

М.Г. Ишмухаметова^{1,2}, Е.Д. Кондратьева¹¹Казанский государственный университет, Казань²Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгардта, Казань
mig@ksu.ru

АСТЕРОИДНО-КОМЕТНАЯ ОПАСНОСТЬ: К 100-ЛЕТИЮ ТУНГУССКОГО ВЗРЫВА

Малые тела Солнечной системы размером от 10 до 100 метров выделяют в отдельную группу инасанов. К подобным объектам относится и Тунгусский метеорит. Вероятность столкновения с Землей подобных объектов составляет примерно один раз в сто лет. Инасаны трудно обнаружить, вследствие чего они представляют реальную опасность для Земли. В работе рассмотрены критерии генетического отождествления космических объектов типа группы «инасанов» с родительскими телами.

Земля, как и другие планеты и их спутники, регулярно испытывает столкновения с космическими телами. На поверхности Земли сохранилось не менее 130 кратеров диаметром до 250 км, имеющих различный возраст. Знаменитый Аризонский кратер в США (Рис. 1) имеет диаметр 1200 м и глубину 175 м. Кратер образовался при падении железного астероида размером примерно 60 м около 50 тыс. лет назад. Все больше подтверждений находит и точка зрения, что внезапное вымирание динозавров объясняется столкновением Земли с огромным астероидом.

Вблизи Мексики у полуострова Юкатан обнаружен кратер, диаметр которого достигает 180 км, а его возраст оценивается учеными порядка 65 млн. лет. В геологических слоях кратера, относящихся к этому периоду, обнаружено содержание иридия в сотни раз превышающее концентрацию в других слоях. Как известно, иридий в больших количествах содержится в метеоритах. Еще одна глобальная космическая катастрофа, возможно, произошла примерно 10 тыс. лет назад и послужила причиной вымирания «мамонтной» фауны. Эти глобальные космические катастрофы стали важным фактором в процессе развития жизни на Земле.

30 июня 2008 г. исполняется сто лет со дня таинственного взрыва в районе реки Подкаменная Тунгуска на территории России. После взрыва на поверхности Земли не было обнаружено никаких воронок и осколков метеоритов. Это породило целый ряд экзотических гипотез: встреча с телом из антивещества, небольшой черной дырой, взрыв «летающей тарелки» и т.д. Первая научная экспедиция под руководством Л.А.Кулика обследовала территорию только в 1927 г. В настоящее время наиболее реальной является версия о столкновении с телом кометного происхождения размером около 50 м. Выводы основаны на показаниях очевидцев и расчетов в рамках механики и аэродинамики.

Из общей массы свидетельских показаний 47% детально описали строение болида, выделив в нем ядро и хвост («комоч пламени», «огненный шар» с огненным, огненно-белым, розово-красным хвостом «метлой»). Таким образом, большинство исследователей сходятся во мнении, что Тунгусский болид не мог быть каменным, железнокаменным или железным астероидом. При сгорании таких объектов в атмосфере остается темный шлейф дыма. Можно предположить, что тело состояло из водяного льда и углеводородных компонент, в частности, метана. В результате взаимодействия с атмосферой и резкого торможения тела происходил интенсивный сброс массы кометного вещества, что привело к образованию облака горячей смеси. Замеченная очевидцами белая полоса и дымка, оставшаяся на

небе после пролета болида, может быть результатом испарения водяного льда при разогреве ядра кометы.

Важной деталью в показаниях очевидцев является тот факт, что тело развалилось во время пролета на мелкие фрагменты, которые, сгорая, были видны в виде искр или даже «красных как раскаленный уголь» фрагментов. Показания очевидцев, отсутствие воронки и осколков метеорита на поверхности земли привели к выводу, что тело взорвалось или распалось в воздухе. Вывал леса был установлен на площади 2150 ± 50 кв. м, причем расположение поваленных деревьев имело хорошо выраженное радиальное направление. Приблизительно в середине вываленного леса на протяжении 3-5 км был обнаружен так называемый телеграфный лес – вертикально стоящие стволы без веток (Рис. 2). Такое разрушение могло быть произведено как сосредоточенным, так и протяженным взрывом. В первом случае, оценивая скорость напора воздуха в ударной волне, способной вызвать такой вывал леса, вычисленная энергия эквивалентна мощности заряда, равной примерно 10 мегатонн тротила. Высота взрыва была оценена по размеру площади телеграфного леса и составила около 6–10 км (Ben-Menahem, 1975). Такой вывал мог быть произведен и баллистической ударной волной от летящего под большим углом к поверхности Земли со сверхзвуковой скоростью телом, которое разрушается на некоторой высоте и тормозится до звуковой скорости (Козин и Коротков, 2000).

Гипотеза падения каменного тела или углистого хондрита не подтверждается, прежде всего, отсутствием осколков в месте падения. Это несмотря на то, что многочисленные экспедиции занимались исследованием этого района. Крупное каменное тело при полете в атмосфере должно испытывать процесс дробления под действием давления на лобовую поверхность. Действительно, именно каменные и углистые метеориты находят чаще всего. Феномен Тунгусского метеорита продолжает привлекать внимание ученых. В этом году планируется провести ряд научных конференций, посвященных столетию Тунгусского события и обсуждению проблем, связанных с астероидно-кометной опасностью и космическим техногенным мусором.

Вероятность столкновения Земли с космическим телом, подобным Тунгусскому, составляет примерно один раз в сто лет. Пространственная плотность малых тел Солнечной системы, проходящих через околоземное пространство, в зависимости от массы представлена на Рис. 3 (Багров и др., 2003). Крупные метеороиды размером в пределах 10-100

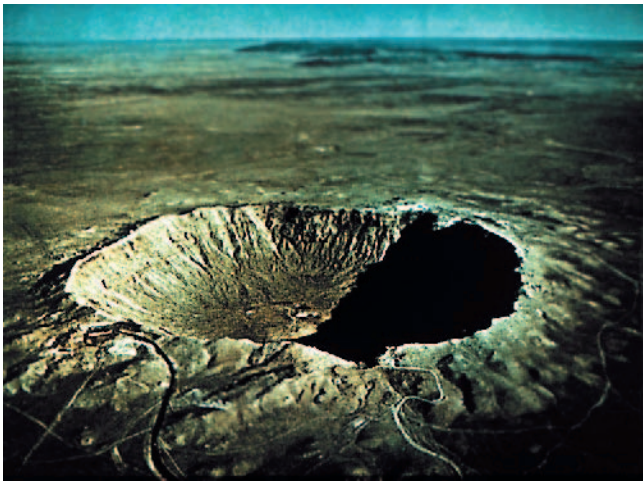


Рис. 1. Аризонский кратер в США – место падения железного метеорита.

м, в некоторых источниках их называют инасанами, имеют малую яркость и большую видимую скорость, а также неопределенность направления их прихода. Потому малые тела данного класса трудно обнаружить в телескопы, и в этом их опасность. Существуют два варианта воздействия на опасный космический объект: это разрушение самого объекта или изменение его траектории. В любом случае объект необходимо обнаружить как можно раньше.

Все обнаруженные на сегодня инасаны принадлежат к метеорным потокам. Генетическое отождествление зарегистрированного метеороида с метеорным роем можно выполнить разными способами. Способ сравнения радиантов является наиболее надежным в том случае, когда координаты радианта метеорного потока известны, а площадь радиации небольшая, то есть для хорошо изученных и сравнительно молодых метеорных роев. Способ D-критерия более универсальный, так как в качестве меры генетической общности принимается близость расстояния между орбитами тел в пятимерном фазовом пространстве (Southworth and Hawkins, 1963).

Для двух исследуемых тел D-критерий выражается формулой:

$$D^2 = (e_2 - e_1)^2 + (q_2 - q_1)^2 + (2\sin(I/2))^2 + ((e_2 + e_1)/2)^2 (2\sin(W/2))^2, \quad (1)$$

где

$$(2\sin(I/2))^2 = (2\sin((i_2 - i_1)/2))^2 + \sin(i_1) \sin(i_2) (2\sin((\Omega_2 - \Omega_1)/2))^2,$$

$$W = \omega_2 - \omega_1 \pm 2\arcsin(\cos((i_2 + i_1)/2) \sin((\Omega_2 - \Omega_1)/2) \sec(I/2)),$$

I – взаимный угол наклона орбит, W – угол между направлениями на перигелии, $e, a, q, i, \omega, \Omega$ – орбитальные элементы. Знак минус ставится, когда $|\Omega_2 - \Omega_1| > 180^\circ$. Принимается, что два тела будут иметь общее происхождение, если расстояние между их орбитами в заданном пространстве окажется меньше некоторой заданной величины D . Метод предполагает, что ошибки измерений элементов орбит значительно меньше, чем реальная дисперсия орбит в рое.

Основной проблемой использования D-критерия является именно определение верхнего предела величины D как меры общего происхождения двух тел. При изучении принадлежности метеороидов к метеорному рою или определения его средней орбиты для всех метеорных роев величину D принимают равной 0,2. Однако применять равные предельные значения D для метеорных роев мож-

но только как первое приближение. Для более надежного отождествления верхний предел D необходимо определять для каждого метеороидного комплекса индивидуально, так как, вероятнее всего, эта величина является некоторой эволюционной характеристикой данного роя или комплекса.

Значение верхнего предела D –критерия было исследовано для наиболее хорошо изученного метеорного роя Персеид. Родительская комета Персеид - комета 1862 III Свифта-Туттля является активной, то есть в результате разогрева при сближении с Солнцем ядро кометы разрушается, выбрасывая метеорное вещество. При дезинтеграции кометного ядра орбиты выброшенных фрагментов связаны с родительским телом, поэтому значение D зави-



Рис. 2. «Телеграфный лес» в эпицентре Тунгусского взрыва.

сит прежде всего от начальных условий выброса (скорости выброса и точки выброса на орбите). Проанализируем значения D -критерия для различных значений скоростей выбросов частиц, выброшенных в разных точках орбиты, используя результаты моделирования выброса Персеид из родительской кометы в 1348 г.

Процесс моделирования образования метеорного роя Персеид, выполненный авторами ранее, подробно описан в работах (Жуков и др., 2003; Ишмухаметова и Кондратьева, 2005). В качестве примера рассмотрим только выброс в направлении против движения кометы, так как в данном случае элементы орбиты выброшенной частицы в наибольшей степени отличаются от орбиты кометы. Величина D для двух орбит комета-метеороид была рассчитана по формуле (1) для диапазона скоростей выбросов 300 - 2100 м/с, при этом были выбраны точки выброса до перигелия -90° -60° , -30° , в перигелии 0° и $+30^\circ$, $+60^\circ$, $+90^\circ$ после прохождения кометой перигелия. На рис. 4 показана зависимость величины D критерия от скорости V выброса частиц. Как видим, значение D практически не меняется для частиц, выброшенных в разных точках орбиты с одной и той же скоростью. Значение D , равное 0,2, достигается только для частиц, выброшенных со скоростями выше, чем 2000 м/с.

По современным газодинамическим представлениям де-

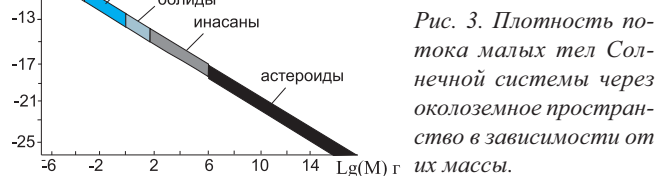
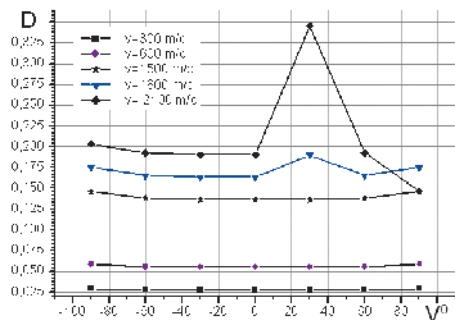


Рис. 3. Плотность потока малых тел Солнечной системы через околоземное пространство в зависимости от их массы.

Рис. 4. Значения D-критерия в зависимости от скорости выброса и положения точки выброса фрагмента на кометной орбите.



зинтеграции кометного ядра при сближении с Солнцем скорости выброса не превышают 600 м/с. Таким образом, для только что выброшенных модельных частиц роя Персеид верхний предел D не превышает величины 0,075 независимо от точки выброса на орбите.

Однако из-за влияния планетных возмущений орбиты метеороидов в рое с течением времени изменяются. Поэтому интересно проследить динамику значений D в зависимости от эволюции роя. Элементы орбит модельных частиц, выброшенных из кометы в 1348 г., были проинтегрированы вперед до 1862 г. с учетом возмущений от всех планет.

Значения D для двух орбит комета-частица, рассчитанные по формуле (2), для возмущенных орбит частиц представлены на Рис. 5.

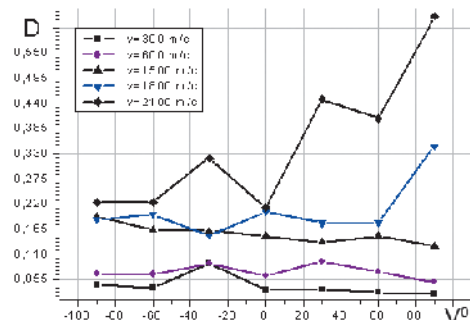
Значение D выше величины 0,2 дает модельная частица, выброшенная со скоростью 2100 м/с в точке орбиты с истинной аномалией $+30^{\circ}$. Это обусловлено сближениями частицы с Юпитером: одно тесное (взаимное расстояние 0,27 а.е.) и два — на границе сферы его действия. При той же скорости выброса в точке орбиты с истинной аномалией -30° основное возмущение на орбиту частицы оказывает Земля. Тесных сближений ее с Землей достаточно много — 1469, 1497, 1525, 1590, 1730, 1758, 1786, 1842 гг., причем при сближениях минимальное взаимное расстояние равно 0,093 а.е., а максимальное — 0,16 а.е. Такие возмущения приводят к значительным изменениям элементов орбит модельных метеороидов за 500 лет. Если рассмотреть диапазон наиболее вероятных скоростей выбросов до 600 м/с, то даже через четыре оборота вокруг Солнца значения D для возмущенных орбит Персеид не выходят за пределы значения 0,1.

Заключение

Отождествление наблюдаемых космических объектов с родительскими телами имеет огромное значение для изучения их эволюции и возможного сближения с Землей. D-критерии являются одним из инструментов генетического отождествления космических тел с той или иной группой малых тел астероидно-кометного и метеорного комплекса, однако неопределенность верхнего предела остается основной проблемой их использования. Значение величины D как меры общего происхождения двух тел нельзя искусственно переносить на разные типы малых тел. Для каждого типа (группы астероидов, семейства комет, комплекса метеорных роев) величину верхнего предела D-критерия необходимо исследовать индивидуально как эволюционную характеристику.

Кроме того, важно отметить, что надежность отождествления наблюдаемых объектов зависит также от точности определения их орбитальных элементов, так как в основе D-критерия лежит вычисление расстояния между орбитами тел в пятимерном фазовом пространстве. Это ста-

Рис. 5. Значение D-критерия через 500 лет после выброса фрагмента.



вит задачу постоянного мониторинга околоземного пространства с целью как можно более раннего обнаружения опасных космических объектов и определения параметров их движения. Орбиту космического тела, неожиданно появившегося в пределах земной атмосферы, вычислить практически невозможно.

Именно таким неопознанным объектом и остался Тунгусский метеорит. Даже если на поверхности земли не были найдены обломки, то вычисленная орбита метеорита позволила бы ученым отождествить его с наиболее вероятным родительским телом или хотя бы с большой степенью достоверности установить к какому типу малых тел Солнечной системы относится Тунгусский болид. Получить какие-либо дополнительные сведения о явлении, наблюдавшемся сто лет назад крайне сложно. Поэтому, вероятно, это удивительное событие так и останется загадкой XX века.

Литература

Багров А.В., Выгон В.Г., Бондарь С.Ф. Труды конф. «Околоземная астрономия - 2003». РАН, Институт астрономии, Терскол, 8-13 сентября 2003. Т. 2. 2003. 29-41.
 Жуков Г.В., Ишмухаметова М.Г., Кондратьева Е.Д., Масленникова Е. Метеорный рой Персеид по наблюдениям кометы Свифта-Туттля. *Георесурсы*. 2(14). 2003. 21-23.
 Ишмухаметова М.Г., Кондратьева Е.Д. *Астрономический вестник*. Т. 35. № 5. 2005. 440-448.
 Козин В.Н., Коротков П.В. Взрыв Тунгусского метеорита и образование вывала леса. *Астрономический вестник*. Т. 34. № 4. 2000. 357-364.
 Ben-Menahem A. Source parameters of the Siberian explosion of June 30 1908 from analysis and synthesis of seismic signals of four stations. *Phys. Earth and Planetary Interiors*. V. 11. 1975. 1-35.
 Southworth R.B., Hawkins G.S. Statistics of meteor streams. *Smithson Contr. Astrophys*. V. 7. 1963. 261-285.



**Марина Геннадьевна
Ишмухаметова**
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии.
Область научных интересов: кометно-метеорная астрономия, исследование эволюции и структуры метеорных роев.



**Екатерина Дмитриевна
Кондратьева**
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии.
Область научных интересов: кометно-метеорная астрономия, моделирование образования метеорных роев.