

ОРБИТА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО ОБЪЕКТА

С.А. Нароенков¹, В.В. Емельяненко¹, О.П. Попова²

¹ – Институт астрономии РАН, ² – Институт динамики геосфер РАН

С использованием полученных из наблюдений астрометрических положений [Popova et al., 2013] была определена орбита Челябинского объекта. На основании полученной орбиты исследовано движение объекта в прошлом и изучена возможность связи Челябинского объекта с астероидами 86039 (1999 NC43) и 2008 DJ.

Введение

Челябинское событие (15 февраля 2013 г.) явилось самым мощным воздушным взрывом метеороида в атмосфере Земли со времени Тунгусского события в 1908 г. Это было неожиданное событие, которое произошло в густонаселенном регионе. В соответствии с официальными отчетами более 7320 сооружений и зданий было повреждено и 1613 человек обратились за медицинской помощью, в основном с порезами от битого оконного стекла.

С астрономической точки зрения, Челябинское событие дало огромное количество наблюдательной информации для детального изучения этого небесного тела. Общее описание первых результатов исследования челябинского тела было дано в работе [Емельяненко и др., 2013]. Более подробный анализ проведен в работах [Popova et al., 2013; Borovicka et al., 2013; Brown et al., 2013].

В данной работе мы представляем наши результаты по определению орбиты и исследованию взаимосвязи Челябинского объекта с другими околоземными объектами.

Орбита тела

На сегодняшний день в метеорной астрономии имеются детально разработанные методы определения доатмосферной орбиты тела, общим для которых является предварительное вычисление радианта и скорости на бесконечности [Jenniskens et al., 2012; Borovicka et al., 2013]. Такой подход хорош в случае метеоров с достаточно короткой траекторией в атмосфере, но в случае Челябинского объекта упрощенная модель движения объекта может дать неправильные результаты при определении доатмосферной орбиты. Поэтому мы определили орбиту напрямую, используя астрометрические координаты объекта, как всегда определяем орбиты астероидов, то есть решили обратную задачу орбитальной динамики с использованием метода наименьших квадратов. При использовании этого метода всегда можно определить не только орбитальные параметры объекта, но и погрешности определения элементов орбиты. Единственным недостатком метода является только его плохая сходимость при итерационном процессе улучшения, если первоначальная орбита известна с недостаточной точностью. В нашем случае, мы использовали в качестве первоначальной орбиту из работы [Popova et al., 2013].

Обратная задача орбитальной динамики состоит в определении орбитальных параметров из астрометрических наблюдений в рамках выбранной модели движения небесных тел. В модели сил воздействующих на исследуемое тело мы учли притяжение Солнца, планет и Луны. Кроме того, мы включили торможение метеороида в атмосфере в виде $-A\rho_A V\vec{V}$, где ρ_A – плотность атмосферы, $\vec{V}$ – скорость объекта относительно атмосферы. Коэффициент A является неизвестным и очень трудным для описания, поскольку зависит в том числе и от абляции, и фрагментации тела в атмосфере. Таким образом, мы определили внеатмосферную орбиту тела: 1) исходя из наблюдений явления в верхней атмосфере, считая изменение A очень малым; 2) изменяя величину A мы нашли наилучший вариант внеатмосферной орбиты, который хорошо представляет все наблюдения.

Для нашего исследования астрометрические наблюдения (прямое восхождение α и склонение δ) были получены на основе пяти видеозаписей, сделанных в Коркино, Первомайском, Белорецке, Снежинске и Каменск-Уральске [Popova et al., 2013]. Наше моделирование показало, что наилучшие результаты при уточнении орбиты достигаются, если использовать все наблюдения с $t < 03:20:32.2$ UTC и $A = 0$. Этот момент времени соответствует максимальной яркости болида, его основной вспышке. Наши вычисления хорошо совпадают с предположением, что до высоты 25 км торможение было незначительным [Popova et al., 2013]. В таблице 1 приведены наши результаты определения кеплеровых элементов орбиты. Величина О-С для нашей орбиты составила 2265". На рисунках 1 и 2 представлены значения азимута и высоты из наблюдений и моделирования. Цифровые значения обозначают

Докатмосферная орбита Челябинского объекта (Эпоха J2000)

T_0	2013.02.15.0 TT
a (AU)	$1,8804986 \pm 0,068$
E	$0,608988648 \pm 0,017$
Ω (deg)	$108,926276 \pm 0,536$
Ω (deg)	$326,445884 \pm 0,002$
i (deg)	$5,938266 \pm 0,427$
M_0 (deg)	$16,872985 \pm 1,069$

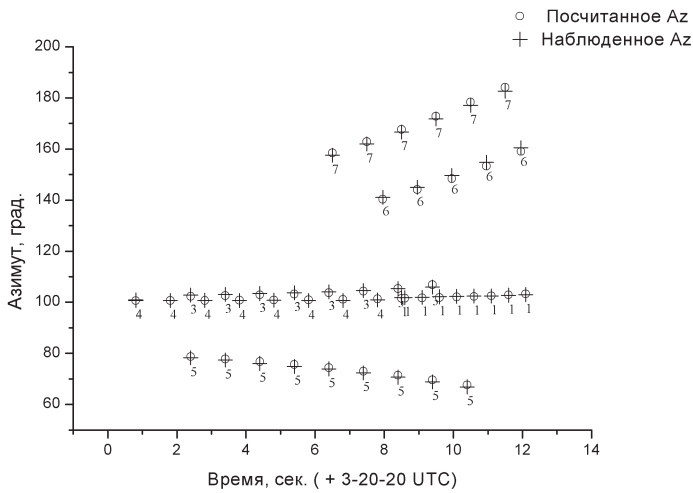


Рис. 1. Изменение азимута Челябинского объекта от времени (наблюденное и модельное)

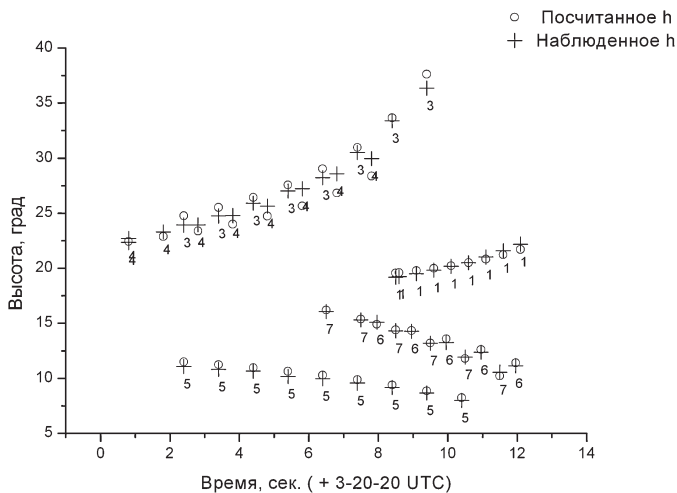


Рис. 2. Изменение высоты Челябинского объекта от времени (наблюденное и модельное)

пункты, откуда были сделаны наблюдения: 1 – Чебаркуль, 3 – Коркино, 4 – Первомайский, 5 – Белорецк, 6 – Снежинск, 7 – Каменск-Уральский.

Различия в орбитальных элементах между нашей орбитой и орбитами, определенными в работах [Poroova et al., 2013; Borovicka et al., 2013] находятся в пределах статистической неопределенности.

Для вычисленной орбиты мы определили трек падения объекта на земную поверхность. По нашим расчетам, траектория полета Челябинского объекта проходила примерно в 34 км от Челябинска, с азимутом – 284° . Так как сейчас определено место в озере Чебаркуль, куда упал ~650-кг осколок, то мы сопоставили координаты места падения метеорита с проекцией нашей траектории падения на поверхность Земли. Расстояние между местом падения и нашей траекторией падения составило 600 метров. Данные результаты могут являться подтверждением правильности метода определения орбиты.

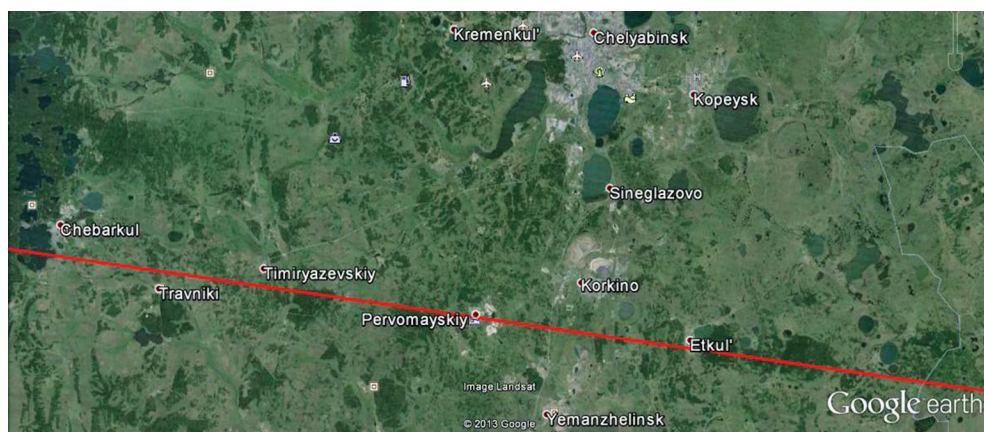


Рис. 3. Траектория полета Челябинского объекта

Поиск астероидов, связанных с Челябинским объектом

Первая попытка определить астероиды с близкими орбитальными параметрами для Челябинского тела была сделана в работе [Marcos, 2013]. Результаты работы являются сомнительными, так как доатмосферная орбита объекта определена очень грубо.

Для орбиты Челябинского болида мы нашли астероиды близкие по орбитальным параметрам. Для анализа был взят каталог астероидов JPL Small-Body Database. Анализ близости орбит проводился с помощью D-критерия (Dsh) [Southworth-Hawkins, 1963]. Наименьшие значения критерия Dsh были получены для астероидов 2008 DJ – $Dsh = 0,061$ и 86039 (1999 NC43) – $Dsh = 0,0526$. Эти астероиды были отмечены как близкие в работе [Borovicka et al., 2013]. Для более подробного изучения этого семейства астероидов мы провели численное интегрирование орбит назад во времени на 2000 лет. Интегрирование проводилось с помощью интегратора Эверхарта. На рис. 4 представлено изменение величины Dsh для пар астероидов Chelyabinsk – 2008 DJ и Chelyabinsk – 1999 NC43. Значение D-критерия для астероида 2008 DJ в прошлом было еще меньше, чем сейчас. Мы считаем, что астеро-

ид 2008 DJ вероятно может быть более тесно связан с метеоритом Челябинск, чем астероид 1999 NC43.

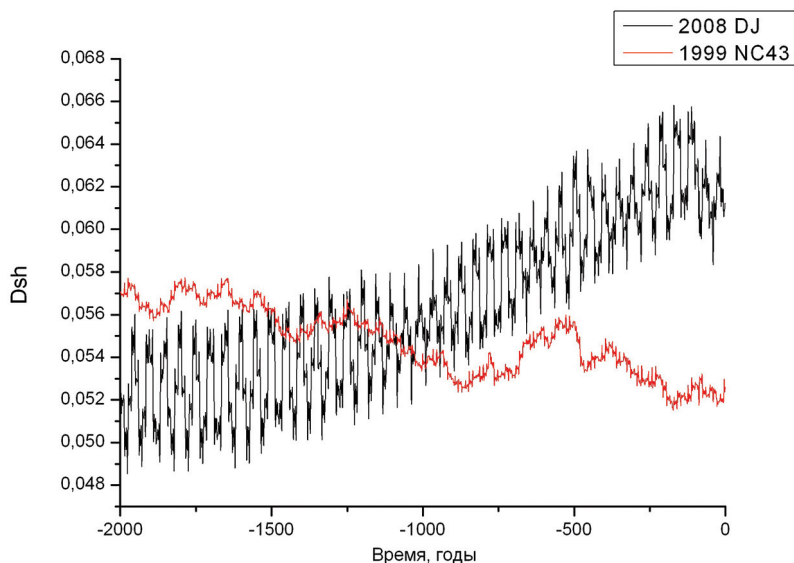


Рис. 4. Изменение D-критерия для пар астероидов 2008DJ – Челябинск и 1999NC43 – Челябинск

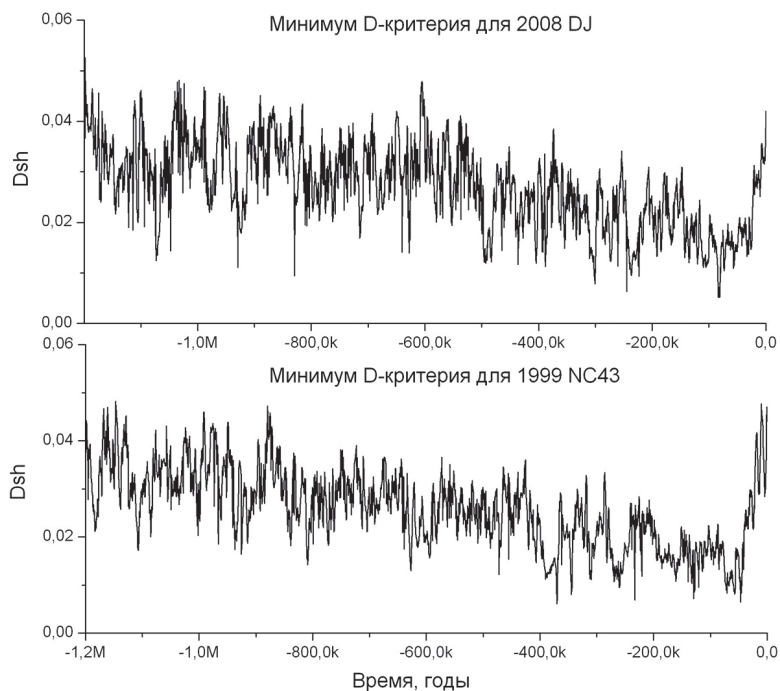


Рис. 5. Изменение минимума D-критерия для клонов астероидов 2008 DJ – Челябинск и 1999 NC43 – Челябинск

Для подтверждения этой теории мы провели исследование долговременной эволюции трех объектов. Для этого мы провели сравнение величины D-критерия между всеми парами клонов астероидов Chelyabinsk – 2008 DJ и Chelyabinsk – 1999 NC43 и исследовали минимальные значения D-критерия всех пар клонов. Для объекта Chelyabinsk количество виртуальных частиц составило – 800, для 1999 NC43 и 2008 DJ – 300, так как орбиты этих объектов известны более точно. Временной интервал сравнения составил 1,2 млн лет.

Мы нашли, что минимум D-критерия для клонов астероидов 2008 DJ и Chelyabinsk достигает 0,005 за ~80 000 лет. Для клонов астероидов 1999 NC43 и Chelyabinsk минимум значения D-критерия 0,006 достигается за время порядка ~47 000 лет. Но это значение времени теоретическое. Затем мы пытались определить момент времени, когда мог произойти распад родительского тела. Мы провели оценку отношения количества орбит клонов, для которых D-критерий был менее 0,04 (или менее 0,02) к общему количеству орбит клонов в каждый момент времени. Результаты оказались близкими к нулю как для случая $D < 0,02$, так и для $D < 0,04$. К сожалению, мы не смогли достоверно определить момент, когда эта ассоциация астероидов могла образоваться.

Заключение

Челябинское событие, несомненно, является уникальным в своем роде. Одна из причин – это большое количество видеоматериала, который был получен очевидцами событий. И благодаря развитию сети Интернет, этот материал стал доступен для анализа и исследования. Для определения доатмосферной орбиты Челябинского болида был использован метод, ранее не применявшийся для таких тел. Результаты наших расчетов не противоречат результатам других авторов. Применяемый нами метод наименьших квадратов позволил определить более точно орбиту объекта и ошибки кеплеровых элементов орбиты Челябинского объекта. Для орбиты Челябинского объекта были выявлены 2 астероида близкие по орбитальным параметрам. Сравнение эволюции астероидов 2008 DJ и 1999 NC43 показывает, что астероид 2008 DJ является более близким по орбитальным параметрам к Челябинскому объекту.

Литература

Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н., Шеляков М.А., и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. 2013. Т. 47. № 4. С. 1–16.

Borovička J, Spurný P., Brown P., Wiegert P., Kalenda P., Clark D., Šrbený L. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. 2013. V. 503, p. 235–237.

Brown, P.G., Spalding R.E., et al. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. 2002. V. 420. P. 294–296.

Brown, P.G. and 32 co-authors. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature. 2013. V. 503, p. 238–241.

Jenniskens P. et al. CAMS Cameras for all sky meteor surveillance to establish minor meteor showers // Ikarus, 216, p. 40–61

De la Fuente Marcos C., R. de la Fuente Marcos. The Chelyabinsk superbolide: a fragment of asteroid 2011 EO40? // arXiv.org. 2013. – arXiv:1307.7918.

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // *Science*. 2013. № 342. P. 1069-1073.

Southworth, R.B., Hawkins, G.S. Statistics of meteor streams // *Smithsonian Contrib.* 1963. *Astrophys.* 7, 261–285.