

**ЦВЕТОВЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ДОЛГОЖИВУЩЕГО МЕТЕОРНОГО СЛЕДА,  
ОБРАЗОВАННОГО ТУНКИНСКИМ БОЛИДОМ**

**COLOR AND SPECTRAL CHARACTERISTICS  
OF LONG-LIVED METEOR TRAIL FORMED BY THE TUNKA BOLIDE**

**А.В. Михалев**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, mikhalev@iszf.irk.ru*

**A.V. Mikhalev**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, mikhalev@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** В работе обсуждаются цветовые характеристики и возможный спектральный состав излучения долгоживущего (~40 мин) метеорного следа необычной геометрической формы, образованного пролетом болида в Тункинской долине 17 ноября 2017 г. Анализ динамики RGB-каналов цветного изображения метеорного следа показал, что в излучение метеорного следа примерно в первые восемь минут мог вносить вклад ионизационный след, который образовался нагретыми до высоких температур на поверхности основного метеороида и отделившимися от него частицами нейтральных и ионизованных компонент метеорного вещества. Рассмотрен также обсуждаемый в литературе механизм гетерогенных химических реакций, происходящих на поверхности метеорной пыли (FeS, FeO и др.) с участием атомов и молекул атмосферных газов. Было высказано предположение, что желтоватый оттенок метеорного следа Тункинского болида в первую очередь определялся излучением полос молекулярного азота  $N_2$  в спектральном диапазоне 570–750 нм (1-я положительная система) и/или усилением континуума  $NO^*$  в гетерогенных химических реакциях. В спектре излучения метеорного следа должны присутствовать также относительно яркие атомарные линии и молекулярные полосы метеорного вещества и атмосферных газов FeI, MgI, CaI, SiI, NaI, FeO и  $SO_2$ , OI, OH и др.

**Ключевые слова:** болид, долгоживущий метеорный след, цвет метеорного следа, спектры метеоров.

**Abstract.** The paper addresses color characteristics and possible spectral composition of emission of a long-lived (~40 min) meteor trail of uncommon geometry, which was formed due to the bolide passage in the Tunka Valley on November 17, 2017. Analysis of dynamics of RGB channels of the meteor trail colored image shows that during the first ~8 minutes the meteor trail emission might have been contributed by the ionization trail. The ionization trail was formed by particles of the meteor matter neutral and ionized components that were heated to high temperatures on the surface of the main meteoroid and separated from it. We also examine the discussed mechanism of heterogeneous chemical reactions occurring on the surface of meteoric dust (FeS, FeO, etc.) with participation of atoms and molecules of atmospheric gases. The yellowish color of the Tunka bolide meteor trail was assumed to be determined, first of all, by the emission of molecular nitrogen  $N_2$  band within the 570–750 nm spectral range (the first positive system) and/or enhancement of  $NO^*$  continuum in heterogeneous chemical reactions. The meteor trail emission spectrum should also include relatively bright atomic lines and molecular bands of the meteoric matter and atmospheric gases FeI, MgI, CaI, SiI, NaI, FeO and  $SO_2$ , OI, OH, etc.

**Keywords:** bolide, long-lived meteor trail, meteor trail color, meteor spectra.

## ВВЕДЕНИЕ

Спектральные наблюдения метеоров и метеорных следов обычно используют для исследования плазменно-пылевых явлений и эффектов, возникающих в результате пролетов метеорных тел в атмосфере Земли, химического состава кометных и астероидных метеороидов, механизмов разрушения метеорных тел, а также для построения теории излучения метеоров [Baggaley, 1976; Бронштэн, 1981; Zinn, Drummond, 2007; Vojáček et al., 2015; Koukal et al., 2016; Silber et al., 2018].

В настоящей работе исследуются цветовые характеристики и возможный спектральный состав

излучения долгоживущего метеорного следа необычной геометрической формы, образованного пролетом болида в Тункинской долине (регион Восточной Сибири, республика Бурятия) 17 ноября 2017 г. [Михалев и др., 2019]. Основная цель исследования — определение спектрального состава излучения и возможного механизма длительного свечения метеорного следа. В работе [Иванов и др., 2019] с помощью программного пакета IRAF был выполнен анализ, который позволил получить абсолютную звездную величину этого метеора  $\sim -7.3^m$ . Это позволило авторам [Иванов и др., 2019] считать исследуемый метеор болидом.



Рис. 1. Цветные изображения пролета Тункинского болида и его долгоживущего следа [Михалев и др., 2019; Михалев, 2021]

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пролет Тункинского болида был зарегистрирован тремя специализированными оптическими камерами, расположенными в двух обсерваториях Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН. Цветная камера с ПЗС-приемником Kodak KAI-340 была расположена в Саянской солнечной обсерватории (ССО) вблизи с. Монды ( $51.6^\circ$  N,  $100.9^\circ$  E). Вспышка болида была зарегистрирована этой камерой в околосенитном направлении. Две другие черно-белые широкоугольные камеры с интерференционными светофильтрами на длины волн излучения атомарного кислорода [OI] 557.7 и 630.0 нм были установлены в Геофизической обсерватории (ГФО) ( $51.8^\circ$  N,  $103.1^\circ$  E). Пролет болида наблюдался у западного горизонта, его след был зарегистрирован этими камерами.

На рис. 1 показаны заимствованные из работ [Михалев и др., 2019; Михалев, 2021] цветные изображения пролета Тункинского болида и его долгоживущего следа, отражающие собственно вспышку болида и отдельные кадры пространственно-временной динамики следа. В метеорном следе в отличие от вспышки болида можно отметить преимущественный желтоватый цвет, что позволило авторам работ [Иванов и др., 2019; Vasilyev et al., 2021] высказать предположение о наличии в метеорном следе излучения дуплета натрия Na 589.0–589.6 нм. Метеорный след наблюдался ~40 мин и распространялся преимущественно в горизонтальном направлении.

Обычно в литературе обсуждают метеорные следы двух видов — пылевые и газовые (или ионизационные). Пылевые следы образуются только яркими болидами в результате конденсации паров метеорного вещества в голове и следе болида. Пылевые долгоживущие метеорные следы, образованные в результате рассеяния сумеречного света, обычно имеют дымчато-белесый или серебристый цвета в зависимости от освещения их Солнцем или Луной. Высоты образования таких пылевых метеорных следов составляют 60–40 км и ниже [Астапович, 1958; Бабаджанов, 1987; Шустов, Рыхлова, 2010]. Ионизированные метеорные следы являются результатом образования излучающей метеорной плазмы [Бронштэн, 1981; Смирнов, 1994]. Отнести анализируемый метеорный след к пылевым метеорным следам пред-

ставляется затруднительным, учитывая его наблюдаемый по оптическим наблюдениям желтоватый цвет, появление ионизированного метеорного следа и высоты высвечивания (~85–105 км) [Иванов и др., 2019; Михалев и др., 2019; Vasilyev et al., 2021]. Следует отметить отдельные сообщения о наблюдении долгоживущих метеорных следов с преобладанием оранжевого, желто-красного и ближнего инфракрасного оттенков свечения, не связываемых авторами с рассеянием внешнего излучения по типу пылевых следов [Murade, 2001].

На рис. 2 показана временная динамика свечения головной части метеорного следа в RGB-каналах цветной камеры (а) и типовой спектральная чувствительность камеры Kodak KAI-340 (б) [www.kodak.com/go/imagers]. Видно, что интенсивности в RG-каналах близки с некоторым преобладанием интенсивности в канале R. Весь показанный временной интервал снижения яркости метеорного следа в RGB-каналах достаточно отчетливо разбивается на два интервала с разными скоростями снижения яркости (отмечены вертикальной штриховой линией).

Здесь же горизонтальной линией со стрелками отмечен интервал наблюдения ионизационного следа, регистрируемого ЛЧМ-ионозондом вертикального и наклонного зондирования [Михалев и др., 2019]. Учитывая спектральную чувствительность RG-каналов матрицы около длины излучения дуплета натрия Na (589.0–589.6 нм) как соответственно ~0.06 и ~0.18 (рис. 2, б), можно предположить, что вклад излучения натрия в формирование желтоватого оттенка метеорного следа, вероятно, не может быть определяющим.

В этом случае необходим поиск дополнительного источника излучения в области спектральной чувствительности R-канала камеры. В работах [Kelley et al., 2000; Clemesha et al., 2001] решалась аналогичная задача интерпретации интенсивного изображения долгоживущего метеорного следа в ближней ИК-области спектра и в каналах регистрации эмиссий атомарного кислорода [OI] 557.7 и 630.0 нм. Было высказано предположение, что значительное излучение в красной области спектра может быть связано с излучением молекул гидроксила OH. При этом ветвь Р полосы OH (7-1) могла обеспечить сигнал в канале с фильтром на эмиссию 557.7 нм, а ветвь Р полосы OH (9-3) — в канале с фильтром на эмиссию 630.0 нм. Авторами статьи [Vasilyev et al.,

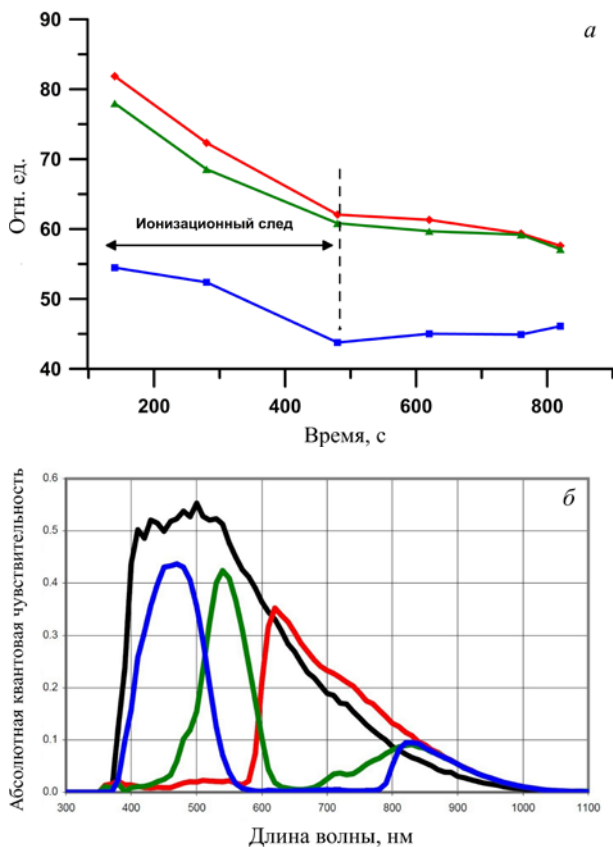


Рис. 2. Временная динамика свечения головной части метеорного следа в RGB-каналах (а) и типовая спектральная чувствительность камеры Kodak KAI-340 (б)

2021] эта интерпретация была использована при анализе возможного спектра излучения долгоживущего следа Тункинского болида, рассматриваемого в настоящей работе.

При этом в [Clemesha et al., 2001] отмечалось, что возбуждение излучения в метеорном следе вполне может отличаться от механизма возбуждения, связанного с естественным свечением атмосферы. Не исключалась возможность существования неизвестного механизма (например, вибрационное распределение в атмосферной полосе  $O_2$ ), совершенно отличного от регистрируемых в собственном излучении атмосферы и полярных сияниях. Специфический механизм свечения анализируемого метеорного следа может быть предложен на основе концепции разрушения крупных метеороидов некоторых типов, разработанной академиком С.С. Григоряном [Григорян, 1979].

Эта концепция рассматривает возможность мгновенного разрушения некоторых метеороидных тел под действием аэродинамической силы и растекания метеорного вещества в поперечном основном движению ядра направлении. Этим механизмом, возможно, определялись основные особенности метеорного следа Тункинского болида, заключающиеся в его необычной форме, длительности свечения, скорости и траектории горизонтального расширения.

В частности, скорость движения анализируемого метеорного следа в квазигоризонтальной по отношению к поверхности Земли плоскости по разным оценкам составляет  $\sim 80\text{--}300$  м/с [Иванов и др., 2019; Vasilyev et al., 2021], что существенно ниже скоро-

стей метеороидов на начальных этапах вторжения в атмосферу (порядка десятков километров в секунду), приводящих к образованию метеорных следов. Это исключает непосредственное рассмотрение классического механизма свечения метеорных тел, связанных с ионизационными и рекомбинационными процессами в метеорной плазме и нейтральной атмосфере вследствие интенсивного нагрева тела метеороида набегающим атмосферным потоком [Бронштэн, 1981]. В случае низкой кинетической энергии метеорного вещества, связанной с его направленным движением, и скорости движения метеорного следа, сопоставимой с тепловыми скоростями молекул воздуха ( $\sim 300\text{--}400$  м/с) на высотах  $\sim 90\text{--}100$  км, энергия излучения метеорного следа, вероятно, должна обеспечиваться внутренним свойством и/или состоянием метеорного вещества. Например, излучение метеорного следа, вероятно, должно обеспечиваться релаксирующей метеорной плазмой после отделения ее от головного тела метеороида и физико-химическими реакциями с участием атмосферных составляющих и метеорного вещества при тепловых столкновениях.

В этом случае особый интерес приобретают, например, результаты работы [Murade, 2001]. Автор рассматривает гетерогенные химические реакции с участием атмосферных газов, которые происходят на поверхности метеорной пыли метеоритных компонент FeS, FeO и других, например, реакции рекомбинации атомарного кислорода и оксида азота  $O + NO + dust \rightarrow NO_2^* + dust$  [Murade, 2001]. По мнению автора указанной работы, гетерогенные химические реакции могут обеспечить существование долгоживущих (десяtkи минут и более) метеорных следов. Рассматриваемый сценарий их образования по [Murade, 2001] состоит из двух этапов. Первый, реализуемый при высоких скоростях движения метеорного вещества (примерно единицы–десятки километров в секунду), включает традиционные механизмы нагрева и абляции, испарение метеорного вещества, хемилюминесцентные реакции с атмосферными составляющими O и  $O_2$  и физико-химические реакции образования метеорной плазмы. После замедления метеорного вещества до скоростей, близких к тепловым, доминирующими процессами, обеспечивающими возможное излучение метеорного вещества, становятся гетерогенные химические реакции. Молекулярными и атомными источниками излучения предполагаются  $SO_2$ , FeO, Fe и  $NO_2$  в низких возбужденных электронных состояниях, а ожидаемые спектры должны состоять из континуума  $NO_2^*$ , полос FeO и  $SO_2$ , а также многочисленных линий железа. Указываются вероятные высоты  $\sim 100$  км, на которых может реализоваться этот механизм поддержания длительного свечения долгоживущих метеорных следов.

Здесь следует отметить одну особенность излучения континуума  $NO_2^*$  в атмосферной компоненте невозмущенного излучения ночной верхней атмосферы. Несмотря на относительно низкую интенсивность сплошного спектра ( $\sim 20$  Рл/нм), суммарная интенсивность в спектральном диапазоне  $\sim 200$  нм, сопоставимом со спектральными диапазо-

нами RGB-каналов цветной камеры, может в среднем составлять ~4000 Рл, что на порядок больше средней интенсивности самой яркой дискретной линии видимой области спектра 557.7 нм [Фишкова, 1983; Михалев и др., 2016]. При достаточном усилении континуума NO<sub>2</sub>\* в рассматриваемых выше гетерогенных химических реакциях это излучение может вносить основной вклад в засветку RGB-пикселей цветной камеры и формировать цвет долгоживущих метеорных следов одного из типов с желтоватым оттенком [Murade, 2001].

На рис. 3 показана динамика высот реперных точек метеорного следа от Тункинского болида по данным [Vasilyev et al., 2021]. Слева показано изображение Тункинского болида, приведенное к высотам его наблюдения [Иванов и др., 2019; Vasilyev et al., 2021], справа — изображение метеорного следа с указанием точек, для которых вычислялись высоты метеорного следа [Vasilyev et al., 2021].

Видно, что метеорный след наблюдался в основном на высотах ~85–105 км. Аналогичный диапазон высот распространения этого метеорного следа (~85–96 км) отмечался в [Иванов и др., 2019; Михалев и др., 2019].

Скорости распространения анализируемого метеорного следа были дозвуковые [Иванов и др., 2019; Михалев и др., 2019; Vasilyev et al., 2021]. Такие скорости не могут обеспечить реализацию традиционных механизмов нагрева, абляции и излучения метеорного вещества, обычно рассматриваемых при вхождении метеороида в атмосферу со скоростями несколько десятков километров в секунду. Можно допустить, что метеорный след мог сформироваться из жидкой пленки и/или путем испарения твердой фазы метеорного вещества [Бронштэн, 1981] на этапе отделения с поверхности основного тела метеороида уже нагретых до высоких температур нейтральных и ионизованных компонент метеорного вещества.

В работе [Михалев и др., 2019] была выполнена оценка изменения скорости метеорных частиц размерами от 1 мкм до 10 мм для высот ~70–120 км в случае горизонтального движения частиц. Было показано, что режим движения метеорной частицы без торможения на характерном временном масштабе ~10<sup>3</sup> с

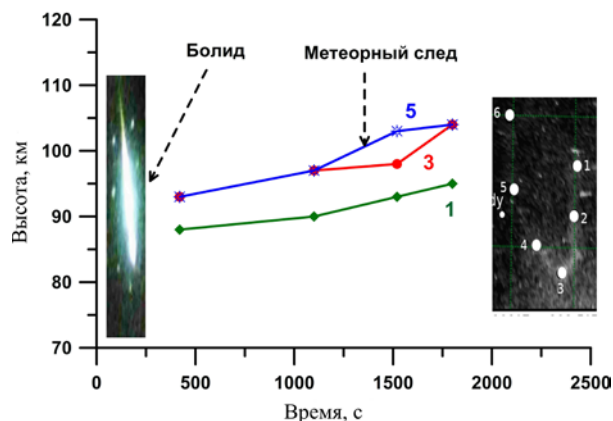


Рис. 3. Динамика наблюдения высот метеорного следа в реперных точках. Используются данные трех реперных точек следа, указанных справа на заимствованном изображении из работы [Vasilyev et al., 2021]

на высотах 70–90 км может реализовываться только для достаточно крупных частиц более 100 мкм (для высоты 120 км — более 1 мкм).

Учитывая приведенную на рис. 2 особенность поведения свечения метеорного следа в RGB-каналах, связанную с изменением скорости снижения интенсивности свечения следа после момента времени ~480 с, можно предположить, что свечение анализируемого метеорного следа могло формироваться двумя различными механизмами. Это может быть традиционный механизм свечения метеоров в результате излучения нагретых до высоких температур (~2000 К) мелкодисперсных частиц метеорного вещества и метеорной плазмы, состоящей из ионизованной и нейтральной компонент метеорного вещества и атмосферных газов [Бронштэн, 1981]. Спектр излучения метеорного следа в этом случае мог быть близким к традиционным спектрам самих метеоров. Второй механизм может быть обусловлен участием гетерогенных химических реакций [Murade, 2001], причем он, вероятно, мог работать в течение всего времени наблюдения метеорного следа.

В этом случае метеорный след на интервале наблюдения ионизационного следа мог представлять собой релаксирующую метеорную плазму и остывающие мелкодисперсные частицы метеорного вещества, на поверхности которых на протяжении всего времени наблюдения метеорного следа протекали гетерогенные химические реакции. Спектральный состав излучения анализируемого следа мог состоять из традиционных спектров метеорных следов и спектров гетерогенных химических реакций, предложенных в [Murade, 2001].

Спектры метеоров состоят из излучения атомных линий элементов FeI, MgI, CaI, SiI, NaI и др., ионных линий этих же элементов и атмосферных линий и полос OI, NI, N<sub>2</sub>, OH и имеют некоторые особенности для различных метеоров и метеорных потоков [Смирнов, 1994; Vojáček et al., 2015]. В работе [Иванов и др., 2019] исследуемый Тункинский болид по данным триангуляционных наблюдений был отнесен к метеорному потоку Леониды. На рис. 4 показаны примеры типичных спектров излучения метеоров из потока Леониды, заимствованных из большого каталога репрезентативных метеорных спектров с низким спектральным разрешением [Vojáček et al., 2015]. Видно, что существенный вклад в интегральную засветку RGB-каналов цветной камеры в анализируемом метеорном следе может вносить излучение полос молекулярного азота N<sub>2</sub>. В таблице приведены общие характеристики атмосферных полос молекулярного азота N<sub>2</sub> [Vojáček et al., 2015]. Здесь следует отметить, что присутствие незначительного излучения дуплета натрия NaI (589.0–589.6 нм) в приведенных спектрах, вероятно, не смогло бы обеспечить желтоватый оттенок метеорного следа, обсуждаемого в более ранних работах [Иванов и др., 2019; Vasilyev et al., 2021]. Поскольку используемая система образования цвета в используемой RGB-матрице суммирует все излучение в пределах спектральной чувствительности цветовых каналов, в этом случае желтоватый оттенок метеорного следа мог быть обеспечен, например, соответствующим соотношением

Атмосферные молекулярные полосы

Длина волны, нм	Химический элемент	Мультиплет
570–600	N <sub>2</sub> (1-я положительная система)	$\Delta v=4$
620–680	N <sub>2</sub> (1-я положительная система)	$\Delta v=3$
700–750	N <sub>2</sub> (1-я положительная система)	$\Delta v=2$

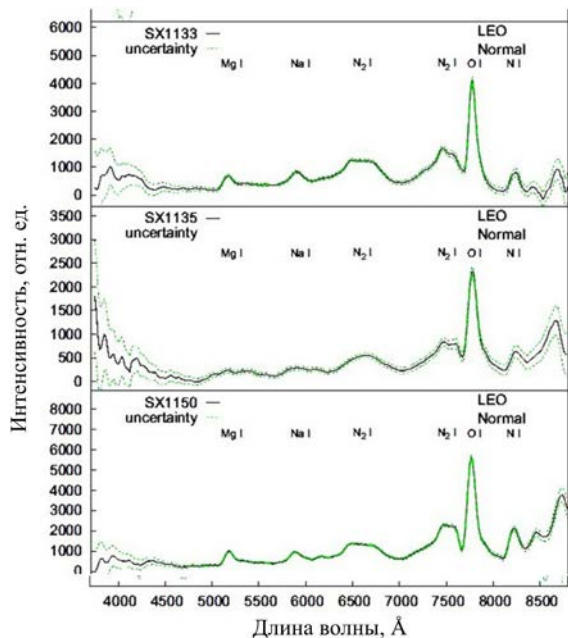


Рис. 4. Примеры типичных спектров излучения метеоро из потока Леониды [Vojáček et al., 2015]

распределения излучения молекулярного азота N<sub>2</sub> и атомарного кислорода OI (777.4 нм) в R- и G-каналах цветной матрицы, по крайней мере, на временном интервале наблюдений ионизационного следа.

Что касается регистрации анализируемого метеорного следа от Тункинского болида широкоугольными камерами с узкополосными интерференционными фильтрами (~2 нм), центрированными на запрещенные линии атомарного кислорода [OI] 557.7 и 630.0 нм, можно указать несколько химических элементов, излучение которых могло присутствовать в излучении метеорного следа на длинах волн 557.7 и 630.0 нм. Это ветвь Р полосы гидроксидов ОН (7-1), которая могла обеспечить сигнал в канале с фильтром на эмиссию 557.7 нм, ветвь Р полосы гидроксидов ОН (9-3) в канале с фильтром на эмиссию 630.0 нм [Clemesha et al., 2001] и континуум излучения NO<sub>2</sub> в гетерогенных химических реакциях, предложенных автором работы [Murade, 2001] для интерпретации долгоживущих метеорных следов. Не следует также исключать излучение метеорного вещества (по крайней мере, в течение времени наблюдения ионизационного следа), например в линии FeI 629.8 и 630.15 нм [Смирнов, 1994], для интерференционного фильтра на эмиссию 630.0 нм.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ**

Выполненный анализ динамики цветовых характеристик долгоживущего метеорного следа (RGB-каналов цветного изображения) во время пролета Тункинского болида 17 ноября 2017 г. и рассмотрение

обсуждаемых в литературе механизмов свечения долгоживущих метеорных следов позволили сформулировать следующие предварительные выводы.

1. Метеорный след формировался в результате излучения первоначально нагретых до высоких температур на поверхности основного метеороида и отделившихся от него частиц нейтральных и ионизованных компонент метеорного вещества и гетерогенных химических реакций, которые происходят на поверхности частиц метеорной пыли (FeS, FeO и др.) с участием атомов и молекул атмосферных газов. Первый механизм излучения вносил вклад в излучение метеорного следа в период существования ионизационного следа (первые ~480 с). Механизм гетерогенных химических реакций, вероятно, вносит вклад в излучение метеорного следа в течение всего времени его наблюдения.

2. С учетом особенностей формирования цвета в цветовом пространстве RGB с широкими спектральными полосами RGB-каналов желтоватый оттенок метеорного следа Тункинского болида мог, в первую очередь, определяться излучением полос молекулярного азота N<sub>2</sub> в спектральных диапазонах 570–600, 620–680 и 700–750 нм (1-я положительная система) и/или усилением континуума NO<sub>2</sub> в гетерогенных химических реакциях с участием метеорной пыли и атмосферных газов.

3. Спектральный состав излучения метеорного следа на различных стадиях его развития в соответствии с отмеченными выше механизмами излучения метеоров и метеорных следов должен содержать также следующие относительно яркие атомарные эмиссионные линии и молекулярные полосы: атомарные линии элементов метеорного вещества FeI (в частности, 516.9, 520.5, 629.8 и 630.15 нм), MgI (457.1, 518.2 нм), CaI, SiI, дуплета натрия NaI (589.0–589.6 нм) и др.; атмосферные линии кислорода [OI] (777.4, 557.7 нм); полосы гидроксидов ОН (в частности, полосы 7-1 и 9-3); молекулярные полосы FeO и SO<sub>2</sub> и многочисленных линий железа при гетерогенных химических реакциях.

Для подтверждения полученных выводов необходимы дополнительные исследования по регистрации спектров подобных метеорных следов с высоким спектральным разрешением.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. В работе использовались данные оптического комплекса, входящего в состав ЦКП «Ангара» [http://ckp-angara.iszf.irk.ru].

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

Астапович И.С. Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука, 1958. 640 с.  
 Бабаджанов П.Б. Метеоры и их наблюдение. М.: Наука, 1987. 176 с.

- Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.
- Григорян С.С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет. *Космические исследования*. 1979. Т. 17, № 6. С. 875–893.
- 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. DOI: [10.12737/szf-51201911](https://doi.org/10.12737/szf-51201911).
- Михалев А.В. Долгоживущие метеорные следы, сформированные при радиальном расширении крупных метеороидов. *Космические исследования*. 2021. Т. 59, № 6. С. 498–504. DOI: [10.31857/S0023420621060066](https://doi.org/10.31857/S0023420621060066).
- Михалев А.В., Подлесный С.В., Стоева П.В. Свечение ночной атмосферы в RGB цветовом представлении. *Солнечно-земная физика*. 2016. Т. 2, № 3. С. 74–80. DOI: [10.12737/19040](https://doi.org/10.12737/19040).
- Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. и др. Долгоживущие метеорные следы. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 3. С. 130–139. DOI: [10.12737/szf-53201913](https://doi.org/10.12737/szf-53201913).
- Смирнов В.А. Спектры кратковременных световых явлений: Метеоры. М.: Физматлит, 1994. 208 с.
- Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 271 с.
- Шустов Б.М., Рылова Л.В. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. М.: Физматлит, 2010. 384 с.
- Baggaley W.J. The Role of the Oxides of Meteoric Species as a Source of Meteor Train Luminosity. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1976. No. 174. P. 617–620.
- Clemesha B.R., F. de Medeiros A., Gobbi D., et al. Multiple wavelength optical observations of a long-lived meteor trail. *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28, iss. 14. P. 2779–2782. DOI: [10.1029/2000GL012605](https://doi.org/10.1029/2000GL012605).
- 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. Lett.* 2000. Vol. 27, iss. 13. P. 1811–1814. DOI: [10.1029/1999GL011175](https://doi.org/10.1029/1999GL011175).
- Koukal J., Srba J., Gorková S., et al. Meteors and meteorites spectra. *Proc. IMC. Egmond*, 2016. P. 137–142.
- Murade E. Heterogeneous chemical processes as a source of persistent meteor trains. *Meteoritics and Planetary Sci.* 2001. Vol. 36, no. 9. P. 1217–1224.
- Silber E.A., Boslough M., Hocking W.K., et al. Physics of meteor generated shock waves in the Earth's atmosphere — a review. *Adv. Space Res.* 2018. Vol. 62, iss. 3. P. 489–532. DOI: [10.1016/j.asr.2018.05.010](https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.05.010).
- Vasilyev R.V., Syrenova T.E., Beletsky A.B., et al. Studying a long-lasting meteor trail from stereo images and radar data. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12. P. 841. DOI: [10.3390/atmos12070841](https://doi.org/10.3390/atmos12070841).
- Vojáček V., Borovička J., Koten P., et al. Catalogue of representative meteor spectra. *Astron. Astrophys.* 2015. Vol. 580, id. A67. 31 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201425047](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425047).
- Zinn J., Drummond J. Formation of parallel meteor trail pairs as associated with their buoyant rise. *Adv. Space Res.* 2007. Vol. 39. P. 555–561. DOI: [10.1016/j.asr.2006.12.007](https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.12.007).  
URL: [www.kodak.com/go/imagers](http://www.kodak.com/go/imagers) (дата обращения 27 апреля 2022 г.).  
URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru> (дата обращения 27 апреля 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Михалев А.В. Цветовые и спектральные характеристики долгоживущего следа, образованного Тункинским болидом. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 3. С. 62–67. DOI: [10.12737/szf-83202209](https://doi.org/10.12737/szf-83202209).