



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 35 за 2011 г.



Энеев Т.М., Ахметшин Р.З.,
Ефимов Г.Б.

К вопросу об астероидной
опасности

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Энеев Т.М., Ахметшин Р.З., Ефимов Г.Б. К вопросу об астероидной опасности // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011. № 35. 40 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-35>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
им. М.В. Келдыша
Российской Академии наук

Т.М. Энеев, Р.З. Ахметшин,
Г.Б. Ефимов

К ВОПРОСУ
ОБ АСТЕРОИДНОЙ
ОПАСНОСТИ

Москва, 2011 г.

Т.М. Энеев, Р.З. Ахметшин, Г.Б. Ефимов. К ВОПРОСУ ОБ АСТЕРОИДНОЙ ОПАСНОСТИ. Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, М., 2011.

Аннотация.

Рассмотрена концепция космического патруля для обнаружения небесных тел, представляющих астероидную опасность для Земли [1]. Целью ее является выявление и каталогизация большинства небесных тел, достигающих окрестности орбиты Земли, в том числе астероидов группы Атона, наблюдение которых с Земли затруднено. Система космического обнаружения могла бы стать следующим шагом по каталогизации опасных небесных тел, продолжающим программы их оптического наблюдения земными средствами.

Дается предварительный анализ схемы “оптического барьера”, создаваемого телескопами космического патруля. Формулируются требования к системе наблюдения, необходимые для надежного выявления опасных тел, предложены схемы визирования области оптического барьера для надежного обнаружения небесных тел, сближающихся с Землей, и определения их орбит. Проведено сравнение массовых затрат на расстановку КА патруля на орбите Земли с помощью электроракетного двигателя и традиционного химического двигателя.

Ключевые слова: астероидная опасность, астероиды, сближающиеся с Землей, космический патруль, оптические наблюдения, электроракетный двигатель.

Eneev T.M., Efimov G.B., Akhmetshin R.Z. ON THE ASTEROID HAZARD PROBLEM. KIAM Preprint, Moscow, 2011.

Rezume.

Conception of a space patrol system destined to discover celestial bodies that may be dangerous for Earth is considered. The patrol system consisting of several spacecrafts located on the Earth orbit around the Sun with space telescopes onboard will allow to discover asteroids approaching the Earth orbit. The overwhelming majority of such bodies with diameters $\geq 200-500$ m may be defined during 5-6 years and the catalogue of their orbits may be done. Some known scientific programs of observing such celestial bodies from the Earth supposes to make a catalogue of $\approx 95\%$ of bodies with diameter ≥ 1 km till 2010 year. Hence the system of space observation may be considered as the following step in the program of observation of dangerous objects.

Our conception is based on the theory of origin of dangerous asteroids and evolution of their orbits. Description of “optical barrier” created by patrol system is given and some principal parameters of the system are analyzed. It's proved that the system of space telescopes may be put on the necessary orbits with the help of spacecraft with electro-rocket propulsion. The project of such spacecraft is now worked out for the expedition “Fobos-Ground”.

Содержание

| | |
|--|----|
| Аннотация | 2 |
| Введение | 3 |
| 1. Концепция космического патруля и «оптического барьера» в связи с проблемой астероидной опасности..... | 5 |
| 2. Популяция небесных тел, сближающихся с Землей и характеристики их орбит | 11 |
| 3. Оптико-геометрическая схема «оптического барьера» для наблюдения опасных небесных тел космическим патрулем | 18 |
| 4. Расстановка КА патруля на орбите Земли | 31 |
| Заключение..... | 33 |
| Литература..... | 34 |
| Приложение..... | 36 |

Введение

Проблема астероидной безопасности Земли уже достаточно давно привлекает внимание ученых и общества. Исследование следов катастроф космического происхождения на поверхности Земли и небесных тел, наблюдения астероидов, пролетающих вблизи Земли, примеры Тунгусского метеорита и других катастроф в XX веке показывают серьезность астероидной опасности для земной цивилизации и необходимость разработки мер для ее предотвращения. В последние годы проблеме астероидной опасности (безопасности) уделяется повышенное внимание: собираются конференции (например, [2, 3]), выходят книги [2, 4, 5]. Широко освещается проблема астероида 99942 Апофис, опасно сближающегося с Землей в 2029 году [2, 3].

Исследования, посвященные вопросам астероидной опасности, охватывают несколько направлений. Прежде всего – обнаружение опасных астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), и определение их орбит. В настоящее время имеется несколько национальных программ оптического наблюдения этих тел. Полагают, что они позволили выявить большую часть таких тел, размерами порядка километра и более [2, 6]. Целый ряд исследований и проектов рассматривают меры противодействия небесным пришельцам – изменения их орбит, разрушения на мелкие осколки, сгорающие в атмосфере и т.п. [2, 3, 7-9]. Однако указанные программы наблюдения опасных небесных тел далеко не полны – Тунгусский метеорит имел размеры около 50-70 метров, тогда как

оптические наблюдения с Земли до сих пор позволяют обнаруживать, как правило, лишь тела существенно больших размеров.

Для возможно полного выявления АСЗ Т.М. Энеевым в 2000 году была предложена концепция создания “оптического барьера” на гелиоцентрической орбите Земли, космического патруля, с помощью системы космических аппаратов (Т.М. Энеев. К вопросу об астероидной опасности / Материалы заседания Рабочей группы РАН «Риск и безопасность», 29 ноября 2000 г., Москва; также см. [10]). Имелось в виду, что система “оптического барьера” позволила бы, в принципе, за время порядка 5-6 лет провести каталогизацию большинства небесных тел, представляющих опасность для Земли, с размером от нескольких сот метров. Развивая концепцию “оптического барьера”, в ИПМ им. М.В. Келдыша проводился анализ его схемы, режимов наблюдения и характеристик орбит АСЗ. Была рассмотрена возможность использования электроракетных двигателей (ЭРД) для расстановки КА-патрулей на орбите Земли [11-18].

Наряду с этой системой были предложены и другие системы космического наблюдения опасных небесных тел [4, 19]. Система космического наблюдения может быть следующим шагом по выявлению опасных тел наряду с программами оптического наблюдения их с Земли.

Концепция системы космического обнаружения и каталогизации АСЗ, предложенная Т.М. Энеевым, опирается на опыт автора по исследованиям во всех направлениях, входящих в эту концепцию, – от вопросов происхождения АСЗ и эволюции их орбит до методов их наблюдения, определения орбит и траекторий полетов КА с ЭРД. Поэтому ниже приводится как текст этой концепции в первоначальном виде, так и материалы, в той или иной степени развивающие и детализирующие различные ее стороны. Приведен анализ характеристик орбит известных АСЗ, уточняющий исходные предположения о роли различных групп АСЗ в проблеме астероидной опасности. Обсуждается вопрос о происхождении популяции АСЗ, в том числе из далеких областей Солнечной системы (что может иметь отношение к характеристикам их орбит). Рассматривается схема наблюдения АСЗ с помощью системы КА патруля, расположенных на гелиоцентрической орбите Земли и создаваемого ими «оптического барьера». Исследуются основные особенности этой схемы и ее характеристики. Выявлен ряд трудностей, возникающих при наблюдении АСЗ, предложены некоторые пути их преодоления. Рассмотрена возможность расстановки КА-патрулей на орбите Земли с помощью ЭРД “малой тяги”, в сравнении с использованием традиционного химического двигателя.

1. Концепция космического патруля и «оптического барьера» в связи с проблемой астероидной опасности

Актуальность и серьезность проблемы астероидной опасности в настоящее время не вызывает сомнений. Новая наблюдательная технология, разработанная в последние годы, резко расширила возможности обнаружения и наблюдения малых тел (астероидов и комет) в окрестности земной околосолнечной орбиты, что позволило по-новому оценить опасность столкновения этих тел с Землей. Действительно, к настоящему времени обнаружено несколько сотен малых тел, размером от нескольких десятков метров до нескольких километров, приближающихся к орбите Земли. Существенная особенность орбит этих тел состоит в том, что их афелии, как правило, не выходят за пределы орбиты Юпитера. Другими словами, тела эти можно отнести к телам группы Аполлона. Статистическая обработка имеющегося материала привела к выводу, что число таких тел может превышать сотню тысяч, причем, число тел, размер которых превышает километр, больше тысячи. Эти данные позволяют сделать два важных вывода.

Во-первых, вероятность столкновения Земли с телами опасных размеров действительно велика. В пользу данного умозаключения говорит тот факт, что на протяжении двадцатого столетия Земля испытала, по крайней мере, два катастрофических столкновения с телами, пришедшими из космоса, произошедшими, к счастью, в безлюдных районах. Имеются в виду Тунгусская катастрофа 30 июня 1908 г., а также катастрофа в безлюдном районе Амазонки 13 августа 1930 г.

Во-вторых, указанный выше наблюдательный материал содержит данные о телах, орбиты которых, как правило, лежат внутри орбиты Юпитера. Другими словами, число тел, пересекающих орбиту Земли и имеющих сильно вытянутые эксцентричные орбиты, типа орбит долгопериодических комет, сравнительно невелико, и, на первых порах их можно не принимать во внимание. Напротив, в центре внимания должны находиться тела, имеющие сравнительно слабо эксцентричные орбиты, подобные орбитам тел групп Аполлона, Атона, Амура и орбитам короткопериодических комет группы Юпитера.

Далее, говоря об астероидной опасности, следует выделить ближайший промежуток времени, на протяжении которого указанная опасность будет практически актуальна для человечества. По-видимому, в качестве такого промежутка времени можно на первых порах принять характерное время порядка ста лет.

Наконец, в разноплановой проблеме астероидной опасности выделим в первую очередь задачу обнаружения и каталогизации потенциально опасных астероидов, как предваряющую другие ее задачи, логически вытекающие из постановки проблемы. Действительно, например, задача активного противодействия опасным астероидам, хотя должна в теоретическом плане рассматриваться параллельно с задачей их обнаружения, практически может быть эффективно решена лишь когда будет более или менее ясна общая картина характера и типов астероидов, которые могут столкнуться с Землей за заданный промежуток времени. Ясно, что для противодействия столкновению с астероидами размерами порядка ста метров и порядка километра должны быть разработаны разные средства.

Таким образом, сосредоточим свое первоочередное внимание на задаче обнаружения и каталогизации опасных астероидов, причем задачу поставим достаточно четко: возможно ли за обозримый промежуток времени (например, несколько лет) составить возможно полный каталог опасных астероидов с размерами порядка ста метров и более, которые могут столкнуться с Землей за указанные выше предстоящие сто лет? Каковы должны быть приемлемые в настоящее время адекватные технические средства? Ниже попытаемся ответить на эти вопросы.

1. Выше было отмечено, что каталог обнаруженных к настоящему времени астероидов, пересекающих орбиту Земли, содержит, как правило, астероиды, афелии которых находятся внутри орбиты Юпитера. Перигелии орбит этих астероидов, как правило, находятся между орбитами Земли и Венеры. Нетрудно показать, что большие полуоси орбит этих тел не превосходят трех астрономических единиц (*a.e.*). В таком случае, пользуясь третьим законом Кеплера, можно найти верхнюю границу периодов обращения вокруг Солнца указанных астероидов. Эти периоды не будут превосходить пяти с небольшим лет. Другими словами, астероиды данной группы будут не реже, чем раз в пять лет пересекать орбиту Земли, или, точнее, окрестности орбиты Земли. Данное обстоятельство представляется чрезвычайно важным. Действительно, если бы в окрестности орбиты Земли удалось установить надежное пятилетнее патрулирование соответствующих средств наблюдения за этой окрестностью, то за указанные пять лет были бы зафиксированы все доступные разрешающей способности данных средств астероиды группы Аполлона.

Далее будет рассмотрен один из возможных вариантов такого патрулирования, однако, прежде чем переходить к этому рассмотрению сделаем важное замечание по поводу одного аспекта проблемы.

Астероиды группы Аполлона, а также групп Амура и Атона не являются постоянными обитателями зоны земной группы планет и Главного пояса астероидов (т.е. зоны, простирающейся от орбиты Меркурия до орбиты Юпитера). Под влиянием планетных возмущений эти астероиды рано или поздно сближаются с Юпитером (входят в его сферу действия), приобретают за счет его поля тяготения дополнительную энергию и на сильно вытянутых эллиптических или даже гиперболических орбитах покидают зону земной группы планет (в последнем случае покидают вообще солнечную систему). Происходит своеобразная диффузия рассматриваемых тел. Вместе с тем ряд исследователей уже давно пришли к выводу, что популяции указанных тел, т.е. группы Аполлона, Амура и Атона, достаточно устойчивы и за время существования солнечной системы существенно не меняли свою численность. Но в таком случае должен существовать какой-то источник пополнения этих популяций. В настоящее время этот вопрос находится в стадии изучения. Допускается в частности, что таким источником может быть пояс Эджеверса-Койпера. Для рассматриваемой проблемы, однако, вопрос об источнике пополнения указанных популяций несущественен. Важно только, что такой источник существует. И коль скоро он существует, то происходит спорадическое пополнение указанных групп новыми членами, при существовании параллельного процесса ухода (диффузии) других членов групп. Оба указанных процесса уравнивают друг друга, и численность популяций примерно сохраняется на одном уровне (разумеется, в данную эпоху).

Описанный выше процесс должен быть оценен с точки зрения влияния его на задачу каталогизации опасных для Земли тел. Сразу отметим, что данный процесс для рассматриваемой задачи не является существенным. Среднее время пребывания тел указанных выше групп в зоне земной группы планет достаточно велико в рамках изучаемой проблемы (хотя и мало по сравнению с временем существования солнечной планетной системы), и, по разным оценкам составляет 10^7 - 10^8 лет. В любом случае это время существенно превосходит характерные времена задачи. Действительно, в качестве характерного времени, для которого должен быть создан каталог опасных тел, нами принят отрезок времени порядка ста лет (см. выше). Этот промежуток времени весьма мал по сравнению с указанными выше средними временами пребывания тел в группах Аполлона,

Амура и Атона, и, поэтому можно пренебречь возможностью неожиданного появления нового (тем более, опасного) тела в указанных популяциях. Такое пренебрежение эквивалентно отмеченному нами выше игнорированию тел, пересекающих орбиту Земли и имеющих сильно вытянутые эксцентричные орбиты. Вероятность столкновения с такими телами очень мала. В конечном счете, можно считать, что популяция наблюдаемых и каталогизируемых нами тел, на практически важном промежутке времени, достаточно устойчива и не меняет своей численности и состава.

2. Обратимся теперь к возможным техническим средствам, которые потенциально пригодны для решения задачи каталогизации тел, пересекающих орбиту Земли.

Построим псевдоцилиндрическую поверхность, содержащую орбиту Земли с осью направленной перпендикулярно ее плоскости. Очевидно, что астероиды группы Аполлона в ходе своего орбитального движения будут периодически пересекать эту поверхность. Если бы удалось контролировать эту поверхность, путем наблюдения вдоль нее с помощью оптических средств, то пересекающие ее астероиды за обозримый промежуток времени были бы зафиксированы. Такое наблюдение можно организовать с помощью системы космических аппаратов, размещенных на орбите Земли и оснащенных телескопами с хорошей разрешающей способностью. При этом, на каждом космическом аппарате (КА) достаточно иметь один телескоп, который, вращаясь относительно оси, направленной на Солнце, обзирал бы за определенный и относительно малый промежуток времени круговую полосу на небесной сфере с шириной, соответствующей угловому диаметру поля зрения телескопа. Разумеется, угол между направлением телескопа и направлением на Солнце, с одной стороны, и, угловая скорость вращения, с другой, должны быть соответствующим образом подобраны.

Рассмотрим конкретный вариант предлагаемой системы. Разместим на орбите Земли N космических аппаратов на равных расстояниях L друг от друга (см. рис.1). Угол между направлением на Солнце и направлением телескопа φ подберем таким, чтобы в ходе вращения телескопа в его поле зрения периодически попадали два соседних КА. Чем больше будет размещено КА на земной орбите, тем ближе будет значение φ к $\pi/2$. Очевидно, что при таком режиме обзора небесной сферы трудно будет наблюдать и фиксировать тела, проходящие вблизи КА. Большинство из них будет проходить окрестность земной орбиты, не попадая в поле зрения телескопа. Однако, тела, двигающиеся

достаточно далеко от КА, будут иметь сравнительно небольшую относительно КА угловую скорость движения на небесной сфере и за время одного оборота телескопа должны попасть в его поле зрения. Орбиты таких тел и смогут быть оценены в первом, хотя и грубом, приближении. Примем в дальнейшем, что “рабочее” пространство телескопа находится за пределами дальности L_{KP} , где $L_{KP} \leq L/2$. В таком случае, окрестности земной орбиты будут обеспечены полным обзором телескопов системы КА, причем, обзор пространства вблизи КА (при расстояниях $< L_{KP}$) будет обеспечен его соседями с разных сторон. Другими словами, будет обеспечена своеобразная “взаимоподдержка” системы КА друг другом.

Примем, что $N=6$ (рис.1); шесть космических аппаратов расположим на земной орбите на равном расстоянии друг от друга L , причем, в данном случае L будет равно одной астрономической единице. Угловое расстояние между аппаратами относительно Солнца будет, очевидно, равно 60° . Если при этом два соседних КА расположить на равном расстоянии от Земли (см. рис.1), то будет обеспечена прямая видимость с Земли всех КА, и, тем самым, прямая радиосвязь с ними (ни один из КА не будет затенен Солнцем). Благодаря такой радиосвязи можно будет оперативно вести окончательную траекторную обработку наблюдательных данных на Земле, что, безусловно, повысит надежность получаемых результатов. Предварительную обработку наблюдений, так же, как и их отбраковку, целесообразно будет проводить на борту КА.

Угол φ между направлением на Солнце с данного КА и на соседний КА будет, очевидно, равен 60° . Область визирования пространства при дальности $L/2$ будет в таком случае находиться примерно посередине между орбитами Земли и Венеры. Выше было отмечено, что перигелии орбит группы Аполлона находятся в своей большей части между орбитами Земли и Венеры. При этом наблюдается тенденция концентрации этих перигелиев именно к указанной середине между орбитами. Все же отдельные перигелии орбит могут более или менее сильно удаляться от этой середины в сторону земной орбиты. Астероиды, движущиеся по таким орбитам, при угле визирования φ равным 60° могут быть не обнаружены. Поэтому, по-видимому, целесообразно для угла φ принять значение несколько больше 60° .

Скорость вращения КА (и, вместе с ним телескопа, находящегося на его борту) должна быть подобрана таким образом, чтобы обнаруженный астероид за время одного оборота КА относительно направления на Солнце попал в поле

зрения телескопа за цикл наблюдения не менее четырех раз. Для этого достаточно иметь угловую скорость вращения КА, обеспечивающую один оборот КА вокруг направления на Солнце примерно около шести часов.

Под скоростью вращения, о которой говорилось выше, подразумевалась, конечно, средняя скорость вращения, которая, в конечном счете, может быть прерывистой – с остановкой вращения телескопа на период экспозиции данного участка небесной сферы. Такая остановка может быть обеспечена с помощью различных технических средств, использующих вращающиеся на борту массы и не требующих расхода рабочего тела. Дискретным может быть также изменение направления оси вращения на Солнце (например, один раз в сутки).

При наличии на борту КА телескопа с разрешающей способностью в 22 звездных величины окажется возможным зафиксировать астероиды размером порядка 100 метров и более, пересекающие окрестности орбиты Земли. Здесь, конечно, возникнут большие трудности, связанные с необходимостью неоднократной идентификации астероидов на фоне большого числа звезд. Однако при наличии достаточно емкой оперативной памяти бортовой ЭВМ эти трудности окажутся вполне преодолимы.

Такова в общих, и, пока довольно грубых чертах, одна из возможных схем патрулирования окрестностей земной околосолнечной орбиты. Несомненно, что параметры этой схемы должны быть тщательно проанализированы и обчислены, прежде, чем будет сделано окончательное заключение о ее практичности и надежности.

Обсуждение проблемы космического патрулирования неизбежно упирается в вопрос о базовой технике, с помощью которой эта проблема должна решаться. Представляется, что в качестве такой базовой техники могут быть использованы уже существующие или находящиеся в стадии разработки те или иные ее образцы. Например, в качестве ракеты, выводящей патрульный КА на промежуточную околоземную орбиту, может быть использован носитель среднего класса типа “Союз”. Дальнейший перевод на околосолнечную земную орбиту патрульного КА может быть осуществлен с помощью аппарата, разрабатываемого в рамках проекта “Фобос-Грунт”, снабженного электро-ракетными двигателями малой тяги (ЭРД). Этот же аппарат может поддерживать функционирование патрульного КА на гелиоцентрической орбите. Подобный путь решения проблемы может оказаться экономически более целесообразным по сравнению с другими возможными вариантами.

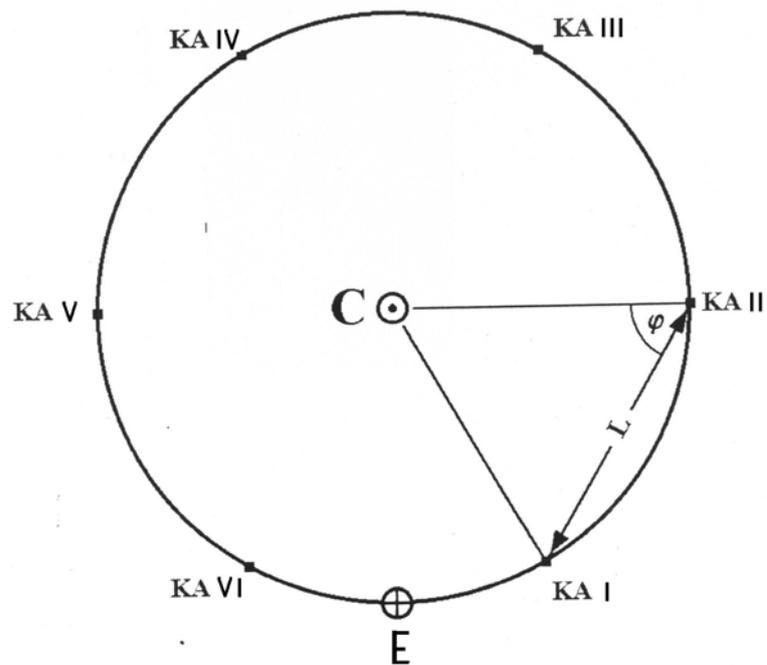


Рис. 1. Система КА-патрулей на гелиоцентрической орбите Земли.

2. Популяция небесных тел, сближающихся с Землей и характеристики их орбит.

Для построения системы выявления малых небесных тел, сближающихся с Землей, важно иметь представление об их составе и параметрах их орбит. Подавляющее большинство этих тел составляют астероиды групп Амура, Аполлона, Атона и кометы группы Юпитера.

Астероиды группы Аполлона имеют орбиты, заходящие внутрь орбиты Земли, с гелиоцентрическими расстояниями в перигелии $q \leq 1 \text{ a.e.}$; расстояния в афелии Q , как правило, у них $Q \sim 2.2-5 \text{ a.e.}$, лежащие в пределах орбиты Юпитера. Астероиды группы Амура не достигают орбиты Земли, их расстояния в перигелии $q \geq 1.03 \text{ a.e.}$, однако некоторые из них могут приближаться к орбите Земли ближе, чем на 0.05 a.e. , попадая тем самым в число «потенциально опасных» АСЗ. (Потенциально опасными АСЗ считаются тела, которые приближаются к орбите Земли ближе, чем на $0.05 \text{ a.e.} \approx 7.5 \text{ млн. км}$). Наблюдение астероидов группы Амура подобно наблюдению астероидов группы Аполлона. У астероидов группы Атона орбиты имеют большую полуось меньше одной a.e. , т.е. $\frac{1}{2}(Q + q) < 1 \text{ a.e.}$; у них q лежит глубоко внутри орбиты Земли, а Q может быть больше и меньше 1 a.e. Число известных нам сегодня АСЗ этой группы, значительно меньше, чем у групп Аполлона и Амура, однако объясняться это может тем, что затруднено их наблюдение с Земли.

Для комет группы Юпитера имеем, как правило, $q \sim 0.8-2 \text{ a.e.}$, $Q \sim 5-6 \text{ a.e.}$ Долгопериодические кометы, с афелием за орбитой Юпитера, особенно опасны из-за высокой скорости сближения с Землей и трудности их заблаговременного обнаружения, но их сравнительно немного, и мы их не рассматриваем.

2.1. Современные сведения о популяции АСЗ и анализ их орбит. В настоящее время проводится наблюдение приближающихся к орбите Земли метеоритов, астероидов и комет оптическими средствами с Земли в соответствии с рядом международных программ [3]. Программа *Spaceguard* ставила своей задачей примерно к 2010 году выявить около 95% опасных астероидов с размерами $\approx 1 \text{ км}$; цели этой программы считаются выполненными, продолжение наблюдения АСЗ будет выявлять небесные тела с меньшими размерами [3, 6].

В каталоге АСЗ Института прикладной астрономии РАН в С-Петербурге 2001 года [20] общее число их – 1366. Из них группы Амура – 611 ($\sim 47 \%$), группы Атона – 111 ($\sim 8 \%$), и группы Аполлона – 644 ($\sim 45 \%$). Сведения по каталогу 2010 г. Смитсоновского института [21], при существенном увеличении числа АСЗ (около 6400), не изменяют эти соотношения: к группе Амура принадлежит 3153 (49.4 %), к группе Аполлона – 2662 (42 %), и к группе Атона – 551 (8.6 %) тел. В табл. 2.1 собраны данные о темпах открытия АСЗ групп Аполлона и Атона, а также потенциально опасных АСЗ, за последние десять лет. В группе Амура только небольшая часть «потенциально опасны» и мы не даем отдельного учета о темпах открытия АСЗ этой группы. Изменение числа открытых АСЗ меняет и оценки их общего количества: популяция тел с диаметром более 100 м оценивалось ранее в 70–160 тысяч, размерами около 1 км и более – около 1.5 тыс. Современные оценки увеличивают число АСЗ вдвое – 320 тысяч размером более 100 м, размером около 1 км и более – порядка 3 тысяч. Число потенциально опасных АСЗ к 2010 году составило по данным [21] 1046 тел.

Таблица 2.1. Темпы открытия АСЗ в XXI веке

| Год/ АСЗ групп | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Апол- лона | 91 | 143 | 180 | 183 | 256 | 297 | 303 | 322 | 427 | 423 |
| Атона | 22 | 23 | 33 | 33 | 54 | 52 | 48 | 68 | 57 | 60 |
| Опасн АСЗ | 48 | 54 | 66 | 65 | 82 | 90 | 76 | 83 | 97 | 18 |

Наибольшее число потенциально опасных АСЗ составляют астероиды группы Аполлона. Условия их наблюдения с КА патруля зависят от наклона i их орбит, а также от скорости, с которой они пересекают окрестность орбиты Земли, а скорость, в свою очередь, – от параметров Q и q (расстояния в афелии и перигелии) их орбит. Распределение астероидов группы Аполлона по расстоянию q в перигелии и по наклону орбиты i по каталогу ИПА [20], собраны в табл.2.2. Из этих данных видно, что АСЗ достаточно сильно различаются по характеристикам орбит, и условия наблюдения их могут быть различны. Видно также, что предположение (приведенное в разделе 1) о концентрации перигелиев орбит АСЗ группы Аполлона в районе середины расстояния между орбитами Земли и Венеры (≈ 0.85 а.е.) не выполняется: более трети АСЗ имеют перигелий внутри орбиты Венеры и одна треть – ближе к орбите Земли, чем 0.85 а.е. Что касается наклона орбит АСЗ, число их с большим наклоном (вопреки предположению в разделе 1) достаточно велико: $i > 30^\circ$ имеет 11,6 % АСЗ группы Аполлона; $i > 15^\circ$ – 38 % АСЗ группы.

Таблица 2.2. Распределение АСЗ группы Аполлона по величине наклона i орбиты и расстояния q в перигелии.

| q [a.e.] | N | % | i [град] | N | % |
|------------|-----|------|--------------|-----|------|
| ≤ 1.0 | 608 | 90.6 | $> 10^\circ$ | 437 | |
| ≤ 0.9 | 427 | 66.3 | $> 15^\circ$ | 245 | 38 |
| ≤ 0.8 | 299 | 46.4 | $> 20^\circ$ | 175 | 27 |
| ≤ 0.7 | 213 | 33.1 | $> 25^\circ$ | 111 | 17.2 |
| ≤ 0.6 | 144 | 22.4 | $> 30^\circ$ | 75 | 11.6 |
| ≤ 0.5 | 85 | 13.2 | $> 35^\circ$ | 61 | 9.5 |
| ≤ 0.4 | 43 | 6.7 | $> 40^\circ$ | 33 | 5.1 |
| ≤ 0.3 | 22 | 3.4 | $> 45^\circ$ | 19 | 3 |
| ≤ 0.2 | 7 | 1.3 | $> 50^\circ$ | 18 | 2.8 |
| | | | $> 55^\circ$ | 11 | 1.7 |

2.2. АСЗ группы Атона. Другую часть опасных тел составляют АСЗ группы Атона. Их значительно меньше, чем в группе Аполлона, поэтому первоначально считалось (раздел 1), что при оценке астероидной опасности ими можно пренебречь. Сейчас их число (и роль в оценке АСЗ) увеличилось, так как их малочисленность определялась, по-видимому, трудностью наблюдения с Земли.

Обнаружение в 2003 году астероида 99942 Апофис, принадлежащего к группе Атона и тесно сближающегося с Землей в 2029 и 2036 годах, привлекло большое внимание. Астероид назван по имени египетского бога Апопа, по-

гречески – Апофиса, змея-разрушителя, живущего в подземном мире и посягающего на Солнце во время его ночного перехода (Aporhis, ранее 2004 MN₄, имеет $e = 0,191$, $a = 0,922$ а.е., $i = 3,331^\circ$, период обращения $P = 323,587$ дней, $q = 0,746$ а.е., $Q = 1,099$ а.е.; размер ~ 300 м, оценка мощности взрыва при падении на Землю ~ 500 Мегатонн). Наблюдение и детальные исследования орбиты Апофиса, сближений его с Землей и эволюции орбиты в результате этих сближений обнаружили факты, давшие ряду соображений по астероидной опасности новое освещение.

Так, у Апофиса из ближайших после его открытия 12 лет удобны для наблюдения и уточнения орбиты лишь 3-4 окна небольшой длительности, мало удобных окон и для радиолокационных наблюдений. Появление АСЗ группы Атона в качестве опасных тел имеет поэтому фактор неожиданности, затруднено и уточнение их орбит, и принятие заранее мер по противодействию им.

Анализ эволюции орбиты Апофиса после тесного сближения с Землей в 2029 году обнаружил, что его пролет вблизи Земли на высоте ~ 40 тыс. км (орбиты геостационарной) приводит к сильному изменению орбиты астероида. После прохождения периодичность сближений Апофиса с Землей существенно уменьшается [22]. Из-за неточности знания орбиты Апофиса прогноз измененной орбиты дает целый ряд вариантов, причем большая часть их них имеет периодичность сближений $\sim 2-3$ года. Возможно дробление астероида на части (при рыхлости структуры астероида, из-за приливных сил), каждая из которых становится опасным телом со своей несколько отличной орбитой (размер Апофиса $\sim 300-350$ м, так что части его могут представлять опасность).

Анализ возможности противодействия Апофису подчеркнул, что для этого требуется время и серьезные меры, в том числе международного характера [2, 3]. Необходимо уточнение его орбиты, посылка зонда для встречи с астероидом, исследование его физических и механических свойств. Требуются меры и усилия и технического, и дипломатического характера из-за масштаба противодействия и серьезности последствий в случае даже частичной их неудачи, опасности возникновения паники при оповещении населения и т.п. Анализ показывает резкое возрастание затрат на противодействие астероиду после прохождения им Земли в 2029 г., в сравнении с затратами на противодействие до 2029 г. [7-9]. Прохождения АСЗ вблизи Земли наблюдались и до Апофиса. Но они имели большие, чем у Апофиса, высоты прохождения над Землей ($\sim 100-150$ тыс. км), и большие относительные скорости пролета (меньшее время взаимодействия), так как эти АСЗ принадлежали к группе Аполлона, их пролет Земли происходил

вблизи перигелия орбиты, тогда как у Апофиса – вблизи афелия его орбиты. Изменение их орбит в результате сближения было меньшим, и анализ этих изменений не привлекал особого внимания.

Таким образом, обнаружение астероида Апофис, анализ его орбиты и ее эволюции подчеркнул важные обстоятельства:

- Опасность АСЗ группы Атона, трудность их наблюдения, случайность их обнаружения и, тем самым, элемент внезапности появления;
- Опасный характер эволюции орбит АСЗ после их сближения с Землей;
- Масштаб мер по противодействию опасным АСЗ, усложнение ситуации при отсрочке этих мер.

Для АСЗ группы Атона пересечение окрестности орбиты Земли происходит вблизи области афелия их орбит, скорость их движения меньше скорости движения Земли по орбите, что может быть удобным с точки зрения условий наблюдения этих АСЗ с КА патруля.

2.3. Представления о происхождении популяции АСЗ. Общепринято, что небесные тела, находящиеся вблизи орбиты Земли, являются мигрантами. Механизм миграции их из Главного пояса астероидов давно привлек к себе внимание ученых, исследовавших эволюцию их орбит вследствие резонансов с движениями больших планет, через так называемые люки Кирквуда. Осколки этих тел, выпавшие на Землю, известны как метеориты. Однако их пребывание вблизи Земли неустойчиво – воздействие планет земной группы постоянно выбрасывает часть их из этой области вследствие резонансов.

На рис.2 показаны орбиты нескольких АСЗ (из числа давно обнаруженных, [23]), причем их орбиты повернуты в плоскости эклиптики так, что большие полуоси орбит совмещены. Видны «люки», образованные в множестве орбит действием больших планет – Земли, Венеры и Меркурия – результат резонансов в движении АСЗ и планет. Подобные резонансы, в первую очередь с движением Юпитера, привели к изменению их первоначальных орбит в Главном поясе астероидов, и к переходу в область вблизи планет земной группы. Популяция АСЗ должна пополняться для сохранения ее численности, однако приход новых АСЗ только из Главного пояса, как предполагают, является недостаточным.

Высказывается предположение (см. выше, раздел 1), что значительная часть АСЗ являются мигрантами из удаленных областей Солнечной системы, поясов Эджеверса-Койпера [24-26]. Происхождение этой части семейства АСЗ может быть прояснено благодаря модели образования Солнечной системы,

разработанной в 70-х годах в ИПМ им. Келдыша [27-28]. Согласно этой модели, формирование планет происходило из газо-пылевых планетозималей, которые сохраняли свое состояние достаточно долго за счет подогрева от распада короткоживущих изотопов, входивших в состав первоначального газо-пылевого облака. В области за планетами гигантами ко времени истощения изотопов не успели образоваться планеты и сохранились многочисленные тела относительно небольших размеров. На основании этой модели в 1979 году было высказано предположение о существовании объектов транснептуного пояса¹ [29, 24]. Было получено изображение одного из таких объектов на телескопе в Зеленчуке, но из-за плохих условий наблюдения оно не было подтверждено и опубликовано.

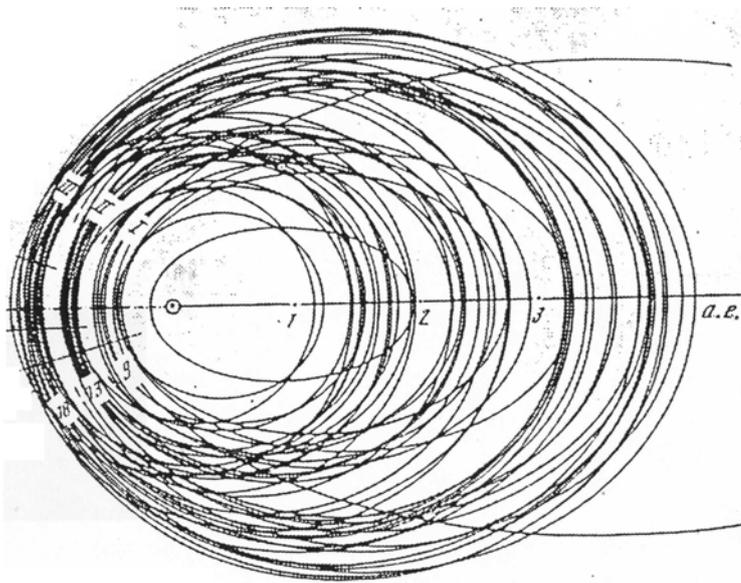


Рис.2. Орбиты нескольких АСЗ с совмещением больших полуосей их орбит. Видны «люки» образованные воздействием Земли, Венеры и Меркурия [23].

С тех пор число объектов транснептуного пояса превысило несколько сот. Изменение их орбит за счет взаимных возмущений и возмущений от планет гигантов приводило к их столкновениям; осколки ядер рождали протоастероиды, а осколки ледяных оболочек могли стать прародителями комет. В процессе возмущения большими планетами и взаимных возмущений часть этих тел постепенно переместились внутрь орбиты Юпитера и превратилась в кометы и

¹ Гипотеза о существовании занептуных поясов, в связи с обсуждением происхождения Плутона, была изложена Т.М. Энеевым сперва в Препринте ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР № 116 за 1979 год, а затем в статье [24]. Однако в статье часть соображений о занептуных поясах была опущена; эта часть препринта приводится в Приложении. Полностью он помещен на сайте ИПМ.

астероиды, сближающиеся с Землей. Другая часть могла получить сильно вытянутые орбиты, вплоть до орбит ухода из пределов Солнечной системы.

Механизм миграции этих тел из областей за Нептуном на их современные орбиты был объяснен Е.И. Казимирчак-Полонской на примере комет [30]. Гравитационное поле планет (или взаимные возмущения астероидов) изменяет первоначальные орбиты тел, делая их сильно эллиптическими и усиливая воздействие планет на них. Пересекая орбиты планет, эти тела подвергаются очередному возмущению, – с эволюцией орбиты во внутрь Солнечной системы, либо на ее границу. Те, что сдвигаются внутрь системы, как бы передаются от одной большой планеты к другой и могут приходить в конце пути в область планет земной группы. Афелий их конечных орбит должен, как правило, находиться внутри орбиты Юпитера, иначе они снова вступают во взаимодействие с Юпитером.

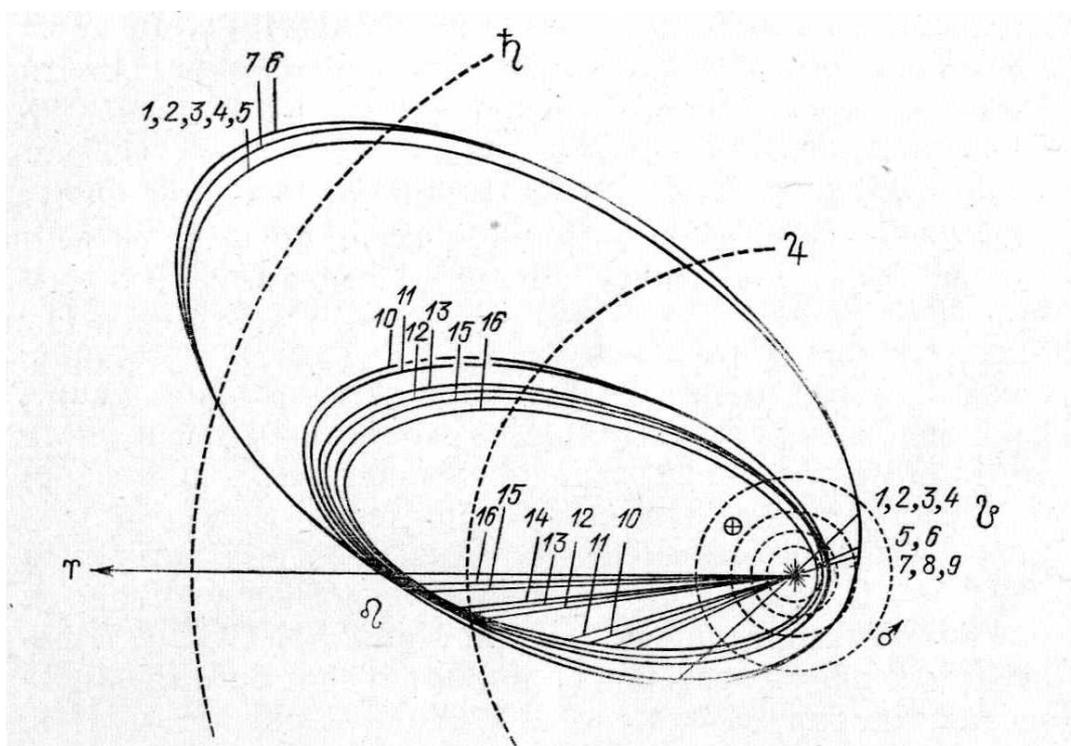


Рис.3. Эволюция орбиты астероида 2824 PL под действием возмущений Юпитера. Показано 16 оскулирующих орбит с интервалом в 25 лет [23].

Пример такой эволюции представлен на рис.3, где даны результаты расчета эволюции орбиты астероида 2824 PL, сближающегося с Землей, на 16-ти периодах его движения вокруг Солнца, – с изменением как перигелия, так и афелия орбиты. В конце исследованного периода орбита астероида пересекает орбиту Юпитера, так что ее эволюция еще не закончена. Наличие АСЗ или комет с сильно эллиптическими орбитами (афелий за орбитой Юпитера) – важно с точки

зрения астероидной опасности, так как скорости подхода их к Земле большие, а возможности их наблюдения менее благоприятные, чем у основной массы АСЗ.

Эволюция малых тел из пределов пояса Эджвуда–Койпера в настоящее время активно изучается многими авторами, например, в большом цикле работ С.И. Ипатова [31-32]. Исследователи по-разному оценивают соотношение числа АСЗ, мигрировавших из отдаленных областей и из Главного пояса [26], однако для наших целей – их выявления и каталогизации – главным является их принадлежность к группам Аполлона, Амура и Атона.

3. Оптико-геометрическая схема «оптического барьера» для наблюдения опасных небесных тел космическим патрулем.

Исследуем схему наблюдения и фиксирования малых тел вблизи орбиты Земли с помощью системы космического патруля. Необходимо сформулировать требования к бортовым телескопам и режимам наблюдения, которые обеспечили бы обнаружение и фиксирование большинства малых тел, пролетающих вблизи орбиты Земли, – сначала в принципиальном плане. Ряд вопросов, относящихся к деталям наблюдения АСЗ с помощью этой схемы, – параметров телескопа, режимов наблюдения, способов обработки измерений и т.п., – требует дополнительного исследования.

Рассмотрим две системы координат: абсолютную $Oxyz$, и относительную $Ox'y'z'$, начала координат которых O находятся в Солнце, а оси Oz и Oz' совпадают и перпендикулярны плоскости эклиптики. Оси Ox, Oy и Ox', Oy' – в плоскости эклиптики, причем Ox направлена, например, в точку весеннего равноденствия, а Ox' проходит через центр Земли, и, следовательно, система координат $Ox'y'z'$ вращается вместе с Землей вокруг оси Oz относительно системы $Oxyz$ (рис.4).

Если разместить КА патруля на гелиоцентрической орбите Земли, то во вращающейся системе координат они будут неподвижны. Примем, что число КА $N = 6$, и они находятся в вершинах правильного шестиугольника (рис.4). Будем считать, что на каждом КА находится по 2 телескопа. Один телескоп направлен «вперед» – в направлении соседнего КА, движущегося по орбите впереди данного аппарата по ходу движения. Второй телескоп направлен «назад» – в направлении КА, движущегося по орбите позади данного аппарата. Каждый телескоп сканирует вертикальную полосу $[-\nu^* \leq \nu \leq \nu^*]$, где $\nu^* \leq 90^0$ – максимальный угол ν возвышения телескопа над плоскостью эклиптики (рис.5).

Будем считать, что *основной рабочий диапазон* дальности каждого телескопа – лежит в области от 0.5 а.е. до 1 а.е. (или несколько больше), так как ближнюю к телескопу часть обозреваемой области между двумя КА АСЗ пересекает с большой угловой скоростью (см. рис.6). КА будут регулярно попадать в поле зрения телескопов соседних аппаратов, что дает возможность отслеживать и корректировать их движение по орбите. Такое расположение и ориентацию КА патруля со “взаимной поддержкой” назовем “*конфигурацией схемы наблюдения*”.

3.1 Режимы сканирования. Сканирование пространства каждым из бортовых телескопов может происходить либо в непрерывном режиме, либо в дискретном. В первом случае телескоп вращается с некоторой постоянной угловой скоростью в вертикальном направлении – сначала снизу вверх, затем обратно, одновременно поворачиваясь вокруг вертикальной оси, проходящей через КА, с угловой скоростью 360^0 за 365.25 суток, или $\approx 1^0$ в сутки. В этом случае сохраняется *конфигурация схемы наблюдения*, и во вращающейся системе координат $Ox'y'z'$ телескопы сканируют вертикальную полосу. Промежуток времени, в течение которого сканируется вертикальная полоса, назовем «*сеансом сканирования*».

Во втором случае телескоп последовательно фиксируется в абсолютной системе координат на соседних участках небесной сферы на время экспозиции $\Delta t_{\text{Э}}$ (например, 100-120 секунд). Получаемые изображения будем называть «*кадрами наблюдения*». Размер кадра наблюдения зависит от величины рабочего поля телескопа, от его угла раствора δ . От кадра к кадру телескоп может поворачиваться как в вертикальном направлении, так и вокруг вертикальной оси, со средней скоростью такой же, как и в непрерывном режиме. Но возможен вариант, когда вокруг вертикальной оси поворот происходит реже, например, один раз за сутки – но зато сразу на угол $360^0/365.25 \approx 1^0$, чтобы восстановить конфигурацию схемы наблюдения (рис.7). В таком случае промежуток времени между поворотами вокруг вертикальной оси, восстанавливающими конфигурацию, назовем «*сеансом наблюдения*».

Рассмотрим этот вариант подробнее. В начале сеанса сканирования с помощью систем стабилизации на КА для каждого телескопа фиксируется своя *плоскость визирования*. Для телескопа, находящегося на КА₁, и направленного вперед – в сторону соседнего аппарата КА₂, это будет плоскость, проходящая через направление КА₁-КА₂ (рис.8), перпендикулярная плоскости эклиптики. На время сеанса сканирования плоскость визирования фиксирована по отношению к телескопу, что позволяет выделять АСЗ на фоне неподвижных звезд. В

неподвижной системе координат $Oxyz$ она смещается поступательно вместе с КА, оставаясь параллельной начальному положению. Телескоп вращается в плоскости визирования, обзревая кадр за кадром диапазон углов $[-\nu^* \leq \nu \leq \nu^*]$. Количество кадров k зависит от ν^* и от величины рабочего поля телескопа, которое представляет из себя квадрат со стороной δ (δ – угол раствора телескопа) и равно $k \approx 2\nu^*/\delta$. Продолжительность сеанса сканирования составит $\Delta t_{\text{э}} \cdot k$. Затем, если достаточен запас времени, телескоп переходит к повторному сканированию вертикальной полосы, но в обратном направлении. По окончании сеанса наблюдения плоскость визирования необходимо повернуть так, чтобы восстановить конфигурацию схемы наблюдения, то есть область, обозреваемая телескопом в течение суток, должна поворачиваться со средней угловой скоростью $\approx 1^\circ$ в сутки.

Оценим время, необходимое для сканирования вертикальной полосы. Допустим, что: $\nu^* = 90^\circ$; продолжительность экспозиции $\Delta t_{\text{э}}$ вместе со временем, необходимым для поворота телескопа, составляет 120 секунд, или 2 минуты (для сравнения, в [19] принято $\Delta t_{\text{э}} = 100$ секунд). Если угол раствора телескопа равен $\delta = 0.25^\circ$, то одна полоса будет состоять из $2\nu^*/\delta = 720$ кадров; продолжительность сканирования составит 1440 минут, или ровно сутки. Итак, при угле δ раствора телескопа в четверть градуса, за сутки вертикальная полоса по ν в пределах $[-90^\circ, 90^\circ]$ может быть просканирована один раз. Соответственно, при углах раствора $0.5^\circ, 1^\circ$ и 1.5° она может быть просканирована – 2, 4 и 6 раз.

Если в течение суток вертикальная полоса может быть просканирована несколько раз, то возможен еще один режим работы телескопа, при котором по окончании сеанса сканирования плоскость визирования поворачивается вокруг вертикальной оси на угол δ и сканируется соседняя полоса, примыкающая к первой (рис.9). Если за сутки удастся просканировать n вертикальных полос, то суммарная ширина области, которая будет проконтролирована телескопом, составит $n\delta$. При углах раствора телескопа $\delta = 0.25^\circ, 0.5^\circ, 1^\circ$ и 1.5° ширина наблюдаемой области составит соответственно $0.25^\circ, 1^\circ, 4^\circ$ и 9° .

3.2 Область оптического барьера. Рассмотрим теперь, что представляет собой область, обозреваемая совместно всеми телескопами. Если пренебречь сдвигом плоскостей визирования за время сканирования, то два телескопа – один на КА₁, второй на КА₂, направленные навстречу друг другу, будут обозревать некоторую окрестность вертикальной плоскости, в которой находятся эти два

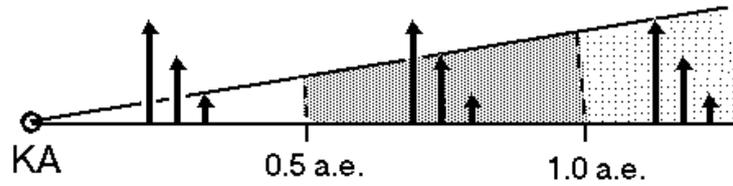


Рис. 6. Пересечение полосы визирования с КА-патруля на разных расстояниях от него астероидом при различных скоростях подхода к орбите Земли. Рабочий диапазон дальности наблюдения – 0.5-1 *a.e.*; стрелки – скорости пересечения АСЗ сектора визирования. Блеск АСЗ пропорционален $\sim 1/\rho^2$, где ρ – расстояние его до КА.

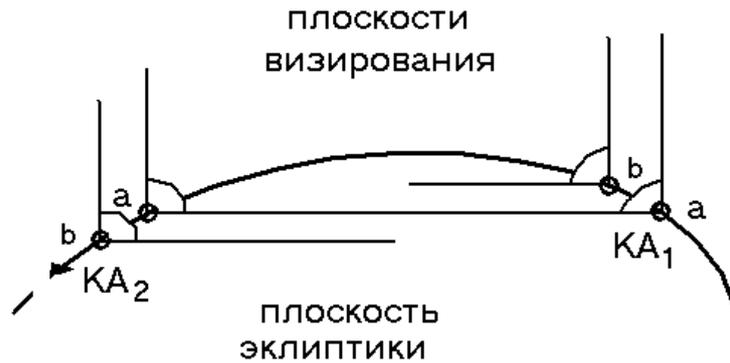


Рис. 7. Изменение конфигурации схемы наблюдения в зоне КА₁-КА₂ оптического барьера за время сеанса наблюдения: в его начале (а) плоскости визирования аппаратов КА₁ КА₂ совпадают, в конце его (b) - параллельны, но разошлись – из-за движения КА по орбите Земли. Конфигурацию следует восстановить – поворотом плоскостей визирования КА.

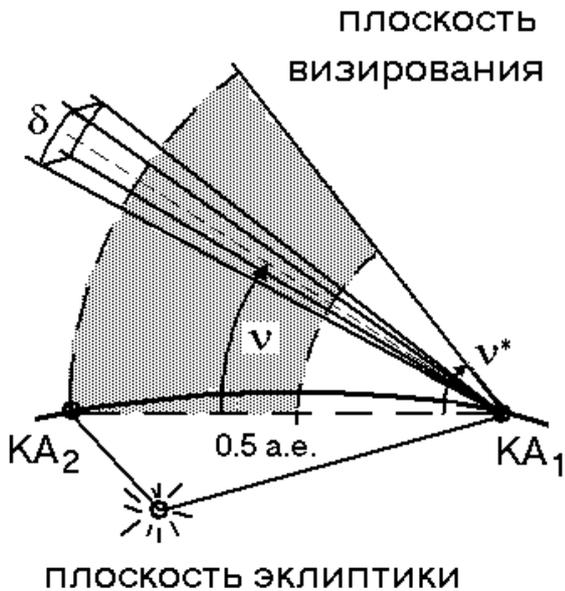


Рис.8. Схема визирования в вертикальной плоскости по v : $[-v^* \leq v \leq v^*]$. Кадр наблюдения соответствует углу δ раствора телескопа.

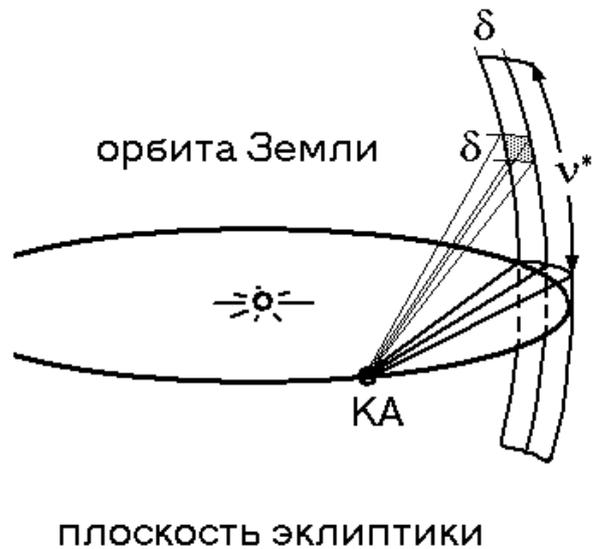


Рис.9. Схема визирования вертикальной полосы несколько раз в сутки в режиме с поворотом плоскости визирования на угол δ .

КА (рис.5). Все плоскости вместе ограничивают шестигранный цилиндр. Область, обозреваемая совместно всеми телескопами, – телесную окрестность шестигранного цилиндра, – будем называть «*оптическим барьером*». Область эта неравномерна по ширине и по высоте над плоскостью эклиптики (рис.10).

Чтобы “оптический барьер” оправдывал свое название, он должен обеспечить обнаружение возможно большего числа АСЗ, по возможности, наименьшего размера (заведомо меньше одного километра). Телескопами КА патруля могут наблюдаться астероиды, пересекающие область оптического барьера, и при этом достаточно яркие, поэтому часть из них может не фиксироваться средствами патруля, если они невелики по размерам, или пересечения их орбит с оптическим барьером лежат за пределами рабочих диапазонов дальностей телескопов. Такими будут, например, большая часть АСЗ, принадлежащих к группе Амура, во время их приближения к орбите Земли.

Но даже если астероид достаточно яркий и пересекает оптический барьер в пределах основного рабочего диапазона дальностей телескопа – это не гарантирует его обнаружения. Так как при восстановлении конфигурации схемы наблюдения каждая плоскость визирования (и область барьера как целое) поворачиваются на $\approx 1^\circ$, то в случае, если ширина барьера δ меньше 1° , будет возникать «зазор» (рис.11). Астероиды, движущиеся навстречу направлению поворота, и перед поворотом попадающие в область «зазора», сразу после поворота окажутся по другую сторону барьера, таким образом «проскочив» его незамеченными. Отсюда следует, что ширина области барьера δ должна быть, по крайней мере, больше угла поворота в 1° при восстановлении конфигурации.

Этот же механизм, связанный с дискретностью поворота телескопа, из-за которого астероид может «проскочить» барьер незамеченным, действует и при повороте телескопа от кадра к кадру. Если астероид движется навстречу направлению, в котором поворачивается телескоп при смене кадра, и к моменту поворота окажется на границе соседних кадров или вблизи нее, то в новом кадре он будет наблюдаться в течение короткого промежутка времени, после чего выйдет за его пределы (рис.12). Этого времени может оказаться недостаточно, чтобы на ПЗС-матрице телескопа сформировался след астероида. Отсюда следует, что необходимо обеспечить частичное перекрытие соседних кадров. Наименьшая необходимая величина перекрытия должна быть $\Delta t_{\text{Э}} \cdot \omega$, где ω – максимально возможная угловая скорость астероида по отношению к телескопу в пределах его рабочего диапазона дальностей. Например, при

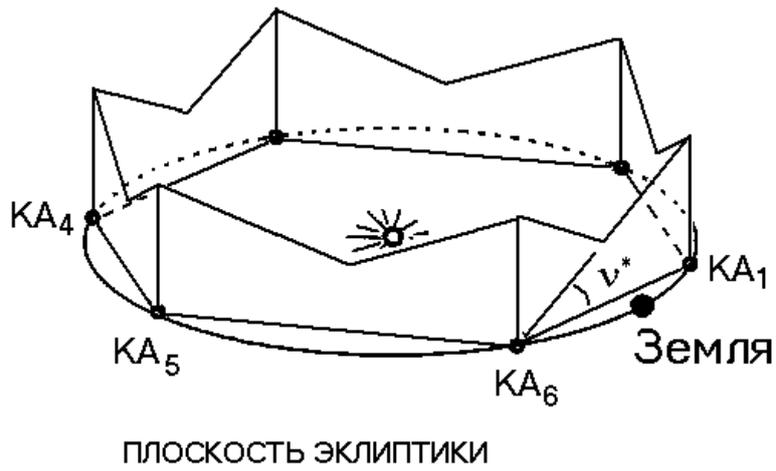


Рис.10. Область оптического барьера над плоскостью эклиптики, общий вид при $N = 6$, $\nu^* \approx 15^\circ$. Под плоскостью эклиптики – аналогично.

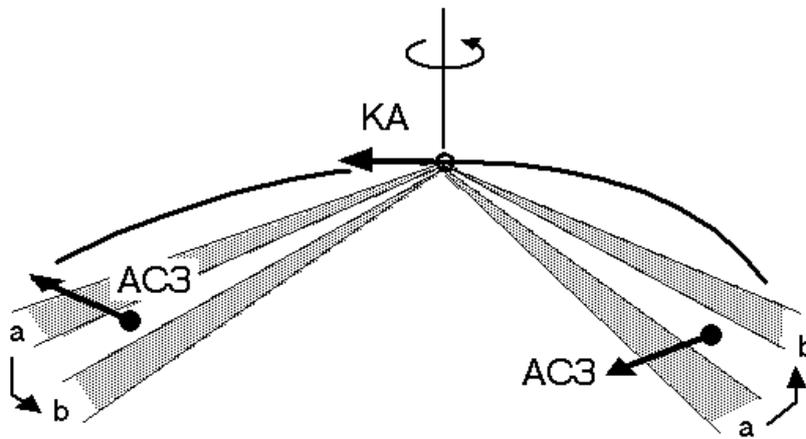


Рис.11. Астероид может проскочить в зазор оптического барьера (ОБ) при сдвиге плоскости визирования в конце сеанса.

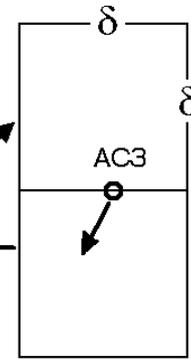


Рис.12. Возможность зазора в ОБ при переходе от кадра к кадру без частичного их перекрытия.

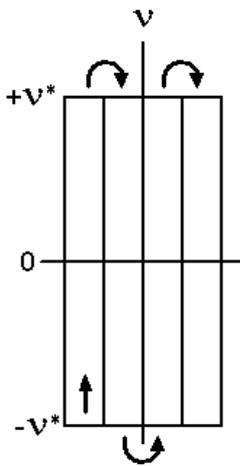


Рис.13. Схема расширения полосы ОБ при сканировании их несколько раз “по вертикали”;

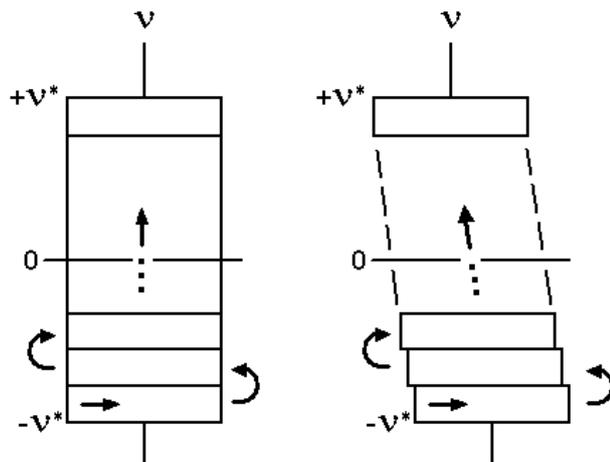


Рис.14. Схема сканирования ОБ “по горизонтали” с поворотом плоскости визирования раз за сеанс или непрерывно.

$\Delta t_{\text{Э}} = 120$ секунд и $\omega = 3^{\circ}$ в сутки она составит $0.25'$, т.е. четверть угловой минуты, или $1/60$ часть высоты кадра для $\delta = 0.25^{\circ}$. Для $\delta \geq 0.5^{\circ}$ это будет менее 1% кадра.

По этой же причине необходимо обеспечить частичное перекрытие соседних сканируемых полос при увеличении ширины области сканирования. Величина перекрытия в этом случае оказывается существенно большей, чем при перекрытии кадров. Если две соседние полосы сканируются «навстречу», одна в обратном направлении по отношению к другой, то величина перекрытия должна быть $2k \cdot \Delta t_{\text{Э}} \cdot \omega$, где $2k$ – количество кадров в двух вертикальных полосах, $2k \cdot \Delta t_{\text{Э}}$ – промежуток времени между сканированием первого кадра первой полосы и последнего кадра второй полосы, которые примыкают друг к другу. При угле δ раствора телескопа в 1° каждая полоса будет состоять из 180 кадров, и тогда величина перекрытия должна быть: $2 \cdot 180 \cdot 1/4' = 90' = 1.5^{\circ}$, что нереально. При угле раствора телескопа в 1.5° каждая полоса будет состоять из 120 кадров, и тогда величина перекрытия должна составить 1° . Если соседние полосы будут сканироваться в одном и том же направлении, (рис.13), промежуток времени между сканированием соседних кадров в двух полосах будет равен $k \cdot \Delta t_{\text{Э}}$, величина перекрытия должна быть в 2 раза меньше, и составит 0.75° и 0.5° соответственно для $\delta = 1^{\circ}$ и 1.5° . Доля пересечения от ширины кадра составит 75% и 33%, что также довольно много.

Гораздо экономнее будет режим сканирования расширенной области барьера не по вертикали, а по горизонтали (рис.14). При углах δ раствора телескопа в 0.5° , 1° и 1.5° в горизонтальных полосах будет соответственно по 2, 4 и 6 кадров. Величина перекрытия составит во всех случаях $1/30$, или 3.3% кадра, если полосы сканируются в разных направлениях, и в два раза меньше, если в одном. В этом случае можно осуществлять небольшой дополнительный поворот вокруг вертикальной оси, проходящей через КА, при смене полосы – для поддержания конфигурации схемы, вместо одного поворота в конце сеанса наблюдения. Назовем этот режим «сканированием по горизонтали с дополнительными поворотами».

3.3 Угловые скорости астероидов при пересечении области барьера. Еще одна причина, по которой астероид может «проскочить» область барьера незамеченным – это большая скорость движения астероида. Если его угловая скорость по отношению к обоим телескопам велика, он может пересечь барьер,

не попав в кадр ни одного из телескопов, пока те сканируют другие части области барьера. Исследуем этот вопрос подробнее.

В таблице 3.1 приведены угловые скорости пересечения оптического барьера астероидом Аполлон. Угловые скорости зависят от вектора скорости астероида, расстояния до телескопа, а также от скорости поворота телескопа, то есть от режима сканирования. Через Δ_1 и Δ_2 обозначены расстояния от астероида до КА₁ и КА₂ (в *a.e.*); ω^1_{BX} и ω^2_{BX} – угловые скорости астероида (в градусах за сутки) относительно телескопов на КА₁ и КА₂ в момент пересечения области барьера на участке сближения с Солнцем, то есть при входе внутрь шестигранного цилиндра (для угловых скоростей на выходе картина симметричная). В левой части таблицы приведены данные для случая, когда плоскость визирования фиксирована, поворот ее вокруг вертикальной оси происходит раз в сутки, между сеансами наблюдения. В правой части – для случая, когда поворот вокруг вертикальной оси происходит в непрерывном режиме. Эти же оценки применимы, если режим поворота дискретный, но в течение сеанса регулярно осуществляются небольшие повороты вокруг вертикальной оси, так что средняя скорость поворота та же, как в непрерывном режиме (режим сканирования по горизонтали с дополнительными поворотами).

Табл. 3.1. Угловые скорости пересечения оптического барьера астероидом Аполлон: слева дискретный режим сканирования, справа - непрерывный режим.

| Δ_1 | ω^1_{BX} | Δ_2 | ω^2_{BX} | Δ_1 | ω^1_{BX} | Δ_2 | ω^2_{BX} |
|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| 1 | 1.47 | 0 | ∞ | 1 | 0.48 | 0 | ∞ |
| 0.9 | 1.58 | 0.1 | -4.36 | 0.9 | 0.59 | 0.1 | -5.35 |
| 0.8 | 1.70 | 0.2 | -1.84 | 0.8 | 0.71 | 0.2 | -2.83 |
| 0.7 | 1.80 | 0.3 | -0.91 | 0.7 | 0.81 | 0.3 | -1.90 |
| 0.6 | 1.91 | 0.4 | -0.39 | 0.6 | 0.92 | 0.4 | -1.38 |
| 0.5 | 2.03 | 0.5 | -0.05 | 0.5 | 1.04 | 0.5 | -1.04 |
| 0.4 | 2.21 | 0.6 | 0.18 | 0.4 | 1.22 | 0.6 | -0.81 |
| 0.3 | 2.53 | 0.7 | 0.33 | 0.3 | 1.54 | 0.7 | -0.66 |
| 0.2 | 3.23 | 0.8 | 0.43 | 0.2 | 2.24 | 0.8 | -0.56 |
| 0.1 | 5.50 | 0.9 | 0.49 | 0.1 | 4.51 | 0.9 | -0.50 |
| 0 | ∞ | 1 | 0.52 | 0 | ∞ | 1 | -0.47 |

Жирным шрифтом выделены значения угловой скорости в пределах основного рабочего диапазона дальностей телескопов. Видно, что в случае дискретного режима сканирования (левая часть таблицы) диапазон угловых скоростей для

двух телескопов различен: [1.47,..2.03] и [-0.05,..0.52]. Причем для второго телескопа есть интервал значений, близких к нулю. В этом случае объект неотличим от звезд, и в нем трудно распознать астероид. В случае непрерывного режима сканирования диапазоны скоростей практически совпадают (по абсолютной величине): [0.48,..1.04], [-1.04,-0.47]. Этот режим предпочтительней и в том отношении, что максимальная угловая скорость (по абсолютной величине) почти в два раза меньше: 1.04 против 2.03 град/сутки.

Орбита астероида Аполлона, типичная для большей части АСЗ его группы, имеет следующие характеристики: расстояние в перигелии $q = 0.65 \text{ a.e.}$, в афелии $Q = 2.29 \text{ a.e.}$, наклонение $i = 6.36^\circ$. Среди астероидов этой группы имеются тела, у которых перигелий значительно ближе к Солнцу, а афелий значительно дальше от Солнца, чем у астероида Аполлон, например: $q = 0.12 \text{ a.e.}$, $Q = 4.51 \text{ a.e.}$, $i = 17.6^\circ$; $q = 0.25 \text{ a.e.}$, $Q = 5.70 \text{ a.e.}$, $i = 15.5^\circ$. Скорость пересечения области барьера этими астероидами значительно выше, чем у Аполлона. Тем не менее, их угловая скорость ω при пересечении оптического барьера в пределах рабочего диапазона дальностей телескопов не превышает 2.5 град/сутки, если используется непрерывный режим сканирования, или близкий к нему дискретный. И даже для сильно вытянутых орбит астероидов группы Аполлона, как показывают оценки, угловая скорость ω пресечения ими барьера не превышает 3-х градусов в сутки.

3.4 Астероиды, доступные для наблюдения. Сделанные выше оценки показали, что ширина области оптического барьера, которую может контролировать телескоп, превышает 3° , если угол раствора телескопа $\delta \geq 1^\circ$. Следовательно, любой АСЗ, пересекающий область барьера, будет, по крайней мере, один раз зафиксирован патрулем, если он доступен по своим размерам, а точнее, по блеску, для наблюдения телескопом в пределах его основного рабочего диапазона дальностей.

Доступность наблюдения зависит от проникающей способности телескопа, от расстояния между телескопом и астероидом в момент пересечения барьера, и от блеска астероида. Блеск астероида, в свою очередь, зависит от размеров астероида, альбедо его поверхности, и фазового угла, под которым он виден с телескопа. Фазовый угол – угол между направлениями от астероида на Солнце и на телескоп. При фазовом угле 0° в телескоп видна вся поверхность астероида, освещенная Солнцем. При больших углах – лишь часть освещенной поверхности.

В рассмотренной схеме оптического барьера астероиды могут наблюдаться в основном под фазовыми углами $60^{\circ} - 90^{\circ}$. Из-за этого блеск астероида может меняться в 2.5 раза. По альбедо астероиды делятся на так называемые светлые и темные, которые при одинаковых размерах могут отличаться по блеску в 1.5 и более раза. Из-за расстояния между телескопом и астероидом, которое в основном рабочем диапазоне дальностей изменяется в 2 раза, блеск для дальней части диапазона может уменьшиться в 4 раза по сравнению с ближней частью. В результате минимальные размеры астероидов, которые могут наблюдаться в области оптического барьера, варьируются в широких пределах. Оценки показывают, что если в ближней части рабочего диапазона дальностей ($\approx 0.5 \text{ a.e.}$) телескопом с проникающей силой в 22 звездную величину могут наблюдаться светлые астероиды диаметром $\approx 150 \text{ м}$, то в дальней части рабочего диапазона ($\approx 1 \text{ a.e.}$) наблюдаемые темные астероиды будут иметь диаметр не менее 500 м.

Отметим, что в поле зрения телескопов могут наблюдаться также астероиды, пересекающие барьер за пределами их основного рабочего диапазона дальностей: более мелкие – на расстояниях меньших 0.5 a.e. , и крупные – на расстояниях, значительно превышающих 1 a.e.

3.5 Оценка параметров орбит обнаруженных астероидов. Наряду с задачей обнаружения астероидов, оптический барьер должен решать задачу определения параметров их орбит, так как только при знании орбиты АСЗ можно следить за ним, выделять среди других тел и оценить, представляет он опасность для Земли, или нет. Для предварительного вычисления параметров орбиты АСЗ необходимо иметь по крайней мере 4 наблюдения астероида на возможно большем интервале времени.

Исследуем подробнее, сколько раз может наблюдаться астероид в области оптического барьера. Вслед за [19] примем, что рабочее поле телескопа – квадрат размером $1.6^{\circ} \times 1.6^{\circ}$, продолжительность экспозиции $\Delta t_{\text{Э}} = 100$ секунд. Если область барьера сканируется по горизонтали, попеременно слева направо и обратно, и количество кадров в каждой горизонтальной полосе равно 7, то ширина области барьера превысит 11° (с учетом необходимого перекрытия кадров в полосе). Перекрытие между полосами должно составить $\approx 0.05^{\circ}$. В этом случае количество горизонтальных полос, необходимых, для сканирования диапазона углов ν по вертикали $[-90^{\circ}, \dots, 90^{\circ}]$, составит 116. Время, необходимое для сканирования всей области барьера, составит $116 \times 7 \times 100 \text{ сек} = 81200 \text{ сек}$

= 22.6 часа. Таким образом, за сутки телескоп сможет проконтролировать область шириной 11° .

Следовательно, даже самые быстрые АСЗ, известные в настоящее время, с угловой скоростью пересечения барьера $\approx 2.5^{\circ}$ в сутки (по [20, 21]), будут наблюдаться по крайней мере в течение 4-х суток (а часто и пяти), если они будут пересекать область барьера на расстоянии 0.5 а.е. от телескопа. Эти же астероиды могут наблюдаться в течение 8-10 суток, если они будут пересекать барьер на расстоянии $\sim 1 \text{ а.е.}$ от телескопа. Основная же масса астероидов, с характеристиками орбит, подобным орбите астероида Аполлона, могут наблюдаться средствами оптического барьера в течение 2-3 недель и, возможно, более. Это позволит определять и уточнять параметры их орбит на борту КА, и проводить предварительную оценку опасности астероидов. Если точность определения орбиты будет недостаточной для оценки опасности астероида, или выяснится, что он представляет потенциальную опасность для Земли – данные о нем должны передаваться на Землю, для последующего наблюдения и уточнения параметров их орбит.

3.6 Ситуации, в которых АСЗ могут не наблюдаться средствами барьера.

Вернемся к геометрии области оптического барьера, образуемого телескопами КА патруля. Выше уже отмечалось, что не все АСЗ могут наблюдаться телескопами барьера; рассмотрим и другие подобные ситуации. Направление стороны $КА_1-КА_2$ шестигранника составляет угол в 30° с направлением движения КА (рис.15). Такое направление выбрано для реализации взаимной поддержки телескопами друг друга. При этом бóльшая часть области барьера находится внутри орбиты Земли, и только небольшая часть, вблизи КА, захватывает непосредственно окрестность орбиты Земли. С увеличением ширины контролируемой телескопом области барьера до 11° увеличивается окрестность орбиты Земли, непосредственно обзриваемая телескопами. Тем не менее, в каждом сеансе значительная часть окрестности орбиты Земли оказывается не охваченной непосредственно наблюдением телескопами патруля.

Трудности с наблюдением АСЗ возникают также, когда расстояние в перигелии орбиты астероида $q \approx 1 \text{ а.е.}$, т.е. перигелий орбиты астероида не входит далеко внутрь орбиты Земли. Тогда при определенном взаимном положении КА и орбиты астероида он может не попасть в область оптического барьера (рис.16), по крайней мере на данном витке движения по орбите, двигаясь почти параллельно отрезку $КА_1 - КА_2$ шестигранника, и в продолжение

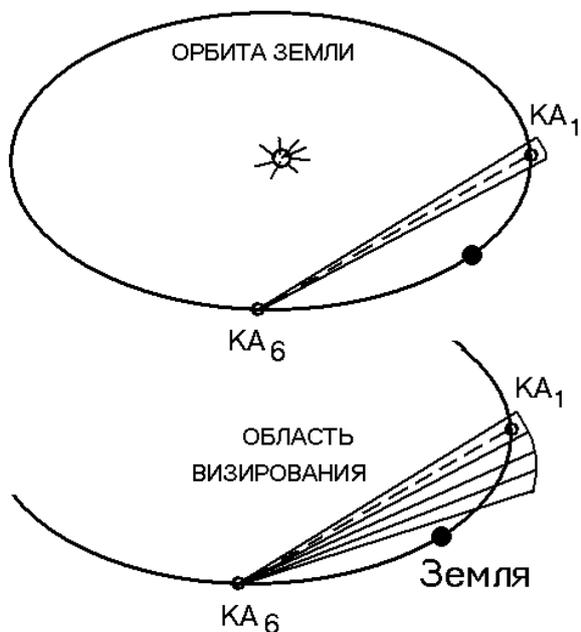


Рис.15. Наблюдение с КА захватывает окрестность орбиты Земли лишь вблизи КА. Расширение (до $n\delta$) полосы визирования увеличивает контролируемую часть орбиты Земли.

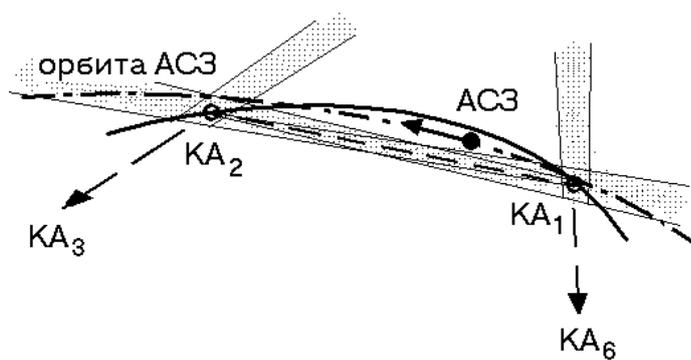


Рис.16. Случай орбиты АСЗ, охватывающей орбиту Земли; АСЗ наблюдается вне рабочей зоны телескопов.

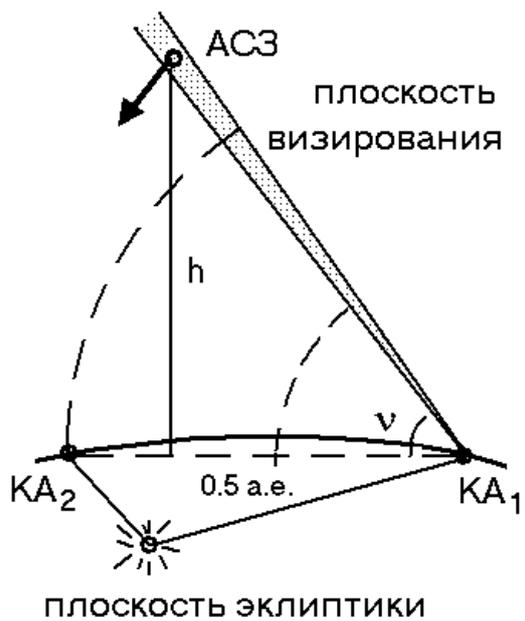


Рис.17. Трудность наблюдения АСЗ в случае пересечения им ОБ высоко над плоскостью эклиптики – он проходит вне основного рабочего диапазона дальности телескопа.

всего участка движения вблизи орбиты Земли находясь между лучами соседних телескопов (а затем опадая в поле зрения телескопов за пределами их основного рабочего диапазона дальностей).

При большом наклонении орбиты, ситуация в которой АСЗ может не наблюдаются, возможна, если астероид пересекает область оптического барьера на большом удалении от плоскости эклиптики (рис.17), на большом расстоянии от телескопов КА патруля, за пределами их рабочих диапазонов дальностей.

Такие ситуации относительно редки, поскольку они могут случаться только на отдельных витках орбиты, при определенном взаимном положении астероида и КА патруля, и таких орбит немного в процентном отношении.

4. Расстановка КА-патрулей на орбите Земли.

Рассмотрим баллистические схемы расстановки КА патруля на орбите Земли. Расстановка КА патруля на орбите Земли может быть выполнена с помощью традиционного химического двигателя или с использованием ЭРД. В качестве ракеты-носителя для разгона в сфере действия Земли предполагается использование ракеты «Союз». Гелиоцентрический участок перелета и установки КА в заданную точку орбиты Земли может осуществляться с помощью перспективного базового модуля с ЭРД и солнечными батареями, разрабатываемого в связи с проектом «Фобос-Грунт» [33], или разгонным блоком с химическим двигателем [12].

Баллистические характеристики перелета примем следующими:

- M_0 , V_∞ – полезная масса КА и скорость “на бесконечности” при разгоне его ракетой-носителем на гелиоцентрическую орбиту;
- Φ , T , M_{PB} , M_K^{ID} , M_K^{CT} , V_C – угловая дальность перелета, продолжительность перелета, масса затрат рабочего вещества, конечная масса КА для случая идеальной и ступенчатой тяги и скорость истечения реактивной струи ЭРД – на этапе гелиоцентрического перелета КА с ЭРД в заданную точку орбиты Земли;
- M_{II} – полезная масса КА в заданной точке на орбите Земли без массы баков (равной $0.2 M_{PB}$) и массы $M_{ЭРД}$ базового модуля вместе с ЭРД и солнечными батареями:

$$M_{II} = M_K^{CT} - 0.2 M_{PB} - M_{ЭРД}.$$

Принимается, что мощность солнечных батарей (на расстоянии 1 а.е. от Солнца) равна $N_{ЭЛ}^0 = 7.0$ кВт, их мощность “в струе” (т.е. с учетом потерь)

$$N^0_C = 3.5 \text{ кВт}, M_{\text{ЭРД}} = 320 \text{ кг}, V_{\infty} = 0 \text{ км/с}, M_0 = 2 \text{ тонны}, V_C = 24 \text{ км/с}.$$

Характеристики перелетов для расстановки КА патруля в трех точках на орбите Земли (требующих наибольших энергозатрат на расстановку, см. рис.1 и рис.4), приведены в таблице 4.1.

Как видно из таблицы, полезная масса КА, доставленных в «худшие» точки N 3 и 4 на орбите Земли, составляет $M_{\Pi} = 1350\text{--}1400$ кг при $V_C = 24$ км/с (для точки N 5 показатели могут быть улучшены при увеличении времени перелета). Таковы возможности расстановки КА патруля на орбите Земли за $T \leq 3$ лет при помощи базового маршевого модуля с ЭРД и энергетикой от солнечных батарей.

Таблица 4.1.

| N | Φ [оборот] | T [годы] | M_K^{ID} [т] | V_C [км/с] | M_K^{CT} [т] | M_{PB} [т] | M_{Π} [т] |
|---|--------------------|-------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|------------------|
| 3 | 3.42 | 3 | 1.895 | 24 | 1.761 | 0.239 | 1.393 |
| 4 | 2.58 | 3 | 1.846 | 24 | 1.730 | 0.270 | 1.356 |
| 5 | 1.75 | 2 | 1.811 | 24 | 1.697 | 0.303 | 1.316 |

Для сравнения приведены расчеты возможности расстановки КА патруля в те же точки с помощью традиционных химических двигателей. Для перелета в каждую из точек на орбите Земли (таблица 4.2) был рассчитан оптимальный многоимпульсный перелет при времени перелета $T \leq 3$ года. В таблице даны величины: V_C , ΔV_X , M_K^{BT} – скорости истечения реактивной струи, затрат характеристической скорости для доставки КА в данную точку орбиты Земли и конечной массы КА в заданной точке (вместе с массой разгонного блока).

Таблица 4.2.

| N | T [годы] | V_C [км/с] | ΔV_X [км/с] | M_K^{BT} [т] |
|---|-------------|-----------------|------------------------|-------------------|
| 2 | 3 | 3.2 | 1.693 | 1.178 |
| 3 | 3 | 3.2 | 1.720 | 1.168 |
| 4 | 2.5 | 3.2 | 1.076 | 1.429 |

Таким образом, для расстановки системы космических аппаратов патруля на орбите Земли может быть использован базовый модуль с ЭРД, проектируемый в рамках проекта «Фобос-Грунт». Сравнивая данные таблиц 4.1-4.2 и вычитая из величины M_K^{BT} массу разгонного блока (порядка 1000 кг), получаем, что

расстановка КА космического патруля в заданные точки орбиты Земли с использованием ЭРД, позволяет получать полезную массу КА патруля заметно большую, чем при использовании химических двигателей большой тяги.

Заключение

Предложена концепция развития системы астероидной безопасности Земли: обнаружения и каталогизации с помощью системы КА, космического патруля, за относительно короткое время 5-10 лет большинства небесных тел, сближающихся с Землей – диаметром в несколько сотен метров и более. Каталогизация опасных для Земли тел и изучение их физических свойств должны предшествовать мерам по противодействию им.

Система космических аппаратов, расположенных на гелиоцентрической орбите Земли и имеющих телескопы на борту, позволяет создать «оптический барьер» для выявления и каталогизации небесных тел, регулярно пересекающих окрестность орбиты Земли. Космическое базирование системы наблюдения астероидов, сближающихся с Землей, позволяет выявлять тела размером от нескольких сот метров, в том числе опасные тела группы Атона, орбиты которых расположены большей частью внутри орбиты Земли, и наблюдение которых с Земли поэтому затруднено.

Рассмотрены различные режимы наблюдения АСЗ с помощью бортовых телескопов, проведено их сравнение. Предложены варианты режимов, позволяющих, в принципе, выявлять АСЗ и определять их орбиты по данным наблюдений при пересечении ими оптического барьера. Указаны случаи, когда наблюдение и каталогизация АСЗ по предложенной схеме наталкиваются на различные трудности; эти случаи заслуживают дальнейшего изучения.

Техническая реализация системы космического патруля может опираться на базовый маршевый модуль с ЭРД, проектируемый в рамках проекта «Фобос-Грунт». Его характеристики позволяют провести расстановку КА патруля в заданные точки орбиты Земли за время полета около 3-х лет, причем полезная масса КА в точках расположения оказывается существенно большей, чем при расстановке их с помощью традиционной техники с химическими двигателями.

Таким образом, предлагаемая космическая программа наблюдения и каталогизации опасных для Земли небесных тел с помощью системы космического патруля, при ее уточнении и развитии, может лечь в основу для системы космического базирования, продолжающей и развивающей существующие программы наземных наблюдений опасных астероидов.

Литература

1. *Т.М. Энеев.* Актуальные задачи исследования дальнего космоса // Космические исследования, 2005, т. 43, № 6, с. 403-407.
2. Защита Земли от столкновения с астероидами и кометными ядрами. Под ред. А.Финкельштейна, У. Хюбнера, В. Шора. – СПб.: Наука, 2010. - 427 с. ISBN 978-5-02-025514-2; Proceeding of the International Conference "Asteroid-Comet Hazard-2009 (St.-Petersburg, Russis, 21-25 September, 2009) <http://www.ipa.nw.ru/PAGE/EDITION/transaction/tbook.htm>
3. International Symposium of Near-Earth Hazardous Asteroids. Мальта, 12-16 сентября 2009 г. // Космические исследования, 2010, т. 48, № 5, с. 387-496.
4. Астероидно-кометная опасность. (Под ред. А.Г. Сокольского). - СПб., ИТА, 1996. 244 с.
5. Угроза с неба: рок или случайность? / Под общей редакцией акад. А.А. Боярчука. - М., Косминформ. 1999. 218 с.
6. *D. K. Yeomans, S. R. Chesley, P. W. Chodas.* NASA's Near-Earth Object Program Office / Защита Земли от столкновения с астероидами и кометными ядрами. P. 244-254.
7. *В.В. Ивашкин, К.А. Стихно.* О проблеме коррекции орбиты сближающегося с Землей астероида (99942) Аporhis. // ДАН, 2008, т. 419, N 5.
8. *В.В. Ивашкин, К.А. Стихно.* О применении гравитационного воздействия на астероид Аporhis для коррекции его орбиты // ДАН, 2009, т.424, N 5, с. 621-626. <http://www.springerlink.com/content/w1437v375167j314/fulltext.pdf>
9. *В.В.Ивашкин, К.А. Стихно.* О предотвращении возможного столкновения астероида АРОPHIS с Землей // *Астрономический Вестник*, 2009, т. 43, № 6, с. 502-516.
10. *Т.М. Энеев.* К вопросу об астероидной опасности. // Компьютерные инструменты в образовании (Номер в честь С.С.Лаврова). С.Пб., 2003, N 2
11. *Т.М. Энеев, Р.З. Ахметшин, Г.С. Заславский, Г.Б. Ефимов.* Астероидная опасность и космический патруль. VIII Международная конференция "Аналитическая механика, устойчивость и управление движением". Тезисы докладов. КАИ имени Туполева, Казань. 2002, с. 223.
12. *Eneev T.M., Efimov G.B., Akhmetshin R.Z., Zaslavsky G.S.* Space patrol system. / 17-th International Symposium on Space Flight Dynamics. Moscow, 16-20 June, 2003. - Proceedings. V.1, Moscow, KIAM, p.109-114.
13. *Т.М. Энеев, Р.З. Ахметшин, Г.Б. Ефимов.* К вопросу астероидной опасности – система космических патрулей. / Сборн. тез. 4-го Междунар. Аэрокосмич. конгресса, М., 18-23 авг. 2003 г. М., СИП РИА, 2003, с. 400.

14. *Р.З. Ахметшин, Г.Б. Ефимов, Т.М. Энеев.* Схема «оптического барьера» на орбите Земли для наблюдения опасных астероидов. Материалы XXVIII академических чтений по космонавтике. М., ИЕЕТА. 2004, с.111-112.
15. *Ахметшин Р.З., Ефимов Г.Б., Энеев Т.М.* Эволюция орбит малых тел Солнечной системы и астероидная опасность. XXIX Академические чтения по космонавтике. Москва, ИЕЕТА, 2005, с. 85-86.
16. *Ефимов Г.Б., Энеев Т.М.* Эволюция орбит малых тел Солнечной системы и проблема астероидной опасности. / 5 Международный Симпозиум по классической и небесной механике. Великие Луки, август 2005. - Тезисы. М., ВЦ РАН. 2005, с. 220-222.
17. *Г.Б. Ефимов, Т.М. Энеев.* Астероидная опасность и миграция малых тел солнечной системы. Тезисы 10-й Международной конференции "Системный анализ, управление и навигация", 3 - 10 июля 2005, Крым, Евпатория. - М., МАИ, 2005, с.50-51.
18. *Т.М. Энеев, Р.З. Ахметшин, Г.Б. Ефимов.* Оптический барьер космического базирования. Тезисы 15-й Международной научной конференции "Системный анализ, управление и навигация", 27 июня - 4 июля 2010, Евпатория. - М., МАИ, 2010.
19. *A. R. E. Gold.* A Phase I Report to the NASA Institute for Advanced Concepts. May 28, 1999; <http://www.nss.org/resources/library/planetary-defense/1999-SHIELD-AComprehensiveEarthProtectionSystem.pdf>
20. Каталог АСЗ, версия 1.8, март 2001. Институт прикладной астрономии РАН. - С-Петербург. 2001.
21. <http://www.cfa.harvard.edu/iau/lists/MPLists.html>, IAU Minor Planet Center Smithsonian Astronomical Observatory.
22. *L. L. Sokolov, N. P. Pitjev, V. Sh. Shaidulin.* About Zones of Resonant Returns of Asteroid Apophis. / Защита Земли от столкновения с астероидами и кометными ядрами. под ред. А.Финкельштейна. С. 279-283.
23. *А.Н. Симоненко.* Астероиды. - М., Наука. 1985.
24. *Т.М. Энеев.* О возможной структуре внешних (занептунных) областей Солнечной системы. // Письма в Астрон. журнал. 1980, т. 6, N 5, с. 295-303.
25. *Т.М. Энеев, Г.Б. Ефимов.* Миграция малых тел в Солнечной системе // Земля и Вселенная. 2005, № 1, с. 80-89.
26. *Е.В. Pitjeva.* Influence of Asteroids and Trans-Neptunian Objects on the Motion of Major Planets / Защита Земли от столкновения с астероидами и кометными ядрами. под ред. А.Финкельштейна. С. 237-242.

27. *T.M. Eneev, N.N. Kozlov.* The problems of simulation of planetary systems accumulation processes. *Adv. Space Res.* 1981, V.1, pp.201-215.
28. *T.M. Энеев, Н.Н. Козлов.* Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем. I. Численные эксперименты. / *Астрон. вестник.* 1981, т.15, N2, с. 80-94. II. Вращение планет и связь с теорией гравитационной неустойчивости. / *Астрон. вестник.* 1981, т.15, N3, с.131-141.
29. *T.M. Энеев.* О возможной структуре внешних (занептунных) областей Солнечной системы. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР № 116. М., 1979.
30. *Е.И. Казимирчак-Полонская.* Бюллетень Института теоретической астрономии АН СССР. 1971, Т. XII. № 9 (142).
31. *Ipatov S.I.* Migration of trans-Neptunian objects to the Earth. // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy.* 1999. V.73, N 1-4, p.107-116.
32. *С.И. Ипатов.* Миграция небесных тел Солнечной системы. М., 2000. 318 с.
33. *В.С. Авдеевский, Э.Л. Аким, Р.С. Кремнев, С.Д. Куликов, М.Я. Маров, К.М. Пичхадзе, Г.А. Попов, Т.М. Энеев.* Космический проект «Фобос–Грунт»: основные характеристики и стратегия развития. // *Космонавтика и ракетостроение.* 2000. Т.19, с. 8–21.

Приложение.

Гипотеза о существовании занептунных поясов, в связи с обсуждением происхождения Плутона, была изложена Т.М. Энеевым в Препринте ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР № 116 за 1979 год, а затем в статье [26]. Однако в статье часть соображений о существовании занептунного пояса была опущена. Эти части препринта, а именно **Раздел 5 и Заключение**, приводится ниже. Полностью препринт № 116 за 1979 г. помещен на сайте ИПМ им М.В. Келдыша

5. Эволюция внешних астероидных поясов и миграция их тел во внутренние области солнечной система.

Образование внешних астероидных поясов и их эволюция имели далеко идущие последствия для солнечной системы. Эволюция эксцентриситетов к больших полуосей астероидов пояса *A* приводила к тому, что часть из астероидов пояса рано или поздно попадала в сферу действия Нептуна. В результате происходила быстрая и сильная трансформация их орбит. Перигелии орбит части из этих астероидов опускались до уровня орбиты Урана и ниже, что приводило к дальнейшей их трансформации с последующим опусканием перигелиев до уровней орбит Сатурна, Юпитера и далее в область планет земной

группы. Так развился мощный процесс миграции тел астероидных поясов во внутренние области солнечной системы. Механизм подобного рода миграции был подробно изучен в работе Е.И. Казимирчак-Полонской (1971), которая обратила внимание на существенную роль трансформационных свойств полей планет-гигантов в эволюции кометных орбит [*Казимирчак-Полонская Е.И. 1971*].

Время пребывания большинства астероидов во внутренних областях солнечной системы было ограниченным из-за сильных трансформационных свойств гравитационного поля Юпитера, которое, в конечном счете, выбрасывало их за пределы солнечной системы или в область облака Оорта. Лишь часть астероидов могла "застрять" на длительный срок внутри системы. Возможно, что к таким телам относятся, аполлоновская группа астероидов, группа "троянцев" и некоторые другие.

Миграция тел астероидных поясов в области, лежащие внутри орбиты Нептуна, была наиболее значительной в начальный период существования солнечной системы, охватывающий время порядка $0.5 \cdot 10^9$ лет. В последующем эта миграция существенно уменьшилась из-за "разрыхления" структуры астероидных поясов. Взаимное гравитационное влияние тел поясов и, особенно, влияние тел, ранее мигрировавших, а затем вернувшихся в пояса, привело к заметному расхождению плоскостей орбит астероидов и, соответственно, к увеличению толщины поясов. Пространственная плотность орбитального потока астероидов уменьшилась на несколько порядков и, соответственно, уменьшилось число их тесных сближений в единицу времени. Последнее обстоятельство и привело к резкому замедлению процесса миграции. Тем не менее, процесс миграции тел из астероидных поясов идет, по-видимому, и в настоящее время. Свидетельством этому служит присутствие в солнечной системе таких странных объектов, как Хирон, Гидальго и некоторых других. Возможно, далее, что, по крайней мере, часть короткопериодических комет и метеоритов представляет собой обломочный материал, мигрировавший и из астероидного пояса А. Этот материал возник в результате катастрофических столкновений астероидов в этом поясе. При этом метеориты могут представлять собой фрагменты железо-каменистых ядер, а кометы – фрагменты ледяных мантий и рыхлых поверхностных слоев разрушившихся астероидов. В связи с этим большой интерес представляет гипотеза Г.И. Петрова (1975) о рыхлой, снегоподобной структуре некоторых кометных ядер [*Петров Г.И., Стулов В.П. 1975*].

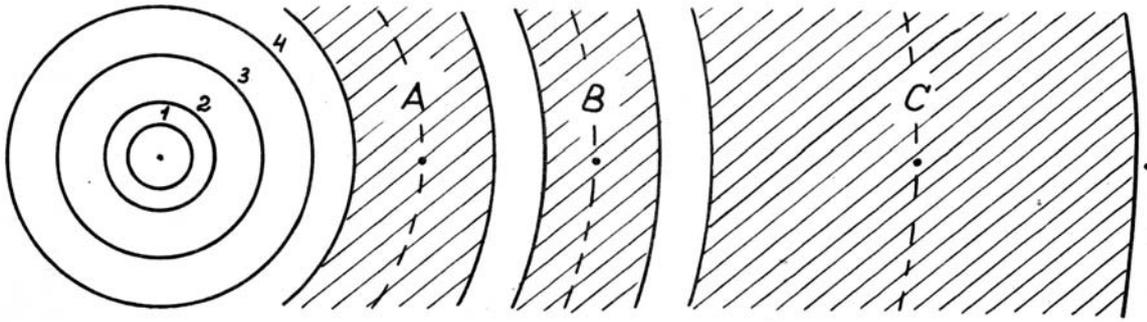


Рис.П1. Схематическое изображение орбит планет-гигантов и занептунных астероидных поясов (цифрами обозначены орбиты планет: 1 - Юпитера, 2 - Сатурна, 3 - Урана, 4 - Нептуна).

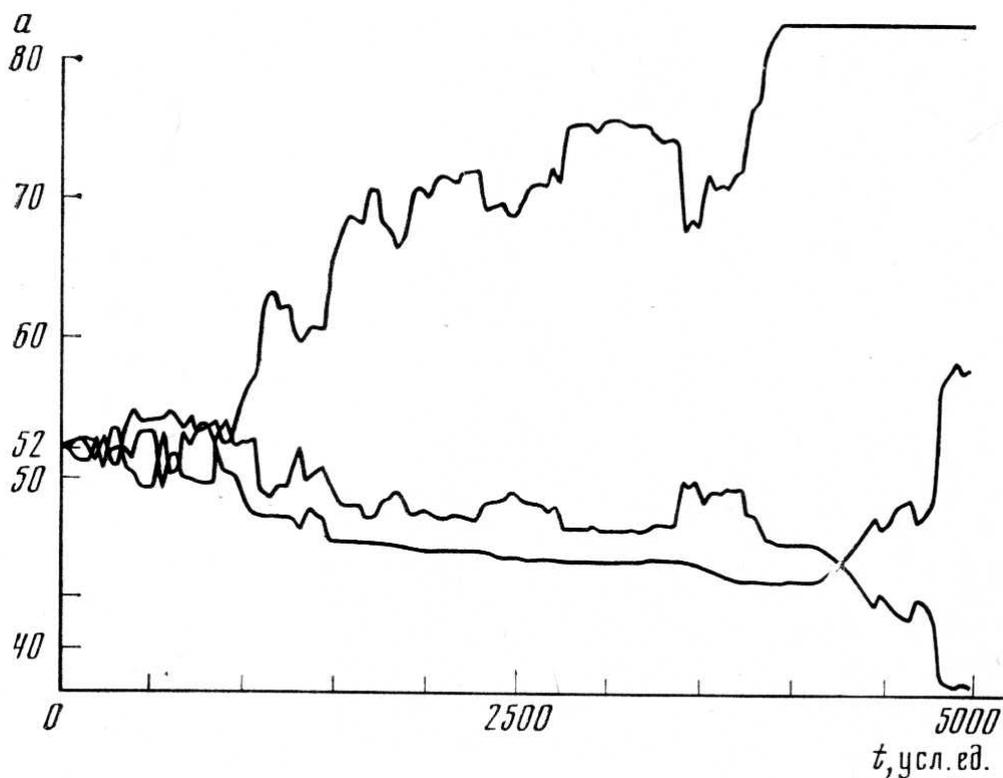


Рис.П2. Эволюция больших полуосей орбит a трех «модельных» гравитационно взаимодействующих астероидов занептунного пояса. Изначально круговые орбиты этих тел ($a = 52 a.e.$) в результате многих тысяч сближений приобрели заметную эллиптичность, и сильно изменились большие полуоси их орбит.

Далее следует отметить, что часть тел миграционного потока, образуя из себя своеобразный "кометно-астероидный ветер", с большими скоростями обрушивалась на поверхности планет и спутников, оказывая динамическое влияние на их поступательное и вращательное движение. Возможно, что указанные "ветер" и являлся тем диссипативным фактором, который

способствовал формированию резонансных структур в солнечной системе [Moltschanov A.M. 1968]. Возможно, далее, что некоторые необычные детали структуры солнечной системы также смогут быть объяснены через соответствующее влияние "ветра". Например, не исключено, что обратное орбитальное движение Тритона может быть объяснено через эволюцию плоскости его орбиты из-за совместного влияния "ветра" и других возмущающих факторов.

Наконец, падение тел астероидных поясов на поверхности планет и спутников оказало определенное воздействие на их физико-химическую эволюцию. В частности, это воздействие было, по-видимому, исключительно сильным в геологической и геохимической истории Земли. Вопрос этот требует, однако, отдельного обсуждения.

6. Заключение.

Таким образом, последовательное развитие новой аккумуляционной модели формирования планет, необходимое для объяснения аномальности орбитальных характеристик Плутона, логически почти неизбежно подводит к выводу о возможности существования внешних (занептунных) астероидных поясов солнечной системы. По крайней мере, в рамках рассматриваемой концепции другого сколько-нибудь надежного и убедительного пути решения проблемы не видно. В связи с этим возникает задача обнаружения тел внешних астероидных поясов с помощью прямых наблюдений. При этом следует иметь в виду, что, хотя в результате описанного выше миграционного процесса отдельные тела поясов присутствуют, по-видимому, во многих внутренних областях солнечной системы (в том числе в области земной группы планет), только прямое наблюдение этих тел за пределами орбиты Нептуна может дать убедительное доказательство существования внешних астероидных поясов. Решение указанной задачи связано, однако, с большими трудностями.

Как уже было отмечено выше, Плутон является одним из наиболее крупных тел внешних поясов. Если в этих поясах и существуют в настоящее время другие тела, имеющие размеры порядка размеров Плутона, то их очень немного, и они должны находиться, по крайней мере, на внешней периферии пояса *A*. В противном случае они были бы, по-видимому, уже обнаружены [Томбо К. 1961]. Подавляющее же большинство тел поясов имеет существенно меньшие размеры. Об этих размерах в настоящее время можно судить по некоторым косвенным данным, поскольку закон распределения тел поясов по массам (и, следовательно, по размерам) пока неизвестен. Эти косвенные данные

можно получить, например, на основании изучения размеров таких объектов как Хирон или Нереида (предположительно, захваченное Нептуном одно из тел пояса *A*). Указанные объекты с точки зрения рассматриваемой модели, должны быть одними из типичных представителей тел поясов. В противном случае, едва ли их удалось бы наблюдать в настоящее время в силу редкости и уникальности рассматриваемых событий пребывания тела на неустойчивой орбите между большими планетами (Хирон) или пребывания захваченного планетой тела на устойчивой спутниковой орбите (Нереида). Если этот вывод верен, то тел с поперечным размером в 200-300 км должно быть достаточно много в зоне пояса *A*. Возможно, что их там десятки, а может быть и сотни тысяч. Можно ожидать, что яркостная характеристика таких тел, при расстоянии их от Земли в 50 *a.e.*, будет соответствовать 23-23 звездной величине. Наблюдение объектов такой яркости находится в пределах возможностей самых мощных современных оптических средств (САО АН СССР), Здесь могут, однако, возникнуть большие трудности в деле опознавания и селекции тел внешних астероидных поясов на фоне огромного числа звезд и других объектов такой же яркости. Поэтому для решения указанной задачи представляется весьма целесообразным привлечение мощных вычислительных средств, а также современных математических методов обработки массовой информации. При надлежащей организации работы поставленную задачу, по-видимому, можно было бы решить за более или менее обозримое время.

Литература к Приложению.

Казимирчак-Полонская Е.И. 1971. Бюллетень Института теоретической астрономии АН СССР. Т. XII. № 9 (142).

Петров Г.И., Стулов В.П. 1975. "Космич. исслед.", т. 13, № 4.

Moltschanov A.M. 1968. *Icatus*. V.8. 203-215.

Томбо К. 1961. Сб. "Планеты и спутники". Пер. с англ. под ред. В.И. Мороза. М., 1963.