

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.06.062>

УДК 523.68, 523.683

П. Н. Козак

Астрономическая обсерватория,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
Киев, 04053, Украина
kpm@univ.kiev.ua

Диффузная структура некоторых метеоров в начале их траекторий на классических высотах

Рассматривается проблема аномальных метеоров, имеющих диффузный вид и увеличенный размер их комы в начале свечения. Приводятся результаты обработки нескольких таких метеоров, зарегистрированных высокочувствительными наблюдательными телевизионными системами суперизокон при наблюдении метеорного потока Леониды 2002. В отличие от аналогичных известных случаев, данные метеоры имели увеличенную в размерах диффузную структуру комы не на сверхвысотах, а ниже 128 км: 118.06 ± 0.07 км, 123.01 ± 0.02 км, 124.45 ± 0.10 км. В начале траектории их абсолютная звездная величина составляла $+6^m \dots +5^m$, а в максимуме блеска она достигала -0.5^m . Диапазон масс равнялся $0.03 \dots 0.06$ г. Рассматривается влияние режима работы наблюдательной телевизионной системы на возможное возникновение артефактов. В то время как полупрозрачный диффузный вид предельно слабого изображения метеора может быть результатом низкого отношения сигнал/шум, увеличение пространственных размеров комы не может быть объяснено техническими артефактами. Разделение некоторых крайне слабых изображений метеоров в начальных кадрах на ряд отдельных точечных объектов, расположенных в пределах зоны $0.5 \dots 1.5$ км, также может быть косвенным доказательством реальной фрагментации начальной частицы. Делается вывод о возможном распаде некоторых метеороидов из потока Леониды на протяжении промежутка времени две-три недели до сближения с Землей при скорости разлета фрагментов порядка миллиметров в секунду.

Ключевые слова: метеоры, телевизионные наблюдения, аномальные метеоры, диффузная структура метеора, фрагментация.

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент наиболее популярным способом оптических наблюдений метеоров являются видеонаблюдения, которые пришли на смену фотографическим. Проведение базисных телевизионных наблюдений позволяет рассчитать не только кинематические характеристики метеоров, такие как параметры их атмосферной траектории и элементы гелиоцентрической орбиты, но и построить фотометрические кривые блеска как функцию высоты или времени. Анализ кривых блеска, в свою очередь, позволяет получать дополнительную информацию о физике метеора как явления, а также о внутренней структуре метеороида. Последнее время среди всего разнообразия наблюдаемых оптическими методами метеоров зарегистрировано относительно незначительное количество метеоров, имеющих уникальные кинематические и фотометрические характеристики, которые не всегда могут найти удовлетворительное количественное или даже качественное объяснение. К аномалиям кинематических характеристик метеора можно отнести такое редкое явление, как ультракороткие вспышки метеорной активности в определенных метеорных потоках (как правило Леонидах), при которых за промежуток времени в несколько секунд наблюдаются десятки, а иногда и сотни метеоров [15, 37]. Очевидно, наблюдение таких сгустков метеороидов должно быть связано с относительно недавним дроблением более крупных компонентов родительской кометы, которые не успели растянуться по орбите. Еще одним интересным явлением являются крайне редкие наблюдения метеоров, касательных к земной атмосфере [5, 7, 11, 23, 27], высота которых после прохождения перигея начинает увеличиваться, причем достаточно массивные частицы могут покинуть земную атмосферу и вернуться в космическое пространство. Безусловного внимания заслуживают также метеоры с аномально большими высотами появления, превышающими 130 км [6, 9, 12—14, 16, 21, 25, 29, 33, 34]. Их появление на такой высоте не может быть объяснено в рамках классической физики метеора плавлением или дальнейшим интенсивным испарением частицы, а требует привлечения иной концепции, например распыления поверхности вследствие прямых атомных столкновений [30]. К фотометрическим аномалиям в развитии метеора можно также отнести резкие провалы в кривых блеска метеора, когда свечение полностью или почти полностью прекращается, а затем метеор развивается как бы заново [24, 31]. Также есть информация [26, 35] о возможных поперечных джетах размером в 0.5...2 км в наиболее скоростном метеорном потоке Леониды.

Одним из самых интересных явлений, зарегистрированных относительно недавно, является диффузная (туманная) структура изображения метеорной комы в начале появления метеора, характерная для некоторых метеоров, принадлежащих быстрым метеорным потокам. Тем не менее, однозначно доказать, что данный эффект является ре-

альным проявлением природы метеора, а не аппаратным артефактом, на сегодняшний день нельзя. Появление такой аморфной структуры изображения метеорной комы связывается большинством исследователей с экстремально большими высотами появления метеоров.

Вероятно, изначально понятие диффузного (или туманного) метеора появилось в серии работ [26, 28, 33] после наземных и бортовых (с самолета) наблюдений метеорного потока Леониды в 1998 г. При этом подчеркивалось, что данный вид изображения метеорной комы характерен в основном для высокоскоростных метеороидов, и однозначно на высотах более 130 км, т.е. данное явление безусловно связывалось с аномально большими высотами появления метеоров. Была выдвинута также теория, предусматривающая излучение метеора в результате непосредственных соударений его поверхности с отдельными атомами атмосферы (т. н. «sputtering» [30, 36], упоминаемый еще в работах [4, 8]). Позже было показано [16], что метеоры с диффузной структурой в начале их траектории не обязательно очень быстрые. Например, наблюдался подобный метеор потока Лирид, который имел скорость 45.3 км/с; его высота составляла 136.8 км.

В данной работе на основе результатов наблюдений потока Леонид в 2002 г. с использованием сверхчувствительной телевизионной системы типа суперизокон будет показано, что некоторые метеоры также имели диффузный вид изображения с расширенной комой в нескольких начальных кадрах, но их высоты при этом находились в диапазоне практически классических значений высоты появления 128...118 км, не выше условного рубежа 130 км.

ДИФФУЗНАЯ СТРУКТУРА ИЗОБРАЖЕНИЙ НЕКОТОРЫХ МЕТЕОРОВ

До недавнего времени для эпизодических наблюдений метеоров в Киеве [2, 3, 14, 21, 25] использовались высокочувствительные телевизионные системы типа суперизокон (изокон, оснащенный предусилителем яркости). Предельная звездная величина, регистрируемая данной системой с объективами «Юпитер-3» ($f = 50$ мм, $f/1.5$) может достигать для звезд $+8^m \dots +9^m$ при хорошей погоде, и $+9^m \dots +10^m$ с объективами «Гелиос-40» ($f = 85$ мм, $f/1.5$). С одной стороны, благодаря высокой чувствительности телевизионной системы был зарегистрирован ряд весьма интересных эффектов, связанных с развитием метеора. С другой стороны, данный тип телевизионных систем имеет ряд недостатков, в первую очередь сильные геометрические дисторсии, а также ряд искажений, проявляющийся при фотометрической обработке: неравномерность чувствительности по полю кадра, некоторая асимметрия изображений вдоль телевизионной строки и др. Указанные недостатки привели к тому, что не все наблюдаемые явления идентифицировались как естественные физические феномены — они могли быть артефактами наблюдательной системы — и соответственно не все

были опубликованы. На сегодняшний день использование данного типа телевизионных систем нами прекращено, но ряд зарегистрированных явлений, особенно в свете публикаций других исследователей, заслуживает внимания.

Здесь представлены некоторые результаты обработки наблюдений метеорного потока Леониды 2002 г. [21], а именно явно выраженная диффузная структура и относительно большие угловые размеры комы в начале пути у некоторого количества метеоров данного потока. Разрешающая способность наблюдательной аппаратуры после оцифровки составляла $720 \times 576 \times 8$ бит/пкл, стандарт PAL/SECAM — частота чересстрочной развертки 25 полных кадров в секунду, время накопления в кадре 0.04 с. Чтобы избежать наложения динамических изображений метеора из четных и нечетных полей, полные кадры предварительно программно разбивались на поля и сохранялись в отдельных файлах — в этом случае пространственная разрешающая способность уменьшалась в два раза и составляла $360 \times 288 \times 8$ бит/пкл. Для повышения точности после астрометрической обработки [17, 22] последовательности вычисленных экваториальных координат головы метеора и моментов времени объединялись в единую последовательность и обрабатывались далее совместно [18] — временная разрешающая способность в этом случае улучшалась до 0.02 с (50 полукадров в секунду). Фотометрические измерения проводились по методике, описанной в работах [1, 20]. Все методы астрометрической, кинематической и фотометрической обработки заложены в программное обеспечение «Falling Star» [19], которое и использовалось. При наблюдениях Леонид 2002 в одном наблюдательном пункте (пункт А, с. Лесники) использовалась система с объективом «Юпитер-3», $23.5^\circ \times 19.0^\circ$ (1 пкл = 4), а во втором (пункт В, с. Пилиповичи) — «Гелиос-40», $13^\circ \times 11^\circ$, (1 пкл = 2.2).

Главными особенностями изображений некоторых метеоров, которые обращали на себя внимание, были: полупрозрачный вид комы метеора в начальных кадрах; сильно увеличенные пространственные размеры комы; сферически-симметричное изображение комы метеора в первом кадре, т. е. не вытянутое вдоль направления движения метеора. Типичный вид увеличенной диффузной комы метеора можно увидеть на рис. 1, где приведена последовательность изображений метеора в начале его пути в четных и нечетных полях кадра, которые, как упоминалось ранее, обрабатывались отдельно. Изображения данного метеора потока Леонид были получены в наблюдательном пункте В с объективом «Гелиос-40», высота метеора составляла около 128 км.

Как видно из рис. 1, метеор появился, или точнее стал видимым в четном 10-м поле (полукадре), и далее развивался, двигаясь по кадру вверх. Началом трансформации изображения метеора к обычному каплеобразному виду стал, очевидно, 4-й полукадр от начала появления (13-е поле), а до этого метеор имел диффузный вид, и кома его

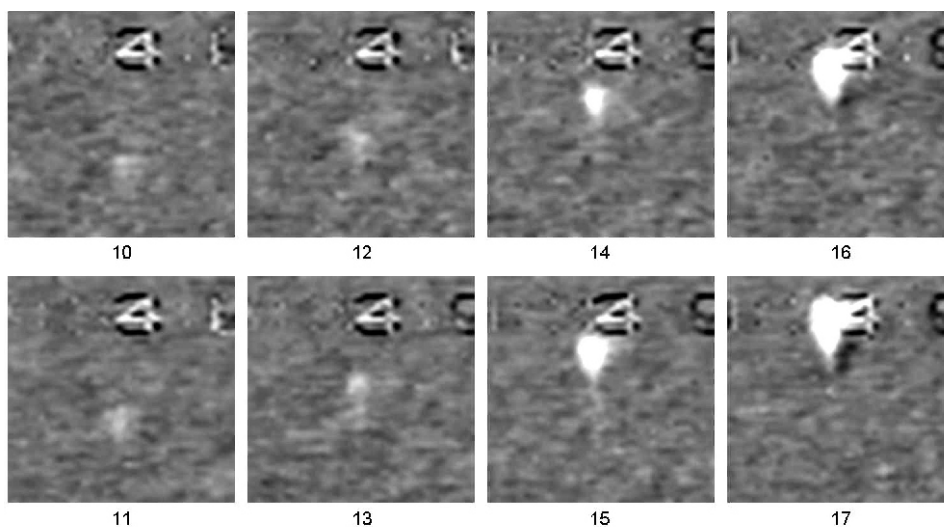


Рис. 1. Изображение комы метеора L066 в четных и нечетных последовательных полях кадра (нумерация полей внутренняя), высота метеора — около 128 км. Временной интервал между четными и нечетными полями составляет 0.02 с. Размер фреймов — 50 50 пкл, 1 пкл = 2.2

была увеличена по сравнению с последующими 13-м и 14-м полями, что в общем нетипично.

Еще один пример подобной аномалии приведен на рис. 2. Начиная с третьего полукадра от начала появления (поле 11) метеор имеет обычный каплеобразный вид; изображение в поле 9 является некоторым промежуточным этапом, а в поле 7 метеор имеет и диффузный полупрозрачный вид, и уширенную структуру, а также определенную круговую (сферическую) симметрию. Отрезки шкалы, приведенные внутри фреймов, соответствуют 2 км на соответствующем расстоянии до метеора. Как видно из первого кадра (хотя контраст довольно низок) размер изображения видимой комы можно оценить в 1...1.5 км, что весьма сложно объяснить естественными причинами, т. е. в предположении, что причиной являются не артефакты, вызванные работой телевизионной системы. Следует отметить, что высота метеора от 7-го до 13-го поля изменялась от 118.06 ± 0.07 км до 111.80

± 0.05 км, а расстояние до точки наблюдения А от 118.59 ± 0.07 км до 111.91 ± 0.05 км, т.е. метеор в точке А был практически в зените: зенитный угол головы метеора изменялся от 6.1° до 3.8°.

На рис. 3 приведена кривая блеска данного метеора как функция его высоты над уровнем моря, а также времени относительно момента появления метеора. Как видно из кривой блеска, в момент начала регистрации метеор был весьма слабым (+5.5^м...+6.0^м). Далее метеор весьма резко увеличил свой блеск примерно до 0^м в максимуме на высоте около 108 км.

Поскольку метеор в процессе развития полностью находился в пределах поля зрения, его кривая блеска позволяет рассчитать фотометрическую массу метеороида. Для этого сначала по его абсолютной

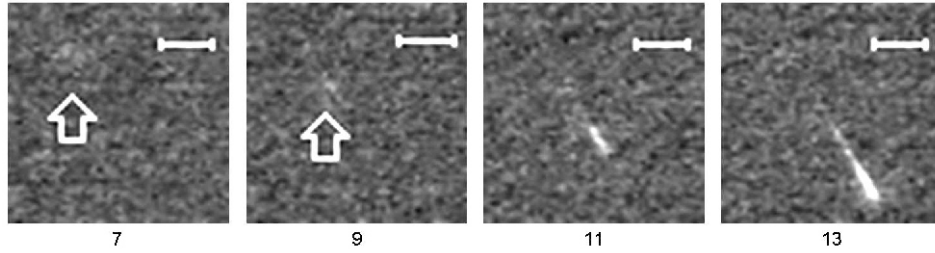


Рис. 2. Изображение метеора L062 в нечетных полях кадра (время между полями 0.04 с) в пункте наблюдения А (объектив «Юпитер-3»), размер фреймов 60 60, 1 пкл = 4 . Отрезок в кадре соответствует длине 2 км

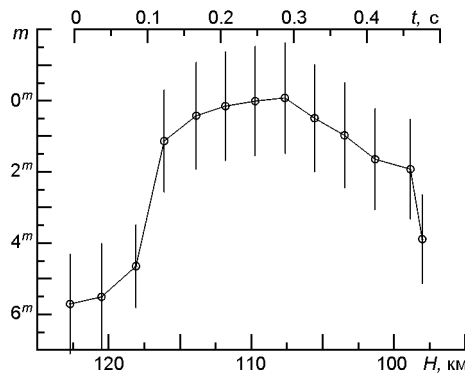


Рис. 3. Кривая блеска метеора L062 как функция высоты и времени

звездной величине $m_{abs(TV)}$ рассчитывалась сила света I_{TV} , т. е. энергия, излучаемая метеором за одну секунду в один стерадиан [23]:

$$I_{TV} = 10^{0.4(C_{TV} m_{abs(TV)})^{14}},$$

где калибровочная константа нашей телевизионной фотометрической системы $C_{TV} = -12.98$, а слагаемое 14 представляет собой логарифм квадрата расстояния до метеора в сантиметрах, которое для абсолютной звездной величины равно 100 км. Далее для вычисления непосредственно массы M метеороида использовалась классическая формула связи силы света и скорости потери кинетической энергии частицы (торможением пренебрегаем):

$$4 I_{TV}(t) = \frac{2}{2} \frac{dM}{dt},$$

откуда масса находится путем интегрирования кривой блеска по времени. Значение коэффициента эффективности излучения можно найти в классических работах [4] и [8]. Мы примем согласно [10] $\eta = 0.002$. Вычисленная начальная масса метеороида $M = 0.03$ г.

Очень похожий вид имеет метеор L088. На рис. 4 в первом кадре (поле 10) метеорная кома имеет практически такой же вид — полупрозрачный, с круговой симметрией и увеличенный в размерах. В следующем четном поле 12 изображение уже имеет вид классического

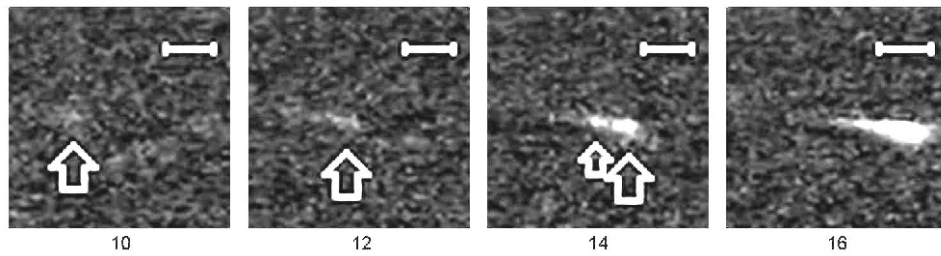


Рис. 4. Метеор L088, зарегистрированный из пункта А при помощи объектива «Юпитер-3». Размер фреймов 60 60 пкл, 1 пкл = 4 . Отрезок соответствует размеру 2 км

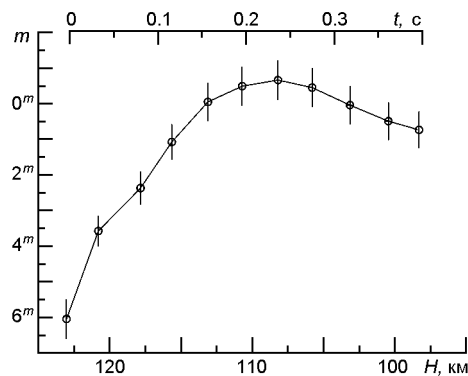


Рис. 5. Кривая блеска метеора L088

начала метеора. Метеор был зарегистрирован из пункта А в диапазоне высот, соответствующих приведенным на рис. 4 полукадрам от 123.01 0.02 до 115.64 0.03 км, на расстоянии от 123.02 0.02 до 115.87 0.03 км, т. е. метеор снова был в зените: угловое расстояние составило 2.9 ...4.8 .

Весьма интересной особенностью изображения метеора в поле 14 является появление на некотором расстоянии позади головы метеора еще одного изображения, которое в принципе может интерпретироваться как отделившийся осколок от основной метеорной частицы — частично его видно еще в поле 12. Основное изображение метеора в полукадре 12 имеет вид уже не диффузный, как в первом полукадре 10, но в то же время и не каплеобразный, как в 14-м. Более того, просматривается некоторая грануляция изображения, что с учетом изображения в поле 14 также может условно интерпретироваться как результат дробления космической частицы. Кривая блеска метеора приведена на рис. 5. В начале траектории метеор также был слабым, аналогично предыдущему случаю, — его звездная величина в первом кадре составила $+6^m$, а в максимуме, также на высоте около 108 км, блеск составлял -0.5^m . Метеор вылетел за пределы кадра, поэтому рассчитанная по кривой блеска масса в 0.05 г является нижней границей начальной массы метеороида.

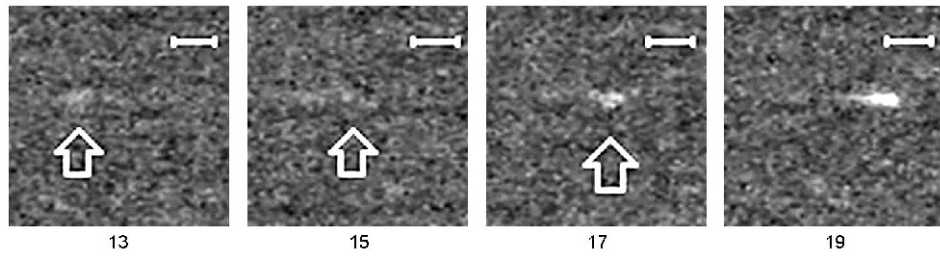


Рис. 6. Фрагменты изображения метеора L095 в четырех нечетных полукадрах, зарегистрированном в пункте А. Размер фреймов 70 70 пкл, 1 пкл = 4. Отрезок соответствует размеру 2 км

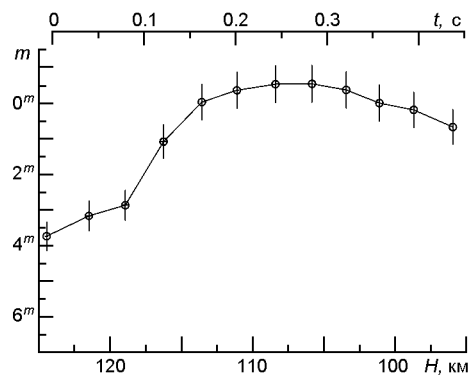


Рис. 7. Кривая блеска метеора L095

Последним из выбранных примеров является метеор L095 (рис. 6), зарегистрированный также из пункта А объективом «Юпитер-3» в начальном диапазоне высот от 124.45 0.10 км до 116.25 0.26 км (поля 13... 19) на расстоянии от 124.41 0.10 км до 116.33 0.25 км от пункта наблюдения. Примечательным в данном случае является превышение высоты появления метеора над уровнем моря над расстоянием от него до пункта наблюдения. Тем не менее, поскольку метеор наблюдался в начале траектории на зенитном расстоянии в 2.3° , т. е. практически в зените, а высота пункта наблюдения А над уровнем моря составляет 130 м, такая ситуация вполне возможна.

Интересным феноменом являются 15-е и 17-е поля данной видео-последовательности. В 15-м поле метеор практически исчезает, хотя в 13-м был хорошо виден, а в 17-м его изображение разбивается на ряд точечных изображений, что опять же может быть интерпретировано как фрагментация космической частицы. В следующем 19-м поле изображение метеора приобретает классическую каплеобразную форму.

Кривая блеска метеора L095 приведена на рис. 7. Как видно, она имеет очень схожий вид с кривой блеска метеора L062 (рис. 3), в частности на начальном этапе траектории, хотя данный метеор имел несколько более интенсивное излучение. В начале регистрации его звезд-

ная величина составляла $+3.5^m \dots +4.0^m$, а в максимуме, на высоте около 104 км, — около -0.5^m . Начальная масса метеороида, рассчитанная по кривой блеска метеора (рис. 7), составляет 0.06 г. Метеор L095 также, хотя вероятно и незначительно, покидает пределы поля зрения, поэтому реальная начальная масса может быть несколько большей.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Полученные результаты можно интерпретировать двумя способами — либо как артефакты, являющиеся следствием специфики работы телевизионной системы, либо как реальные проявления природы некоторых метеоров потока Леониды — но в обоих случаях данные аномалии в изображениях должны найти удовлетворительное объяснение.

Большинство исследователей наблюдавших диффузную структуру и уширение метеорной комы на начальном этапе траектории на высотах, превышающих 130 км, сходятся во мнении о реальности данного явления. Так, в работе [28] обсуждаются результаты наблюдений метеорного потока Леониды в 1998 г. с борта самолета, летевшего на высоте порядка 13 км, в рамках подготовленной программы НАСА. Среди прочих был зарегистрирован метеор потока Леониды, имеющий диффузную структуру в начале траектории. Согласно оценкам поперечный размер комы составлял около 900 м (удаление края свечения от центра изображения составляло 450 в каждую сторону). К сожалению, данные наблюдения были односторонними, поэтому вычислить высоту метеора не представлялось возможным. Тем не менее, при принятии средних характеристик потока Леониды начальная высота была определена в 138 км, при блеске в кадре $+1.6^m$ (чувствительность наблюдательной аппаратуры по звездам достигала $+8.5^m$). Более широкоугольная камера обнаружила его далее с максимальным блеском -4.0^m . Поперечный фотометрический профиль метеора сравнивался с профилем аналогичного по блеску «обычного» метеора, наблюдаемого приблизительно в то же время, и было продемонстрировано значительное различие их видимых ширин комы.

В работе [32] обсуждаются данные наблюдений Леонид 1998 г. во время китайско-голландской экспедиции. Рассматривается семь метеоров, у которых наблюдалась диффузная структура на высотах более 130 км, а также поперечные джеты размером порядка 2.5, 3.2, 6.5 км (в основном яркие болиды). В одном из болидов (самый яркий -12.5^m), по мнению авторов, четко были видны поперечные джеты, развивающиеся со скоростью 100 км/с (развитие происходило за один кадр), а также отмечается, что в общем наличие джетов типично для всех семи болидов. После достижения высоты 130 км диффузная структура метеорной комы исчезала. Классификация свечения, предложенная авторами, была такова: выше 132 км — диффузная фаза,

135...125 км — переходная фаза, ниже — обычный метеор. Абсолютная звездная величина метеоров в диффузной фазе составляла приблизительно $+6^m \dots +2^m$.

В работе чешских исследователей [16] приводятся результаты поиска в собственных наблюдательных данных сверхвысоких метеоров, всего рассматривается четыре метеора: 1 Лирид, 2 -Акварида, 1 Персеид. Не все метеоры были высокоскоростными. Авторы также настаивают на реальности наблюдаемых у всех метеоров диффузной фазы. Абсолютная звездная величина метеоров в диффузной фазе варьировала в пределах от $+5^m$ до $+3^m \dots +2^m$.

Также следует упомянуть работу [13], где представлены результаты наблюдений метеора потока Леониды 2002 г. над Испанией. Высота его появления была 174 км (погрешность 5 %). Авторы отмечают, что до 130 км наблюдалась диффузная стадия метеора.

Тем не менее, есть предположение о диффузном виде изображения метеора как об артефакте наблюдательной телевизионной системы. Так, в работе [29] описаны наблюдения над Польшей в 2012 г. яркого болида -14.7^m из потока Орионид. Высота его появления составила 168.4 км (погрешность 0.6 км). Авторы не считают диффузную составляющую, наблюдавшуюся в начале пути природным феноменом, а комбинацией чересстрочной развертки (рассматривались полные кадры) и угловой скорости метеора.

Результаты, приведенные в данной работе, исходно рассматривались как возможные артефакты, получаемые в результате работы телевизионной системы. При этом следует отметить, что мы давно и заведомо отказались от обработки полных кадров как раз во избежание наложения динамических изображений, поэтому влияние чересстрочной развертки сразу можно исключить. Как отмечалось выше, отличие метеоров с диффузной структурой, зарегистрированных нашей наблюдательной системой, состоит в том, что метеоры имеют такой вид только в одном-двух (иногда трех) начальных кадрах, а не в десятках кадров; метеорная кома имеет такой вид на почти «классических» высотах или немного выше, т. е. в диапазоне 118...132 км, а не только на высотах, значительно превышающих 130 км (140...160 км). И хотя полупрозрачный вид метеорного изображения и сильно уширенная структура видимой метеорной комы являются общими особенностями, вероятно, данный вид аномалий не имеет одной природы с аналогичным видом метеора на сверхбольших высотах. В последнем случае появление метеоров на больших высотах частично объясняется прямыми столкновениями атомов атмосферы с поверхностью метеороида (без процесса абляции), а увеличенный размер комы метеора ассоциируется с большей длиной свободного пробега на высотах 140...200 км. На высотах порядка 110...120 км длина свободного пробега составляет величину порядка сантиметра [26], т. е. размеры комы порядка километра, образованной разлетом атомов, невозможны.

Как показал детальный анализ изображений, некоторые аномалии в изображении метеора в начале его регистрации действительно вполне могут быть артефактами телевизионной системы. Так, симметрия в первом кадре объясняется тем, что метеор может появиться (стать видимым) не в начале кадра, а в его середине, или ближе к концу экспозиции, т. е. изображение метеора двигалось меньше, чем в последующих кадрах. Полупрозрачный (или диффузный) вид комы можно объяснить непосредственно низкой интенсивностью изображения по отношению к флуктуациям фона (низким отношением сигнал/шум), когда флуктуации фона в отдельных пикселях изображения превышают интенсивность изображения самого метеора, создавая эффект прозрачности. Аналогичный, хотя и не столь ярко выраженный эффект можно наблюдать в эксперименте съемки звезд вращающейся камерой, когда по мере уменьшения интенсивности изображения звезды до предельных значений появляется эффект полупрозрачности. Тем не менее, сильное увеличение размера метеорной комы нельзя объяснить работой телевизионной системы — такое уширение отсутствует и у подвижных изображений звезд. Это очевидно — ведь полная ширина на полувысоте функции распределения точки (ФРТ) должна быть константой при линейном отклике системы (который в нашем случае реализуется для объектов малого блеска), а внешний вид изображения точечного объекта должен определяться амплитудным множителем перед безразмерной частью ФРТ, пропорциональным освещенности от объекта. Таким образом, при уменьшении освещенности (увеличении звездной величины) от объекта видимый размер его изображения должен также уменьшаться. Единственным возможным предположением, которое рассматривалось как возможная причина, было предварительное применение математической процедуры вычитания кадров для увеличения точности измерений изображения метеора [22, 23]. Речь идет об избавлении кадров от стационарных изображений звезд и неравномерности среднего значения фона путем вычитания кадра перед появлением метеора. Поскольку стандартное отклонение распределения флуктуаций фона в результирующем кадре при этом увеличилась бы в $\sqrt{2}$, как правило, отнимается некоторый усредненный кадр (в работе [26] использовалось усреднение 40 кадров), и в этом случае погрешность результирующего кадра будет практически такой же, как и у исходного. Но данная процедура таит в себе некоторую опасность, которая теоретически может повлиять на появление новых артефактов. В то время как дисперсия флуктуаций фона действительно остается практически без изменения, изображения звезд в усредненном кадре и в одиночных кадрах будут несколько сдвинуты случайным образом друг относительно друга. После вычитания это приведет к созданию в области звездных изображений некоторых их остатков, которые могут быть выше и ниже среднего значения фона. Появляется так называемая «грануляция» общего фона, где «гранулы» превышают размеры одного пикселя. Если

такая гранула образуется в области начального появления метеора, и в соответствующем полукадре, возможно визуальное увеличение изображения такого «метеора». Такие гранулы хорошо видны в нескольких местах фреймов на рис. 2, 4 и 6. И хотя вероятность возникновения такого артефакта в данном месте и в данное время (в данном кадре) крайне мала, особенно в двух последовательных кадрах, его следует принимать во внимание. Однако данный фактор легко исключается путем сравнения изображения метеора в модифицированном и исходном кадрах. В нашем случае все приведенные особенности изображений имели место и в оригинальных кадрах, поэтому эффект увеличенной метеорной комы не может быть объяснен спецификой работы телевизионной системы.

Что касается реальности данного уширения метеорной комы как природного явления, то вероятное объяснение было предложено ранее в работе [26]. При этом рассматривались два варианта: либо дефрагментация хрупкой частицы в атмосфере на высотах порядка 200...150 км и поперечный разлет осколков, либо развал частицы ранее, до взаимодействия с атмосферой. Второй вариант представляется нам более правдоподобным, так как для первого случая следует предположить, что за одну секунду с высоты 200 км до 130...120 км частицы разлетелась на расстояние около 1 км поперек траектории, т. е. следует предположить поперечную составляющую скорости примерно 1 км/с при скорости Леонид около 72 км/с. Наблюдения кластерной структуры в потоке Леонид [15, 37] также косвенно подтверждает возможность реализации второго варианта. Дополнительным аргументом в пользу нескольких фрагментов могут служить изображения метеоров на рис. 4 и 6. Если принять реальность двух изображений как отделившихся частиц в 14-м полукадре рис. 4, то видно, что расстояние между ними вдоль траектории составляет около 1.5 км. Аналогично, если принять во внимание, что группа изображений в 17-м полукадре рис. 6 состоит из 5-6 фрагментов, то видно, что они растянуты вдоль траектории на расстояние около 2 км, и поперек на расстояние, несколько меньше 1 км. Такие значения являются вполне приемлемыми. Далее при увеличении интенсивности излучения фрагментов размеры изображений их ФРТ увеличиваются в амплитудах и автоматически в размерах, и сливаются в одно изображение, не решаясь более телевизионной системой.

Если предположить, что фрагментация частицы потока Леониды в космическом пространстве происходила постепенно за счет относительно медленного плавления или испарения летучей «склеивающей» составляющей под воздействием солнечного излучения, то можно принять вариант отделения более плотных каменных компонентов метеороида с минимальными начальными скоростями, например порядка 0.1...1 мм/с. Отсюда следует, что разлет частиц на расстояние 1 км должен осуществляться за 116...12 сут до сближения с Землей. Очевидно, что при скорости 0.1 мм/с время разлета 4 месяца является

сильно завышенным — метеороиды находятся далеко от перигелия, и дезинтеграция частицы маловероятна на больших расстояниях от Солнца. Принимая из расчетов орбит, что истинная аномалия метеороидов потока Леониды в среднем соответствует 6° , т. е. перигелий размещен весьма близко к орбите Земли, а гелиоцентрическая скорость метеороидов в точке сближения с Землей составляет около 44.2 км/с (в упрощенном варианте расчетов можно положить, что она такая же и в перигелии), можно в первом приближении получить, что для скорости отделения фрагментов 1 мм/с угол движения вдоль орбиты Леонид составит около 17° , т. е. 11° до перигелия и 6° после, что выглядит вполне правдоподобным для распада исходной частицы. Если предположить, что фрагментация частицы случилась быстро и в наиболее вероятном месте — в перигелии — то тогда можно рассчитать, что скорость вылета фрагментов из исходного метеороида должна составлять приблизительно 2.9 мм/с.

1. Козак П. М., Козак Л. В. Метод фотометрії слабких метеорів та штучних супутників Землі із спостережень з телевізійними системами суперізокон // *Космічна наука і технологія*. 2015. 21, № 1. С. 38—47.
2. Козак П. М., Рожило О. О., Тарануха Ю. Г. Кінематичні параметри метеорів за результатами базисних телевізійних спостережень в період осіннього рівнодення 2001 року. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Астрономія*. 2012. 49. С. 20—25.
3. Козак П. М., Рожило О. О., Тарануха Ю. Г., Кручиненко В. Г. Кінематичні характеристики вересневих метеорів за базисними телевізійними спостереженнями 2003 року. *Космічна наука і технологія*. 2011. 17, № 4. С. 53—64.
4. Левин Б. Ю. *Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе*. Москва: Изд. АН СССР. 1956. 293 с.
5. Abe S., Borovička J., Spurný P., Koten P., Ceplecha Z., Tamagawa T., and Meteor Network Team in Japan. *Earth-grazing fireball on March 29, 2006. European Planet. Sc. Cong. 2006, Berlin, Germany*. 2006. P. 486.
6. Betlem H., Jenniskens P., Leven J., Kuile C., Johannink C., Zhao H., Lei C., Li G., Zhu J., Evans S., Spurný P. Very precise orbits of 1998 Leonid meteors. *Meteoritics and Planet. Sci.* 1999. 34. P. 979—986.
7. Borovička J., Ceplecha Z. Earth-grazing fireball of October 13, 1990. *Astron. and Astrophys.* 1992. 257. P. 323—328.
8. Bronshten V. A. *The Physics of Meteoritic Phenomena*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co. 1983.
9. Campbell M. D., Brown P. G., LeBlanc A. G., Hawkes R., Jones J., Worden S., Correll R. Image-intensified video result from the 1998 Leonid shower: I. Atmospheric trajectories and physical structure. *Meteoritics and Planet. Sci.* 2000. 35. P. 1259—1267.
10. Campbell-Brown M. D., Koschny D. Model of the ablation of faint meteors. *Astron. and Astrophys.* 2004. 418. P. 751—758.
11. Ceplecha Z. Earth-grazing daylight fireball of August 10, 1972. *Astron. and Astrophys.* 1994. 283. P. 287—288.
12. Fujiwara Y., Ueda M., Shiba Y., Sugimoto M., Kinoshita M., Shimoda C., Nakamura T. Meteor luminosity at 160 km altitude from TV observations for bright Leonid meteors. *Geophys. Res. Lett.* 1998. 25, 8. P. 285—288.

13. Gahrken B., Michelberger J. A bright, high altitude 2002 Leonid. *WGN, the journal of the IMO*. 2003. 31. № 5. P. 137—138.
14. Hajdukova M., Kruchinenko V. G., Kazantsev A. M., Taranucha Ju. G., Rozhilo A. A., Eryomin S. S., Kozak P. N. Perseid meteor stream 1991—1993 from TV observations in Kiev. *Earth, Moon and Planets*. 1995. 68. P. 297—301.
15. Kinoshita M., Maruyama T., Sagayama T. Preliminary activity of Leonid meteor storm observed with a video camera in 1997. *Geophys. Res. Lett.* 1999. 26, 1. P. 41—44.
16. Koten P., Spurny P., Borovicka J., Stork R. Extreme beginning heights for non-Leonid meteors. In: *Proc. Meteoroids 2001 Conf.* Ed.: Barbara Warmbein. ESA SP-495, Noordwijk: ESA Publ. Div. 2001. P. 119—122.
17. Kozak P. M. Analysis of the methods and precision of determination of the equatorial coordinates in digital reducing of TV observations of meteors. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 2002. 18, 5. P. 471—480.
18. Kozak P. M. A vector method for the determination of trajectory parameters and heliocentric orbit elements of a meteor in TV observations. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 2003. 19, 1. P. 62—76.
19. Kozak P. “Falling Star”: software for processing of double-station TV meteor observations. *Earth, Moon, and Planets*. 2008. 102, 1—4. P. 277—283.
20. Kozak P. M. Semi-empirical method for the photometry of low-light meteors from observations with the isocon television systems. — In: *Proc. Meteoroids 2013*. Eds.: T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, I. P. Williams. A. M. University Press. 2014. P. 335—343.
21. Kozak P., Rozhilo O., Kruchynenko V., Kazantsev A., Taranukha A. Results of processing of Leonids-2002 meteor storm TV observations in Kyiv. *Adv. Space Res.* 2007. 39, 4. P. 619—623.
22. Kozak P. M., Rozhilo A. A., Taranukha Y. G. Some features of digital kinematic and photometrical processing of faint TV meteors. In: *Proc. Meteoroids 2001 Conf.* Ed.: B. Warmbein. ESA SP-495, Noordwijk: ESA Publ. Div. 2001. P. 337—342.
23. Kozak P. M., Watanabe J. Upward-moving low-light meteor — I. Observation results. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. 467, 1. P. 793—801.
24. Kozak P., Watanabe J., Sato M. Anomalous meteors from the observations with super-isocon TV systems. — *Abs. Book ACM'2014*, Eds: K. Muinonen, A. Penttila, M. Granvik, A. Virkki, G. Fedorets, O. Wilkman, T. Kohout, 2014. P. 310.
25. Kruchinenko V. G., Kazantsev A. M., Taranukha Yu. G., Kozak P. M., Yeryomin S. S., Rozhylo O. O., Smertyuk L. M. Catalogue of Perseid shower meteors on TV observations in Kyiv during 1991—1993. *Вісник Київського ун-ту, Астрономія*. 1997. 34. С. 94—117.
26. LeBlanc A. G., Murray I. S., Hawkes R. L., Worden P., Campbell M. D., Brown P., Jenniskens P., Correll R. R., Montague T., Babcock D. D. Evidence for transverse spread in Leonid meteors. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2000. 313. P. L9—L13.
27. Madiedo J. M., Espartero F., Castro-Tirado A. J., Pastor S., de los Reyes J. A., Jose A. Earth-grazing fireball from the Daytime -Perseid shower observed over Spain on 2012 June 10. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. 460. 1. P. 917—922.
28. Murray I. S., Hawkes R. L., Jenniskens P. Airborne intensified charge-coupled device observations of the 1998 Leonid shower. *Meteoritics and Planet. Sci.* 1999. 34. P. 949—958.
29. Olech A., Zoladek P., Wisniewski M., Fietkiewicz K., Maciejewski M., Tyminski Z., Krzyzanowski T., Krasnowski M., Kwinta M., Myszkiewicz M., Polakowski K., Zareba P. PF191012 Myszyniec — highest Orionid meteor ever recorded. *Astron. and Astrophys.* 2013. 557, A89. P. 1—5.

30. Popova O. P., Strelkov A. S., Sidneva S. N. Sputtering of fast meteoroids' surface. *Adv. Space Res.* 2007. 39, 4. P. 567—573.
31. Roberts I. D., Hawkes R. L., Weryk R. J., Campbell-Brown M. D., Brown P. G., Stokan E., Subasinghe D. Meteoroid structure and ablation implications from multiple maxima meteor light curves. — *The Meteoroids 2013*. Eds: T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, I. P. Williams. A. M. Univ. Press. 2014. P. 155—162.
32. Spurný P., Betlem H., Jobse K., Kotten P., Leven J. V. New type of radiation of bright Leonid meteors above 130 km. *Meteoritics and Planet. Sci.* 2000. 35. P. 1109—1115.
33. Spurný P., Betlem H., Leven J. V., Jenniskens P. Atmospheric behavior and extreme beginning heights of the thirteen brightest photographic Leonid meteors from the ground based expedition to China. *Meteoritics and Planet. Sci.* 2000. 35. P. 243—249.
34. Spurný P., Shrubny L., Borovička J., Kotten P., Vojacek V., Stork R. Bright Perseid fireball with exceptional beginning height of 170 km. *Astron. and Astrophys.* 2014. 563. A64. P. 1—6.
35. Taylor M. J., Gardner R. C., Murray I. S., Jenniskens P. Jet-like structures and wake in Mg I (518 nm) images of 1999 Leonid storm meteors. *Earth, Moon, and Planets.* 2000. 82—83. P. 379—389.
36. Vinković D. Thermalization of sputtered particles as the source of diffuse radiation from high altitude meteors. *Adv. Space Res.* 2007. 39, 4. P. 574—582.
37. Watanabe J., Tabe I., Hasegawa H., Hashimoto T., Fuse T., Yoshikawa M., Abe S., Suzuki B. Meteoroid clusters in Leonids: evidence of fragmentation in space. *Publ. Astron. Soc. Jap.* 2003. 55, 3. P. L23—L26.

REFERENCES

1. Kozak P. M., Kozak L. V. (2015) Method for photometry of low light level meteors and earth artificial satellites from observations of superisocon TV systems. *Space Science and Technology.* 21(1). 38—47. (In Ukrainian).
2. Kozak P., Rozhilo O., Taranukha Ju. (2012) Kinematical parameters of the meteors from the results of the basic television observations during the period of the Autumn Equinox 2001. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomy.* 49. 20—25. (In Ukrainian).
3. Kozak P., Rozhilo O., Taranukha Ju., Kruchynenko V. G. (2011) Kinematical characteristics of September meteors from double-station TV observations in 2003. *Space Science and Technology.* 17(4). 53—64. (In Ukrainian).
4. Levin B. Y. (1956) *Physical Theory of Meteors and Meteor Matter in the Solar System*, USSR Academy of Sciences, Moscow. (In Russian).
5. Abe S., Borovička J., Spurný P., Kotten P., Cepelcha Z., Tamagawa T., and Meteor Network Team in Japan. (2006) *Earth-grazing fireball on March 29, 2006. European Planet. Sc. Cong. 2006, Berlin, Germany.* 486.
6. Betlem H., Jenniskens P., Leven J., Kuile C., Johannink C., Zhao H., Lei C., Li G., Zhu J., Evans S., Spurný P. (1999) Very precise orbits of 1998 Leonid meteors. *Meteoritics and Planet. Sci.* 34. 979—986.
7. Borovička J., Cepelcha Z. (1992) Earth-grazing fireball of October 13, 1990. *Astron. and Astrophys.* 257. 323—328.
8. Bronshten V. A. (1983) *The Physics of Meteoritic Phenomena*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co.
9. Campbell M. D., Brown P. G., LeBlanc A. G., Hawkes R., Jones J., Worden S.,

- Correll R. (2000) Image-intensified video result from the 1998 Leonid shower: I. Atmospheric trajectories and physical structure. *Meteoritics and Planet. Sci.* 35. 1259—1267.
10. Campbell-Brown M. D., Koschny D. (2004) Model of the ablation of faint meteors. *Astron. and Astrophys.* 418. 751—758.
11. Cepelcha Z. (1994) Earth-grazing daylight fireball of August 10, 1972. *Astron. and Astrophys.* 283. 287—288.
12. Fujiwara Y., Ueda M., Shiba Y., Sugimoto M., Kinoshita M., Shimoda C., Nakamura T. (1998) Meteor luminosity at 160 km altitude from TV observations for bright Leonid meteors. *Geophys. Res. Lett.* 25(8). 285—288.
13. Gahrken B., Michelberger J. (2003) A bright, high altitude 2002 Leonid. *WGN, the journal of the IMO.* 31(5). P. 137—138.
14. Hajdukova M., Kruchinenko V. G., Kazantsev A. M., Taranucha Ju. G., Rozhilo A. A., Eryomin S. S., Kozak P. N. (1995) Perseid meteor stream 1991—1993 from TV observations in Kiev. *Earth, Moon and Planets.* 68. 297—301.
15. Kinoshita M., Maruyama T., Sagayama T. (1999) Preliminary activity of Leonid meteor storm observed with a video camera in 1997. *Geophys. Res. Lett.* 26(1). 41—44.
16. Koten P., Spurny P., Borovicka J., Stork R. (2001) Extreme beginning heights for non-Leonid meteors. In: *Proc. Meteoroids 2001 Conf.* Ed.: Barbara Warmbein. ESA SP-495, Noordwijk: ESA Publ. Div. 119—122.
17. Kozak P. M. (2002) Analysis of the methods and precision of determination of the equatorial coordinates in digital reducing of TV observations of meteors. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 18(5). 471—480.
18. Kozak P. M. (2003) A vector method for the determination of trajectory parameters and heliocentric orbit elements of a meteor in TV observations. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 19(1). 62—76.
19. Kozak P. (2008) “Falling Star”: software for processing of double-station TV meteor observations. *Earth, Moon, and Planets.* 102(1-4). 277—283.
20. Kozak P. M. (2014) Semi-empirical method for the photometry of low-light meteors from observations with the isocon television systems. — In: *Proc. Meteoroids 2013.* Eds.: T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, I. Williams. A. M. University Press. 335—343.
21. Kozak P., Rozhilo O., Kruchynenko V., Kazantsev A., Taranukha A. (2007) Results of processing of Leonids-2002 meteor storm TV observations in Kyiv. *Adv. Space Res.* 39(4). 619—623.
22. Kozak P. M., Rozhilo A. A., Taranukha Y. G. (2001) Some features of digital kinematic and photometrical processing of faint TV meteors. In: *Proc. Meteoroids 2001 Conf.* Ed.: Barbara Warmbein. ESA SP-495, Noordwijk: ESA Publ. Div. 337—342.
23. Kozak P. M., Watanabe J. (2017) Upward-moving low-light meteor — I. Observation results. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 467(1). 793—801.
24. Kozak P., Watanabe J., Sato M. (2014) Anomalous meteors from the observations with super-isocon TV systems. — *Abs. Book ACM'2014*, Eds: K. Muinonen, A. Penttila, M. Granvik, A. Virkki, G. Fedorets, O. Wilkman, T. Kohout.
25. Kruchinenko V. G., Kazantsev A. M., Taranukha Yu. G., Kozak P. M., Yeryomin S. S., Rozhilo O. O., Smertyuk L. M. (1997) Catalogue of Perseid shower meteors on TV observations in Kyiv during 1991—1993. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomy.* 34. 94—117.
26. LeBlanc A. G., Murray I. S., Hawkes R. L., Worden P., Campbell M. D., Brown P., Jenniskens P., Correll R. R., Montague T., Babcock D. D. (2000) Evidence for trans-

- verse spread in Leonid meteors. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 313. L9—L13.
27. Madiedo J. M., Espartero F., Castro-Tirado A. J., Pastor S., de los Reyes J. A., Jose A. (2016) Earth-grazing fireball from the Daytime -Perseid shower observed over Spain on 2012 June 10. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 460(1). 917—922.
28. Murray I. S., Hawkes R. L., Jenniskens P. (1999) Airborne intensified charge-coupled device observations of the 1998 Leonid shower. *Meteoritics and Planet. Sci.* 34. 949—958.
29. Olech A., Zoladek P., Wisniewski M., Fietkiewicz K., Maciejewski M., Tyminski Z., Krzyzanowski T., Krasnowski M., Kwinta M., Myszkiewicz M., Polakowski K., Zareba P. (2013) PF191012 Myszyniec — highest Orionid meteor ever recorded. *Astron. and Astrophys.* 557(A89). 1—5.
30. Popova O. P., Strelkov A. S., Sidneva S. N. (2007) Sputtering of fast meteoroids' surface. *Adv. Space Res.* 39(4). 567—573.
31. Roberts I. D., Hawkes R. L., Weryk R. J., Campbell-Brown M. D., Brown P. G., Stokan E., Subasinghe D. (2014) Meteoroid structure and ablation implications from multiple maxima meteor light curves. — *The Meteoroids 2013*. Eds: T.J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, I. P. Williams. A. M. Univ. Press. 155—162.
32. Spurný P., Betlem H., Jobse K., Koten P., Leven J. V. (2000) New type of radiation of bright Leonid meteors above 130 km. *Meteoritics and Planet. Sci.* 35. 1109—1115.
33. Spurný P., Betlem H., Leven J. V., Jenniskens P. (2000) Atmospheric behavior and extreme beginning heights of the thirteen brightest photographic Leonid meteors from the ground based expedition to China. *Meteoritics and Planet. Sci.* 35. 243—249.
34. Spurný P., Shrbeny L., Borovicka J., Koten P., Vojacek V., Stork R. (2014) Bright Perseid fireball with exceptional beginning height of 170 km. *Astron. and Astrophys.* 563(A64). 1—6.
35. Taylor M. J., Gardner R. C., Murray I. S., Jenniskens P. (2000) Jet-like structures and wake in Mg I (518 nm) images of 1999 Leonid storm meteors. *Earth, Moon, and Planets.* 82-83. 379—389.
36. Vinković D. (2007) Thermalization of sputtered particles as the source of diffuse radiation from high altitude meteors. *Adv. Space Res.* 39(4). 574—582.
37. Watanabe J., Tabe I., Hasegawa H., Hashimoto T., Fuse T., Yoshikawa M., Abe S., Suzuki B. (2003) Meteoroid clusters in Leonids: evidence of fragmentation in space. *Publ. Astron. Soc. Jap.* 55(3). L23—L26.

П. М. Козак

Астрономічна обсерваторія, Київський національний університет
імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ДИФУЗНА СТРУКТУРА ДЕЯКИХ МЕТЕОРИВ НА ПОЧАТКУ ЇХНІХ ТРАЕКТОРІЙ НА КЛАСИЧНИХ ВИСОТАХ

Розглядається проблема аномальних метеорів, що мають дифузний вид і збільшений розмір їх коми на початку світіння. Приводяться результати обробки декількох таких метеорів, зареєстрованих високочутливими спостережними телевізійними системами суперізокон при спостереженні метеорного потоку Леоніди 2002. На відміну від аналогічних відомих випадків, дані метеори мали збільшену в розмірах дифузну структуру коми не на надвеликих висотах, а нижче 128 км: 118.06 ± 0.07 км, 123.01 ± 0.02 км, 124.45 ± 0.10 км. На початку траєкторії їхня абсолютна зоряна величина дорівнювала $+6^m \dots +5^m$, а в максимумі блиску вона досягала -0.5^m . Діапазон мас дорівнював $0.03 \dots 0.06$ г. Розглядається вплив режиму роботи спостережної

телевізійної системи на можливе виникнення артефактів. Тоді як напівпрозорий дифузний вид гранично слабкого зображення метеора може бути результатом низького відношення сигнал/шум, збільшення просторових розмірів коми не може бути пояснене технічними артефактами. Розділення деяких надслабких зображень метеорів у початкових кадрах на ряд окремих точкових об'єктів, розміщених у межах зони 0.5...1.5 км, може бути також побічним доказом реальної фрагментації початкової частинки. Робиться висновок про можливий розпад деяких метеороїдів з потоку Леоніди протягом проміжку часу два-три тижні до зближення з Землею при швидкості розльоту фрагментів порядку міліметрів за секунду.

Ключові слова: метеори, телевізійні спостереження, аномальні метеори, дифузна структура метеора, фрагментація.

P. M. Kozak

Astronomical observatory, Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Kyiv, Ukraine

DIFFUSE STRUCTURE OF SOME METEORS AT THE BEGINNING OF THEIR TRAJECTORIES AT CLASSIC HEIGHTS

The problem of anomalous meteors with diffuse view and increased size of their comas at the beginning of radiation is considered. Results of processing of some such meteors detected with high-sensitive observational TV systems of super-isocon type during Leonid 2002 storm observations are given. In opposite to similar cases described in literature earlier the given meteors had the increased size diffuse structure of meteor coma not at extra-high altitudes, but below 128 km: 118.06 ± 0.07 km, 123.01 ± 0.02 km, 124.45 ± 0.10 km. At the trajectory beginning their absolute astronomical magnitudes were varying in the range of $+6^m \dots +5^m$, and in maximum of brightness they reached -0.5^m . The range of their masses was 0.03...0.06 g. The influence of working mode of TV system onto possible appearance of artifacts is considered. While the transparent, diffuse view of limiting low-light meteor image can be a result of low signal-to-noise ratio, the increasing of spatial size of meteor coma cannot be explained by technical artifacts. Separation of some extremely low-light meteor images in start frames onto a range of individual point objects placed inside a zone 0.5...1.5 km can serve as an indirect argument of real fragmentation of an initial particle. The conclusion about possible fragmentation of some meteoroids from Leonid stream during time period of two-three weeks before collision with earth with velocities of fragment separation about millimeters a second is drawn.

Key words: meteors, TV observations, anomalous meteors, diffuse meteor structure, fragmentation.

Стаття надійшла до редакції 02.06.2019

Після доопрацювання 13.06.2019

Прийнята до друку 08.08.2019