



Обзор классификаций метеоров и способов параметризации их кривых блеска

Д.С. Дроздов¹

¹ ГАО РАН

Поступила в редакцию 30 ноября 2025 / Принята к публикации 15 декабря 2025

Аннотация

Основным источником данных о физических свойствах метеороидов, сгорающих в атмосфере Земли служат наблюдения метеоров. Наиболее важными источниками информации являются параметры, связанные с асимметрией кривой блеска, длительностью пролета и высотами начала аблации. Однако в последнее время, в связи с увеличением данных и улучшением их разрешения больше внимания уделяется отдельным небольшим пикам в кривой блеска. Первоначально классификации метеороидов отталкивались от местоположения главного пика, но появление видеонаблюдений метеоров в высоком разрешении также даёт возможность классифицировать их по форме и структуре «головы» и «хвоста», цвету. В данном обзоре рассматриваются различные способы классификаций таких событий и вводимые параметры для их описания.

ключевые слова: метеоры, кривые блеска, классификация кривых блеска

Введение

Наблюдения метеоров предоставляют ценнейшие сведения о пылевой компоненте Солнечной системы. Например, базисные наблюдения пролетов метеороидов в атмосфере позволяют с высокой точностью определить их орбиты и изучать изменение роя частиц, порожденных кометой, детальней понимая роль тонких эффектов воздействия излучения. Однако для полного понимания динамики частиц и отделения метеороидов, принадлежащих потокам, от спорадического фона, необходимо знать их физические свойства, например массу, плотность, химический состав, структуру породы или наличие возможного вращения. И здесь возникает проблема: метеороиды небольшой массы полностью сгорают в атмосфере. Конечно, существуют очень ценные спектроскопические наблюдения метеоров, напрямую определяющие их состав, но такие наблюдения сложны и немногочисленны, более того, невозможны для слабых метеороидов, а ведь именно они отличаются разнообразием физических свойств и представляют наибольший интерес. Поэтому для получения информации о самой частице приходится извлекать информацию из свойств метеора.

В нынешнее время теория аблации метеоров разработана достаточно хорошо ((Bronshten, 1983), (Borovička, Spurný, Koten, 2007)) и позволяет определять массу частицы исходя из скорости и суммарного блеска, однако подобные уравнения надежно работают только для метеоров, не взрывающихся при прохождении атмосферы и демонстрирующих гладкую кривую блеска. В противном случае моделирование значительно усложняется. Поэтому наряду с величинами, определяемыми из моделирования, метеоры часто описываются параметрами, получаемыми непосредственно из наблюдений, а физические свойства определяются исходя из статистических закономерностей.

*e-mail:paganelle7@mail.ru

1 Существующие классификации и параметры

1.1 Кривые блеска

Первая попытка различить метеоры по наблюдательным параметрам относится к работе (Hoffleit, 1933). В ней производилось распределение метеоров по двум типам. К типу I относились метеоры, чьи кривые блеска не имели ярко выраженных максимумов, к типу II, соответственно, имеющие узкий, высокий пик. Подтипы данного разделения определялись по местоположению максимума кривой, относительно начала и конца видимого трека. Отмечалось, что подобное разделение имеет связь со скоростью вхождения метеороида в атмосферу, кроме того, разделение помогает отделять метеоры потоков от фона, так как спорадические метеоры чаще относятся к типу I.

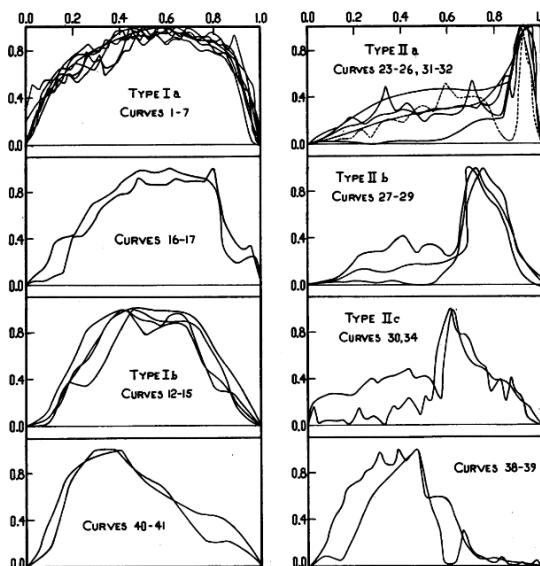


Рис. 1: Классификация кривых блеска по (Hoffleit, 1933)

Уже к концу XX века, с развитием видеонаблюдений и соответствующим увеличением количества и качества данных был введен параметр F (Fleming, R. L. Hawkes, Jones, 1993), сейчас являющийся наиболее часто используемым. Его идея состоит в определении высоты, на которой достигается максимум излучения, а так же высот, где излучение ниже максимального на $0.^m25, 0.^m5, 0.^m75, 1^m, \dots, 3^m$. После чего параметр F вычисляется по формуле:

$$F = \frac{H_{1,\Delta m} - H_{max}}{H_{1,\Delta m} - H_{2,\Delta m}} \quad (1)$$

где $H_{1,\Delta m}, H_{2,\Delta m}$ — высоты до и после максимума яркости, для которых падение блеска от максимума составляет Δm . Таким образом, F определяет асимметрию кривой блеска. Проблема данного параметра в том, что это не один параметр, а целое семейство отличающихся F для различных Δm . Однако, параметр получил широкое распространение, так как асимметрия кривой блеска является одним из самых значимых её свойств. Например, было установлено, что более плотные, железные, частицы имеют $F \approx 0.3$ (Čapek *et al.* 2019).

Проблема использования данного параметра вместе с необходимостью численно оценивать асимметрию кривых мотивировала искать иные величины. Несколько грубый, но геометрически красивый способ был предложен (Campbell, R. Hawkes, Babcock, 1999). Идея состояла в аппроксимации кривой блеска параболой, повернутой на некоторый угол θ . Как ни странно, наклонённая парабола довольно точно описывает блеск метеора вблизи пика и данная идея даже использовалась для быстрой генерации изображений искусственных метеоров. Более того парабола

метр θ имеет линейную зависимость от параметра F : $\theta = -0.91F + 0.41$, а значит может быть его альтернативой.

Предлагались и иные способы оценки асимметрии, например (Murray, Robert L. Hawkes, Peter Jenniskens, 1999) использовали в дополнение к F параметру еще и углы наклона до и после максимума, выраженные как $\log \frac{I_{pix}}{t}$, то есть среднее падение блеска в инструментальных величинах за время, а (Murray, Beech, Schroeder, 2002) вводили параметр S — отношение длины плато к полной длине кривой блеска.

Увеличение точности наблюдений позволило увидеть в кривых блеска небольшие пики и колебания, и (Brosch *et al.* 2004), в числе прочих параметров вводит JUMPS, как величину максимального различия яркости в соседних точках кривой. Для отслеживания асимметрии же предлагался параметр P . Всего вводилось десять параметров:

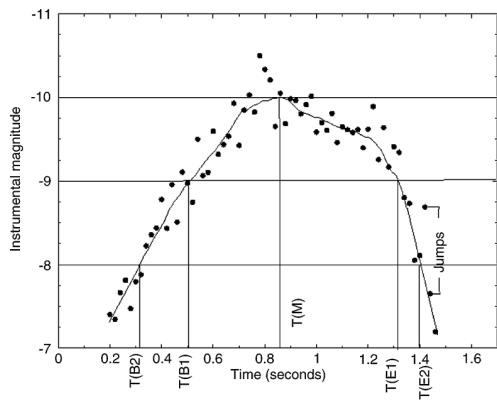


Рис. 2: Определение параметров F и P из наблюдаемой кривой блеска. (Brosch *et al.* 2004)

1. F , для $\Delta m = 1^m$
2. $P = \frac{T(E1) - T(B1)}{T(E2) - T(B2)}$
3. $M1$ — разность звездных величин пика и первой зарегистрированной точки метеора
4. $M2$ — разность звездных величин пика и последней зарегистрированной точки метеора
5. JUMPS — величина наибольшей разности звездных величин метеора в соседних кадрах
6. D — длительность наблюдения метеора
7. $D1$ — время от появления метеора до достижения пиковой яркости
8. $D2$ — время от момента пиковой яркости до исчезновения метеора
9. $S1 = M1/D1$
10. $S2 = M2/D2$

Вскоре появилось еще одно предложение параметризации (Beech, 2007). По аналогии с разделением на I и II типы у (Hoffleit, 1933) производилось более формальное разделение на условно выпуклые и не выпуклые кривые. Критерием становилось отличие кривой блеска от «треугольной», с линейным возрастанием и падением интенсивности до и после максимума. Кривые параметризовались в специальном L-пространстве, где каждая кривая нормировалась к единичной длине и единичному блеску в пике. Вводились следующие параметры:

1. F — упомянутый выше

2. S — длина плато в L-пространстве
3. x_{max} — положение максимума в нормированном пространстве
4. A — площадь под кривой в нормированном пространстве
5. D_{NC} — параметр только для невыпуклых кривых, показывающий, какая часть кривой невыпукла.

Увеличение количества данных показывает многообразие кривых, поэтому в последующих классификациях, приходится учитывать иррегулярные типы. Например, в классификации (Subasinghe, Campbell-Brown, Stokan, 2016) метеоры делятся согласно параметру F или наличию нескольких пиков:

1. $F < 0.35$
2. $0.35 < F < 0.65$
3. $F > 0.65$
4. Двойной пик
5. Плоская кривая (без ярко выраженных пиков)

Последняя из предложенных классификаций (Silber, Sawal, 2025), где анализировали кривые ярких метеоров, концентрируется как раз на распределении пиков. Для ярких метеоров существенны эффекты дробления, поэтому классификация опирается уже не на асимметрию, а на количество, взаимное расположение и форму пиков. Типы определялись следующим образом:

1. Непрерывная фрагментация. Наблюдаются многочисленные пики с небольшими интервалами. Иногда имеются переодические «мерцания».
2. Дискретная фрагментация. Пики многочисленны, но разделены продолжительными временными интервалами.
3. Метеоры с большим взрывом. Один доминирующий пик с резким подъемом яркости и плавным спадом.
4. Одиночный пик. Изолированный пик без существенной сопутствующей активности в кривой блеска.
5. Отсутствие пиков. Гладкая кривая блеска без выраженной активности.

1.2 Иные классификации

Видеонаблюдения позволяют следить не только за кривой блеска, но и за пикадровым изменением формы метеора. Примечательна классификация (Subasinghe, Campbell-Brown, Stokan, 2016), вводящая различие по форме метеорных «голов» и «хвостов».

Кроме формы возможно различие и по цвету. Отдельной классификации еще не предложено, так как большинство наблюдений производится на камерах, не позволяющих надежно определять показатели цвета, но в работе (Mills *et al.* 2021) выяснили, что по красному цвету можно надежно отличить железные метеороиды.

Необходимо упомянуть также классификации, не связанные с блеском метеора. Цеплех (Ceplecha, 1967), предположил, что метеороиды начинают светиться при одинаковой температуре, значит высота начала свечения тесно связана с составом. Исходя из этого им был введен параметр K_b :

$$K_B = \log \rho_B + \frac{5}{2} \log v_\infty - \frac{1}{2} \log \cos z_R \quad (2)$$

здесь ρ_B — плотность атмосферы на высоте начала горения. Введение параметра позволило разделить метеороиды по плотности:

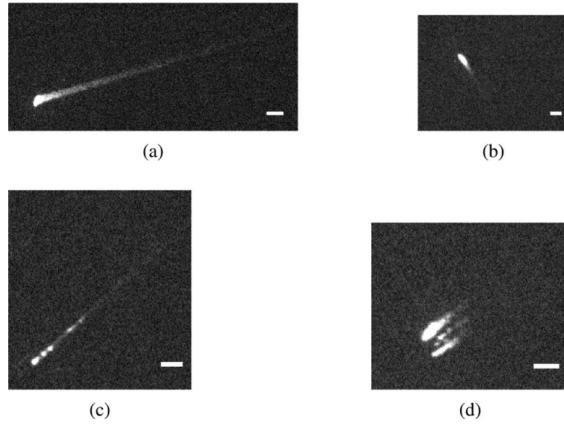


Рис. 3: Различные типы метеоров. (а) отчетливый след, размытая «голова», (б) короткий след, круглая «голова», (с) заметна продольная фрагментация, (д) поперечная фрагментация.

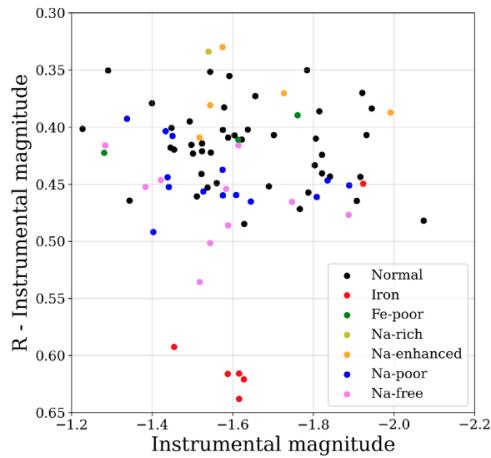


Рис. 4: Цвета метеоров, полученные сверткой спектральных наблюдений. Отдельно выделяются железные метеороиды. (Mills *et al.* 2021)

1. Астероидные: $K_b > 8$, обычные хондриты с плотностью $3.7 g/cm^{-3}$
2. A: $7.3 < K_b < 8$, углеродные хондриты с плотностью $2.0 g/cm^{-3}$
3. B: $7.1 < K_b < 7.3$, плотный кометный материал с плотностью $1.0 g/cm^{-3}$
4. C: $6.6 < K_b < 7.1$, средний кометный материал с плотностью $0.75 g/cm^{-3}$
5. D: $K_b < 6.6$, легкий кометный материал с плотностью $0.27 g/cm^{-3}$

Значимость параметра K_b подтверждалась в последующих работах, где он использовался для выделения железных метеороидов. Поэтому данный параметр развивался и получал вариации в работах (Cephecha, McCrosky, 1976) и (P. Jenniskens *et al.* 2016), где были введены параметры PE и K_c соответственно.

$$PE = \log \rho_e - 0.42 \log m_\infty + 1.49 \log v_\infty - 1.29 \log \cos z_R \quad (3)$$

$$K_c = H_b + \frac{2.86 - 2.00 \log v_\infty}{0.0612} \quad (4)$$

Высказывались также предположения о переходе к более физичным параметрам. У (Pecina, Koten, 2009) и (Beech, 2009) присутствуют предложения перехода к параметру μ , связанному с

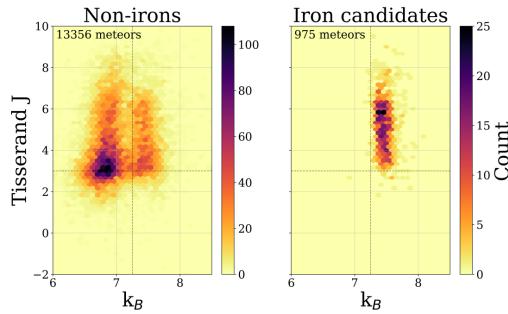


Рис. 5: Инвариант Тиссеранда и параметр K_B для железных и иных метеороидов. K_B явно отделяет железные метеороиды в отдельную область. (Mills *et al.* 2021)

площадью поперечного сечения $S \approx m^\mu$. Данный параметр был введен Левиным (Levin, 1956). Позже (Levin, 1963), им был предложен параметр $F = L_n/L_t$, как отношение наблюдаемой длины следа к теоретической, вычисленной по светимости и скорости. Отличие длин объясняется дроблением и соответствующим высвечиванием энергии на меньшей длине траектории. Поэтому данный параметр характеризует дробление метеоров и может учитываться при определении структуры метеороида.

2 Заключение

К настоящему времени появилось обилие различных классификаций метеоров и было введено множество параметров для их описания, однако большинство являются избыточными, так как описывают одни и те же свойства пролета метеороидов. Здесь примечательна уже упомянутая работа (Brosch *et al.* 2004), в которой не только были предложены новые параметры, но и проведен корреляционный анализ. Была исследована корреляция между параметрами и методом главных компонент определены наиболее значимые из них. Анализ показал, что важнейшими являются параметр асимметрии F , время, в течении которого наблюдается метеор и величина колебаний яркости кривой. Именно эти величины использовались в последующих работах. К сожалению, подобному анализу не подвергались многие параметры, предложенные позднее.

Вследствие улучшения качества наблюдений, теперь представляется возможным классифицировать метеоры не только по кривой блеска, но и по форме изображения в каждом кадре. Дополнительные данные о метеороидах может давать и их цвет, как было показано - железные метеороиды способны сильно выделяться в красном свете, то есть в полосе R камер, используемых для видеонаблюдений метеоров.

В данный момент, наиболее часто используемым для классификации метеоров является параметр F , который имеет ряд недостатков, таких как отсутствие формального определения и неактуальность для кривых с множественными пиками. Заменой ему могут стать иные параметры, характеризующие асимметрию, такие как S и P .

Благодарности

Автор выражает признательность Ховричеву Максиму Юрьевичу, за саму идею данного обзора.

Список литературы

- Bronshten, Vitalij Aleksandrovich (1983). *Physics of Meteoric Phenomena*.
- Borovička, J., P. Spurný, P. Koten (2007). Atmospheric deceleration and light curves of Draconid meteors and implications for the structure of cometary dust. *A&A*, 473.2, 661–672.
- Hoffleit, Dorrit (1933). A Study of Meteor Light Curves. *Proceedings of the National Academy of Science*, 19.2, 212–221.
- Fleming, D. E. B., R. L. Hawkes, J. Jones (1993). Light curves of faint television meteors. B: *Meteoroids and their Parent Bodies*. Под ред. J. Stohl, I. P. Williams, 261.
- Čapek, David *et al.* (2019). Small iron meteoroids. Observation and modeling of meteor light curves. *A&A*, 625, A106.
- Campbell, M., R. Hawkes, O. Babcock (1999). Light curves of shower meteors: implications for physical structure. B: *Meteoroids 1998*. Под ред. W. J. Baggaley, V. Porubcan, 363.
- Murray, Ian S., Robert L. Hawkes, Peter Jenniskens (1999). Airborne intensified charge-coupled device observations of the 1998 Leonid shower., 34.6, 949–958.
- Murray, Ian S., Martin Beech, M. Schroeder (2002). Leonid light curve morphology: review of 1998–2001 data. B: *Asteroids, Comets, and Meteors: ACM 2002*. Под ред. Barbara Warmbein. Т. 500. ESA Special Publication, 297–299.
- Brosch, N., Ravit Helled, D. Polishook, E. Almoxino, N. David (2004). Meteor light curves: the relevant parameters. *MNRAS*, 355.1, 111–119. arXiv: [astro-ph/0409186 \[astro-ph\]](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0409186).
- Beech, Martin (2007). The classification of meteor light curves: an application of hat theory. *MNRAS*, 380.4, 1649–1655.
- Subasinghe, Dilini, Margaret D. Campbell-Brown, Edward Stokan (2016). Physical characteristics of faint meteors by light curve and high-resolution observations, and the implications for parent bodies. *MNRAS*, 457.2, 1289–1298.
- Silber, Elizabeth A., Vedant Sawal (2025). BLADE: An Automated Framework for Classifying Light Curves from the Center for Near-Earth Object Studies Fireball Database. *AJ*, 170.3, 153. arXiv: [2506.16099 \[astro-ph.EP\]](https://arxiv.org/abs/2506.16099).
- Mills, Tristan *et al.* (2021). Iron Rain: measuring the occurrence rate and origin of small iron meteoroids at Earth. *MNRAS*, 508.3, 3684–3696. arXiv: [2109.10265 \[astro-ph.EP\]](https://arxiv.org/abs/2109.10265).
- Ceplecha, Z. (1967). Classification of meteor orbits. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, 11, 35.
- Ceplecha, Z., R. E. McCrosky (1976). Fireball end heights: A diagnostic for the structure of meteoric material. *J. Geophys. Res.*, 81.B35, 6257–6275.
- Jenniskens, P. *et al.* (2016). CAMS newly detected meteor showers and the sporadic background. *Icarus*, 266, 384–409.
- Pecina, P., P. Koten (2009). On the theory of light curves of video-meteors. *A&A*, 499.1, 313–320.
- Beech, Martin (2009). On the shape of meteor light curves, and a fully analytic solution to the equations of meteoroid ablation. *MNRAS*, 397.4, 2081–2086.
- Levin, B.Yu. (1956). The physical theory of meteors and meteoric matter in the solar system.
- (1963). On the fragmentation of meteoric bodies.

An overview of meteor classifications and ways to parameterize their light curves

D.S. Drozdov¹ ,

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Received 30 November 2025 / Accepted 15 December 2025

Abstract

The main source of data on the physical properties of meteoroids burning up in the Earth's atmosphere is the meteor flyby. The most important sources of information are the parameters related to the asymmetry of the light curve, the duration of meteor flyby, and the heights of the onset of ablation. However, recently, due to the increase in data and improved resolution, more attention has been paid to small peaks in the light curve. Initially, meteoroid classifications were based on the location of the main peak, but the advent of high-resolution video surveillance of meteors also makes it possible to classify meteors by the shape and structure of the meteor's head and tail, and color. This review examines various ways of classifying such events and the parameters introduced to describe them.

key words: meteors, light curve, light curve classification