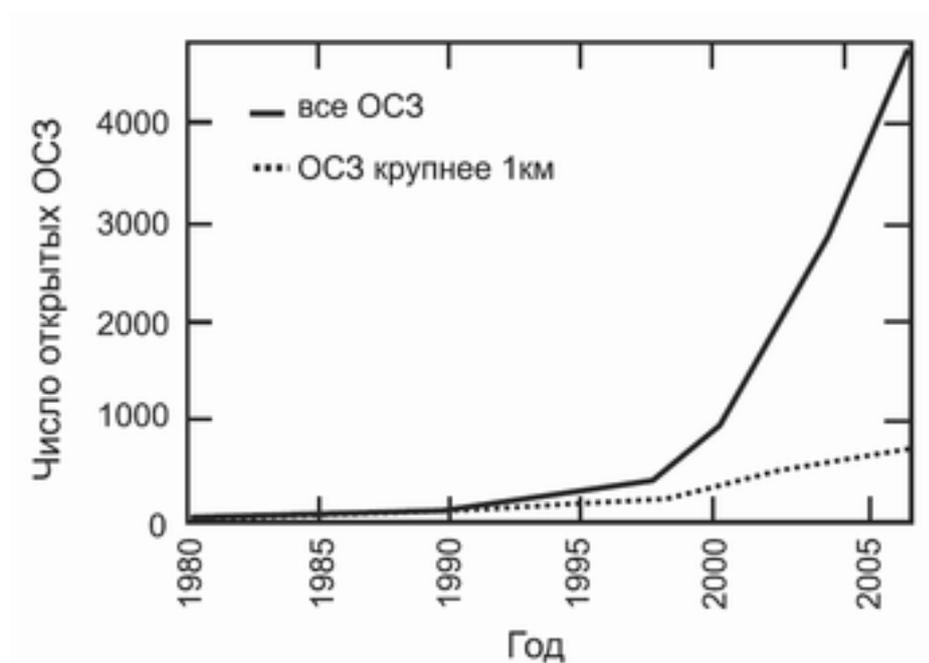


Рисунок 3. Динамика обнаружения объектов, сближающихся с Землей (по данным НАСА). Сплошная линия – все объекты, сближающиеся с Землей, пунктирная линия – объекты с размером более 1 км

В табл.2 приведены данные Центра малых планет (ЦМП) при Международном астрономическом союзе (Кембридж, Массачусетс) об объектах, сближающихся с Землёй, по состоянию на конец 2009г [1]. Среди объектов, сближающихся с Землёй, комет немного, но нужно учитывать, что прогнозировать их движение очень сложно. Короткопериодические кометы (периоды обращения до 200 лет) сравнительно малочисленны, однако прогноз их движения затрудняется влиянием негравитационных эффектов. Долгопериодические кометы обнаруживаются в лучшем случае лишь за несколько месяцев или год до их появления в окрестности Солнца. Например, комета C/1983 H1 (IRAS–Araki–Alcock) с орбитальным периодом 963.22 года, открытая 27 апреля 1983 г., уже через две недели (11 мая 1983 г.) пролетела мимо Земли на

расстоянии 0.0312 а.е. . Заметим, что такие кометы имеют большую скорость относительно Земли. Ядра их могут к тому же распадаться на крупные фрагменты. Всё это существенно усложняет вопрос о противодействии их возможному падению на Землю.

Таблица 2. Сводка результатов обнаружения опасных астероидов на конец 2009 года

Небесные тела	Количество объектов
Сближающиеся с Землей (ОСЗ) – всего	6500
Кометы	84
километровые астероиды	795
гектометровые астероиды	5705
потенциально опасные объекты (ПОО)	1070
кометы	Нет
километровые астероиды	146
гектометровые астероиды	924
Условно угрожающие астероиды (менее 5 расстояний до Луны)	75
Реально угрожающие астероиды (ниже ГСО)	1 - Апофис

Стоит заметить, что наши знания о потенциально опасных объектах не дают гарантии, что завтра, через год, через десятилетие не будет обнаружен объект, намного более опасный, чем уже известные. Более того, в силу ограниченности современных наблюдательных возможностей опасные тела открываются практически по счастливой случайности.

Вернемся к рассмотрению потенциально опасных астероидов, обращающиеся вокруг Солнца по довольно вытянутым и нестабильным орбитам, которые сближаются с орбитой Земли и могут ее пересекать.

К настоящему времени обнаружено около 800 астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) или пересекающих ее орбиту (АПЗ). Это

астероиды групп Атона, Аполлона и Амура, физические свойства которых почти не отличаются от астероидов главного пояса соответствующих размеров. Они имеют в основном такой же минералогический состав, такие же в среднем оптические свойства поверхностей, форму, вращение, как и астероиды главного пояса. Основные отличия – это их орбиты и относительно малые размеры. Крупнейший из них, астероид 1036 Ганимед, имеет диаметр около 40 км, но он относится к астероидам группы Амура, которые только приближаются, но не пересекают орбиту Земли. Среди же астероидов, пересекающих орбиту Земли (группы Аполлона и Атона, q J 1,017 а. е.), крупнейшим является 1866 Сизиф диаметром около 8 км [12].

В последние годы усилия специалистов по изучению астероидов все больше направлены на исследование именно АСЗ-объектов. С точки зрения фундаментальной науки, такие вопросы, как происхождение АСЗ, механизмы их перевода на орбиты, сближающиеся с земной, время жизни, связь с другими малыми телами Солнечной системы (кометами и метеоритами) и пр., представляются очень важными для решения основной проблемы изучения ближнего космоса – проблемы происхождения эволюции Солнечной системы.

С другой стороны, изучение этих объектов в последние годы приобретает также очень важное прикладное значение. АСЗ все больше рассматриваются как потенциальные источники металла и другого минерального сырья (Fe, Ni, Mg, Al, Si, H₂O, N, C, O и др.) в околоземном космическом пространстве. Значительная часть АСЗ содержит летучие вещества (водород, азот, углерод) в концентрациях в 100 раз более высоких, чем лунное вещество. Как показывают данные радарных наблюдений, среди АСЗ имеются объекты чисто металлические. Косвенным подтверждением тому является, например, Сихотэ-Алинский метеорит (94% Fe и 6% Ni), упавший в Уссурийской тайге в 1947 году.

Общий вес его по оценкам специалистов составил около 100 тонн (собрано примерно 30 тонн). Вещество поверхности АСЗ может быть использовано также для термоядерной энергетики (добычи термоядерного горючего ГЕЛИЙ-3). Примерно пятая часть АСЗ является энергетически более достижимой для космических аппаратов, чем Луна. Есть проекты разработки АСЗ с целью использования их полезных ископаемых для осуществления космических миссий.

1.1 Опасные для Земли астероиды

В данной главе более подробно остановимся на проблеме опасных астероидов для нашей планеты. В первую очередь, это относится к астероидам, которые пересекают орбиту Земли.

На Рис. 4 приведены оценки общего числа астероидов, пересекающих орбиту Земли, в зависимости от их размеров, полученные Е. Боуэллом[10, 15]. Согласно этим данным, существует свыше 2000 астероидов более 1 км в диаметре, которые пересекают орбиту Земли, и около 300 тысяч, диаметры которых превышают 100 м. Столкновение с Землей каждого из них – это реальная опасность для человечества.

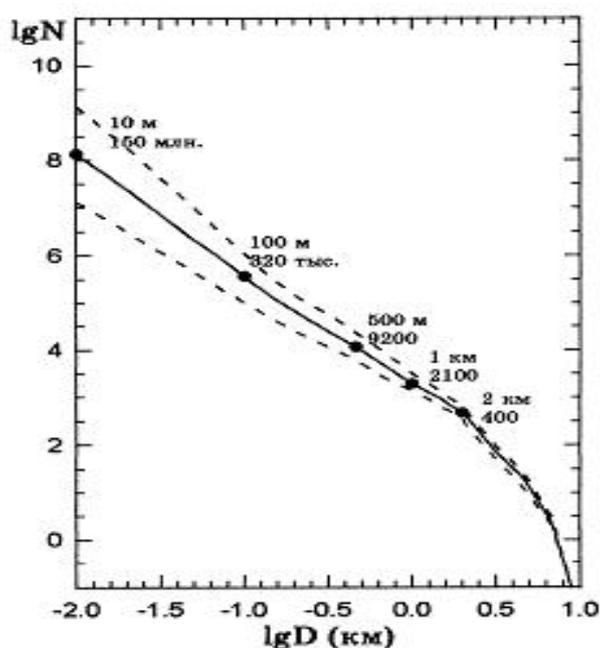


Рисунок 4. Общее число АСЗ с диаметрами, большими заданного значения (оценки Э. Боуэлла, США)

На Рис. 5 показаны орбиты 115-ти АПЗ с перигелиями QJ 1,0 а.е. вместе с орбитами Меркурия, Венеры, Земли и Марса (слева). Рассматривая этот рисунок, нужно помнить, что в действительности в окрестности орбиты Земли обращаются вокруг Солнца сотни тысяч объектов с $D=100$ м, которые могут столкнуться с Землей.

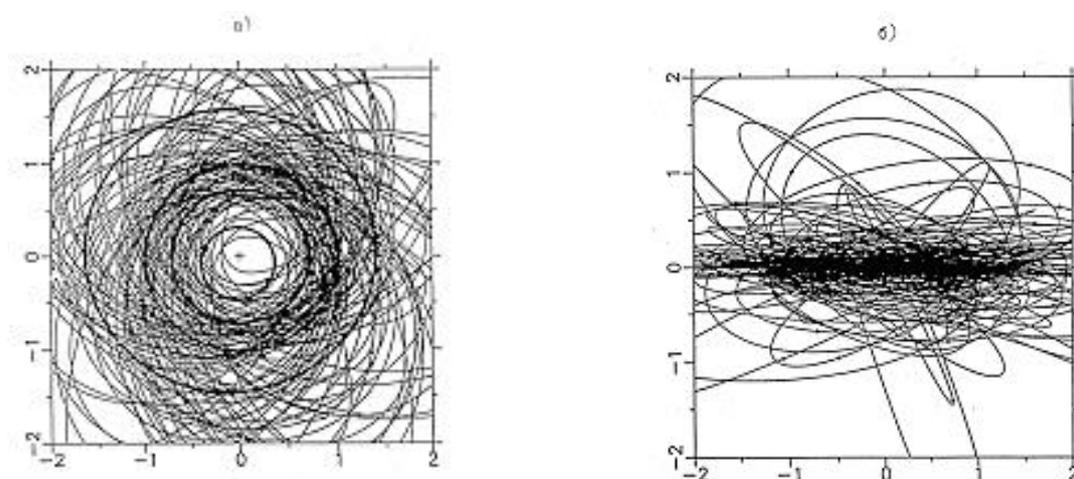


Рисунок 5. Орбиты 115-ти астероидов, пересекающих орбиту Земли. а) вид с полюса эклиптики. Жирными линиями показаны орбиты Меркурия, Венеры, Земли и Марса. + – положение Солнца. б) вид в плоскости эклиптики. Расстояния по осям даны в а. е.

Ниже в Таблице 3 представлены данные о доле обнаруженных к настоящему времени астероидов, пересекающих орбиту Земли (АПЗ), в процентах по отношению к оценкам общего их числа и в зависимости от их диаметров.

Таблица 3.(Доля обнаруженных к 2009г АПЗ в % от общего числа)

Диаметр, км (больше чем)	Доля АПЗ, (%)
6 – 12	100
3 – 6	35
2 – 4	15
1 – 2	7
0,1 – 0,2	0,2

Таким образом, к настоящему времени обнаружены все объекты крупнее 6 км среди так называемых среднеальбедных (т. е. светлых) астероидов и крупнее 12 км среди низкоальбедных (темных) АПЗ. В то же время сейчас нам известны орбиты лишь около 7 % АПЗ диаметром больше 1 км и намного меньше (примерно 0,2 %) орбит астероидов диаметром больше 100 м, даже наименьшие из которых способны вызвать региональные катастрофы. Именно в этом и состоит суть проблемы "Астероидная опасность".

Показательный пример – открытие астероида Апофис. Обнаруженный в 2004 г. потенциально опасный объект 2004 MN4=(99942) Apophis диаметром 200–350 м в 2029 г. пройдёт, согласно результатам многочисленных расчётов, на расстоянии 36.1–39.2 тыс. км от Земли. В 2036 г. он имеет ненулевую вероятность столкнуться с Землёй. Самое интересное – существование так называемой зоны резонансного возврата (в англоязычной литературе используется более образный термин

"keyhole" – "замочная скважина"). Размер такой зоны менее 1 км. Если Апофис пролетит именно в "замочную скважину" (вероятность события оценивается примерно в $2 \cdot 10^{-5}$), то в 2036 г. он гарантированно столкнется с Землей (Рис. 6).



Рисунок 6. Возможные места столкновения астероида Apophis с Землей в 2036г.

За астероидом, который прошел на расстоянии 14,46 миллиона километров от Земли, наблюдала космическая обсерватория "Гершель". С ее помощью ученым удалось составить температурную карту поверхности астероида. Зная освещенность тела, астрономы смогли по этой карте построить своего рода карту альбедо Апофиса(Рис.7).

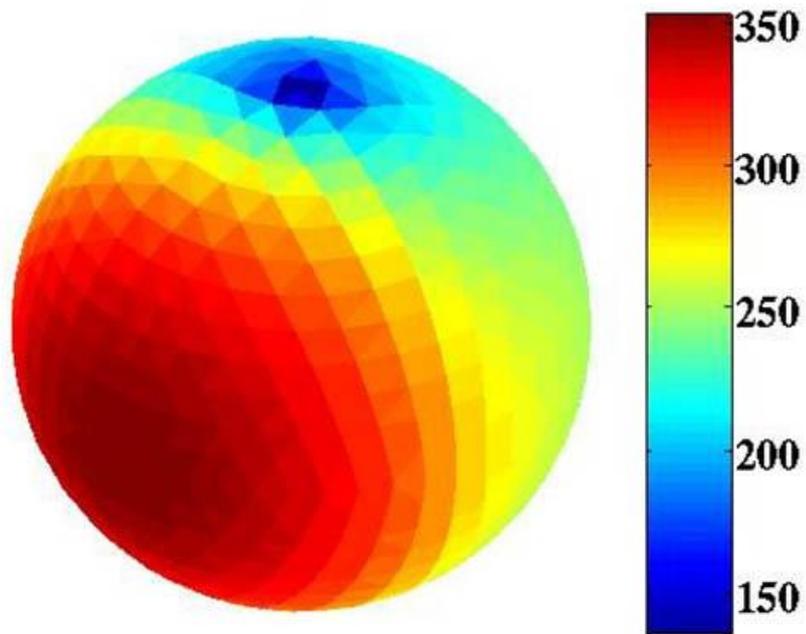


Рисунок 7. Температурная карта астероида 99942 (Aphros)

На Рис.8 приведена иллюстрация состояния приближающихся к Земле астероидов за ближайшие 180 лет.



Рисунок 8. Приближающиеся к Земле астероиды

1.2 Российские и зарубежные программы по защите планеты

В свете нарастающей для нашей планеты угрозы от астероидов, мировыми космическими агентствами за последние три десятилетия было предложено множество программ. Программы включают в себя не только меры противодействия астероидам, но и инструменты их обнаружения, слежения за опасными объектами, а также набор инструкций по ликвидации последствий столкновения с астероидами.

Факт, что не все они были восприняты серьезно, но некоторые из них оказались одобренными и получили финансирование. В первую очередь обращает на себя внимание программа «NEOShield».

- NEOShield - это новый международный проект, участники которого будут оценивать угрозу Земле от приближающихся к ней космических объектов (NearEarthObjects, NEO) и искать наилучшие варианты предотвращения столкновения с астероидами и кометами, траектории которых пересекаются с орбитой Земли в одной точке. Инициатором создания данного проекта является Немецкое космическое агентство DLR, а участниками проекта станут все европейские ведущие страны, Россия и США. Основную часть финансирования работ по проекту NEOShield возьмет на себя Европейский союз.

Участниками проекта со стороны промышленности станут немецкое, британское и французское отделения крупнейшей европейской аэрокосмической компании EADS Astrium. Так же посильное участие в этом проекте примет российский ФГУП Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИмаш), который является "правой" технической рукой российского Федерального космического агентства "Роскосмос". Эти участники будут заниматься разработкой технических средств и космических аппаратов, с помощью которых потенциально опасные объекты будут отклонены со своей траектории.

В течение первых трех лет работ в рамках программы NEOShield будет собрана и систематизирована вся доступная информация, касающаяся космических объектов NEO.

"Мы должны знать об астероидах практически все. Только тогда мы сможем найти эффективное решение по отклонению его от курса

столкновения с Землей" - объясняет руководитель проекта профессор Алан Харрис (Professor Alan Harris) из немецкого агентства DLR(TheGermanAerospaceCenter)[18].

Так как же можно повлиять на движение опасного космического объекта? Первым из реальных методов является "молоток", космический ударник. Эта задача походит на миссию НАСА DeepImpact 2005 года, на миссию LCROSS 2009 года и на миссию ЕКА DonQuijote, которая была запланирована, но так и не была реализована. Подразумевается, что массивный космический аппарат совершит столкновение с астероидом или кометой. Небольшой импульс от столкновения немного изменит траекторию движения и сместит перекрестие прицела астероида от Земли.

Так же в вышеупомянутых целях предлагается использование гравитационного тягача. Это подразумевает то, что космический корабль, обладающий большой массой, подойдет к астероиду или комете на максимально близкое безопасное расстояние. Гравитационное притяжение между кораблем и объектом заставит объект очень медленно отклониться от первоначальной траектории. А космический корабль, находящийся на втором конце гравитационного каната сможет корректировать свою траекторию в течение длительного времени с помощью ионных или плазменных двигателей. Одной из проблем данного вида решения является то, что необходимо обеспечить работоспособность систем космического корабля и его двигателей в течение очень и очень длительного времени, в течение нескольких десятилетий. И это одна из технических проблем, решение которой будет производиться в рамках программы NEOShield.

В обоих сценариях, величина воздействия и оказываемого им эффекта очень мала. Но, если до столкновения еще целые десятилетия времени, то

и этих малых воздействий будет достаточно для эффективной защиты нашей планеты.

- Начиная с 1998 г. под эгидой NASA действует объединение обсерваторий Spaceguard, задача которого – вовремя обнаруживать до 90% всех объектов больше полумили (800 м) в диаметре. Согласно расчетам, таких со времени открытия проекта должно было набраться 1100 и пока удалось обнаружить три четверти этого количества. К 2020 г. планируется перевести Spaceguard на новый уровень точности, позволяющий работать с небесными телами от 150 м – число подобных тел должно составлять уже порядка 12 тыс. Для этого должны быть введены в строй несколько новых телескопов на Гавайях, в США и Чили. Впрочем, пока что проект сталкивается с серьезными финансовыми трудностями. Под постоянным пристальным наблюдением держатся 140 особенно опасных астероидов.
- В начале 2000-х годов ряд ведущих организаций различных отраслей России и Украины (НПО им. С. А. Лавочкина, НИЦ им. Г. Н. Бабакина, ОКБ МЭИ, НПО "Молния", НИИ механики МГУ, МАК "Вымпел", ГКБ "Южное" и ряд других) учредили Некоммерческое партнерство "Центр планетарной защиты". В качестве программного документа Центра подготовлено и утверждено членами Координационного Совета Центра «Предложение по созданию Системы планетарной защиты «Цитадель», разработанное на базе концептуального проекта СПЗ "Цитадель".

«Эта система должна включать два эшелона - краткосрочного и долгосрочного реагирования. Для гарантированного обнаружения опасных небесных тел в составе оперативного эшелона (краткосрочного) необходимо иметь минимум один космический аппарат-наблюдатель», - сказал А.Зайцев(Генеральный директор

НП «Центр планетарной защиты») [2].

После обнаружения опасного объекта - кометы или астероида - к нему запускается космический аппарат-разведчик, а вслед за ним аппарат-перехватчик с кинетическими или ядерными средствами воздействия. Для запуска аппаратов планируется использовать российско-украинскую ракету-носитель «Зенит».

«С помощью этого эшелона мы сможем защитить Землю от объектов размером до сотен метров, что составляет 99,5% от общего числа астероидов, сближающихся с Землей».

Кроме того, А.Зайцев предложил создать две вспомогательные службы - службу прогнозирования районов и последствий падения опасных космических объектов и службу региональной защиты на базе перспективных средств воздушно-космической обороны. Вторую службу лучше разделить на два оперативных эшелона, которые разместить в обоих полушариях планеты. Эшелон краткосрочного реагирования, по словам А.Зайцева, может быть создан в течение пяти лет. Затраты на его создание составят несколько миллиардов долларов, и в случае привлечения иностранных инвестиций затраты для России будут минимальными. Защита от крупных астероидов и кометных ядер, рассказал он, будет осуществляться средствами эшелона долгосрочного реагирования, для этого потребуются сверхмощные и многоразовые средства выведения, ядерные установки, например, такая, какая разрабатывается в центре Келдыша.

«Это потребует более серьезных затрат и длительных сроков создания, однако станет стимулом для создания новых технологий», - отметил А.Зайцев.

Авторы проекта убеждены, что он станет жизнеспособным только в том случае, если обретет статус международного. Реализация проекта

рассчитана на 5—7 лет с ежегодным бюджетом в полмиллиарда долларов.

- Группа независимых ученых из команды B16 Foundation (Калифорния, США) проводит работы по созданию лазерной платформы DE-STAR(рис. 9), для уничтожения метеоритов. Название проекта DE-STAR расшифровывается как Directed Energy Solar Targeting of Asteroids and Exploration. Это представляет собой орбитальную систему, превращающую падающий на нее солнечный свет во множество лучей, наподобие лучей лазера, сфокусированных на цели. Это позволит если не взорвать куски космических камней, то, по крайней мере, сбить их с опасной для людей траектории.

Филип Лубин (Philip Lubin), ученый-физик из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре (UC Santa-Barbara), и Гари Хьюз (Gary Hughes), исследователь из Калифорнийского политехнического университета (California Polytechnic State University), занимались разработкой своей идеи почти в течение года. Придуманная ими технология базируется на технологии сбора солнечной энергии в космосе, которые уже существуют и которые станут реальностью в недалеком будущем. Разрабатывая свою идею, Лубин и Хьюз выполнили моделирование систем DE-STAR различных размеров, от нескольких метров до десяти километров в диаметре. Чем больше размеры системы, тем большими энергиями она может оперировать и тем больше ее возможности.

К примеру, система DE-STAR 2, диаметром в 100 метров, что приблизительно соответствует размерам Международной Космической Станции (МКС), сможет столкнуть с траектории небольшие кометы и астероиды. DE-STAR 4, система, диаметром в 10 километров, сможет направить энергию, эквивалент которой составляет 1.4 мегатонны в сутки, к цели. Такой энергии хватит для

того, чтобы "стереть в порошок" астероид диаметром 500 метров за год времени[9].

Помимо борьбы с астероидами для систем DE-STAR больших размеров найдется масса других применений. Их энергию можно будет использовать для изучения состава астероидов, других космических тел и для снабжения энергией процесса разгона космических кораблей, отправляющихся в дальний космос на скорости, близкой к скорости света.

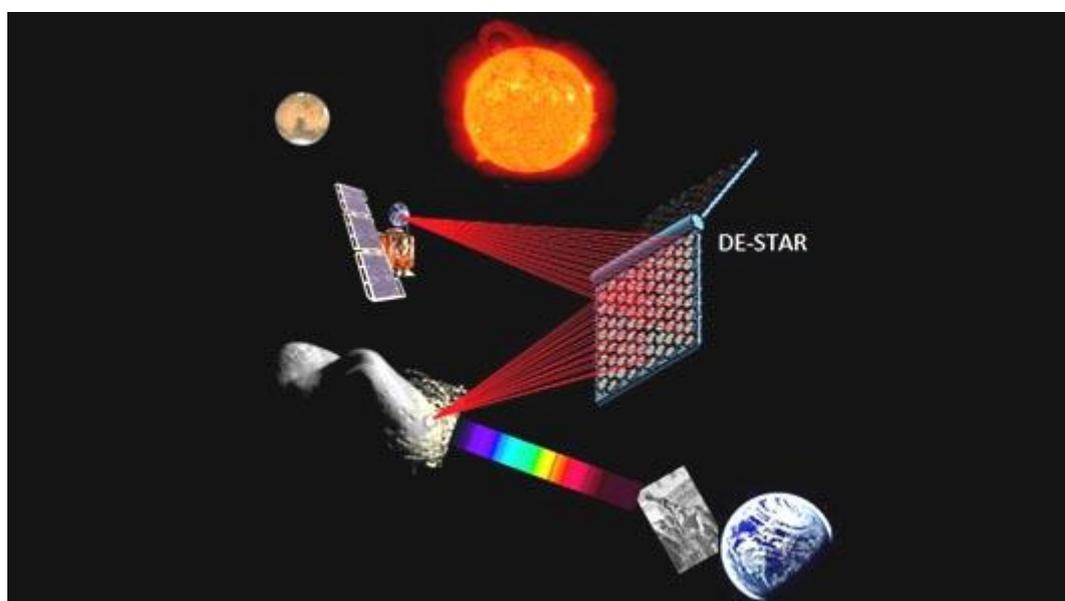


Рисунок 9. Схема проекта DE-STAR.

2. Способы предотвращения астероидной опасности

В предыдущей главе коротко упоминались разнообразные мировые программы по защите от астероидов, все они основаны на определенных идеях и теориях. Далее рассмотрим и ознакомимся с самыми актуальными из них. На данный момент существуют различные технические решения задачи воздействия на опасный космический объект, которые можно разделить на два типа: это разрушение объекта или изменение его траектории.

2.1 Уничтожение астероида с помощью ядерного взрыва

Рассмотрим ситуацию, когда опасный астероид находится на пути столкновения с Землей, то одной из возможностей обезвредить его является отправление к нему космического аппарата с ядерным зарядом. Вопрос о применении ядерных зарядов для изменения орбиты или уничтожения опасного объекта имеет политические, экологические и моральные аспекты. Ядерная технология, безусловно, не экологична, однако ее применение вблизи Земли может стать неизбежным в случае очень малого времени упреждения.

Такая миссия, которая будет стоить около 1 миллиарда USD, может быть подготовлена на основе уже финансируемых НАСА в настоящее время разработок, говорит известный эксперт по астероидной защите Бонг Ви (BongWie), директор Исследовательского центра по отклонению астероидов Университета штата Айова. Он описал систему, которую разрабатывает его команда, присутствующим на Международной конференции по космическим разработкам, проходившей в Ла Джолла, Калифорния, 23 мая 2013 года.

Предложение американских ученых состоит в том, чтобы Антиастероидный космический корабль (HAIV- Hypervelocity Asteroid Intercept Vehicle) доставил ядерную боеголовку, чтобы уничтожить угрозы, прежде чем они смогут достигнуть Земли. Двухсекционный космический корабль будет состоять из импактора кинетической энергии, который отделится для создания кратера в астероиде [17]. Другая часть космического аппарата будет нести ядерное оружие, которое затем взорвется внутри кратера астероида.

Цель будет заключаться в разделении астероида на множество частей, которые затем разойдутся по отдельным траекториям. Профессор Ви считает, что 99 процентов частей астероида пролетят мимо Земли, что значительно ограничивает воздействие на планету. Те, которые все же настигнут Землю, сгорят в атмосфере и не представляют никакой угрозы.

Hypervelocity Asteroid Intercept Vehicle (HAIV) Mission Architecture

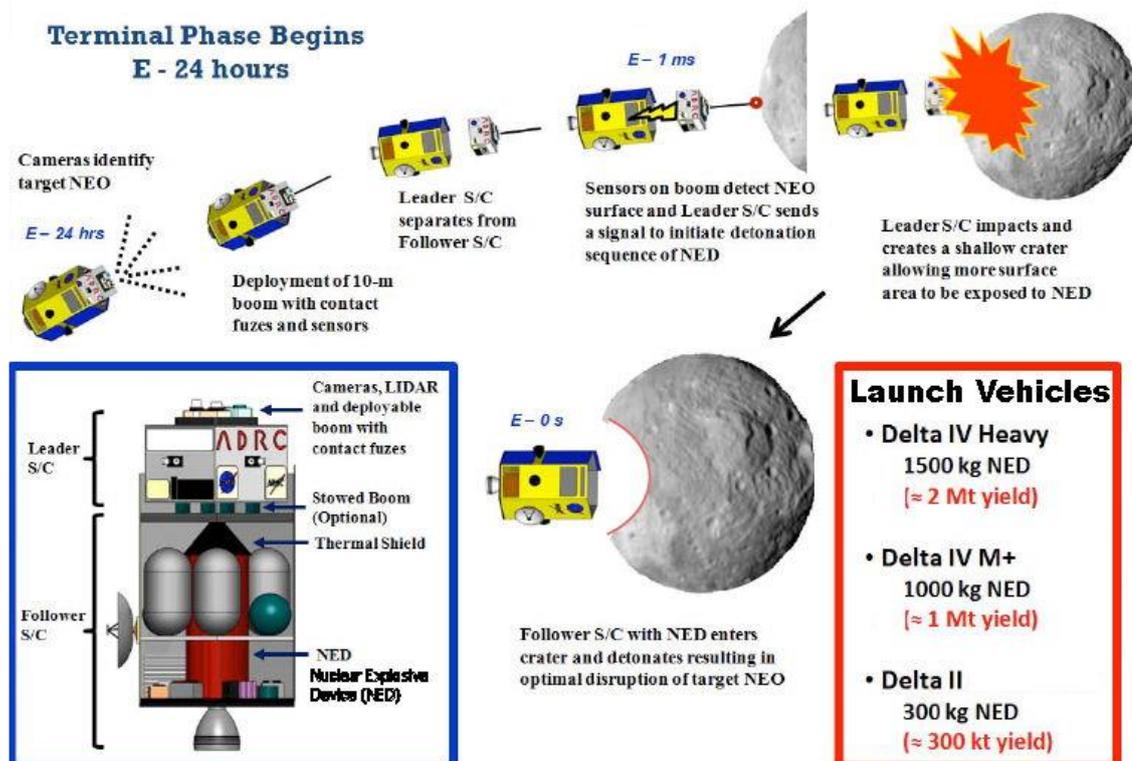


Рис. 10. Схема реализации программы HAIV

Исследование Ви сосредоточено на обеспечении потенциального реагирования на астероиды за год или около того. По плану будет два космических аппарата - один основной, второй резервный - которые могут быть запущены на ракете Delta 4. Если первый космический аппарат рухнет при запуске или не сможет уничтожить астероид, второй будет направлен, чтобы закончить работу.

Ви признал, что отправка ядерного оружия в космос - это политически спорный вопрос. Вместе с тем он сказал, что есть ряд функций, которые могут быть встроены в космический корабль, чтобы предотвратить ядерную боеголовку от взрыва в случае неудачного запуска. Ядерное оружие является единственной вещью, которая работает против астероидов за короткие сроки, что является большим плюсом этого способа, и является ключевым фактором в ситуации ограниченного времени. Другие системы, призванные защитить от астероидов, такие как буксиры и солнечные паруса, потребуют уведомления за 10 или 20 лет до инцидента.

2.2 Смещение астероида с опасной траектории

В последнее время большинство ученых рассматривают изменение траектории опасного астероида, как более выгодный и предсказуемый вариант защиты Земли от астероида, чем его прямое уничтожение. Смещение астероида с опасной траектории может быть осуществлено разными путями. Будь то сообщение астероиду дополнительной скорости системой ядерных взрывов на его поверхности или двигателями реактивной тяги космического аппарата, рассеяния пылевого облака на пути движения астероида, направленного сброса вещества с его поверхности, окраски части поверхности астероида с целью изменения его альбедо и получения дополнительного импульса и др. Уровень развития

технологии в настоящее время позволяет осуществить эти решения. Причем чем раньше астрономы сообщат о возможном столкновении объекта с Землей, тем меньше надо будет затратить энергии и средств для его предотвращения. Выбор способа воздействия будет зависеть от времени до расчетного момента столкновения (времени упреждения) и физических свойств объекта. К последним относятся прежде всего размер тела, форма, плотность и прочность вещества, определяемые типом астероида (силикатный, углистый, металлический). В случае необходимости посадки на поверхность объекта космического аппарата, нужно знать, кроме того, скорость и направление его вращения, а также ориентацию оси вращения в пространстве. Нужно знать также природу АСЗ – это слабо консолидированное ядро потухшей кометы с прочностью порядка $100-1000 \text{ дин/см}^2$, которое легко фрагментируется в атмосфере, или же, например, железо-никелевый астероид с прочностью порядка 1 млрд дин/см^2 . Все эти характеристики доступны для определения из наземных наблюдений, хотя крайне желательны и космические миссии типа "Галилео", "NEAR", "Клементина". Таким образом, определение физических характеристик АСЗ является одной из важнейших задач после его обнаружения и определения орбиты. Это, в частности, особо подчеркивал на конференции в г. Снежинске в 1994 году Э. Теллер, призывавший к ядерным экспериментам на астероидах и к изучению их физических свойств.

2.2.1 Смещение астероида при помощи удара другим астероидом

Концепция использования малых астероидов для отклонения опасных околоземных объектов от траектории столкновения с Землей впервые была предложена на Симпозиуме по опасным околоземным объектам, проведенным в октябре 2009 года на Мальте [19].

Суть концепции, заключается в сообщении достаточно малому астероиду с поперечным размером около 10-15м сравнительно небольшого импульса скорости (порядка 10 м/с), с тем, чтобы перевести его на траекторию к Земле, где за счет гравитационного маневра при пролете Земли этот астероид будет направлен на траекторию столкновения с опасным околоземным объектом, например, с Апофисом. В упомянутой публикации было показано, что предложенный способ является почти на два порядка более эффективным по сравнению с реализацией наведения на астероид космического аппарата с последующим его столкновением с опасным астероидом, если эффективность оценивать в терминах отношения изменения скорости опасного астероида, к массе используемого для этого космического аппарата.

Однако был оставлен открытым вопрос, а возможно ли найти среди достижимых астероидов такой астероид, который малым импульсом и с помощью гравитационного маневра возможно вывести на траекторию столкновения с Апофисом. Предполагалось, что в силу того, что астероидов подходящего размера насчитывается достаточно много –сотни тысяч по современным оценкам, выбрать подходящий для решения нашей задачи решаемая проблема. Вместе с тем, следует отметить, что обнаружить столь малые астероиды и определить параметры их орбит – это в значительной мере задача, которую еще предстоит решить. И решение ее в настоящее время идет с очень большой скоростью: за счет реализации соответствующих программ в США и в Европе в последнее десятилетие открыто околоземных астероидов больше, чем за весь предшествующий период наблюдений.

В 2013 году Европейское Космическое Агентство планирует запустить в окрестность солнечно-земной точки либрации астрометрический космический аппарат GAIA, с помощью которого предполагается открыть и каталогизировать орбиты нескольких тысяч новых околоземных объектов.

В связи с этим, более важным представляется ответ на вопрос, существуют ли астероиды в имеющемся в настоящее время каталоге, которые можно перевести на траекторию столкновения с опасным астероидом, таким как Апофис до ожидаемой его встречи с Землей в 2036 году, используя при этом существующие в настоящее время возможности по носителям и технологиям управления орбитальным движением. Имеется в виду реализация сценария, когда к малому астероиду-снаряду направляется космический аппарат с рабочим телом достаточной массы, далее осуществляется его посадка на этот астероид, закрепление на астероиде и сообщение астероиду необходимого импульса скорости, который переводит его на траекторию столкновения с Апофисом за счет гравитационного маневра при пролете Земли.

Выполненные в ходе работ по проверке концепции впервые в мире показывают, что реализация такого сценария возможна, поскольку в существующем в настоящее время каталоге удовлетворяющие нашим требованиям астероиды имеются.

В последующее время можно ожидать только улучшения ситуации с выбором подходящих астероидов в силу непрерывного пополнения каталога околоземных объектов.

2.2.2 Гравитационный маневр как основной инструмент наведения астероида-снаряда на опасный объект.

Астероиды, которые нами рассматриваются как малые, имеют массу не менее 1500 т, поэтому управлять их движением в классическом понимании этого процесса, т.е. с помощью приложения реактивной тяги не представляется возможным. Однако, если использовать гравитационный маневр как инструмент «усиления» в изменении параметров орбиты, когда небольшой импульс скорости позволяет изменить высоту перигея

управляемого тела (астероида-снаряда) у планеты пролета (Земли) в достаточной мере для того, чтобы повернуть вектор относительной

скорости астероида на десятки градусов, то мы получаем исключительно эффективный инструмент управления орбитальным движением небесного тела столь значительной массы. Выбором положения вектора относительной скорости тела на бесконечности относительно планеты пролета (при фиксированном радиусе перицентра) мы получаем любую требуемую плоскость относительной траектории пролета с соответствующим направлением вектора относительной скорости после пролета.[6,7]

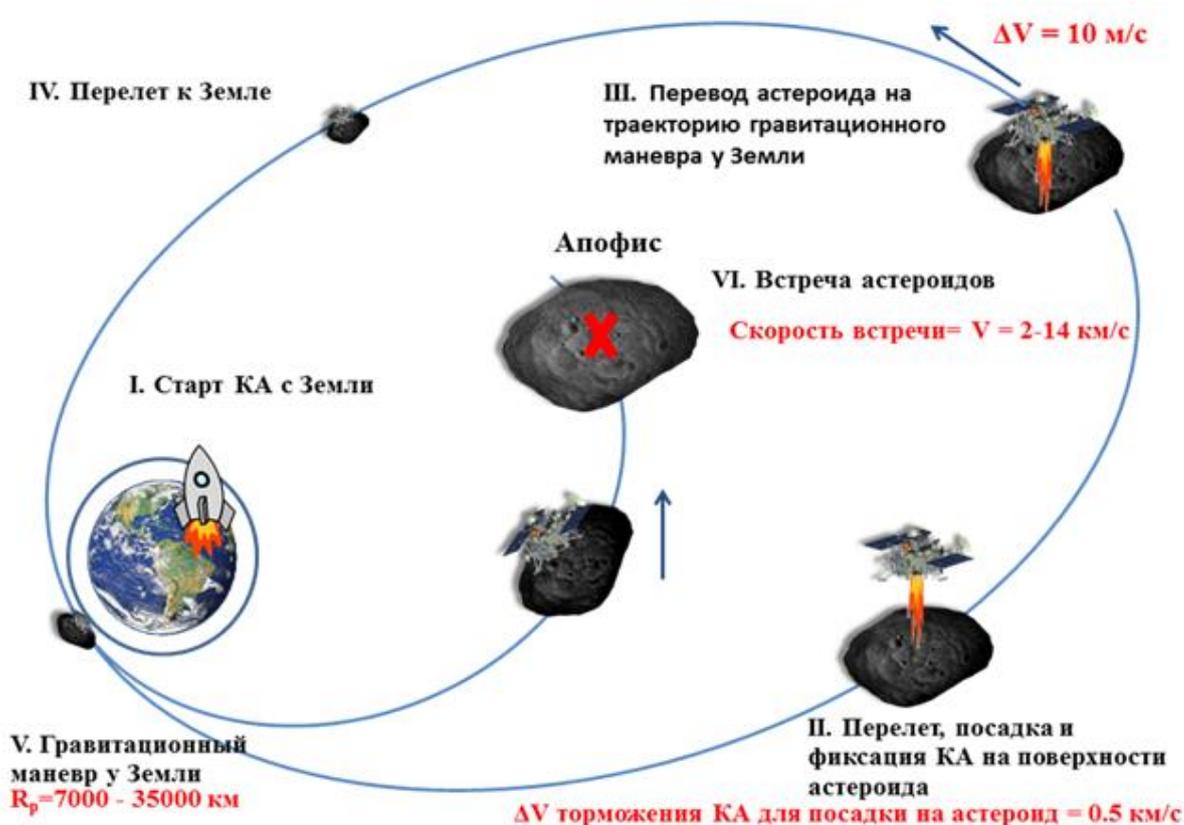


Рисунок 11. Схема наведения астероида-снаряда на опасный объект

Сценарий миссии по отклонению опасного околоземного объекта от столкновения с Землей состоит, как отмечалось из следующих этапов (рис. 11):

- старт космического аппарата с Земли и перелет к астероиду, который планируется использовать как управляемый аппарат для его наведения на опасный объект;

- посадка и закрепление космического аппарата на этот астероид за счет гашения относительной скорости аппарата и выполнения процедуры «стыковки» с астероидом;
- полет управляемого астероида в пассивном режиме по прежней его траектории до момента старта его к Земле;
- сообщения астероиду сравнительно небольшого импульса скорости за счет использования ракетных двигателей пристыкованного к астероиду аппарата, переводящего астероид на траекторию полета к Земле для выполнения гравитационного маневра у Земли;
- выполнение гравитационного маневра у Земли, переводящего управляемый астероид на траекторию столкновения с опасным объектом, в качестве которого в нашем случае выбран астероид Апофис;
- перелет к Апофису с последующим столкновением с ним.

Очевидно, что на всем протяжении такой миссии производятся коррекции параметров траектории. Сначала аппарата при его движении к астероиду, выбранного в качестве управляемого снаряда, затем коррекции параметров этого управляемого астероида с целью его попадания в заданную окрестность около Земли, координаты которой позволяют получить параметры траектории отлета от Земли, которая является траекторией попадания в астероид-цель. На финальной траектории также выполняются необходимые корректирующие маневры.

Задача проектирования миссии в целом состоит в том, чтобы выбрать все имеющиеся у нас свободные параметры, которые при заданной максимально достижимой имеющимися носителями массе аппарата, выводимого на низкую околоземную орбиту, позволяют получить максимальное изменение вектора скорости астероида-цели после столкновения с ним управляемого астероида-снаряда.

Эта задача многопараметрическая, поэтому ее решение разбивается на несколько этапов. Один из этих этапов – это получение траекторий перелетов, начиная от старта с низкой круговой орбиты и кончая столкновением с опасным околоземным объектом:

т.е. траектории перелета

Земля – управляемый астероид, управляемый астероид – Земля, Земля – астероид-цель[3,14].

Возможность изменения орбиты астероида оценивается таким образом, чтобы приложением весьма ограниченного импульса скорости астероиду перевести его на траекторию гравитационного маневра у Земли, с последующим столкновением с опасным астероидом. Очевидно, что реализация такого импульса скорости требует размещения на малом астероиде соответствующей двигательной установки с запасом рабочего тела и системы управления, аналогичной применяемым на космических аппаратах. Опыт проекта NEAR, когда была осуществлена посадка на астероид Eros, позволяет надеяться на выполнимость этой части миссии по предотвращению столкновения с Землей опасного астероида при условии, что подходящий малый астероид обнаружен и параметры его орбиты определены с достаточной точностью.

2.2.3 Использование тормозящего «облака»

В рассмотренных ранее способах предотвращения астероидной опасности можно заметить разнообразные изъяны и технические сложности, которые делают эти способы более дорогостоящими и энергоёмкими. К примеру, при использовании ядерного заряда для разрушения астероидов необходимо соблюсти два условия: осколки разрушенного тела сами по себе должны быть существенно менее опасны для Земли, чем исходное тело, и должен быть обеспечен их разлет, исключаящий последующее групповое воздействие на Землю. С учетом

факторов и сложностей рассмотренных способов, стоит напомнить, что недостаточно внимания уделяется эффективному и технически достаточно просто реализуемому способу организации на пути астероида «воздушных пузырей». В этом случае происходит обмен кинетическими энергиями молекул воздуха с материалом астероида, подобно столкновению с рассмотренным выше аппаратом-ударником. Однако важными преимуществами «пузырей» являются следующие обстоятельства.

Во-первых, большим пузырем легче попасть в астероид — он влетает в него сам. Во-вторых, упоминавшийся ранее вспомогательный астероид-снаряд будет эффективен только при центральном ударе, когда вектор его скорости проходит через центр масс астероида, в то время как масса газа равномерно распределяется по всей поверхности астероида автоматически. В-третьих, астероид-снаряд будет совершенно неэффективен для групповых астероидов, состоящих из множества мелких, которые он попросту будет «прошивать» насквозь. И наконец, кратковременное ударное воздействие трудно сделать управляемым и регулируемым. Процесс прохождения астероидом газового облака можно растянуть на секунды, облегчая как процесс наблюдения, так и возможное управление при прохождении астероидом заданной последовательности «пузырей».

Эффективность использования «пузырей» сравнима с применением ядерного оружия без риска стать заложниками ядерных террористов. Такое торможение, проведенное всего лишь за две недели до возможного столкновения с Землей, способно устранить глобальную катастрофу. При этом только энергия торможения сопоставима с общей энергией, выделяющейся при взрыве водородной бомбы с тротиловым эквивалентом более 1 Мт. Здесь возникает важный вопрос, связанный с транспортировкой нужного количества газа и организацией самого газового облака. Нетрудно подсчитать, что при торможении в газовой

среде со средней плотностью $0,1 \text{ кг/м}^3$ (соответствует плотности земной атмосферы на высоте около 16 км) и объеме $100 \times 100 \times 10000 \text{ м}$, его масса составит около 10 000т. Это означает, что его запасы должны быть созданы заранее и при необходимости использованы с помощью нескольких ракет-носителей. Сами газовые облака могут быть заключены в специальные оболочки необходимого размера и сгруппированы вдоль траектории движения потенциально опасного небесного тела наподобие дирижаблей ПВО времен Второй мировой войны. Следует отметить, что это лишь один из крайних случаев, когда астероид сравнительно большой и достаточно плотный. Такие астероиды можно обнаружить задолго до столкновения и заранее принять необходимые меры. Не менее опасны и сравнительно небольшие астероиды с диаметром около 20 м, летящие навстречу движению Земли со скоростями до 50-60 км/сек. Но в этом случае «подушки безопасности» работают еще эффективнее, поскольку энергия их сопротивления возрастет пропорционально квадрату скорости самого объекта, вследствие чего их масса может быть значительно уменьшена., достаточно 3-5т газа. Кроме того, следует учесть, что пропорционально плотности астероида можно изменять массу таких «подушек» без снижения их эффективности. Не следует забывать и о проблеме «космического мусора», летающего на околоземных орбитах и реально угрожающего безопасности космических полетов. Организация кратковременных воздушных пузырей на соответствующих орбитах позволит эффективно бороться и с этой опасностью. Например, газовый пузырь размером $100 \times 100 \times 100 \text{ м}$ и массой 1 тонна способен на 600 м/сек. затормозить влетающие в него объекты с массой около килограмма. При этом сам «пузырь» должен обращаться по встречной орбите для обеспечения максимальных относительных скоростей.

2.2.4 Гравитационное воздействие космического аппарата(гравитационный тягач)

Двумя американскими астронавтами, Эдвардом Лу (Edward Lu) и Стэнли Лав (Stanley Love) в 2005 году была предложена своя идея использования автоматического космического аппарата для защиты Земли от потенциально опасных метеоритов и астероидов. По их мнению, космический аппарат должен был отклонить космическое тело от опасной траектории, используя гравитационные силы[9]. В настоящее время французская компания EADS Astrium, являющаяся гигантом космической отрасли Европы, начала научно-исследовательские работы в результате которым может стать возможным создание такого космического гравитационного тягача для метеоритов и астероидов.

Видимо, под впечатлением полета японского зонда «Хаябуса», который уже два месяца висит над астероидом Итокава, американские астронавты и предложили эту оригинальную и простую схему воздействия на астероид, не требующую крепить двигатель к его поверхности. Вместо этого предлагается связать тягач с астероидом силой гравитации. Если космический аппарат массой $m = 20$ тонн, включив двигатели, зависнет над самой поверхностью астероида радиусом $r = 100$ метров, то на астероид будет действовать сила гравитации, тянущая его к аппарату. Нетрудно показать, что ускорение астероида за счет этой силы составит:

$$a = G m/r^2 = 1,3 \times 10^{-10} \text{ м/с}^2,$$

где G — гравитационная постоянная. За год скорость связки астероид–корабль изменится примерно на 4 мм/с, за три года можно будет достичь скорости около 1 см/с, этого как раз достаточно, чтобы через 20 лет астероид отклонился от своей первоначальной траектории на 8 тысяч километров — чуть больше радиуса Земли.

Интересно заметить, что ускорение связки аппарат–астероид не зависит от массы астероида. Просто чем она больше, тем мощнее нужны двигатели на тягаче. Например, если при этом же радиусе 100 м плотность астероида составляет $2,3 \text{ г/см}^3$ (как у астероида Итокава), то потребуется двигатель с тягой всего-навсего около полутора ньютонов (150 г). Естественно, струи выхлопа нужно направить несколько в сторону от астероида — как лепестки цветка (Рис. 12).

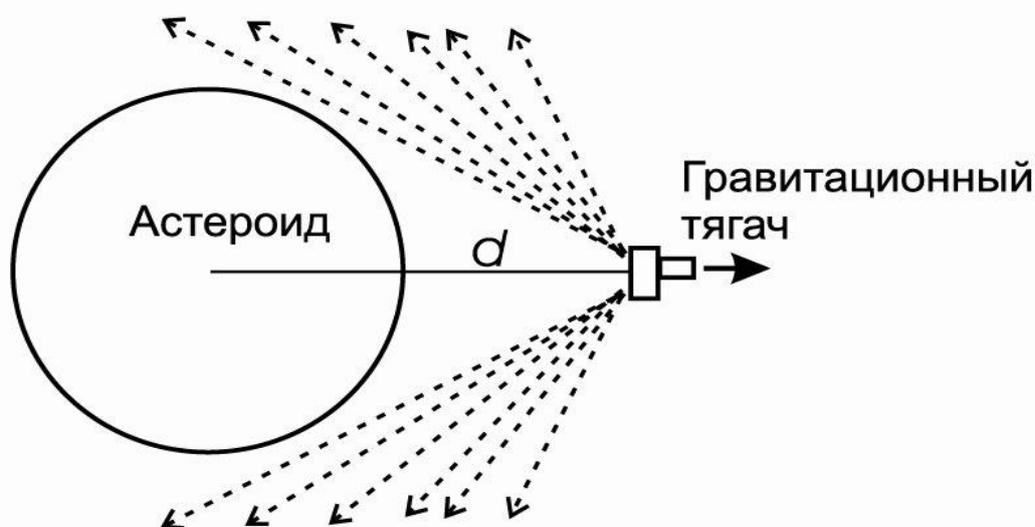


Рисунок 12. Принцип работы Гравитационного тягача (зонда)

Ионные двигатели малой тяги использовались на американском аппарате DeepSpace 1 и на японском «Хаябуса». Причем двигатель DeepSpace 1 проработал 678 суток и имел тягу втрое больше, чем требуется по приведенному выше расчету. Автономная навигация зонда вблизи астероида отработывалась аппаратами NEAR Shoemaker и «Хаябуса». Наконец, масса кораблей «Аполлон», летавших к Луне (что по затратам энергии ненамного ближе, чем к астероидам) составляла свыше 45 тонн. Так что современная космонавтика располагает всеми необходимыми технологиями, чтобы отклонить от Земли астероид

диаметром до 200 метров. В этом состоит главное достоинство предложенной технологии.

Впрочем, есть у нее и недостатки. Главный из них связан с тем, что сила притяжения быстро убывает с расстоянием. Если аппарат поднимется всего на 100 метров над поверхностью, сила, действующая на астероид, уменьшится в 4 раза и во столько же раз затянется маневр коррекции орбиты. В тоже время, зависнуть в нескольких метрах над поверхностью, скорее всего, не получится. Во-первых, в этом случае выхлоп двигателя будет упираться в астероид, что сведет на нет всю затею. А во-вторых, мелкие астероиды, как правило, имеют неправильную форму и вращаются. Поэтому аппарату придется держаться на достаточной высоте, чтобы его не задело каким-нибудь шальным выступом. Все это означает, что размер астероида 200 метров находится на самом пределе возможностей гравитационного тягача. Но вот с объектами диаметром метров 100-150 он должен справиться легко.

2.2.5 Использование YORP-Эффекта

А сейчас рассмотрим еще один вариант бесконтактного воздействия на опасный астероид, так называемый эффект YORP. Эта аббревиатура состоит из первых букв фамилий учёных, внесших той или иной вклад в описание данного явления – Ярковского, О'Кеефе, Радзиевского и Пэддека (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack). Данный эффект заключается во взаимодействии малых вращающихся тел и излучения. В частном случае – астероидов и Солнца.

В поле зрения исследователей попали два астероида — 2000 RH5 и 1862 Apollo. Интересно, что ими занимались два разных коллектива, а их статьи вышли практически одновременно, хотя и в разных журналах: одна

в Nature и целых две в Science[8]. Эти работы впервые осветили важные особенности YOPR-эффекта для астероидов.

Как же работает YOPR?

Такие небольшие тела как астероиды перемещаются не только за счёт инерции. На их движение, как известно, в основном оказывают влияние гравитация остальных тел системы и всяческие столкновения. Однако оказывается, что у астероидов есть и составляющая реактивного движения. Это звучит несколько странно, но ещё более удивительно, что источник энергии такого движения – Солнце.

Излучение светила может расталкивать в разные стороны мелкие объекты типа пыли или протопланетных пушинок. На первый взгляд, то же должно происходить и с другими, более крупными телами (теми же астероидами), правда, в абсолютно других, более мелких масштабах.

Однако всё не так просто. Эти объекты, как правило, обращаются вокруг звезды, вращаясь при этом вокруг своей оси. В результате поворота астероид оказывается разогретым неравномерно. Пока один бок ещё не остывшей поверхности уходит «из вида» на ночную сторону, противоположный, соответственно, выходит на дневную и начинает нагреваться.

Что же представляет из себя «тёплая поверхность»? Эти слова означают, что она переизлучает тепловые фотоны, недавно поглощённые при облучении Солнцем, и часть их энергии получает астероид в виде дополнительного момента. Фактически происходит реактивное движение. Это явление описано русским инженером Иваном Осиповичем Янковским (1844-1902гг.).

В зависимости от того, каково соотношение угловых скоростей вращения вокруг своей оси и обращения вокруг Солнца, движение может приобретать различный характер. Один из случаев схематически приведён на Рис.13.

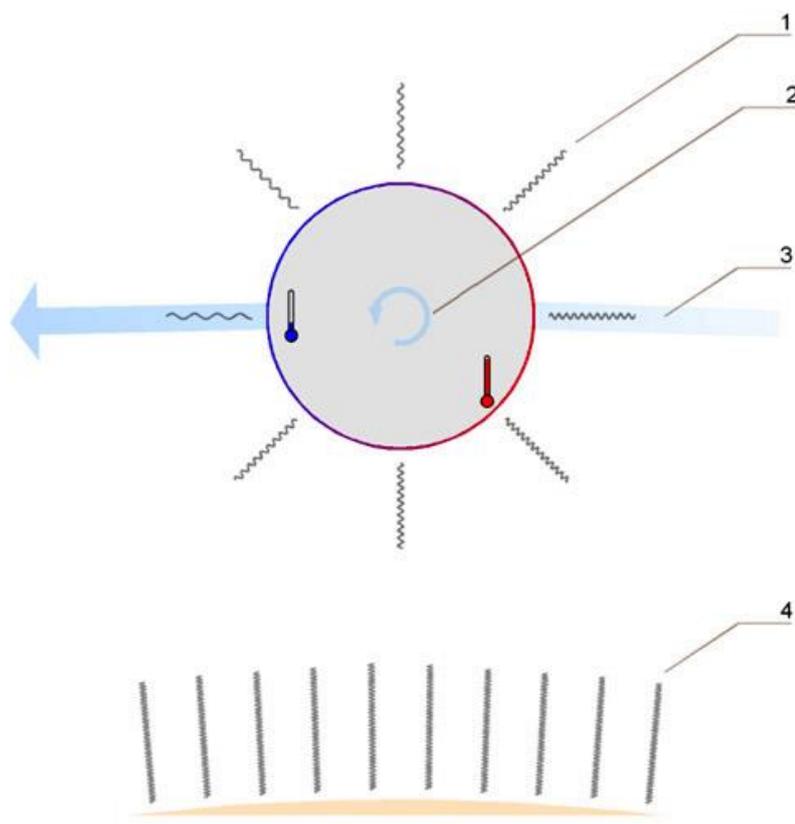


Рисунок 13. Пример эффекта Ярковского. 1 – излучение с поверхности астероида, играющее роль реактивной тяги. С тёплой «красной» стороны оно, конечно, сильнее. 2 – направление вращения астероида (сам кружок, как вы догадались, — это идеальный астероид круглого сечения). 3 – орбита астероида и направление его движения по ней. 4 – излучение со стороны Солнца

Астероид, впрочем, можно считать «шариком» только в первом приближении. На движение оказывают существенное влияние ряд факторов, связанных с такими особенностями «небесных камней», как специфика поверхности, форма, габариты, период вращения (он, кстати,

может существенно меняться). Такую динамику уже описывает более близкий к реальности эффект YORP, учитывающий все эти детали.

Интересно, что для разных астероидов эффект может быть различным. Скажем, если объект не вращается (то есть его день равен его году), то вектор реактивного движения оказывается направленным так, что YORP-эффект приводит к сокращению орбиты под действием солнечной гравитации. Итогом этого может стать постепенное «опускание» орбиты астероида из пояса астероидов к орбитам планет близких к Солнцу.

YORP может и по-другому влиять на астероиды – например, уменьшать период их обращения и «отгонять» подальше от Солнца. И, разумеется, эффект может становиться причиной раскрутки астероидов вокруг своей оси или, опять-таки, замедления этого движения – в зависимости от набора параметров.

Вообще, не столь удивительно, что такое влияние может иметь место. Но насколько оно сильное? В 1990-х учёные пронаблюдали YORP на примере одного небольшого астероида, а также нашли несколько косвенных свидетельств существования эффекта. А вот свежие проверки двух астероидов оказались куда более обстоятельными и – что очень важно – основанными на прямых наблюдениях. Первый из них – 150-метровый 2000 RH5, который полюбился группе исследователей во главе со Стивеном Лаури (Queen's University Belfast) – оказался довольно удобным объектом для изучения такого влияния. Наблюдать его очень удобно – орбита 2000 RH5 (Рис. 14) находится недалеко от земной, и сам он невелик, а значит, YORP должен быть для него особенно сильным. Это подозрение оказалось небезосновательным – «день» объекта длится всего около 12 минут, и этот астероид, вероятно, является самым быстро вращающимся в Солнечной системе.

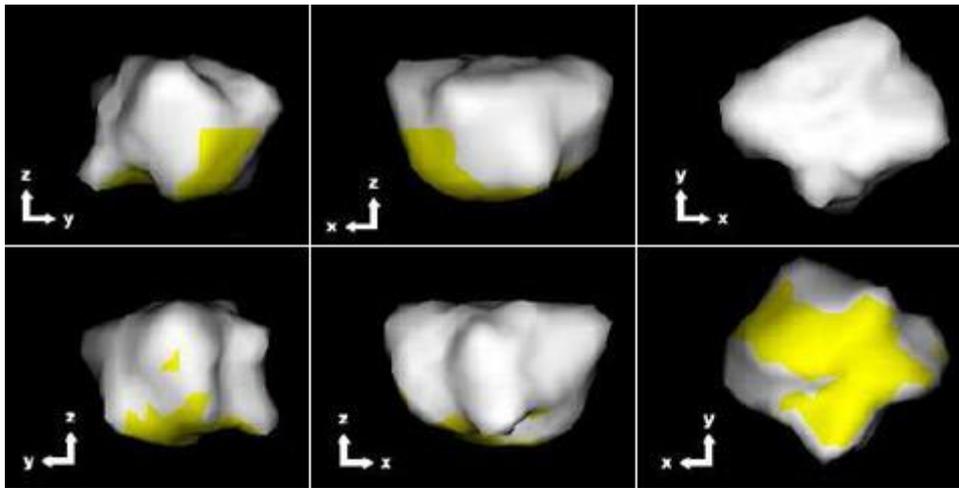


Рисунок 14. Серия изображений 2000 PH5 в разных проекциях. Цветом выделена область, нагретая в некоторый момент и становящаяся на это время «реактивным двигателем» астероида

Как показала обработка параметров, такая невероятная «раскрученность» — результат YORP, и она не может объясняться гравитационным воздействием Земли или Солнца.

А что касается 1862 Apollo — им занимался физик Микко Каасалайнен (Mikko Kaasalainen) из университета Хельсинки (University of Helsinki) с компанией — то это тоже не кирпич, а астероид диаметром 1,7 километра.

По подсчётам, также основанным на прямых наблюдениях, этот объект тоже поддаётся на «YORP-провокацию», в результате которой за последние сорок лет он был «вынужден» сделать на один оборот больше, чем если бы эффекта не существовало.

И судьба сего небесного тела из-за YORP, похоже, окажется трагичной: помимо частоты обращения вокруг Солнца, растёт и скорость вращения вокруг своей оси, и возникающие центробежные силы разорвут астероид.

В результате этих исследований учёным, очевидно, придётся серьёзно пересмотреть особенности эволюции орбит астероидов в современной Солнечной системе. А значит, и пересчитать даты вероятных столкновений с Землёй. Вследствие чего откладывать разработки других способов защиты в долгий ящик нельзя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был выполнен обзор способов предотвращения астероидной опасности. Это те способы, которые могут быть реализованы в наше время, выполнение которых основано на существующих технологиях. Стоит заметить, что ключевым фактором в выборе способа в условиях астероидной опасности будет являться время. Так как, большинство факторов, такие как использование газового облака, гравитационный тягач, или использование YORP-эффекта требуют длительного времени не только на подготовку, но и на устранение непосредственной опасности, в чем заключается их непосредственный минус в отличие от использования ядерного взрыва. В то же время, способ использования ядерного взрыва тоже имеет изъяны. В случае непосредственного взрыва опасного астероида, могут возникнуть проблемы при бурении астероида и непосредственном расположении заряда внутри него. Поэтому способы бесконтактного воздействия на опасный объект имеют неоспоримое преимущество перед ядерным взрывом, не приходится рассматривать посадку каких-либо модулей на астероид, что несет дополнительный риск при неточных расчетах и появлении внештатных ситуаций. Так же вариант с использованием удара опасного астероида и его последующего смещения с орбиты чреват появлением крупных осколков при столкновении, а что еще хуже при попадании в центр масс опасного астероида, мы не добьемся его смещения, а лишь заставим вращаться.

Представленные в работе возможные меры не требуют создания принципиально новых технологий в дополнение существующим. Но они требуют дальнейшего развития автоматической и пилотируемой космонавтики и постановки перед ней реальных практических задач,

решение которых не только устранит те угрозы, которые осознано человечество, но и объединит его усилия в настоящем овладении Космосом.

Реализация подобных проектов открывает новые перспективы для развития земной Цивилизации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астероидно – Кометная Опасность: вчера, сегодня, завтра под редакцией Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой, – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2010.
2. Доклад «Концептуальный проект Системы планетарной защиты `Цитадель`» на международной конференции Космическая защита земли-2000(КЗЗ-2000) 15-19 сентября 2000 года г. Евпатория, Крым
3. Данхэм Д.У., ЧумаченкоЕ.Н., НазировР.Р., Эйсмонт Н.А. Международное сотрудничество ученых по программе пилотируемых полетов для исследования солнечной системы и планетарной защиты // Вестник РАЕН, 2012, том.12, №4, с. 82-92.
4. Ковтуненко В. М., Роговский Г. Н., Суханов К. Г. и др. Возможность построения системы защиты Земли от астероидов и комет на базе современных технологий // Тезисы докл. Всеросс. конференции "Астероидная опасность-95" 25-27 мая 1995 г. – СПб: Изд. МИПАО и ИТА РАН, 1995. – Т.2. – С. 65-66.
5. Медведев Ю. Д., Свешников М. Л., Сокольский А. Г. и др. Астероидно-кометная опасность. – СПб.: Изд-во ИТА-МИПАО, 1996. – 244 с.
6. Назиров Р.Р., Эйсмонт Н.А. Гравитационные маневры как способ направить малые астероиды на траекторию встречи с опасными околоземными объектами // Космические исследования,2010. –Т.48.- №5. -С.491-496.
7. Назиров Р.Р., Эйсмонт Н.А, Чумаченко Е.Н., Данхэм Д.У., БоярскийМ.Н., ЛогашинаИ.В. , ЛедковА.А., АксеновС.А., Наведение малых астероидов на опасные околоземные объекты для предотвращения их столкновения с Землей, Вестник ВГТУ, 2012, №9, с. 61-64.

8. «SpinRateofAsteroid (54509) 2000 PH5 IncreasingDueTothe YORP Effect»; «DirectDetectionoftheAsteroidal YORP Effect», *Nature*, 2007.
9. Gravitational tractor for towing asteroids, Edward T. Lu & Stanley G. Love/ NASA Johnson Space Center, *Nature*, 2005.
10. Alan W Harris, Edward Bowell. Asteroids, comets, meteors. Houston, TX : Lunar and Planetary Institute, 1992.
11. Chapman C. R., Morrison D. Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard // *Nature*. – 1994. – V. 367. – P. 33-40.
12. C.R. Chapman, P. Paolicchi, V. Zappala, R.P. Binzel, J.F. Bell 1989. Asteroid families: Physical properties and evolution. In *Asteroids II* (Eds. R. Binzel, T. Gehrels, and M.S. Matthews, Univ. of Arizona Press), 386-415.
13. Morrison D. (Ed.) The Spaceguard Survey: Report of the NASA International Near-Earth-Object Detection Workshop. – JPL. – Pasadena. – 1992. – 66 p.
14. Natan Eismont, Michael Boyarsky, Anton Ledkov, Ravil Nazirov, David Dunham, Eugene Chumachenko and Konstantin Fedyaev. Using small asteroids to deflect larger dangerous asteroids, Proceedings of The 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics, 2012, Pasadena, USA.
15. Rabinowitz D. L., Bowell E., Shoemaker E., Muinonen K. The population of Earth-crossing asteroids // Hazards due to comets and asteroids (ed. T.Gehrels). – Univ. ofArizonaPress, Tucson. 1994. – P. 285-312.
16. Taylor P.A. and J.L. Margot, Binary Asteroid Systems: Tidal End States and Estimates of Material Properties, *Icarus* 212,2011, 661-676,
17. Wie B., Space Vehicle Dynamics and Control // American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998. – V.661.

18. The 32 Space Research projects, funded under the 4th Space call of the 7th Framework Programme (FP7) and featured in the “Eye on Space” brochure, 2012
19. Malta Symposium on Hazardous NearEarth Asteroids «MotionControlofNEOs: Dream or Reality?» October 12-16, 2009