

## К ВОПРОСУ ОБ АСТЕРОИДНОЙ ОПАСНОСТИ

Данная статья посвящена славному юбилею Святослава Сергеевича Лаврова. Святослав Сергеевич Лавров – один из пионеров ракетно-космической техники и баллистики. Сразу после войны он вошел в ведущий коллектив по ракетной технике на жидкотопливных ракетных двигателях. Святослав Сергеевич заведовал знаменитым баллистическим отделом номер 17 в ОКБ 1 у Сергея Павловича Королева. С.П. Королев нашел его еще в армии в Германии. Интересно, что еще при знакомстве он сказал: «будем заниматься «косметикой» (то есть космонавтикой)» – так как всегда мечтал об исследовании космоса. С самого начала своей работы в ОКБ Святослав Сергеевич ввел высочайшую культуру математических вычислений в баллистике. Он один из первых в стране и в своей области постарался использовать ЭВМ. Начинать работать еще на первых БЭСМ у С.А. Лебедева в Институте точной механики и вычислительной техники (ИТМ и ВТ). Святослав Сергеевич поднял на высокий уровень культуру программирования в ОКБ у С.П. Королева.

Хочется пожелать Святославу Сергеевичу крепкого здоровья, счастья и новых больших творческих успехов.

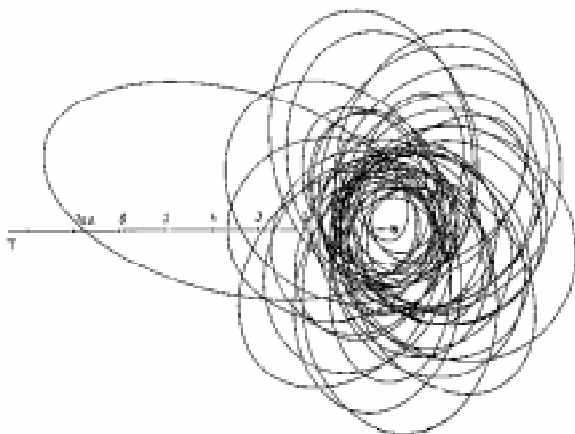
Проблема астероидной безопасности Земли привлекает все большее внимание ученых и общества во всем мире. Исследование следов катастроф космического происхождения на поверхности Земли и небесных тел, наблюдения астероидов, пролетающих вблизи Земли, примеры Тунгусского метеорита и других так называемых «астрокатастроф» в XX веке показывают со всей очевидностью серьезность астероидной опасности для земной цивилизации и необходимость разработки мер для ее предотвращения. За последние годы вышли книги по проблеме астероидной опасности (и безопасности) [1–3], собирались конференции, в Новосибирске издается специальный журнал «Большая Медведица». Среди исследований, посвященных вопросам астероидной опасности и безопасности, можно выделить несколько направлений. Прежде всего, наблюдения опасных тел, сближающихся с Землей, выявление их. В настоящее время



*К вопросу об астероидной опасности.*

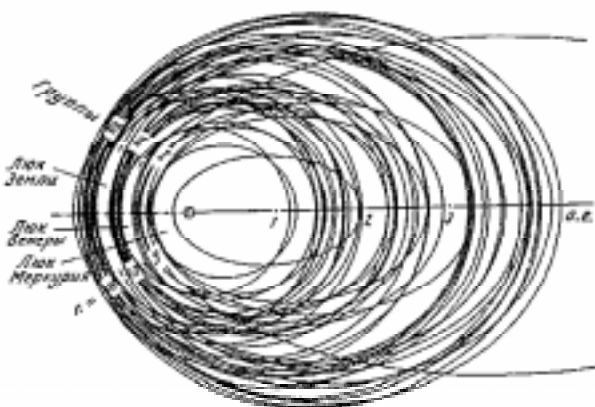
имеется несколько программ оптического наблюдения небесных тел, сближающихся с Землей (американская, англо-австралийская и другие, в них участвуют и наши ученые). В течение ближайшего десятилетия с их помощью предполагается выявить большую часть таких тел, размерами около километра и более. Целый ряд исследований и проектов разрабатывает меры противодействия небесным пришельцам – изменения их орбит, разрушения на мелкие

осколки, сгорающие в атмосфере, способы их реализации, возможности использования современной космической техники. В этих работах активно участвуют российские ученые и инженеры, ведущие ракетные фирмы. Однако указанные программы наблюдения и выявления опасных небесных тел далеко не полны – оптические наблюдения с Земли позволяют выявлять тела с размерами порядка одного километра, в то время как Тунгусский метеорит имел, по оценкам, размеры около 50–70 метров. Для выявления меньших размера-



**Рисунок 1.** Современные орбиты 48 известных астероидов группы Аполлона и Амура. Орбиты совмещены с плоскостью эклиптики.  
(Из кн. А.Н. Симоненко. Астероиды. М., Наука, 1985.)

ми опасных небесных тел предлагается концепция создания «оптического барьера» на орбите Земли с помощью системы космических аппаратов (КА). Система КА-патрулей позволяет за 5–6 лет провести каталогизацию значительного числа небесных тел, сближающихся с Землей, с диаметром порядка 100 метров и более. Поэтому система космической каталогизации может быть следующим шагом по выявлению опасных тел после известных программ оптического наблюдения их с Земли.



**Рисунок 2.** Те же орбиты, но с совмещенными линиями аспид. Видны «люки» вблизи орбит Меркурия, Венеры и Земли (из той же книги).

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 метров до нескольких километров, пересекающих орбиту Земли. Существенная особенность орбит этих тел состоит в том, что их афелии (наиболее удаленные от Солнца точки орбиты), как правило, не выходят за пределы орбиты Юпитера. Другими словами, тела эти можно отнести к телам группы Аполлона и Атона (см. рисунки 1, 2). 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 XX 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.

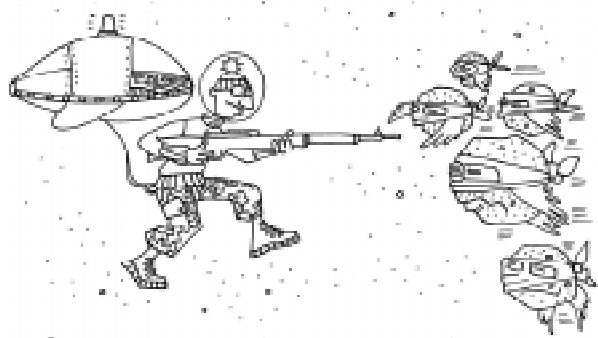
Напротив, в центре внимания должны находиться тела, имеющие сравнительно слабо эксцентричные орбиты, подобные орбитам тел групп Аполлона, Атона, Амура и орбитам короткопериодических комет группы Юпитера.

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 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 и 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 с размерами порядка ста метров и порядка километра должны быть разработаны разные средства.

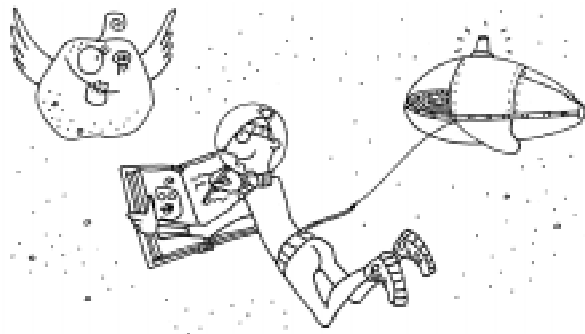
Таким образом, сосредоточим свое первоочередное внимание на задаче обнаружения и каталогизации опасных астероидов, причем задачу поставим достаточно четко: возможно ли за обозримый промежуток времени (например, несколько лет) составить каталог опасных астероидов с размерами порядка ста метров и более,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

1. Выше было отмечено, что каталог обнаруженных к настоящему времени астероидов, пересекающих орбиту



*Целый ряд исследований и проектов разрабатывают меры противодействия небесным пришельцам...*

Земли, содержит, как правило, астероиды, афелии которых находятся внутри орбиты Юпитера. Перигелии орбит (ближайшие к Солнцу точки орбит) этих астероидов, как правило, находятся между орбитами Земли и Венеры. Нетрудно показать, что большие полуоси орбит этих тел не превосходят трех астрономических единиц (а.е.). 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



*выделим ... задачу обнаружения и каталогизации потенциально опасных астероидов ...*

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 (то есть 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 некоторые исследователи уже давно пришли к выводу, что популяции указанных тел, то есть 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<sup>1</sup>. Допускается, в частности, что таким источником может быть пояс Эджеверса-Койпера<sup>2</sup>. Для рассматриваемой проблемы, однако, вопрос об источнике пополнения указанных популяций несуществен. Важно только, что такой источник существует. И коль скоро он существует, то происходит спорадическое пополнение указанных групп новыми членами, при суще-

ствовании 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 со временем существования солнечной планетной системы), и, по разным оценкам, составляет 10–100 миллионов 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. 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 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 потен-

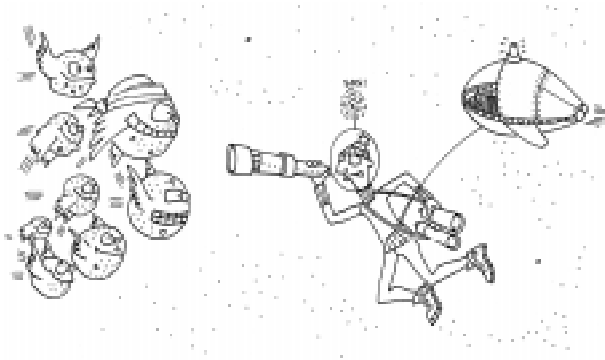
<sup>1</sup> Для понимания происхождения семейств малых тел, попадающих в окрестность Земли, и особенностей их орбит важное значение имеет теория образования солнечной системы, разработанная в 1970-х годах в ИПМ им.М.В.Келдыша [3]. На основании этой модели в 1980 г. было высказано предположение о существовании объектов занептунного пояса [4]. Сейчас открыто большое число астероидов занептунного пояса размерами 200–300 км.

<sup>2</sup> Большой вклад в теорию миграции небесных тел из далеких областей солнечной системы в окрестность Земли внесли работы Е.И. Казимирчак-Полонской. В них был показан механизм образования комет, эволюции их орбит путем постепенного «перебрасывания» их планетами-гигантами внутрь солнечной системы. В последнее время миграцию малых тел исследовал С.И. Ипатов.

циально пригодны для решения задачи каталогизации тел, пересекающих орбиту Земли.

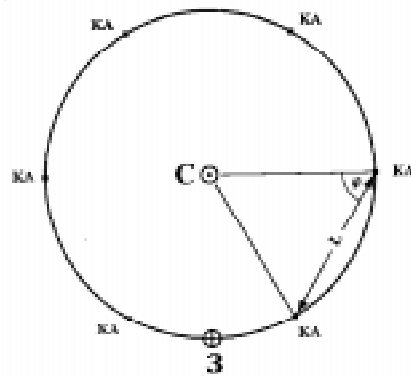
Построим псевдоцилиндрическую поверхность, содержащую орбиту Земли с осью, направленной перпендикулярно ее плоскости. Очевидно, что астероиды группы Аполлона в ходе своего орбитального движения будут периодически пересекать эту поверхность. Если бы удалось контролировать эту поверхность путем наблюдения 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 достаточно иметь один телескоп, который, вращаясь относительно оси, направленной на Солнце, обозревал 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. рисунок 3). Угол между направлением на Солнце и направлением телескопа  $\varphi$  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  $\varphi$  к  $\frac{\pi}{2}$ . 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. Одна-



*Если бы удалось контролировать эту поверхность ... то пересекающие ее астероиды за обозримый промежуток времени были бы зафиксированы.*

ко тела, двигающиеся достаточно далеко от КА, будут иметь сравнительно небольшую относительно КА угловую скорость перемещения 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. Для определенности 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, меньших  $L_{KP}$ ) будет обеспечен его соседями с разных сторон. Другими словами, будет обеспечена своеобразная «взаимоподдержка» системы КА друг другом.



**Рис. 3.** Схема размещения КА-патрулей на орбите Земли.



Чтобы более наглядно представить указанную систему космического патрулирования, примем, что  $N = 6$  (см. рисунок 3). Другими словами, шесть космических аппаратов расположим на земной орбите на равном расстоянии  $L$  друг от друга, причем в данном случае  $L$ , очевидно, будет равно одной астрономической единице (а.е.). Угловое расстояние между аппаратами относительно Солнца будет равно  $60^\circ$ . Если при этом два соседних КА расположить на равном расстоянии от Земли, 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  $\varphi$  между направлением на Солнце с данного КА и на соседний КА будет, очевидно, равен  $60^\circ$ . Область визирования пространства при дальности  $L/2$  будет в таком случае находиться примерно посредине между орбитами Земли и Венеры. Выше было отмечено, что перигелии орбит значительной части астероидов группы Аполлона находятся 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. Астероиды, движущиеся по таким орбитам, при угле визирования  $\varphi$ , равным  $60^\circ$ , могут быть не обнаружены. Поэтому, по-видимому, целесообразно для угла  $\varphi$  принять значение несколько больше  $60^\circ$ .

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 одного часа.

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 все астероиды размером от 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 космической 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 около-

земную орбиту, может быть использован носитель среднего класса типа «Союз»<sup>1</sup>. Дальнейший перевод на около солнечную земную орбиту патрульного КА может быть осуществлен с помощью аппарата, разрабатываемого в рамках проекта «Фобос-Грунт», снабженного электроракетными двигателями малой тяги<sup>2</sup>. Этот же аппарат может поддерживать функционирование патрульного КА на околосолнечной земной орбите. Подобный путь решения проблемы может оказаться экономически более целесообразным по сравнению с другими возможными вариантами.

### Литература

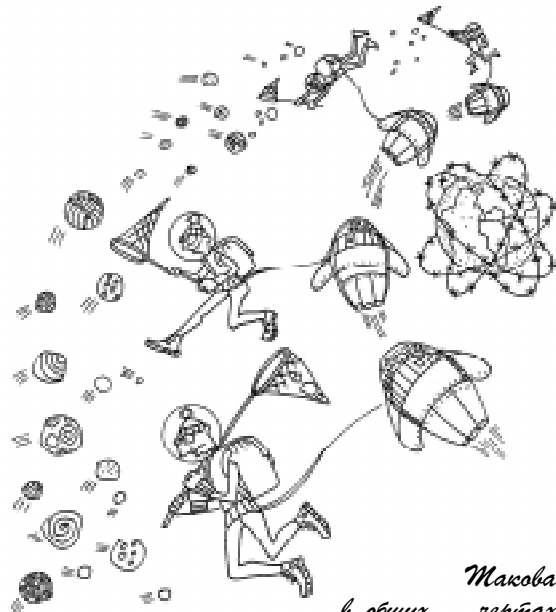
1. Астероидно-кометная опасность. (ред. А.Г. Сокольский). СПб.: ИТА, 1996.

2. Угроза с неба: рок или случайность? Под общей редакцией акад. А.А. Боярчука. М.: Косминформ, 1999.

3. А.М. Микуша, М.А. Смирнов. Земные катастрофы, вызванные падением небесных тел. Вестник РАН, т. 69, № 4, 1999. Также «Большая Медведица», 2002, № 1, с. 23–30.

4. Т.М. Энеев, Н.Н. Козлов. Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем. I. Численные эксперименты. Астрон. вестник. 1981, т. 15, № 2, с. 80–94. II. Вращение планет и связь с теорией гравитационной неустойчивости. Астрон. вестник. 1981, т. 15, № 3, с. 131–141.

5. Т.М. Энеев. О возможной структуре внешних (занептунных) областей Солнечной системы. Письма в Астрон. журнал. 1980, т. 6, № 5, с. 295–303.



Такова в общих ... чертах одна из возможных схем патрулирования окрестностей земной околосолнечной орбиты.

<sup>1</sup> Ракета «Союз» – модификация одной из самых первых ракет-носителей, с помощью которой был произведен запуск первого искусственного спутника Земли в 1957 году.

<sup>2</sup> Базовый космический аппарат с электроракетными двигателями, ионными или плазменными (у которых скорость истечения реактивной струи в 5-10 раз больше, чем у химической ракеты, поэтому они существенно экономичнее последней) проектируется в рамках российской программы «Фобос-Грунт». Этот проект направлен на доставку образца вещества с Фобоса, спутника Марса, к Земле. КА с электроракетными двигателями малой тяги могут быть необходимыми как для межпланетных полетов (к Фобосу, астероидам главного пояса и кометам для доставки вещества с них к Земле), так и вблизи Земли, для подъема спутников связи на высокую геостационарную орбиту (40 тысяч км над поверхностью Земли).

**Энеев Тимур Магомедович,**  
**академик Российской академии наук,**  
**лауреат Ленинской премии,**  
**заведующий сектором Института**  
**прикладной математики**  
**им. М.В. Келдыша РАН, ветеран**  
**освоения космического пространства.**  
**Вместе с Д.Е. Охоцимским и**  
**С.С. Лавровым участвовал в запуске**  
**первого спутника Земли в 1957 году.**



Наши авторы, 2003.  
Our authors, 2003.