

УДК 523.44:521.314; 523.64:521.314; 621.396.96

**Ю. Д. Медведев, Ю. С. Бондаренко, Д. Е. Вавилов, В. А. Шор**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт прикладной астрономии Российской академии наук  
Набережная Кутузова 10, Санкт-Петербург, Россия, 191187  
medvedev@ipa.nw.ru

### **Проблемы исследования астероидно-кометной опасности**

*Очерчен круг наиболее актуальных задач, возникающих при решении проблемы астероидно-кометной опасности. Сделан обзор работ, проводимых в рамках этой проблемы в Институте прикладной астрономии Российской академии наук. В настоящее время в институте ведутся работы по созданию информационного центра, в задачи которого входят сбор и обработка оптических и радиолокационных наблюдений малых тел Солнечной системы, определение их орбит и оценка степени угрозы столкновения вновь открываемых малых тел с Землей, Луной и другими большими планетами, и их спутниками.*

*ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ АСТЕРОЇДНО-КОМЕТНОЇ НЕБЕЗПЕКИ, Медведев Ю. Д., Бондаренко Ю. С., Вавилов Д. Е., Шор В. А. — Окреслено коло найбільш актуальних завдань, що виникають при вирішенні проблеми астероїдно-кометної небезпеки. Зроблено огляд робіт, що провадяться в рамках цієї проблеми в Інституті прикладної астрономії Російської академії наук. В даний час в інституті ведуться роботи зі створення інформаційного центру, в завдання якого входять збір і обробка оптичних і радіолокаційних спостережень малих тіл Сонячної системи, визначення їхніх орбіт і оцінка ступеня загрози зіткнення знову відкритих малих тіл із Землею, Місяцем та іншими великими планетами та їхніми супутниками.*

*PROBLEMS OF ASTEROID-COMET HAZARD, by Medvedev Yu., Bondarenko Yu., Vavilov D., Shor V. — The most urgent challenges which arise when solving the problem of asteroid-comet hazard are considered. A review of works that carried out within this problem in the Institute of Applied Astronomy is given. At present, a project of creating an information center, whose tasks include the collection and processing of optical and*

*radar observations of small Solar system bodies, the determination of their orbits and the estimation of the impact hazard of discovered bodies with the Earth, the Moon and the other major planets and their satellites is developing in the Institute.*

Традиционно к малым телам Солнечной системы относят астероиды, кометы, естественные спутники планет и метеорные потоки. Количество открываемых малых тел в Солнечной системе постоянно увеличивается. Так, если в начале прошлого века было известно всего несколько сотен астероидов и комет, а также около двух десятков спутников, то в настоящее время известно более 450 тысяч нумерованных и 250 тысяч ненумерованных астероидов; 330 нумерованных короткопериодических и 3500 долгопериодических комет; 173 спутника планет и 50 метеорных потоков. Кроме того, предполагается, что у более 10 % астероидов имеются спутники.

По мере роста количества открываемых малых тел и расширения наших знаний о их физике и динамике изменялась и роль малых тел в Солнечной системе. Основным воздействием малого тела на планету является столкновение с нею. В результате столкновения, в зависимости от скорости и массы малого тела, выделяется энергия, изменяется состав атмосферы и поверхностный слой планеты-мишени. Ярким примером такого события явилось падение на Юпитер в июле 1994 г. обломков кометы Шумейкеров — Леви 9. В июле 1992 г. эта комета прошла на расстоянии менее 100 000 км от Юпитера и из-за приливного воздействия разделилась на 21 фрагмент. В период с 16 по 22 июля все фрагменты кометы Шумейкеров — Леви 9, как было предсказано заранее [2], упали на Юпитер, вызвав значительные возмущения в его атмосфере. Так, пятно, образовавшееся на диске Юпитера в результате падения одного из фрагментов, уже через 1 ч 45 мин достигло диаметра 9 тыс. км (1.5 диаметра Земли). Общее количество энергии, выделившееся при падении осколков кометы, по различным оценкам составило  $10^{35}$ — $10^{37}$  Дж, или  $10^5$ — $10^7$  мегатонн в тротиловом эквиваленте.

Особое место среди этой проблематики занимает опасность столкновения Земли с небесными телами кометной и астероидной природы, которую принято называть проблемой астероидно-кометной опасности (АКО).

Проблема эта относительно молодая: она едва насчитывает три десятилетия. Хотя опасность была всегда, ранее для ее осознания не хватало фактов и объединяющей теории. На земной поверхности, дне океанов и морей были обнаружены около двух сотен кратеров ударного происхождения размером от нескольких сотен метров до 200... 300 км в поперечнике. Такие кратеры образовались в результате столкновения Земли с космическими телами от десятков метров до десяти километров и более в поперечнике со скоростями 12...72 км/с. Большинство более мелких кратеров исчезли в результате геологических,

гидрологических и атмосферных процессов. Однако о непрекращающейся относительно стабильной ударной бомбардировке свидетельствует фиксация этих событий на поверхности Луны.

Приносимая на Землю энергия является основным фактором, от которого зависят последствия столкновения. В отличие от других природных земных катаклизмов, энергия падающего тела может быть практически неограниченно большой, ввиду чего последствия катастрофы могут охватить практически всю Землю. Точную величину энергии, приводящей к глобальной катастрофе, оценить трудно, поскольку последствия, помимо приносимой энергии, зависят еще от ряда факторов (места падения, минералогического состава тела и пород в месте удара и т. п.), тем не менее, по современным данным такая энергия оценивается величиной порядка  $10^6$  мегатонн в тротиловом эквиваленте, что примерно равно величине энергии, выделяющейся при столкновении с Землей тела размером 1...2 км и скоростью порядка 20 км/с. Считается, что глобальная катастрофа может унести жизни значительной части современного населения Земли. Основные потери при этом связаны не только с прямым воздействием удара (землетрясениями, цунами, разбросом осколков на сотни километров вокруг, пожарами), а с побочными эффектами (уменьшением прозрачности атмосферы в результате выброса в нее большого количества пыли и пепла, нарушением глобальной циркуляции атмосферы и ее состава, наступлением «послеударной зимы», снижением фотосинтеза, кислотными дождями, неурожаем, голодом, эпидемиями). Средняя частота глобальных катастроф составляет примерно один раз в несколько миллионов лет.

Падения тел меньшей энергии, размером от сотен метров до одного километра, приводят к региональным катастрофам, которые могут охватывать материи или их части. Число жертв здесь существенно меньше, но все еще велико, особенно при падении тел в океан на сравнительно небольшом расстоянии от берега. Возникающие цунами способны опустошить береговую линию на протяжении сотен, если не тысяч километров. Падения тел подобных размеров происходят раз в несколько сотен тысяч лет.

Падения тел от примерно двадцати метров в поперечнике до ста пятидесяти метров способны вызвать катастрофы лишь небольшого масштаба. Такие тела в зависимости от состава и композиции могут либо достигать Земли с потерей части космической скорости, либо полностью разрушаться в атмосфере Земли, причем процесс разрушения протекает лавинообразно и сопровождается выделением тепловой и лучистой энергии, как это имело место при падении «Тунгусского метеорита» в 1908 г., в результате чего деревья в сибирской тайге были повалены на площади более 2000 км<sup>2</sup>. События такого масштаба происходят раз в несколько сотен — несколько тысяч лет.

Тела размером меньше 20 м в поперечнике считались телами, не представляющими угрозы для людей и материальных ценностей. Однако падение Челябинского метеорита опровергло это мнение. Взрыв

в атмосфере Челябинского метеорита диаметром 15...18 м, скромного по астрономическим меркам тела, привело к довольно существенным материальным потерям — около 1 млрд рублей. Поэтому в настоящее время актуальна задача каталогизации малых тел вплоть до декаметрового размера.

Осознание проблемы АКО произошло в тесной связи с увеличением наших знаний о населенности Солнечной системы телами, особенно теми, которые могут столкнуться с Землей. За время изучения проблемы АКО произошел значительный прогресс в понимании природы данной опасности и определились возможные пути противодействия ей. Уже на начальной стадии изучения проблемы возникло представление о том, что первым шагом на пути ее решения должна стать возможно полная каталогизация опасных небесных тел и анализ их движения на протяжении ближайших десятилетий. Возможные пути решения проблемы требуют понимания, с какой опасностью приходится иметь дело, каким закономерностям подчиняется распределение опасных тел в пространстве и какова частота их столкновения с Землей. Было ясно, что проблема является комплексной, что одним изучением объектов, сближающихся с Землей (ОСЗ), противодействие не ограничится, что за изучением должно последовать возможное активное противодействие (изменение орбит угрожающих тел или их разрушение), что является сложной и дорогостоящей научно-технической задачей.

Исследование движения малых тел Солнечной системы, астероидов и комет традиционно являлось одним из важных направлений деятельности Института прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН).

В настоящее время в ИПА РАН функционирует «Вычислительно-аналитический стенд», обрабатывающий в реальном времени поступающую информацию об открытиях и наблюдениях потенциально опасных тел [<ftp://quasar.ipa.nw.ru/pub/Collision>]. В состав этого стенда входит программа, которая выявляет на сайте Международного планетного центра появление новых электронных циркуляров (MPEC) с сообщениями об открытии опасных для Земли небесных тел. В случае появления такого циркуляра программа считывает наблюдения опасного тела, вычисляет его номинальную орбиту и эллипсоид рассеяния возможных орбит, производит вычисления обстоятельств сближения этого тела. Затем производится оценка вероятности столкновения тела с Землей. С этой целью вычисляется проекция эллипсоида рассеяния виртуальных астероидов на плоскость цели (плоскость, проходящую через центр Земли нормально к вектору относительной скорости астероида) в момент, соответствующий входу астероида в сферу действия Земли. В зависимости от количества, качества наблюдений и величины наблюдаемой дуги орбиты производится линейная или нелинейная оценка параметров эллипса рассеяния на плоскости цели [6]. Для выявления тесных сближений или столкновений на длительных интервалах времени производится вариация на-

ибо более неустойчивого элемента орбиты (среднего движения) и прослеживание движения большого числа виртуальных тел (с варьированным значением одного элемента и номинальными значениями прочих элементов) на протяжении нескольких десятилетий путем численного интегрирования с учетом всех ощутимых возмущений.

Кроме этого, в ИПА РАН разработаны и реализованы и другие методы оценки вероятности. Это, в первую очередь, новый линейный метод, основанный на оригинальной криволинейной системе, позволяющий надежно определять величину вероятности столкновения при отсутствии тесных сближений [5]. Метод Line of Variations (LOV), который широко используется лабораторией реактивного движения NASA и Пизанским университетом в Италии, реализован для вычислений с 32-разрядной десятичной сеткой.

В пакете программ, входящих в стенд, имеется программа, использующая новый метод определения предварительной орбиты, основанный на переборе возможных орбитальных плоскостей тела с последующим определением расстояний от наблюдателя до точек пересечения выбранной плоскости с векторами направления на объект [4].

Программа уточнения орбит малых тел позволяет определять негравитационные эффекты в движении комет и астероидов [3], возникающие из-за сублимации вещества с поверхности ядер комет или из-за эффекта Ярковского в движении астероидов.

Стенд позволяет моделировать движение тел астероидной и кометной природы в атмосфере Земли с учетом ее сопротивления, оперативно определять район вероятного места падения, вычислять энергию, выделившуюся на разных участках движения в атмосфере, а также оценивать основные поражающие факторы. При обнаружении астероида или кометы, сталкивающейся с Землей или Луной, выдается информация о месте и времени падения небесного тела [1].

В случае обнаружения новых интересных небесных тел, достаточно близко подходящих к Земле (несколько диаметров орбиты Луны) планируется организовывать исследование этих тел радиотехническими средствами. С этой целью создан комплекс программ, в задачи которого входит эфемеридная поддержка радиолокационных наблюдений, которая позволяет уточнять орбиты и периоды собственного вращения небесных тел в автоматическом режиме по мере поступления новых позиционных и фотометрических наблюдений.

Новым направлением исследований в проблематике астероидно-кометной опасности в Институте является проведение радиолокационных наблюдений малых тел, сближающихся с Землей. Радиолокационные наблюдения позволяют исследовать поступательно-вращательное движение астероидов и комет, сближающихся с Землей, уточнять форму, параметры вращения и физические характеристики их поверхностного слоя, оценивать параметры орбиты, а значит более точно вычислять вероятность столкновения этих тел с Землей и Луной. При проведении радиолокационных наблюдений используется

разделенная схема, когда локация и прием отраженного сигнала производятся различными радиотелескопами. В качестве приемников используются 32-м антенны сети «Квазар», объединяющей три обсерватории: Бадары, Зеленчукская и Светлое, локатором служит 70-м антенна обсерватории Голдстоун. Проведенные в июле 2015 г. наблюдения астероида 2011 UW158 показали эффективность такой схемы.

В ходе обработки наблюдений радиоэха от этого астероида удалось получить оценки величины доплеровского смещения сигнала для нескольких моментов времени, исследовать изменения уширения сигнала, вследствие вращения астероида, что позволило оценить форму и период вращения этого астероида вокруг своей оси. Оценки амплитуды сигналов для различных поляризаций позволили оценить физические свойства поверхностного слоя астероида.

В ближайшие три года планируется получить радиолокационные наблюдения астероидов 2009 DL46 и 2012 TC4 (в мае 2016 г. и в октябре 2017 г.), двойных астероидов 363599 2004 FG11 и 66391 1999 KW4 (в апреле и мае 2018 г.), кометы 46P/Виртанен (в декабре 2018 г.), а также астероида 3200 Фаэтон (в декабре 2017 г.).

На основе данных этих наблюдений будут построены численные модели поступательно-вращательного движения астероидов 2009 DL46 и 2012 TC4, изучены физические и химические свойства их поверхностей. Получены орбиты компонентов двойных астероидов 363599 2004 FG11 и 66391 1999 KW4. Исследована форма и сделаны оценки гравитационных потенциалов главных компонентов этих астероидов. Локация ядра кометы 46P/Виртанен позволит получить представление о форме его ядра, получить параметры его вращений. Исследование комы этой кометы позволит сделать оценки размеров частиц, вылетающих с ее поверхности в результате сублимации, подтвердить или опровергнуть наличие больших по размеру частиц в коме этой кометы во время ее сближений с Землей. Особый интерес представляет исследование астероида 3200 Фаэтон, который, вероятно, является потухшей кометой.

В ИПА РАН регулярно вычисляются обстоятельства сближения с Землей потенциально опасных тел, эти данные помещаются на сайте института в виде каталога [<http://www.ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/LSBSS/hazard/>].

В заключение можно еще раз подчеркнуть, что астероидно-кометная опасность является важной научной проблемой, которая включает в себя решение практических задач, от которых зависит спасение жизни и имущества людей.

1. Бондаренко Ю. С., Медведев Ю. Д. Определение траектории движения небесных тел в атмосфере Земли // Вестник СибГАУ. 2014. № 4 (56). С. 16–24.
2. Клумов Б. А., Кондауров В. И., Конохов А. В. и др. Столкновение кометы Шумейкер — Леви 9 с Юпитером: что мы увидим // Успехи физ. наук. 1994. 164, № 6. С. 617–630.

3. *Bondarenko Yu. S., Medvedev Yu. D.* Long-term numerical theories of comet motion // *Solar System Res.* 2010. **44**, N 2. P. 144–151.
4. *Bondarenko Yu. S., Vavilov D. E., Medvedev Yu. D.* Method of determining the orbits of the small bodies in the solar system based on an exhaustive search of orbital planes // *Solar System Res.* 2014. **48**, N 3. P. 212–216.
5. *Vavilov D. E., Medvedev Yu. D.* A fast method for estimation of the impact probability of near-Earth objects // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2015. **446**, N 1. P. 705–709.
6. *Zabotin A. S., Medvedev Yu. D.* On the accuracy of the orbit of asteroid (99942) Apophis at the time of its encounter with the Earth in 2029 // *Astron. Lett.*—2009.—**35**, N 4.—P. 278—285.

Статья поступила в редакцию 01.12.15