

УДК 550.338

ДОЛГОЖИВУЩИЕ МЕТЕОРНЫЕ СЛЕДЫ, СФОРМИРОВАННЫЕ ПРИ РАДИАЛЬНОМ РАСШИРЕНИИ КРУПНЫХ МЕТЕОРОИДОВ

© 2021 г. А. В. Михалев*

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

**mikhalev@iszf.irk.ru*

Поступила в редакцию 21.02.2021 г.

После доработки 18.04.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

В работе рассматривается возможный механизм образования долгоживущих метеорных следов необычной геометрической формы в рамках модели мгновенного разрушения метеорного тела под действием аэродинамической силы и растеканием метеорного вещества в поперечном основном движению ядра направлении, впервые предложенной в 1979 г. С.С. Григоряном и развитой в последующие годы другими авторами. В рассматриваемом событии долгоживущий метеорный след определялся формой метеороида и его динамикой в процессе разрушения метеорного тела. Метеорный след стал формироваться вблизи поверхности тела метеороида при его радиальном расширении, что согласуется с моделью С.С. Григоряна мгновенного разрушения метеорного тела под действием аэродинамической силы и поперечным расширением при разрушении метеорного тела упругими волнами. Метеорный след “уходит” в обратном и радиальном направлениях по отношению траектории полета основного метеороидного тела. Отмечается, что наблюдаемые времена жизни долгоживущих метеорных следов (~20–40 мин) и их пространственные масштабы (десятки-сотни километров) могут обеспечиваться распространением крупных метеорных частиц (≥ 100 мкм). Эти частицы обладают высокими значениями импульса, которые сохраняются при горизонтальном распространении на высотах атмосферы с одинаковой плотностью на больших расстояниях без существенной потери скорости. В этом случае свечение метеорного следа может определяться классическими механизмами собственного свечения метеорного вещества и газовыми составляющими атмосферы.

DOI: 10.31857/S0023420621060066

ВВЕДЕНИЕ

Согласно классической физике метеорных явлений излучение метеоров формируется в коме, т.е. нагретой газовой оболочке, состоящей из смеси воздуха и метеорных паров. Обычно сопровождается линейным метеорным следом вдоль траектории метеороида, и далее может трансформироваться под действием преимущественных ветров на высотах высвечивания метеоров. В работе [7] описаны случаи регистрации эллипсоидальных долгоживущих метеорных следов. Изображения необычных метеорных следов иногда появляются и в интернете (см., например, изображение яркого метеора со следом из потока Геминид, зарегистрированного 9.XII.2010 в САО РАН). В качестве основной проблемы при интерпретации таких следов следует отметить механизм образования необычной геометрической структуры долгоживущих метеорных следов.

В настоящей работе рассматривается возможный механизм образования метеорных следов в рамках модели мгновенного разрушения метеор-

ного тела под действием аэродинамической силы и поперечным расширением, впервые предложенной в 1979 г. С.С. Григоряном [5] и развитой в последующие годы другими авторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Отдельные наблюдательные данные долгоживущих метеорных следов. В работе [7] описываются 4 события долгоживущих метеорных следов (ДМС), два из которых имели редкие квазисимметричные эллипсоидально-кольцевые формы.

Событие 18.XI.2017. Событие регистрировалось двумя камерами в 2-х обсерваториях (Саянской солнечной обсерватории и Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН), разнесенных на расстояние ~150 км, что позволило выполнить базисные определение высоты следа. Метеорный след распространяется преимущественно горизонтально в интервале высот 86–91 км. Полное время наблюдения метеорного следа по оптическим данным составило ~35–40 мин. Носовая

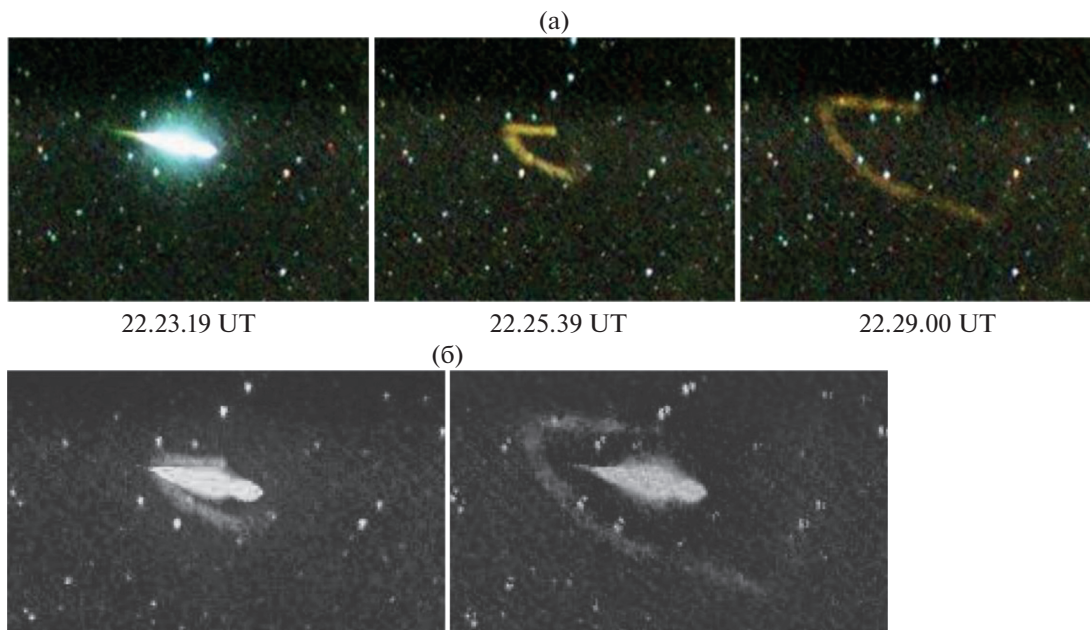


Рис. 1. (а) Время экспозиции кадров 60 с. (б) Комбинированные изображения, слева кадр 1 и 2, справа – кадры 1 и 3.

часть петли метеорного следа двигалась с постоянной скоростью по разным оценкам от ~ 80 до ~ 320 м/с [4, 10] и за указанное время сместилась на расстояние ~ 400 км. В Саянской солнечной обсерватории этот след наблюдался в околосолнечной области небосвода. Ориентация трека и момент обнаружения позволили сделать вывод о его принадлежности к метеорному потоку Леониды, средняя скорость движения частиц которого в атмосфере Земли составляет около 70 км/с. Оценка блеска метеора дала значение абсолютной звездной величины около -7.3^m [4].

События 23.I.2018. Этот ДМС был зарегистрирован в Геофизической обсерватории черно-белой камерой всего неба в эмиссии 557.7 нм у восточного горизонта. Время наблюдения этого метеорного следа составило ~ 20 мин. Проекция скорости перемещения метеорного следа на направление наблюдения составила $\sim 34\text{--}40$ м/с (для высоты 90 км). К сожалению, вхождение этого метеороида в атмосферу Земли не попало в поле зрения камеры, установленной в Саянской солнечной обсерватории. Поэтому базисные наблюдения не были осуществлены, что не позволило оценить реальное направление и скорости для этого события.

На рис. 1а показаны примеры последовательных изображений, полученных 18.XI.2017 в Саянской солнечной обсерватории цветной камерой всего неба [7]. На рис. 1а показаны оригинальные изображения, а рис. 1б – комбинированные изображения, полученные наложением оригинальных изображений.

На рис. 2а показаны примеры последовательных изображений, полученных 23.I.2018 в Геофизической обсерватории черно-белой камерой всего неба в эмиссии 557.7 нм [7]. На рис. 2а показаны оригинальные изображения, а на рис. 2б – комбинированное изображение, полученное наложением оригинальных изображений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Установлено, что ДМС в атмосфере Земли возникают в основном во время полетов крупных метеороидов или болидов сильных метеорных потоков, таких как Леониды [1, 11], и сопровождаются нетипичными для обычных метеоров рядом геофизических явлений. В настоящее время в основном рассматриваются два вида метеорных следов – пылевые и газовые (или ионизационные). Пылевые следы образуются только яркими болидами в результате конденсации паров метеорного вещества в голове и следе болида. Ионизированные метеорные следы являются результатом образования излучающей метеорной плазмы [1, 3, 8]. Соответственно можно говорить о двух механизмах поддержания метеорного следа в течение длительного времени. Это рассеяние солнечного света, в основном на мельчайших пылинках в случае пылевых метеорных следов, и свечение вследствие ионизационных и рекомбинационных процессов в метеорной плазме и нейтральной атмосфере, в случае ионизационных следов [3, 6].

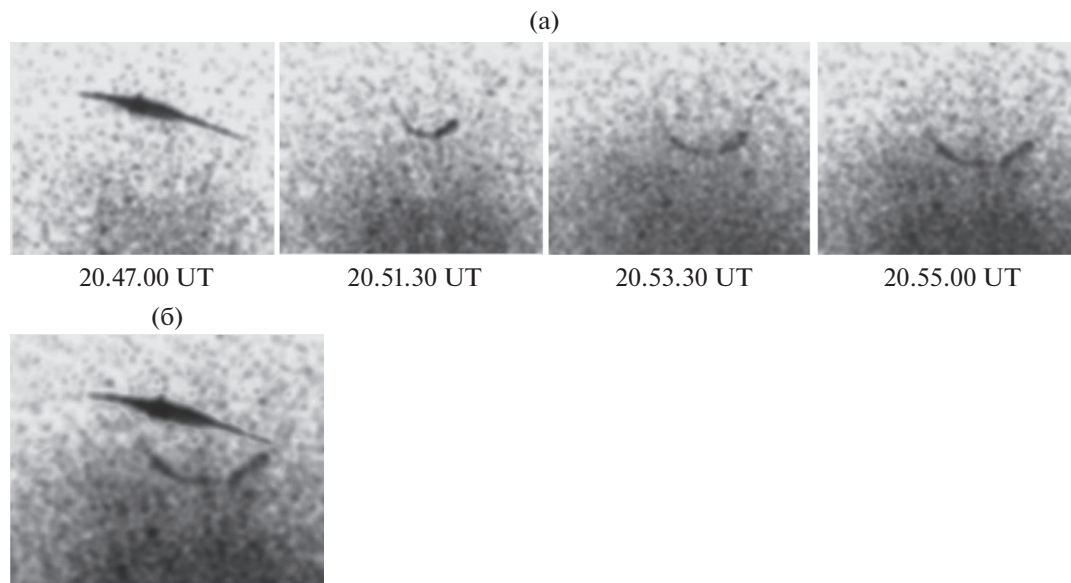


Рис. 2. (а) Время экспозиции кадров 60 с. (б) Комбинированное изображение для кадров 20.47.00 и 20.55.00 UT.

Важно, что согласно концепции метеорного явления, тормозящиеся частицы метеорной плазмы отстают от метеорного тела, образуя его кому и хвост и сохраняя направление движения основного метеорного тела [9].

Формы ДМС, образующиеся в процессе их динамики достаточно разнообразны и могут быть представлены петлями, спиралями, сферическими сгустками [1, 12]. Принципиально важно, что в подавляющем большинстве случаев регистрируемые формы ДМС формируются из линейных следов в процессе их последующей эволюции под действием преимущественных ветров на высотах высвечивания метеоров [2, 13] и других возможных источников. В работе [12] описывается оптически тонкий инверсионный след, который на конечной стадии эволюционирования приобрел квазиколецевую форму. По мнению авторов, его кольцевая форма вызвана гравитационными волнами, образующимися ветрами над высокогорными массивами. Вероятно, важно и то обстоятельство, что пространственно-временные и высотные характеристики ветровых потоков на высотах турбопаузы и ниже (≤ 100 км) достаточно сильно изменчивы, что исключает сохранение строго геометрических форм ДМС в процессе их эволюции.

Основная особенность представленных на рис. 1–2 ДМС заключается в том, что их формы формируются и распространяются в направлении отличном от основной траектории полетов метеороидов, образуя и сохраняя при этом правильные геометрические фигуры. Для события 18.XI.2017 это полуэллипс, а для события 23.I.2018 – полукруг. При этом начальная форма указанных ДМС

сформировалась в самые начальные моменты их регистрации, что, вероятно, делает невозможным влияние ветровых атмосферных потоков на начальную форму ДМС.

Для события 18.XI.2017 на снимке виден яркий трек, блеск и размеры которого равномерно возрастают по ходу движения метеорного тела и резко обрывается в конце, что соответствует картине абляционного горения метеороида в разреженных слоях атмосферы [4]. При этом образующийся ДМС от этого метеороида распространяется поперек траектории полета и в обратном направлении полета основного тела. Комбинированные снимки, представленные на рис. 1б, могут указывать на то, что ДМС в этом событии определялся формой метеороида и ее динамикой, формируясь на его поверхности (рис. 1б, левый снимок). В дальнейшем метеорный след распространялся с относительно постоянной скоростью, примерно сохраняя первоначально сформированную геометрию следа (рис. 1б, правый снимок).

Для события 23.I.2018 образуется полукруговой ДМС (для момента времени 20.53.30 UT ближе к круговому). Так как этот метеорный след наблюдался у восточного горизонта, то ориентацию траектории полета метеороида и метеорного следа в пространстве определить не представлялось возможным.

В связи отмеченной особенностью анализируемых ДМС большой интерес представляет работа [5], в которой рассматривался нетрадиционный механизм разрушения метеороидов в атмосферах планет. В результате детальных расчетов автор этой работы пришел к выводу, что для некоторых крупных метеороидов (болидов) может реализо-

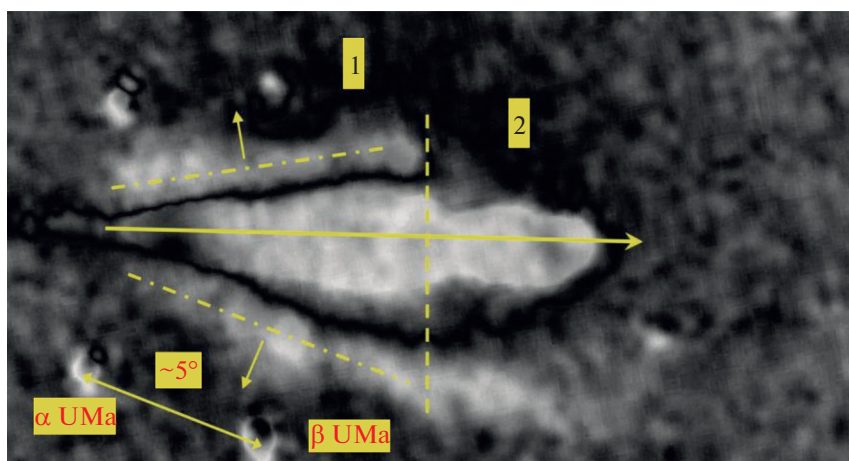


Рис. 3. Комбинированное изображение для события 18.XI.2017 в моменты регистрации 22.23.29 и 22.25.39 UT.

ваться сценарий с существенным ростом поперечных размеров и уменьшением толщины метеороида за счет дробления метеорита до мельчайших частиц и превращения его в “жидкость” с последующим растеканием в боковом направлении набегающим потоком.

На рис. 3 для возможной интерпретации метеорного следа в рамках результатов и выводов работы [5] приведен увеличенный фрагмент рис. 1б (левое изображение) с нанесением поясняющих линий и дополнительной информации, относящихся к различным объектам — метеору и метеорному следу, и положению отдельных звезд. Сплошной горизонтальной линией со стрелкой отмечен метеор. Стрелка показывает направление движения метеора. Штрих-пунктирными линиями показан метеорный след. Стрелки у этих линий показывают направление распространения метеорного следа. Вертикальные штриховые линии разделяют динамику метеора и метеорного следа на 2 условные фазы динамики метеора и метеорного следа. В нижнем левом углу рисунка для оценок угловых размеров явления отмечены положения и угловое расстояние между двумя звездами α UMa и β UMa из созвездия Большой Медведицы.

Согласно [4] видимая длина трека метеора (болида) в событии 18.XI.2017 оценивается величиной ~ 45 км. Оценка величины видимой длины трека метеора, полученная из размера трека метеора и углового расстояния между звездами α UMa и β UMa на рис. 3, для высоты ~ 100 км имеет вдвое меньшее значение ~ 26 км. При скорости метеороида ~ 40 – 70 км/с он проходит расстояние ~ 26 км за время порядка ~ 0.65 – 1.75 с. При времени экспозиции кадра 60 с изображение метеора, вероятно, можно интерпретировать некоторой временной разверткой, отражающей изменение поперечных размеров метеороида (учи-

тывая внешнюю резкую границу изображения), возможно включая окружающую кому.

В этом предположении можно отметить наиболее интересные особенности рис. 3. Пространственное положение метеорных следов (наклон относительно траектории полета метеора) и его мелкомасштабные неоднородности, зарегистрированные через ~ 140 с после пролета метеора в фиксированной пространственной области, совпадают с поверхностью или особенностями изображения метеора.

Особенно отчетливо это проявляется на начальной фазе линейного увеличения поперечного размера изображения метеора, отмеченной на рис. 3 цифрой “1”. В финальной стадии динамики изображения метеора, отмеченной на рис. 3 цифрой “2”, поведение метеорного следа является более сложным — исчезновение его в верхней части рисунка и присутствие в нижней части рисунка. Вероятно, в финальной части движения метеороида разрушение его тела осуществляется как классическим механизмом за счет плавления и испарения, так и чисто механическим уносом метеорного вещества [5].

Согласно [5] в достаточно крупных метеороидах в процессе их полета в атмосфере Земли кроме процессов плавления и испарения иногда может реализовываться и механизм “мгновенного” дробления метеороида до мельчайших частиц, и превращения его в “квазизидкое” состояние. Дробление метеороида начинает осуществляться, когда давление набегающего потока газа на лобовой поверхности становится выше прочности материала метеорита. В этом случае по метеороиду начинает распространяться волна давления со скоростью, имеющей порядок скорости упругих волн в материале болида порядка нескольких км/с. Можно предположить, что процесс дробления метеороида идет по сценарию эффекта падающего доми-

но. Сначала дробится поверхностный слой, затем критическое давление переносится на следующие слои, которые также дробятся и т.д. При скорости волны давления по метеороиду ≥ 1 км/сек и размере метеороида ~ 10 см время “мгновенного” взрывного дробления метеороида может быть $\leq 10^{-4}$ с. При этом собственно взрыва в классическом понимании применительно к метеорам может и не быть. При этом “дробленое вещество болида будет растекаться в стороны и назад”.

Совместный анализ динамики поперечных размеров метеороида (болида) и положение метеорного следа, представленных на рис. 3, вероятно, позволяет предположить, что изложенная выше концепция С.С. Григоряна [5] может быть использована для интерпретации механизма образования квазикруговых или квазиэллиптических долгоживущих метеорных следов, описанных в работе [7]. В этом случае, вероятно, анализируемые в настоящей работе ДМС могут служить первым экспериментальным подтверждением теоретической модели Григоряна [5].

Что касается времени жизни наблюдаемых метеорных следов (~ 20 – 40 мин) можно отметить следующее. В работе [7] было показано, что крупные метеорные частицы (≥ 100 мкм) при горизонтальном распространении на высотах ~ 70 – 120 км могут распространяться без потери скорости на расстоянии десятки-сотни километров. В анализируемом случае в рамках концепции “мгновенного” разрушения и радиального растекания крупных метеороидов [5] это могут частицы мелкодисперсной фазы метеорного вещества, образованные в результате дробления основного метеороидного тела и его “сдувания” набегающим воздушным потоком.

Следует отметить некоторые особенности цветовых характеристик регистрируемого ДМС, указывающих на возможный химический состав метеороида и механизм свечения ДМС. Пылевые долгоживущие метеорные следы, образованные в результате рассеяния сумеречного света, обычно имеют дымчато-белесый цвет (см., например, [1]). Анализируемый метеорный след, зарегистрированный цветной камерой в R-G-B каналах, на протяжении всего времени наблюдения имеет желтоватый оттенок (см. рис. 1). И регистрируется в основном только в зеленом G и красном R цветовых каналах [4, 7]. Это, вероятно, позволяет исключить механизм свечения ДМС в результате рассеяния света источниками со сплошным спектральным составом, включая сумеречное солнечное излучение. Согласно [Смирнов, 1994] в красной и желтой части метеорного спектра чаще всего излучают линии железа, азота, кремния (например, линии FeI – 629.8, 630.15, 642.1, 654.6 нм и др., N₂ – 630.5, 644.8, 654.5 нм и др., SiII – 637.1 нм) и дуплет натрия (NaI – 589.0 и

589.6 нм). Это может указывать, что анализируемый ДМС мог высвечивать по классическому механизму за счет ионизации и возбуждения атомов и ионов при взаимных столкновениях, при комбинации свободных электронов с ионами и последующих каскадных переходов в нагретой плазменно-газовой оболочке, состоящей из смеси воздуха и метеорного вещества. Следует отметить, что в метеорных следах обнаруживаются линии и молекулярные полосы атмосферных составляющих, присущие собственному свечению верхней атмосферы, в частности, запрещенным линиям атомарного кислорода OI 557.7 и 630.0 нм, полос гидроксила OH в красной области спектра и других [3, 8, 11].

Отличие анализируемого цвета ДМС от традиционных метеорных спектров, в которых обычно изменяется спектр метеора за время полета в результате прохождения различных высот с резко меняющимися плотностью и составом [8], заключается в том, что желтоватый цвет метеорного следа сохранялся на протяжении всего времени его регистрации. Эта особенность может быть обусловлена необычной траекторией горизонтального полета мелкодисперсной фазы метеорного вещества в атмосфере Земли с сохраняющимися плотностью и составом. А существенно меньшая скорость распространения ДМС по сравнению со скоростью основного метеороидного тела позволяет предложить, что для мелкодисперсной фазы, представляющей метеорный след, сохраняются условия медленной абляции метеорного вещества ДМС. В этом случае анализируемый метеорный след условно можно назвать “тлеющий метеорный след” по аналогии с тлеющим газовым разрядом. Последнее предположение, безусловно, является предварительным и требует дополнительных исследований.

ВЫВОДЫ

Впервые рассмотрено экспериментальное подтверждение концепции “мгновенного” разрушения и радиального растекания крупных метеороидов [5], связанное с образованием ДМС, распространяющихся в радиальных и возвратных направлениях по отношению траектории основного тела метеороида.

В рассматриваемом событии 18.XI.2017 долгоживущий метеорный след определялся формой метеороида и его динамикой в процессе разрушения метеорного тела. Метеорный след стал формироваться вблизи поверхности тела метеороида при его радиальном расширении и продольным сжатии, что согласуется с моделью мгновенного разрушения метеорного тела под действием аэродинамической силы и поперечным расширением при разрушении метеорного тела упругими волнами. Зарегистрированный метеорный след “ухо-

дит” в обратном и радиальном направлениях по отношению к траектории полета основного метеороидного тела, что согласуется с работой [5]. Свечение метеорного следа может наблюдаться в течение ~10–40 мин в случае его горизонтального распространения и определяться классическими механизмами собственного свечения метеорного вещества и газовых составляющих атмосферы.

Полученные результаты предварительно позволяют говорить о новом типе метеорных следов, обладающих своими морфологическими особенностями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России и РФФИ (грант № 20-05-00520). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” <http://ckp-rg.ru/ckp/3056/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Астапович И.С.* Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука, 1958.
2. *Бабаджанов П.Б.* Метеоры и их наблюдение. М.: Наука, 1987.
3. *Бронштэн В.А.* Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981.
4. *Иванов К.И., Комарова Е.С., Васильев Р.В. и др.* Исследование дрейфа метеорного следа по данным базисных наблюдений // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 1. С. 100–106. <https://doi.org/10.12737/szf-51201911>
5. *Григорян С.С.* О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космич. исслед. 1979. Т. 17. № 6. С. 875–893.
6. *Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф.* Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука, 1967.
7. *Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. и др.* Долгоживущие метеорные следы // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 3. С. 130–139. <https://doi.org/10.12737/szf-53201913>
8. *Смирнов В.А.* Спектры кратковременных световых явлений: Метеоры. М.: Физматлит. 1994.
9. *Смирнов В.А.* Интерпретация излучения метеоров // Вісник Астрономічної школи. 2004. Т. 5. № 1–2. С. 189–194.
10. *Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Васильев Р.В., Михалев А.В.* Оценка параметров метеорного следа на основе данных двухпозиционных оптических наблюдений. Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Тезисы докладов XXVI Международного симпозиума. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2020.
11. *Clemesha B.R., de Medeiros A.F., Gobbi D. et al.* Multiple wavelength optical observations of a long-lived meteor trail // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. № 14. P. 2779–2782. <https://doi.org/10.1029/2000GL012605>
12. *Kelley M.C., Gardner C., Drummond J. et al.* First observations of long-lived meteor trains with resonance lidar and other optical instruments // Geophys. Res. Letts. 2000. V. 27. № 13. P. 1811–1814. <https://doi.org/10.1029/1999GL011175>
13. *Li G., Ning B., Chu Y.-H. et al.* Structural evolution of long-duration meteor trail irregularities driven by neutral wind // Geophys. Res. Space Physics. 2014. V. 119. № 10. P. 348–10, 357. <https://doi.org/10.1002/2014JA020116>