# Ретроспективный анализ траекторий метеороидов

© И.А. Баляев

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
196140 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: balasteravan@yandex.ru

*Поступило в Редакцию 5 мая 2026 г.*
*В окончательной редакции 21 августа 2026 г.*
*Принято к публикации 23 октября 2026 г.*

Приведены результаты расчетов траекторий виртуальных метеороидов от столкновения с Землей назад во времени. Метеороиды взяты из данных Global Meteor Network, т. е. рассматриваются реальные тела, столкнувшиеся с Землей. Для расчета применяется численное интегрирование уравнений движения. На примере потока Геминид показан различный характер возможных сближений с предполагаемыми родительскими телами и случайными астероидами. Получаемые параметры сближений могут указывать на родительское тело. Помимо этого, получены тесные сближения виртуальных метеороидов с Землей в прошлом.

**Ключевые слова:** Солнечная система, метеороиды, численное интегрирование.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64051.317-26

## Введение

Метеорные потоки не только представляют собой красивое зрелище, но и несут опасность для космических аппаратов. Поэтому изучение и предсказание поведения метеорных роев имеет в том числе практический интерес. Современные методы наблюдений дают большой объем данных для изучения. В настоящем исследовании мы попытались отследить происхождение и изучить особенности траекторий некоторых метеороидов, зарегистрированных Глобальной Метеорной Сетью (Global Meteor Network, GMN [1]). Рассматриваются предыдущие сближения метеороидов как с предполагаемыми родительскими телами, так и с другими телами Солнечной системы.

Для решения этой задачи применялось численное интегрирование. Поведение основных массивных тел (Солнце, планеты, крупные астероиды) уже рассчитано и представлено в форме различных эфемерид, однако использование сторонних эфемерид накладывает ограничения на промежуток времени, в котором можно работать. Например, DE440 [2] будет работать в прошлое только до 1550 г. В перспективе хотелось бы иметь возможность это ограничение обойти, поэтому был реализован автономный расчет всей Солнечной системы. Интегрирование производится вариантом метода Эверхарта [3]. Автономная модель сделана более простой для ускорения расчетов. В нее включены Солнце, большие планеты (для гигантов взят центр масс планеты и ее спутников), Луна и наиболее массивные астероиды Главного пояса. Проведено сравнение автономной модели с эфемеридами. Для тел, подозреваемых в порождении метеоров, предусмотрен учет негравитационных эффектов. Для самих метеороидов отдельно добавлен эффект Пойнтинга–Робертсона.

Постановка задачи непосредственно для численного интегрирования требует учета ошибок в определении начальных координат и скоростей. Положение и направление метеороидов обычно определяются с высокой точностью, в отличие от величины геоцентрической скорости. Принимая это во внимание, мы варьируем модуль геоцентрической скорости и для одного реального метеороида генерируем множество виртуальных частиц с разной начальной скоростью. В ходе исследования проведено сравнение параметров сближений метеороидов хорошо известного потока Геминиды с несколькими околоземными астероидами, часть из которых не относятся к предполагаемым родительским телам. На основании полученных результатов делаются выводы о работоспособности подхода для определения родительского тела метеорного потока. В частности, на основе полученных данных можно сделать вывод, что критерием могут стать тесные сближения с низкой относительной скоростью. В идеальном случае можно было бы отследить траекторию метеороида до момента отрыва от родительского тела, однако большие погрешности в начальных данных пока не позволяют уверенно находить такие сближения. Часто для определения родительского тела используется D-критерий [4]. В нашем случае его удобно использовать для определения кандидатов в родительские тела и уже для кандидатов проводить расчет сближений. Отдельно рассмотрен вопрос о предыдущих сближениях метеороидов с Землей. Заблаговременное обнаружение и изменение траектории опасных объектов может зависеть от таких сближений.

## 1. Описание метода

Для построения модели Солнечной системы с помощью сервиса Horizons[1] взяты начальные координаты и

[1] https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/

скорости планет, Солнца, Луны и 16 наиболее массивных астероидов Главного пояса. Уравнения движения основаны на модели, используемой в программном комплексе ASSIST [5]. Это программа с открытым исходным кодом, хорошо воспроизводящая эфемериды JPL DE. Модель включает релятивистскую поправку (2), негравитационные эффекты (3), отдельно эффект Пойнтинга–Робертсона (4) для метеороидных частиц. Формула (4) учитывает также давление света.

$$\mathbf{a} = -G\sum_{i=1}^{N}\frac{m_i}{|\mathbf{r_i}|^3}\,\mathbf{r_i}, \tag{1}$$

$$\mathbf{a}_{REL} = \frac{Gm_0}{c^2|\mathbf{r_0}|^3}\left(\left(\frac{4Gm_0}{|\mathbf{r_0}|} - |\mathbf{v_0}|^2\right)\mathbf{r_0} + 4(\mathbf{r_0}\cdot\mathbf{v_0})\mathbf{v_0}\right), \tag{2}$$

$$\mathbf{a}_{NG} = \frac{1}{|\mathbf{r_0}|^2}\left(A_1\frac{\mathbf{r_0}}{|\mathbf{r_0}|} + A_2\frac{(\mathbf{r_0}\times\mathbf{v_0})\times\mathbf{r_0}}{|(\mathbf{r_0}\times\mathbf{v_0})\times\mathbf{r_0}|} + A_3\frac{\mathbf{r_0}\times\mathbf{v_0}}{|\mathbf{r_0}\times\mathbf{v_0}|}\right), \tag{3}$$

$$\mathbf{a}_{PR} = \beta\frac{Gm_0}{|\mathbf{r_0}|^2}\cdot\left(\left(1.0 - \frac{\mathbf{r_0}\cdot\mathbf{v_0}}{|\mathbf{r_0}|c}\right)\frac{\mathbf{r_0}}{|\mathbf{r_0}|} - \frac{\mathbf{v_0}}{c}\right). \tag{4}$$

Формула (1) представляет закон всемирного тяготения Ньютона для точечных масс и в особом пояснении не нуждается. Для остальных формул обозначения следующие: $G$ — гравитационная постоянная; $c$ — скорость света; $m_0$ — масса Солнца; $\mathbf{r_0}$ — гелиоцентрический вектор; $\mathbf{v_0}$ — гелиоцентрическая скорость; $A_i$ — коэффициенты для расчета негравитационных эффектов, в частности, Ярковского; $\beta$ — коэффициент для расчета эффекта Пойнтинга–Робертсона. Коэффициент $\beta$ рассчитывается исходя из имеющихся данных. Для каждого метеороида в базе GMN есть готовая оценка массы, а $F$-параметр описывает кривую блеска, отражающую модель абляции, что позволяет получить информацию о плотности.

Расчет траекторий всех тел производится в этой модели, включая планеты. Возможны ситуативные модификации, например, для комет. Для расчета траектории метеороида берется его положение по данным GMN и варьируется модуль скорости в соответствии с указанной погрешностью. Таким образом, для каждого реального метеороида генерируется небольшой рой виртуальных (количество произвольное, для получения результатов использовалось 30–100). Сближения до заданного расстояния отмечаются в файле вывода: дата, идентификаторы сблизившихся тел, минимальное расстояние и скорость.

## 2. Проверка модели движения

Перед проверкой самого метода имеет смысл оценить разницу используемой модели Солнечной системы с моделью DE, используемой сервисом Horizons. Для этого вычислена разница гелиоцентрических координат некоторых планет. В частности, метеороиды из базы данных GMN удобно задавать по гелиоцентрическим элементам орбиты, но для этого нужно точное положение Земли на момент задания координат метеороида. Может ли наша модель обеспечить приемлемую точность? Расчет гелиоцентрического положения Земли дает разницу в пределах километра, т. е. начальное положение метеороида относительно Земли получается адекватным. Разброс скорости будет иметь намного большее значение для траектории.

Отклонение положения Юпитера за 120 лет составило около 30 км. Учет массы Главного пояса может уменьшить это отклонение до 8 км. Тут стоит оговориться, что в модели DE не учитывается полная масса Главного пояса, а только набор из нескольких сотен астероидов. Поэтому реальная точность модели DE не лучше этих значений (для Юпитера). Соответственно, делать нашу модель сложнее особого смысла нет.

## 3. Некоторые результаты

Метод было решено опробовать на известном метеорном потоке Геминиды. Поток интересен в том числе тем, что есть по меньшей мере три кандидата в родительское тело [6]. Это астероиды (3200) Фаэтон, 2005 UD и 1999 YC. В качестве контрольной группы взяты астероиды (433), (99942), (443104). Одновременно рассчитывались предыдущие сближения виртуальных метеороидов с Землей.

Промежуток времени можно произвольно увеличивать, но для активных в наши дни астероидов вроде Фаэтона представляется разумным попробовать на 100 лет. Расчет на 100 лет в прошлое уже дает достаточное количество сближений для анализа (порядка 1000). Приведем для примера один конкретный метеороид, зарегистрированный 2025-12-13 23:23:43.836024 UTC. Для 30 виртуальных метеороидов получено в общей сложности 835 сближений до 0.1 AU с массивными телами Солнечной системы и выбранными астероидами. Из них 208 сближений с астероидом (3200), 54 сближения с 2005 UD, 75 сближений для 1999 YC. Для астероида (433) сближений вообще не найдено, 102 сближения с (99942), 70 сближений с (443104). Можно предположить, что наибольшее количество сближений соответствует более вероятному кандидату в родительское тело. Однако необходимо принять во внимание и относительную скорость. Сближения с потенциальными родительскими телами происходят, как правило, на намного меньшей скорости.

На рис. 1 показаны сближения со всеми выбранными астероидами 100 виртуальных частиц, сгенерированных для одного из изученных метеороидов. Сближения с астероидами из контрольной группы показаны фигурами без заливки. Похожая картинка получена для всех изученных метеороидов Геминид.

Кроме сближений с возможными родительскими телами, получены сближения с планетами, в том числе

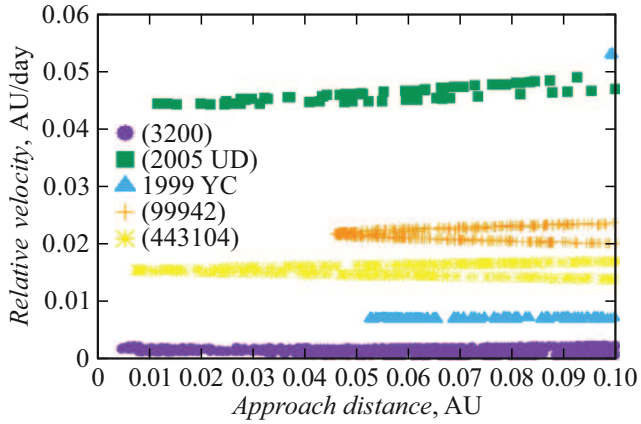



**Рис. 1.** Сближения виртуальных метеороидов с потенциальными родительскими телами и астероидами из контрольной группы.

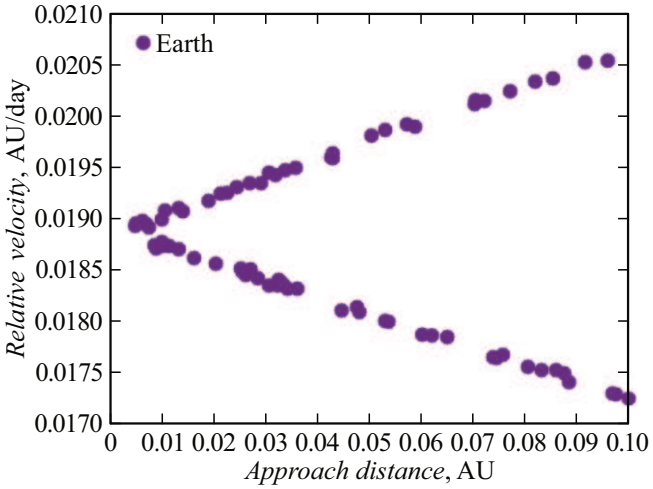



**Рис. 2.** Сближения виртуальных метеороидов с Землей (до соударения).

Землей. Подтверждено, что тесные сближения на траектории соударения есть почти всегда (0.05 AU в течение 100 лет до соударения). Для метеороида 2025-12-13 23:23:43.836024 такие сближения найдены для 29 из 30 виртуальных частиц, причем оставшаяся частица сблизилась с Землей на расстояние 0.054 AU. Сближения с Землей показаны на рис. 2. Также обнаружены сближения с Луной, Венерой и массивным астероидом (15) Эвномия.

## Выводы

Произведены расчеты движения виртуальных метеороидов и изучены их сближения с различными телами. В ходе исследования построена простая, но довольно точная модель Солнечной системы. Сближения изученных виртуальных метеороидов с Фаэтоном, основным кандидатом в родительское тело Геминид, многочисленны и происходят на намного меньшей скорости по сравнению с другими астероидами. Это может указывать на происхождение взятых метеороидов конкретно от Фаэтона. Помимо этого, результаты подтверждают, что предыдущие сближения с Землей есть почти всегда. Это полезно для обнаружения опасных объектов заранее, однако тесные сближения ухудшают точность расчета траектории. В дальнейшем планируется получить и опубликовать результаты уже массовых расчетов для метеороидов, относящихся к разных метеорным потокам. Хотя отследить траекторию до момента отрыва от родительского тела пока не удалось, количество и характеристики сближений позволяют указать на наиболее вероятное родительское тело.

## Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## Список литературы

[1] D. Vida, D. Šegon, P.S. Gural, P.G. Brown, M.J.M. McIntyre, T.J. Dijkema, L. Pavletić, P. Kukić, M.J. Mazur, P. Eschman, P. Roggemans, A. Merlak, D Zubović. Global Meteor Network — Methodology and first results., **506** (4), 5046 (2021).
[2] R.S. Park, W.M. Folkner, J.G. Williams, D.H. Boggs. JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441, **161** (3), 105 (2021).
[3] I.A. Balyaev. Solar System Research, **54** (6), 557 (2020).
[4] B.A. Dumitru, M. Birlan, M. Popescu, D.A. Nedelcu. Association between meteor showers and asteroids using multivariate criteria, 607, A5 (2017).
[5] M. Holman, H. Rein. ASSIST: In *AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting. v. 55 of AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting*, (2024), p. 503.03.
[6] W.Z. Cukier, J.R. Szalay. Formation, Structure, and Detectability of the Geminids Meteoroid Stream., **4** (6), 109 (2023).