



## Околоземная астрономия

Л. В. РЫХЛОВА,  
доктор физико-математических наук  
Институт астрономии РАН

Для Астросовета (ныне Институт астрономии РАН) традиционны наблюдения искусственных спутников Земли – от самых первых до фрагментов объектов искусственного происхождения (отходы космической деятельности), названные космическим мусором. Здесь разрабатывались и развивались наблюдения быстро движущихся небесных объектов. Поскольку обычные астрономические телескопы не могут проводить наблюдения



таких объектов, то в других астрономических институтах им почти не уделялось внимания. Теперь это направление астрономии (наблюдение ИСЗ и космического мусора) называется околоземной астрономией – исследуются все природные и искусственные тела, находящиеся в околоземном пространстве или проходящие через него. Особое внимание уделяется и проблеме астероидно-кометной опасности.

### ЗЕМЛЯ – ЕДИНАЯ ЭКОСИСТЕМА

Для планеты Земля окружающей средой служит околоземное космическое пространство. Хорошо прижившийся в научной литературе термин “околоземное космическое пространство” (ОКП) не имеет строгого определения и в разных областях

науки используется в привычных и приемлемых для данной области терминах. К примеру, в астрономии выделяют понятие “сферы Хилла”, ограничивающей ОКП той областью пространства, в которой могут двигаться тела, оставаясь спутниками нашей планеты. Для Земли это рас-

стояние равно 0,01 а.е., то есть приблизительно 1,5 млн км. Существует понятие сферы тяготения – области пространства, внутри которой притяжение планеты превосходит солнечное; для Земли эта область пространства ограничена расстоянием примерно 0,002 а.е., или 260 тыс. км.

С геофизической точки зрения, ОКП – это несколько внешних оболочек Земли. Некоторые из них предохраняют нас от воздействия процессов, непрерывно происходящих в сложной системе Солнце – межпланетная среда – Земля. Самая удаленная защитная оболочка Земли – это магнитосфера, образующаяся при взаимодействии солнечного ветра с магнитным полем Земли. Граница магнитосферы на обращенной к Солнцу стороне Земли располагается примерно на расстоянии  $10 R_3$  (около 60 тыс. км), а с ночной стороны Земли магнитосфера вытянута на миллионы километров и выходит далеко за орбиту Луны. При возмущенном состоянии магнитосферы на Земле отмечаются магнитные бури. На расстоянии около 36 тыс. км от Земли наблюдаются довольно сильные потоки заряженных частиц (в основном, протонов и электронов), локализованные в радиационных поясах Земли. Атмосфера не только рассеивает и поглощает инфракрасное и коротковолновое излучение Солнца, но и не пропускает значительную часть космического радиоизлучения, ослабляет поток высокоэнергичных частиц, идущих к Земле из космоса.

С точки зрения освоения космического пространства человечеством,

ОКП – это объект исследования и новая среда обитания. Граница ОКП отодвигается все дальше по мере расширения сферы деятельности человечества. К началу XXI в. космическая индустрия освоила несколько околоземных орбит – от низких (250–450 км) до геостационарной (35 785 км) и высокоэллиптических (470 тыс. км).

В США ОКП делят на пространство со средним расстоянием до Луны (384 тыс. км, или  $60 R_3$ ) и пространство за орбитой Луны до Солнца (1 а.е., или  $23 481 R_3$ ). ОКП не поддается делению по государственной принадлежности, оно экстерриториально.

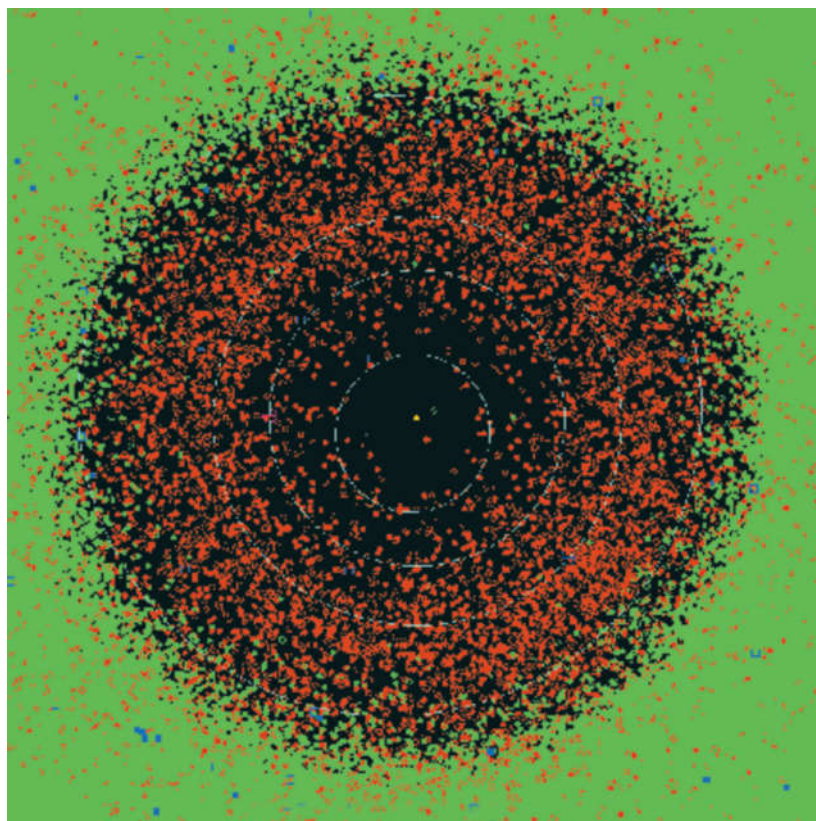
В околоземном космическом пространстве находятся как естественные, так и искусственные космические объекты, движущиеся по геоцентрическим и гелиоцентрическим орбитам. Из естественных тел только Луна движется по геоцентрической орбите, все другие – кометы, астероиды и метеороиды – по гелиоцентрическим орбитам, лишь ограниченное время находясь в ОКП. Искусственные тела – это работающие и вышедшие из строя по разным причинам искусственные спутники Земли, верхние ступени ракет-носителей и их обломки, образовавшиеся после взрывов, а также другие фрагменты. Масса и размер

выводимых на орбиты спутников и орбитальных станций возрастает по мере совершенствования космической техники (Земля и Вселенная, 2008, № 6).

Для Астрономического совета АН СССР, созданного в 1936 г. в том числе и для координации исследований в области наземной оптической астрономии, естественным важнейшим направлением деятельности стали наблюдения ИСЗ. Подготовка к этой работе началась еще до запуска первого ИСЗ. В 1966 г. под руководством профессора А.Г. Масевич была создана международная сеть станций наблюдений ИСЗ (Земля и Вселенная, 1965, № 1; 2008, № 5). Она стала основой для проведения наблюдений ИСЗ по геодезическим программам. Спутник на высоте 500–5000 км – прекрасная мишень для построения глобальных геодезических сетей, изучения поверхности, формы, гравитационного поля Земли. Развивавшаяся с самого начала космической эры тема изучения движения искусственных спутников Земли со временем естественно переросла в ставшую более актуальной проблему засоренности космического пространства.

К этому времени в научном мире стали активно обсуждаться проблемы динамики естественных малых тел Солнечной

Мгновенное положение в Солнечной системе астероидов (красные круги) и комет (синие), сближающихся с Землей (перигелийное расстояние  $q < 1,3$  а.е.). Желтая звездочка почти в центре – Солнце, показаны орбиты Меркурия, Венеры, Земли и Марса. Зеленые круги – астероиды Главного пояса с перигелийным расстоянием  $q > 1,3$  а.е. Рисунок Центра малых планет (<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/InnerPlot2.html>)



системы, источники притока вещества в околоземное космическое пространство, а также проблема астероидно-кометной опасности для Земли. В упомянутых ниже сборниках были статьи об использовании негравитационных (сублимационных) сил для “увода” от Земли опасных комет и о транспортировке астероида в околоземное пространство. Эта тематика

стала особо актуальной уже в наше время.

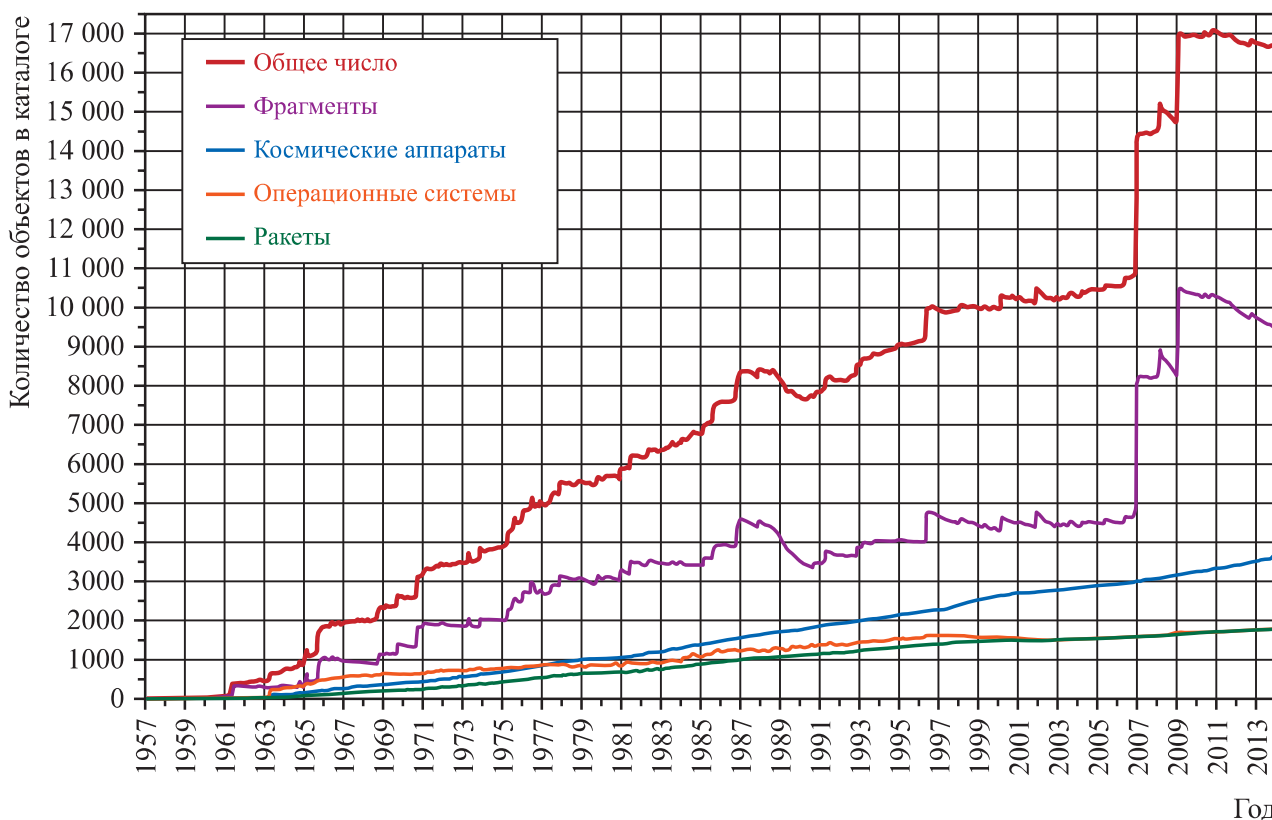
В 1993 г. и в 1995 г. в издательстве “Космосинформ” вышли сборники “Проблема загрязнения космоса (космический мусор)”, подготовленные специалистами нашего института (Земля и Вселенная, 1995, № 4). Как отметил в своей рецензии академик А.А. Боярчук, “...впервые в российской научной литературе рассматривался комплексно вопрос о загрязнении окружающего космического пространства объектами искусственного происхождения”.

А в 1998 г. в том же издательстве уже вышел сборник под названием “Околоземная астрономия (космический мусор)”.

В дальнейшем ИНАСАН каждые два года начал проводить конференции с публикацией трудов “Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы” и “Околоземная астрономия XXI века”; начиная с 2003 г. – “Околоземная астрономия – 2003”. В 2015 г. прошла IX конференция, посвященная изучению движения ИСЗ и космического мусора, средств и методов исследования малых тел Солнечной системы, а также проблеме астероидно-кометной опасности (Земля и Вселенная, 2010, № 2, с. 60–65).



Обложка сборника трудов конференции “Околоземная астрономия – 2015”.



#### ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ И КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР

Ни первый взрыв верхней ступени американской ракеты-носителя "Able-star", которая вывела на орбиту один из первых навигационных спутников "Транзит-4А" в 1961 г., ни первый целенаправленный взрыв по команде с Земли спутника "Космос-50" в 1964 г. не взволновали ученых, создателей космической техники и общественность. Всерьез заговорили о проблеме космического мусора лишь в 1980-х гг. Наблюдаемый в ОКП космический мусор представляет угрозу для окружающей среды, пилотируемых кораблей, орбитальных станций и работающих длительное время

научных космических аппаратов. Вот несколько примеров: в 1978 г. ИСЗ "Космос – 954" упал в таежной части Северной Канады, годом позже обломки американской орбитальной станции "Скайлэб" рассыпались над пустынными районами Австралии. Первое столкновение фрагмента космического мусора с крупным объектом было зафиксировано в июне 1996 г., когда французский спутник "Cerise" врезался в обломок верхней ступени французской ракеты-носителя "Ариан", запущенной десятью годами раньше. В марте 2009 г. из-за позднего обнаружения фрагментов космического мусора оказался невозможным маневр уклонения МКС,

*График состояния загрязненности околоземного пространства космическим мусором. Наблюдается быстрый рост числа искусственных объектов.*

поэтому экипаж был на несколько минут переведен в космический корабль "Союз" для возможной экстренной посадки. В настоящее время маневры уклонения МКС по тем же причинам происходят несколько раз в год.

За 60 лет космической деятельности было осуществлено более 5 тыс. запусков ракет-носителей, с помощью которых на околоземные орбиты выведено почти 6 тыс. космических аппаратов. Накопленная масса



*Астрономические инструменты ИНАСАН для наблюдения тел в околоземном космическом пространстве: а – высокоточная астрономическая установка ВАУ; б – астрономическая фотографическая установка АФУ-75; в – фотографическая камера SBG производства “Карл Цейс”.*

геостационарная орбита высотой 35 786 км.

В числе первых публикаций, упомянутых во введении к Трудам конференций, были работы сотрудников Астросовета, которые получили дальнейшее развитие. Фотографические наблюдения ИСЗ и их каталогизация, фотометрия низкоорбитальных космических аппаратов начинались на Звенигородской обсерватории с помощью фотокамер АФУ-75 и SBG, а также высокоточной астрономической установки ВАУ.

В настоящее время основной массив данных об объектах космического мусора в различных областях околоземного пространства (включая область ГСО) получают с помощью ПЗС-приемников на комплексе телескопа Цейс-2000 Терскольского филиала ИНАСАН в Приэльбрусье.

Проводились телевизионные наблюдения ОКП с целью обнаружения фрагментов космического мусора (А.В. Багров, М.А. Смирнов); было

искусственных объектов в ОКП приближается к 7 тыс. тонн. В настоящее время в ОКП зарегистрировано и находится под постоянным контролем около 20 тыс. объектов размером более 10 см. При этом только 7% являются функционирующими космическими аппаратами.

Наиболее полными каталогами, в которые занесены существующие на орбитах объекты и их фрагменты, являются

каталоги служб Контроля космического пространства США и России. В 1998 г. NASA впервые выполнило систематизацию наблюдаемых объектов и их фрагментов.

Наиболее чувствительные (из-за высокой “населенности” космическими аппаратами) к проблеме космического мусора области ОКП – это район низкой околоземной орбиты, простирающийся до высоты 2 тыс. км, а также

*Наблюдатель Н. С. Бахтигараев с телескопом Цейс-2000 на Терскольской обсерватории ИНАСАН.*

предложено проводить наблюдения фрагментов космического мусора с помощью телескопа, расположенного на геостационарном спутнике (А.М. Микиша, М.А. Смирнов, Г.Б. Шоломицкий); исследовалась динамика роста обломков космического мусора, связь взрывов на низких орбитах и солнечной активности (Т.В. Касименко, Л.В. Рыхлова) и вековая эволюция орбит спутников под воздействием светового давления (А.М. Микиша, Е.С. Новикова, Л.В. Рыхлова, М.А. Смирнов); выполнялось математическое моделирование процесса образования и эволюции техногенных частиц в ОКП (В.И. Шематович); предложено использование геостационарных спутников для решения задач геодинамики (А.М. Микиша, М.А. Смирнов, А.С. Сочилина); разработана схема транспортировки астероида в околоземное космическое пространство (А.М. Микиша, М.А. Смирнов, С.А. Смирнов). Некоторые из идей, заложенных в этих работах, существенно опередили свое время.

В последние годы проблема космического



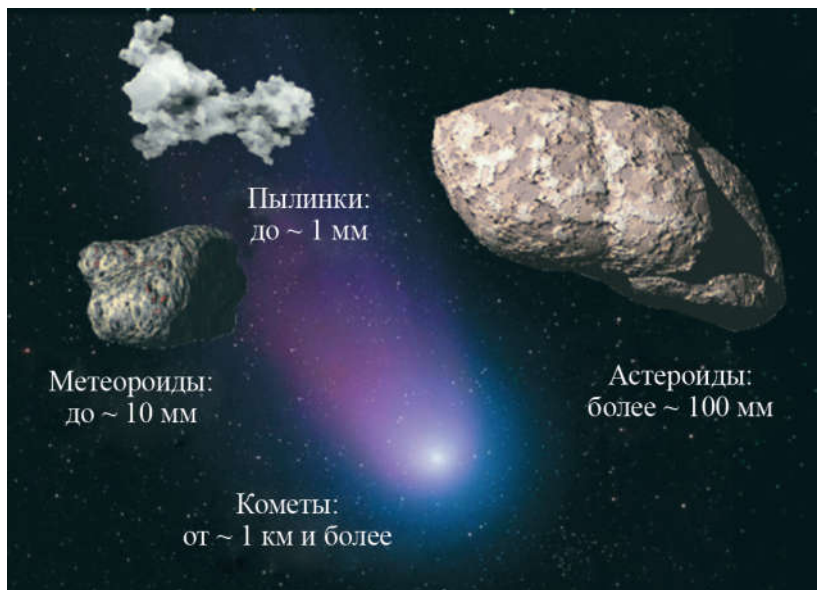
мусора значительно усложнилась из-за обнаружения множества объектов с нехарактерной для ИСЗ большой парусностью, а также вследствие появления на разных орбитах множества нано- и пикоспутников (Земля и Вселенная, 2004, № 2). Появилась другая проблема – связанная с накоплением и распространением в ОКП радиоактивных материалов.

Таким образом, космический мусор требует тщательного и постоянного научного исследова-

ния. Необходимо поддерживать каталог известных малоразмерных объектов, проводить наблюдения для уточнения их орбит, открывать и “сопровождать” новые объекты, определять их орбиты, уточнять модели движения объектов неизвестной формы.

#### МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Новые знания в исследовании Солнечной системы, полученные человечеством на рубеже XX–XXI вв., поражают



*Размеры малых тел Солнечной системы.*

воображение; этому способствовало несколько факторов. Во-первых, появились крупные наземные оптические телескопы, целенаправленно исследующие дальний космос вплоть до границ Вселенной. Во-вторых, появилось принципиально новое оборудование на основе сверхчувствительных матричных приемников излучения с зарядовой связью (ПЗС-камеры). Их высокая квантовая эффективность дает возможность всего лишь за 30 с получать изображения точечных источников излучения (до  $24^m$ ) с помощью телескопов диаметром зеркала около 2 м, а гигантское поле зрения обеспечивает возможность проведения скоростных обзоров. Появились быстродействующие компьютеры, позволяющие сравнивать изображения исследуемой области неба, полученные в разное время, с целью

выделения перемещающихся на фоне звезд объектов. Накопленные базы данных дают возможность быстрого сравнения полученных результатов при поиске новых небесных объектов.

У планет Солнечной системы были открыты десятки неизвестных ранее спутников. Пояс Койпера, существующий за орбитой Нептуна на расстоянии 35–40 а.е. от Солнца, стал изучаемым объектом: открыто несколько сотен новых транснептуновых объектов, часть из них по орбитальным характеристикам близки к Плутону (Земля и Вселенная, 2006, № 2). По этой причине выделена группа планет-карликов, а бывшая планета Плутон стала одной из них. По решению МАС в 2006 г. все другие тела Солнечной системы (кометы, астероиды, метеороиды) стали называть малыми телами. По современным

оценкам, в поясе Койпера может находиться 70–100 тыс. тел размером более 100 км. У некоторых из них (Плутон, Эрида, Хаумеа) были открыты спутники (Земля и Вселенная, 2006, № 2, с. 49–50; 2011, № 6, с. 46; 2012, № 1; 2012, № 6, с. 53; 2013, № 6, с. 95).

Избранные астероиды детально исследованы автоматическими межпланетными станциями (Веста, Церера, Итокава, Эрос; Земля и Вселенная, 2006, № 1, с. 76; 2012, № 1, с. 35–37; 2012, № 3, с. 40; 2013, № 1, с. 106–107; 2015, № 5, с. 110; 2016, № 3, с. 55). Спускаемый аппарат японской АМС “Хаябуса” доставил в 2010 г. на Землю образцы грунта с астероида Итокава (Земля и Вселенная, 2010, № 2, с. 23; 2010, № 6, с. 49). До этого эксперимента земные лаборатории располагали только пробами лунного грунта, а вещество с других планет или малых тел Солнечной системы оказывалось на Земле только в виде метеоритов. Исследованы также ядра некоторых комет (Вильда 2, Темпеля 1 Чурюмова–Герасименко; Земля и Вселенная, 2005, № 2, с. 61–62; 2006, № 6, с. 106–107; 2015, № 4).



В Главном поясе астероидов, между Марсом и Юпитером, еще недавно насчитывали тысячи астероидов. Сегодня известно о многих сотнях тысяч таких объектов (по данным Центра малых планет). За весь XIX в. было открыто около 500 астероидов. За XX в.— 5 тыс. астероидов. В XXI в. за одну ночь открывают по несколько сотен новых астероидов.

Но не менее важно изучать уже открытые астероиды. Современные методы многоцветной фотометрии, спектроскопии и поляриметрии позволяют получить информацию об астероиде: абсолютную звездную величину, скорость и наклон оси вращения; форму объекта и наличие у него спутников; минеральный состав;

плотность и пористость, средний размер неровностей и шероховатости его поверхности. На основе астрометрических наблюдений уточняются динамические характеристики орбит астероидов. Фотометрические наблюдения с использованием разных фильтров дают информацию о показателях цвета и позволяют определять таксономический класс и химический состав астероидов. Такая информация, с одной стороны, необходима для понимания природы этих объектов, эволюции их орбит и места происхождения в Солнечной системе; с другой — эти сведения нужны для понимания степени их опасности в случае возможного сближения или столкновения с Землей.

*Карликовые планеты Солнечной системы.*

Наряду с тем, что количество открытий новых астероидов продолжает быстро расти, до сих пор физико-химические свойства известны лишь для десятков—сотен изученных астероидов. В этом направлении проводится большая работа, она представляет не только научный интерес, но и практический. В NASA разрабатываются проекты доставки небольших астероидов на окололунную и околоземную орбиты с целью изучения и возможной добычи на них полезных ископаемых. В ИКИ РАН



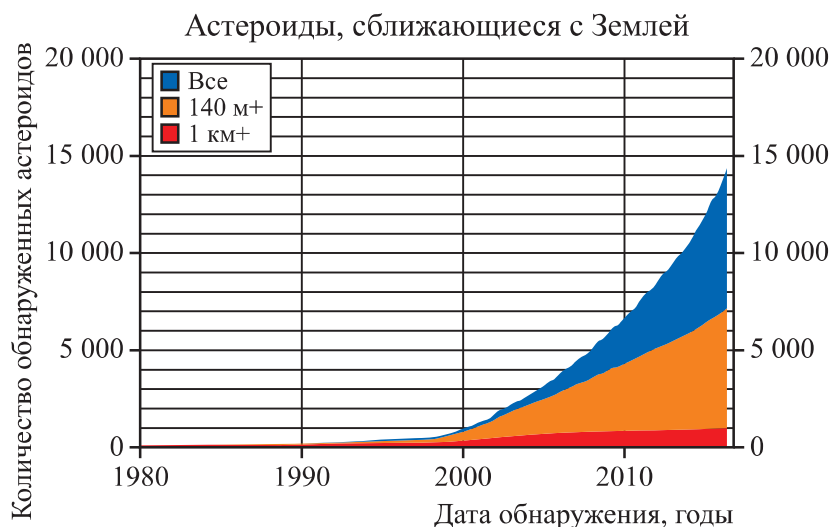


График роста числа открываемых опасных астероидов, сближающихся с Землей.

выполняются исследования по разработке методов управления движением астероидов. Цель работ – создание технологий, которые позволят отклонять опасные небесные тела от траекторий возможного столкновения с Землей, или переводить их на орбиты спутника Земли для дальнейшего исследования или использования в качестве источника ценных ресурсов.

Одна из главных тем, над которыми работают ученые нашего Института в настоящее время, – изучение малых тел Солнечной системы, путей их миграции, динамики, структурных и физических характеристик. Вновь обращаясь к публикациям сборников “Трудов конференций по околоземной астрономии за 1998 г.”, обращаем внимание читателей на статью А.М. Микиши, М.А. Смирнова, С.А. Смирнова “Транспортировка астероида в околоземное космическое пространство”.

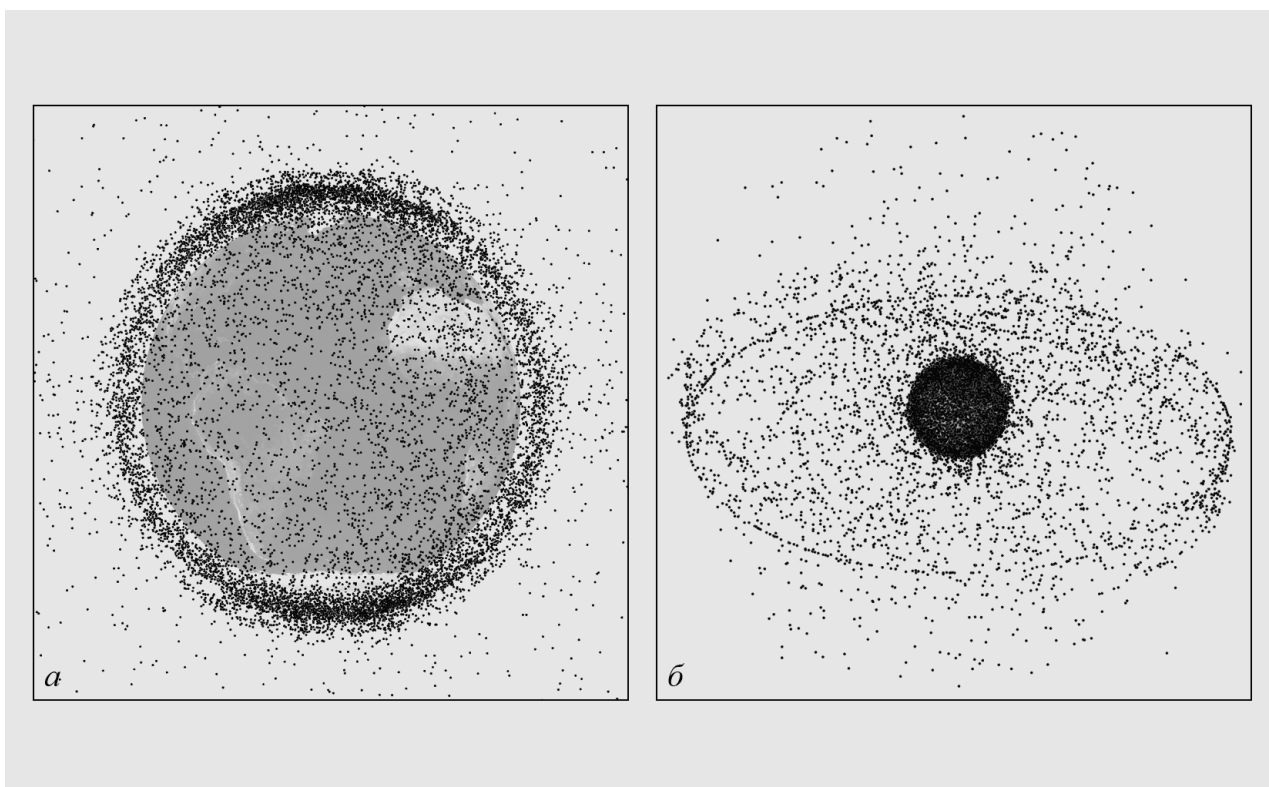
В качестве способов передвижения больших тел в космосе рассматривалась реактивная тяга, поглощение импульса, переносимого внешним телом, и упругое соударение.

#### АСТЕРОИДНО-КОМЕТНАЯ ОПАСНОСТЬ

Астероидно-кометная опасность как угроза столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы, стала проблемой, требующей изучения; она обозначилась примерно два десятилетия назад – с появлением специализированных программ наблюдений малых тел. В результате планомерных наблюдений было обнаружено много потенциально опасных для Земли тел. Первый проект США “Космическая стража”, разработанный для раннего обнаружения опасных небесных тел, был ориентирован на обнаружение в 1998–2008 гг. более 90% опасных астероидов размером

более 1 км (Земля и Вселенная, 2011, № 3). Падение астероида такого размера может вызвать глобальную катастрофу на Земле. Оказалось, что такие астероиды есть, но их всего лишь несколько десятков. Зато количество опасных тел размером менее 1 км оценивается в десятки или сотни тысяч. Поэтому на втором этапе – в проекте США “Космическая стража-2” – планируется за 15 лет обнаружить и каталогизировать около 90% всех астероидов и комет размером от 140 м, опасно сближающихся с Землей. На начало 2016 г. таких объектов обнаружено около 15 тысяч; число их быстро растет.

Задача фундаментальной науки – разработка эффективных средств предотвращения (или уменьшения) возможных последствий столкновения небесных тел с Землей. Для оценки размеров и физико-химических параметров опасных небесных тел основную информацию дают фотометрические и спектрофотометрические наблюдения астероидов и ядер комет. Ценную информацию получают при помощи радиолокационных



и поляриметрических наблюдений. Все перечисленные типы наблюдений очень трудоемки, и потому изученных опасных объектов пока очень немного. Например, известный астероид Апофис до его обнаружения неоднократно сближался с Землей. Исследования показали, что его повторные резонансные сближения (после ожидаемого близкого сближения в 2029 г.) будут возможны вплоть до его прямого столкновения с Землей в последующие годы (Земля и Вселенная, 2007, № 1, с. 99). История наблюдений Апофиса показала, что большинство небесных тел (при условии их пролета вблизи Земли) всегда будут представлять опасность из-за возможности их повторений.

Последствия удара небесного тела о Землю (помимо его размера и химического состава) определяются скоростью, углом падения тела, структурой космического тела и многими другими геофизическими факторами. Имеет большое значение плотность “населения” на территории падения, насыщенность данного района промышленными объектами.

Событие 15 февраля 2013 г. в небе над Челябинском – вход в атмосферу Земли тела размером 16–20 м под углом примерно  $20^\circ$  к горизонту и последующий взрыв – сопровождалось большой областью разрушений. Взрыв произошел в атмосфере на высоте примерно 23 км, он сопровождался мощной

*Схема положения искусственных объектов в околоземном космическом пространстве: а – на низких орбитах, б – на высоких. Рисунки NASA.*

ударной волной; энергия взрыва была оценена в 300–500 кт. По сообщению МЧС, разрушения от взрывной волны были зафиксированы в Челябинске и десяти районах области. За медицинской помощью обратились более 1600 человек (Земля и Вселенная, 2014, № 5). С точки зрения проблемы астероидной опасности, Челябинское событие представляет уникальный случай, поскольку впервые это событие регистрировалось активно многими техническими средствами.

В феврале 2009 г. на 46-й сессии Научно-технического подкомитета Комитета ООН по мирному использованию космоса был озвучен документ, в котором подчеркивалось, что проблема астероидно-кометной опасности имеет глобальный характер и должна рассматриваться как объект международного сотрудничества.

В России на уровне мировых стандартов развиваются лишь теоретические исследования. Задачи обнаружения и мониторинга астероидов, сближающихся с Землей, ведутся инициативно, без необходимой координации и целевого финансирования. После события, произошедшего в Челябинске, было объявлено о создании в России «Программы по защите от космических угроз». Проект такой программы был

разработан еще в 2010 г. Экспертной рабочей группой по проблеме астероидно-кометной опасности, созданной при Совете РАН по космосу. Программа была представлена на совместном заседании Президиума НТС Роскосмоса и Бюро Совета РАН по космосу и получила одобрение. Но на этом все и остановилось. Возможно, при осуществлении новой Федеральной космической программы на 2016–2025 гг. ситуация изменится к лучшему.

Сфера исследований околоземной астрономии (отрасли, появившейся из-за необходимости наблюдений за неизвестными прежде объектами) теперь включает исследование всех природных и искусственных тел, находящихся в околоземном пространстве или проходящих через него). В ИНАСАН разрабатыва-

ются проекты космических телескопов для исследования таких объектов.

По современным оценкам для обнаружения более 90% входящих в околоземное пространство тел, представляющих потенциальную угрозу для планеты Земля, необходимо круглосуточное наблюдение за небосводом. Однако погодный фактор, а также невозможность проводить наблюдения в области пространства в угловой окрестности Солнца из-за засвечивания аппаратуры заставляет астрономов искать другие решения этой проблемы с помощью специальных космических аппаратов.

Автор благодарит Е.С. Баканас за помощь в оформлении статьи и рисунков.