

УДК 523.682

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРА s МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ ПЕРСЕИД, ОРИОНИД И ГЕМИНИД ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНОЙ МЕТЕОРНОЙ СЕТИ

© 2024 г. В. В. Ефремов^{1,*}, О. П. Попова¹, А. П. Карташова²¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия²Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: efremov.vv@phystech.edu

Распределение метеороидов по массам описывается степенным законом, где показатель степени – параметр s . Параметр s избранных метеорных потоков (Персеид, Геминид и Орионид) был рассчитан для 2021–2022 гг. по данным Глобальной метеорной сети (GMN). Оценка s основывалась на фотометрической оценке массы метеороидов и оценке массы по эмпирическим зависимостям. Рассмотрено изменение оценок s в течение периода активности избранных метеорных потоков. Показано, что влияние разных оценок масс частиц на параметр s может достигать 20%.

Ключевые слова: метеорные потоки, индекс масс, распределение по массе.

Для цитирования: Ефремов В.В., Попова О.П., Карташова А.П. Оценка параметра s метеорных потоков Персеид, Орионид и Геминид по данным глобальной метеорной сети // Динамические процессы в геосферах. Т. 16. № 4. С. 64–74. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_4_64

Введение

Изучение метеороидов и их потоков, оценки связанного с ними риска для космических аппаратов имеют важное значение, особенно для программ пилотируемых космических полетов [Moorhead et al., 2020]. Основной риск столкновения с космическими аппаратами несут спорадические метеороиды, за исключением периодов активности метеорных потоков [Moorhead et al., 2019]. Метеороид массой 10^{-5} г может вывести из строя космический аппарат [Moorhead et al., 2019]. Считается, что метеороид потока Персеид стал причиной гибели действующего спутника Olympus-1 в 1993 г. [Caswell et al., 1995].

Фундаментальной характеристикой метеороидов в Солнечной системе является распределение частиц по размерам и массе. Частотное распределение метеороидов по массе дает представление о происхождении, эволюции и возможном разрушении частиц в Солнечной системе. Это распределение играет ключевую роль в оценке общего притока массы внеземного вещества на Землю [Plane, 2012]. Данное распределение часто описывается степенным законом, где показатель степени – параметр s (в англоязычной литературе используется термин *index mass*). Параметр s используется для изучения свойств метеорных потоков, также может использоваться как свободный параметр в моделях (например, в модели Межпланетного пылевого облака) и корректироваться в соответствии с наблюдениями (например, см. [Nesvorný et al., 2010]). Прямые оценки s для метеорных потоков могут быть сделаны на основе метеорных наблюдений. Метеорные наземные наблюдения позволяют исследовать метеорные потоки, которые являются только частью метеорных роев. Поэтому показатель s для потока может отличаться от s для роя.

Для спорадических метеоров параметр s принимает значение $s \approx 2$ [Blaauw et al., 2011], для разных метеорных потоков показатель s варьируется, но как правило $s \leq 2$ [Beech, 1998; Vida et al., 2022; Šimek, Pecina, 1998]. Более высокий показатель s обычно указывает на более старый поток, поскольку эволюционные эффекты, такие как столкновения, увеличивают количество мелких частиц (что увеличивает показатель s). Для потоков, которые недавно сформировались, показатель s может

рассказать о процессе выброса вещества из родительского тела. Структура потока также раскрывается в изменении параметра s . К сильным ежегодным метеорным потокам, регистрируемым на Земле, относятся Персеиды, Ориониды и Геминиды.

Персеиды, родительским телом которых принято считать комету 109P/Свифта–Туттля, самый известный метеорный поток. Его возраст (части потока наблюдаются каждый год) в среднем оценивают в $25\,000 \pm 10\,000$ лет [Brown, Jones, 1998]. Количество метеоров (интенсивность потока) часто описывают при помощи зенитного часового числа (*zenithal hourly rate* (ZHR)). ZHR показывает, сколько метеоров мог бы увидеть наблюдатель, наблюдая за видимой (над всем горизонтом) частью неба, за час при высоте радианта в 90° (в зените) и в предположении, что он со 100% уверенностью замечает все метеоры яркостью до $+6.5^m$ [Brown, 1990], таким образом это одна из характеристик структуры потока. Используя ZHR, можно оценить изменения характера активности метеорного потока от года к году, оценить структуру потока и распределение частиц в нем. Для Персеид ZHR ~ 100 в период максимума активности [Rendtel et al., 2020], в разные годы наблюдались вспышки активности с ZHR до 300 [Brown, Rendtel, 1996], связанные с гравитационными возмущениями от Юпитера и Сатурна [Brown, Jones 1998].

Происхождение метеорного потока Геминиды и его связь с родительским телом, астероидом 3200 Фазтон, изучается и в настоящее время [Ryabova, 2021]. В то же время, анализ абляции частиц из потока Геминид показывает, что их поведение в атмосфере отличается от метеорных потоков кометного происхождения, и согласуется с более прочным астероидным материалом [Ceplecha et al., 1998]. Структура потока Геминид, например, его нынешняя активность, является ключом к ответам на многие вопросы, в частности, происхождения. Возраст потока оценивают в 2000 лет [Рябова, 1999]. Зенитное часовое число потока Геминид варьируется для периода максимума активности 120–130 [Rendtel, 2005]. Масса всего потока оценивается примерно в 10 процентов от массы самого родительского тела [Hughes, McBride, 1989; Blaauw, 2017; Vida et al., 2022]. Для точной оценки массы потока, его структуры и происхождения необходимы постоянные многолетние наблюдения [Ryabova, 2007].

Ориониды представляют собой еще один сильный ежегодный поток, связанный с кометой 1P/Галлея [Vida et al., 2022]. Этот поток является самым высокоскоростным из рассматриваемых в этой статье и несет самую большую опасность для космических аппаратов [Egal et al., 2020]. Орионидам также характерны периодические вспышки активности, вызванные гравитационными возмущениями от планет, особенно от Юпитера [Hajduk, 1970; Trigo-Rodriguez et al., 2007]. Типичное значение ZHR в максимуме активности 20–25 и может достигать всплесков до 80 [Rendtel, 2008; Egal et al., 2020]. Возраст потока, вероятно, превышает 5000 лет [Ryabova, 2003; Egal et al., 2020].

В данной статье оценивается характеристика потока – параметр s . Показатель s рассчитывается для потоков Персеид, Геминид и Орионид по данным базы Глобальной метеорной сети за 2021–2022 гг. Мы сравниваем полученные показатели s с данными из базы Video Meteor Network IMO и другими доступными данными.

Наблюдательные данные

Данная работа основана на оптических наблюдениях GMN (подробная информация о сети и ее работе доступна на сайте – <https://globalmeteornetwork.org/> и описана в [Vida et al., 2020a; 2021]. В работе использовались данные метеоров, зарегистрированных в период 2021–2022 гг.

GMN состоит из высокочувствительных широкоугольных недорогих видеокамер (предел звездной величины для метеоров $\sim +5$ ($\sim 10^{-7}$ кг [Ceplecha et al., 1998]), расположенных в различных участках Земли [Vida et al., 2020b]. В базе данных GMN приведены параметры для каждого метеора, зарегистрированного с нескольких пунктов (координаты радианта, орбитальные параметры, скорость, абсолютная звездная величина, фотометрическая масса, высоты загорания, погасания и максимума кривой светимости, угол и скорость входа и др.).

Количество метеоров из потоков Персеид, Геминид и Орионид, зарегистрированных GMN в период 2021–2022 гг., показано в Таблице 1.

Таблица 1.

Количество зарегистрированных метеоров за 2021–2022 гг. по данным GMN

Поток	Год		Всего
	2021	2022	
Персеид	11406	15125	26531
Геминид	9967	15802	25769
Орионид	4555	9575	14130

Сравнение полученных результатов проводилось с базой данных телевизионных наблюдений международной метеорной организации (Video Meteor Network IMO) (https://www.imo.net/members/imo_vmdb). Наблюдения, включенные в данную базу, получены на широкоугольных метеорных камерах, расположенных в разных участках Земли (www.imonet.org/). Video Meteor Network IMO – это база данных, в которой содержатся параметры более 3 000 000 метеоров. Не все данные этой сети открыты, поэтому был использован, приведенный в базе IMO, популяционный индекс (r). Популяционный индекс связан с дифференциальным параметром s , как: $s = 1 + 2.5\lg(r)$, и позволяет оценить интересующий нас показатель s [Cepplecha et al., 1998].

Методы

Кумулятивное число метеорных частиц пропорционально некоторой степени массы. Если $N(> m)$ – это количество метеороидов массой больше m , то распределение имеет вид: $N(> m) \propto m^{-S}$, где S – кумулятивный показатель степени. Если dN – это количество метеороидов в диапазоне масс от m до $m + dm$, то дифференциальное распределение записывается как: $dN \propto m^{-s} dm$, где s – дифференциальный показатель. Кумулятивный (S) показатель связан с дифференциальным соотношением: $s = S + 1$.

Параметр s был оценен для трех метеорных потоков по кумулятивным распределениям. Он оценивался как наклон кривой кумулятивного распределения (S) и пересчитывался в дифференциальный (s).

На рис. 1 показано кумулятивное распределение масс для потока Персеид, дифференциальный s для этого распределения: $s = 1.62 \pm 0.01$.

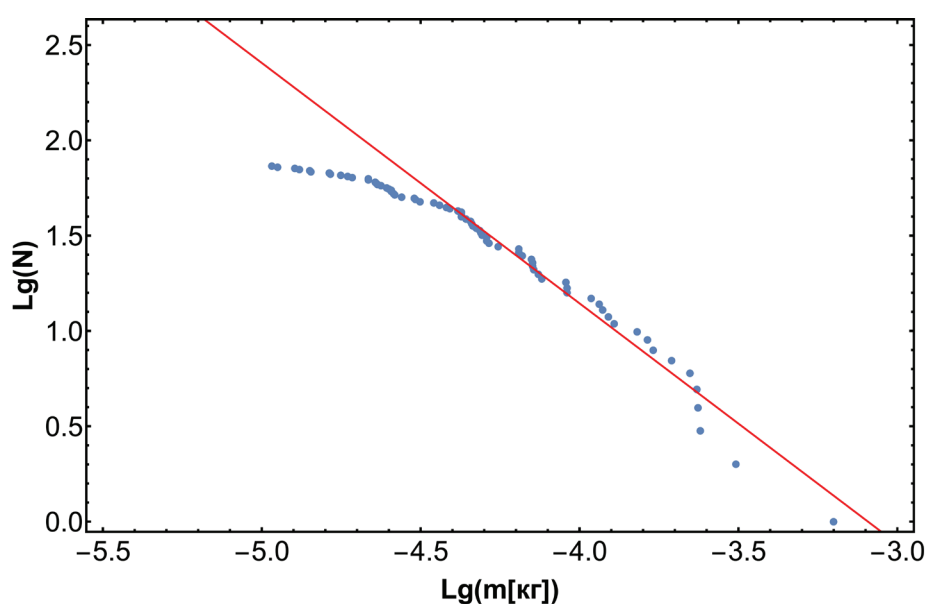


Рис. 1. Пример кумулятивного распределения масс (фотометрических) метеороидов потока Персеид для солнечной долготы (J2000.0) 126° – 2023 г.

Любые используемые для наблюдений камеры (в том числе в сети GMN) имеют предел чувствительности, поэтому в области слабых метеоров (малых масс) полученные регистрации не полны, и наблюдается отклонение кривой от степенного закона (рис. 1). В случае ярких метеоров (больших масс) из-за ограничения поля зрения камер не хватает статистики и также наблюдается отклонение от степенного закона. Полными являются данные в середине распределения; по этому участку кривой оценивается кумулятивный показатель S как коэффициент наклона аппроксимирующей прямой. Именно поэтому для оценки s используется только центральная часть кривой (на рис. 1 диапазон логарифма масс от -3.5 до -4.5).

Массы метеоров, которые необходимы при определении показателя s , оценивались двумя разными способами. Использовались фотометрические массы метеоров, приведенные в базе данных GMN, и для этих же метеоров были получены оценки масс по эмпирической зависимости (1) из работы [Vida et al., 2018]. Данная зависимость дает возможность оценить массу метеороида, опираясь на значения абсолютной звездной величины M_a с учетом скорости и угла входа.

$$m = (10^{-8} \cdot P_{0m} V / \tau) \cdot 10^{[5.15 - 3.89 \lg V - 0.33(M_a + 0.6) - 0.67 \lg(\cos \theta)]}, \quad (1)$$

где m , V – масса [кг] и начальная скорость тела [км/с], τ – эффективность высвета (%), θ – угол входа, M_a – абсолютная звездная величина, $P_{0m} = 1490$ Дж/с – мощность метеора нулевой звездной величины.

Оцененные двумя способами массы метеороидов могут различаться до шести раз. Оценки масс метеорных тел демонстрируют большой разброс в зависимости от выбранного метода [Efremov et al., 2023], который влияет и на оценку параметра s , как будет показано ниже.

Метеорный поток Персеид

На рисунках 2 и 3 показаны изменения дифференциального показателя s за 2021 и 2022 гг. для потока Персеид. В начале и конце активности потока параметр s увеличивается. Характер кривой свидетельствует о том, что Земля проходит различные области потока, в которых отношение числа крупных частиц к числу более мелких постепенно меняется. Оценки s хорошо согласуются с данными, полученными по Video Meteor Network IMO, расхождение в начале и конце активности потока объясняется небольшим количеством зарегистрированных метеоров, что дает большую ошибку в определении s .

Показатель s для метеорного потока Персеид варьируется от 1.84 до 2.09 (Табл. 2). Brown, Rendtel (1996), по визуальным наблюдениям за 1991–1994 гг., оценили средний за период активности $s = 1.80$.

Таблица 2.

Средний за год параметр s для метеорных потоков Персеид, Орионид и Геминид

Год	Персеиды (фотометри- ческая)	Персеиды (эмпирическая)	Ориониды (фотометри- ческая)	Ориониды (эмпирическая)	Геминиды (фотометри- ческая)	Геминиды (эмпирическая)
2021	1.91 ± 0.02	1.85 ± 0.03	1.93 ± 0.01	1.83 ± 0.08	1.94 ± 0.03	1.90 ± 0.09
2022	1.90 ± 0.01	1.91 ± 0.04	2.22 ± 0.04	1.78 ± 0.01	1.78 ± 0.08	1.78 ± 0.10

Примечание: в скобках указано, какая оценка массы использовалась.

Так же s для данного потока был оценен по визуальным наблюдениям за 2016 г.: среднее s за период активности оказался равным 1.82 [Miskotte, Vandeputte, 2017]; Molau et al. (2019) оценили по данным базы IMO за 2015 и 2018 гг. среднее s как 1.80. Jenniskens et al. (1998) по фотографическим наблюдениям за период 1991–1994 гг. пришли к выводу, что s в максимуме активности не изменялся и составлял 1.73. По телевизионным наблюдениям Персеид в 2021 г. Jenniskens, Miskotte (2021) оценили s в максимуме активности – 2.39. Для одной ночи наблюдений 2016 г. – Ehlert, Erskine (2020) по данным базы NASA All-Sky Fireball Network (видео) приводят: $s = 1.54$.

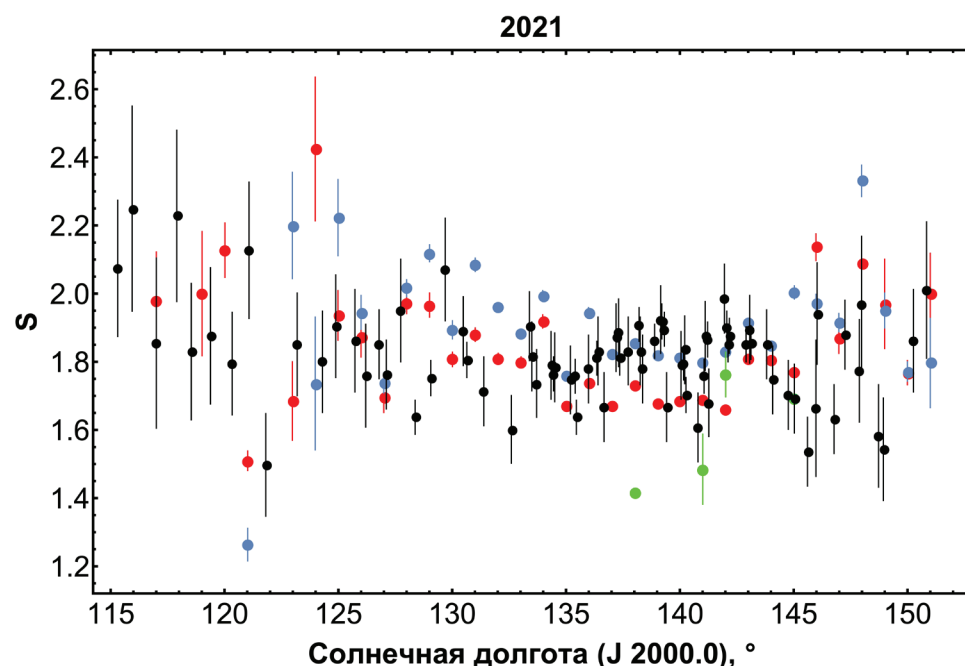


Рис. 2. Показатель s для потока Персеид для 2021 г. по базе IMO (черные точки) и значения, полученные по данным GMN: по фотометрической массе – синие, по эмпирической массе – красные. Зеленые точки – показатель s , рассчитанный по наблюдениям ЗО ИНАСАН – ГФО «Михнево» по эмпирической зависимости

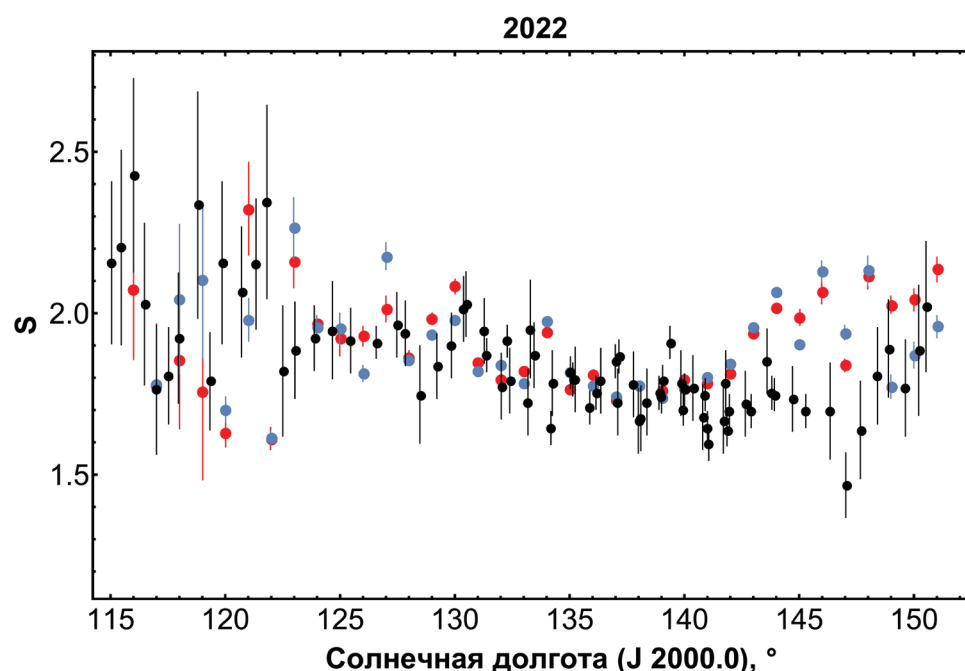


Рис. 3. Показатель s для потока Персеид для 2022 г. по базе IMO (черные точки) и значения, полученные по данным GMN: по фотометрической массе – синие, по эмпирической массе – красные

Ранее был оценен показатель s (его диапазон и значение в максимуме активности потока), используя две оценки массы: для Персеид в 2019 г. – 2.09 ± 0.06 и 1.99 ± 0.14 ; в 2020 г. – 1.94 ± 0.01 и 1.84 ± 0.03 [Kartashova et al., 2024].

На основе наших базисных наблюдений на Звенигородской обсерватории ИНАСАН (ЗО ИНАСАН) – Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН (ГФО «Михнево») 2021 г. показатель s для Персеид оценивается как 1.60 ± 0.05 . Наблюдения проводятся с двух пунктов. Поэтому число регистрируемых метеоров меньше, чем в GMN. Мы работаем над расширением своей сети.

По данным базы GMN, дополненным данными Канадского метеорного радара (CMOR) и результатами сети NASA (NASA All-Sky Fireball Network) Vida et al. (2022) оценивают показатель s для метеороидов потока Персеид как 1.54 ± 0.09 за 2021 г. По радионаблюдениям 2021 г. Miskotte et al. (2021) оценили s пика активности как 2.10. Различие в оценках показателя s для одного и того же периода наблюдений может быть объяснено тем, что видеонаблюдения фиксируют более крупные частицы, чем радионаблюдения.

Метеорный поток Геминид

Распределение параметра s для потока Геминид показано на рисунках 4 и 5. Для наблюдений 2021–2022 гг. можно считать, что они совпадают для обеих баз. Рассчитанный параметр s по фотометрической и по эмпирической массам различается до 9% (Табл. 2). Miskotte (2019) по визуальным наблюдениям 2018 г. оценил для максимума активности $s = 1.69$. По радарным наблюдениям 2007 г. Канадского метеорного орбитального радара (CMOR) Blaauw et al. (2011) оценили s в диапазоне от 1.63 ± 0.04 до 1.94 ± 0.09 ; для 2008 г. – от 1.58 ± 0.04 до 1.97 ± 0.07 ; для 2009 г. – от 1.62 ± 0.04 до 1.92 ± 0.07 . По данным GMN нами был оценен s (его диапазон и значение в максимуме активности потока), используя две оценки массы, для Геминид в 2019 г. – 1.83 ± 0.05 и 1.84 ± 0.07 ; в 2020 г. – 1.79 ± 0.07 и 1.77 ± 0.06 [Kartashova et al., 2024].

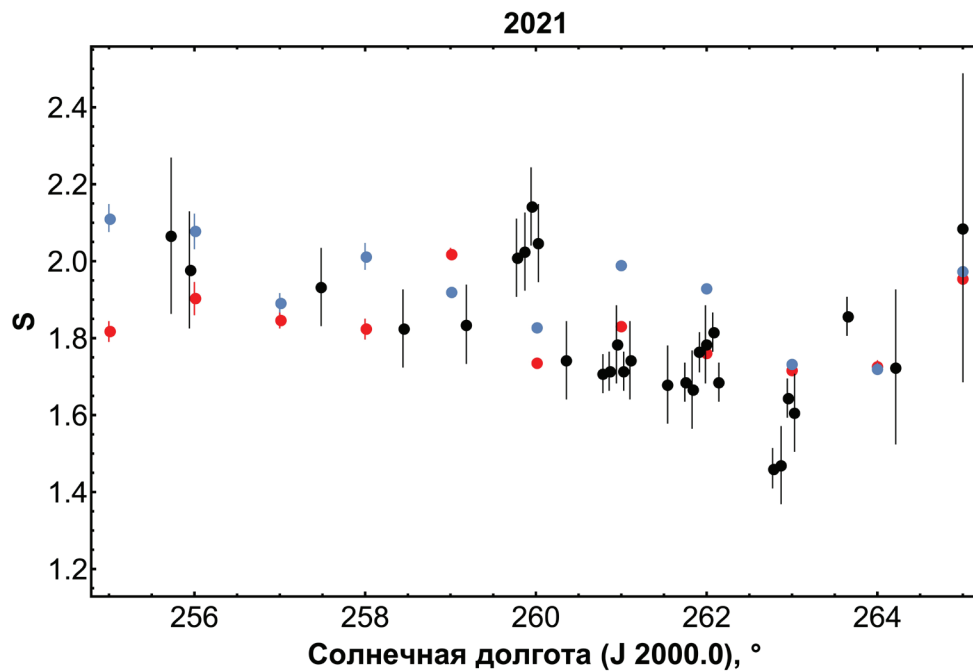


Рис. 4. Показатель s для потока Геминид для 2021 г. по базе IMO (черные точки) и значения, полученные по данным GMN: по фотометрической массе – синие, по эмпирической массе – красные

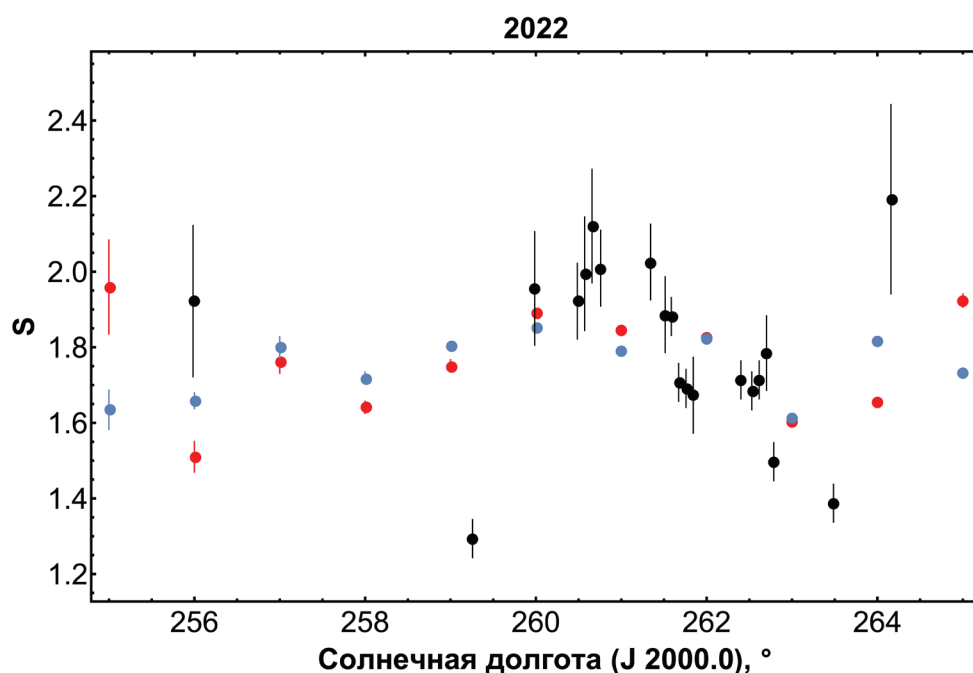


Рис. 5. Показатель s для потока Геминид для 2022 г. по базе IMO (черные точки) и значения, полученные по данным GMN: по фотометрической массе – синие, по эмпирической массе – красные

Метеорный поток Орионид

На рисунках 6 и 7 показано изменение параметра s за 2021 и 2022 гг. для потока Орионид. Как и в случае с Персеидами для начала и конца активности потока значения s для IMO и GMN различаются. Оценка s по фотометрической массе из GMN лучше соотносится с данными из Video Meteor Network IMO. Оценка параметра s по фотометрической и эмпирической массам могут различаться до 20% для Орионид (Табл. 2). Параметр s для Орионид из базы GMN варьируется от 1.58 до 2.22 (Табл. 2). По радарным наблюдениям Канадского метеорного орбитального радара (CMOR) Vlaauw et al. (2011) в 2007–2009 гг. оценили s для: 2007 г. в диапазоне от 1.65 ± 0.04 до 1.78 ± 0.04 ; для 2008 г. – от 1.71 ± 0.07 до 1.98 ± 0.05 ; для 2009 г. – от 1.77 ± 0.04 до 1.90 ± 0.07 . Также GMN нами был оценен s (его диапазон и значение в максимуме активности потока), используя две оценки массы, для Орионид в 2019 г. – 1.88 ± 0.02 и 1.58 ± 0.02 ; в 2020 – 1.87 ± 0.03 и 1.85 ± 0.14 [Kartashova et al., 2024].

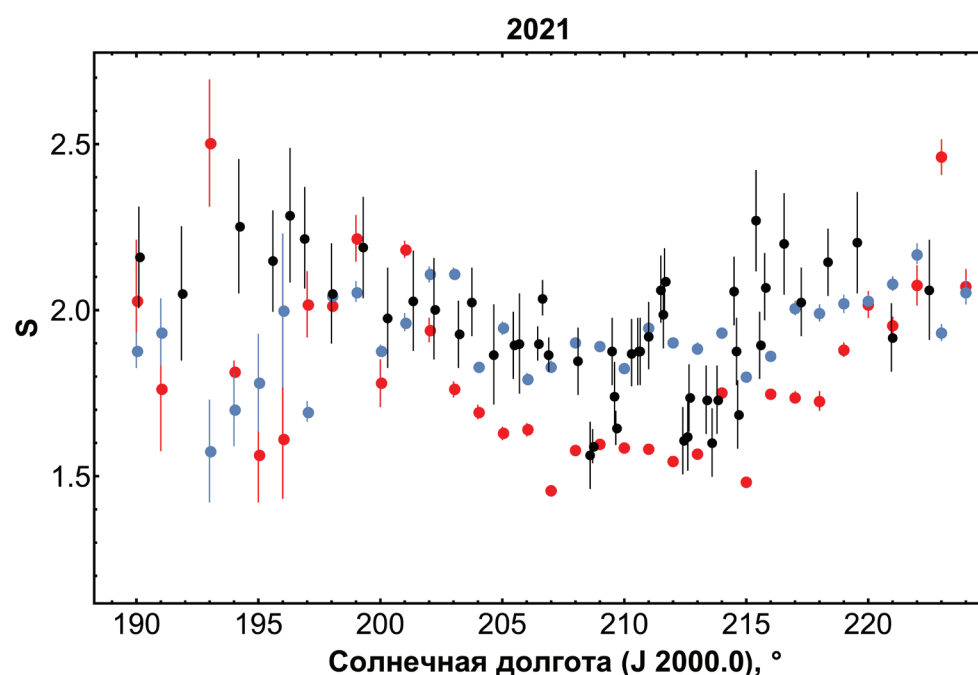


Рис. 6. Показатель s для потока Орионид для 2021 г. по базе IMO (черные точки) и значения, полученные по данным GMN: по фотометрической массе – синие, по эмпирической массе – красные

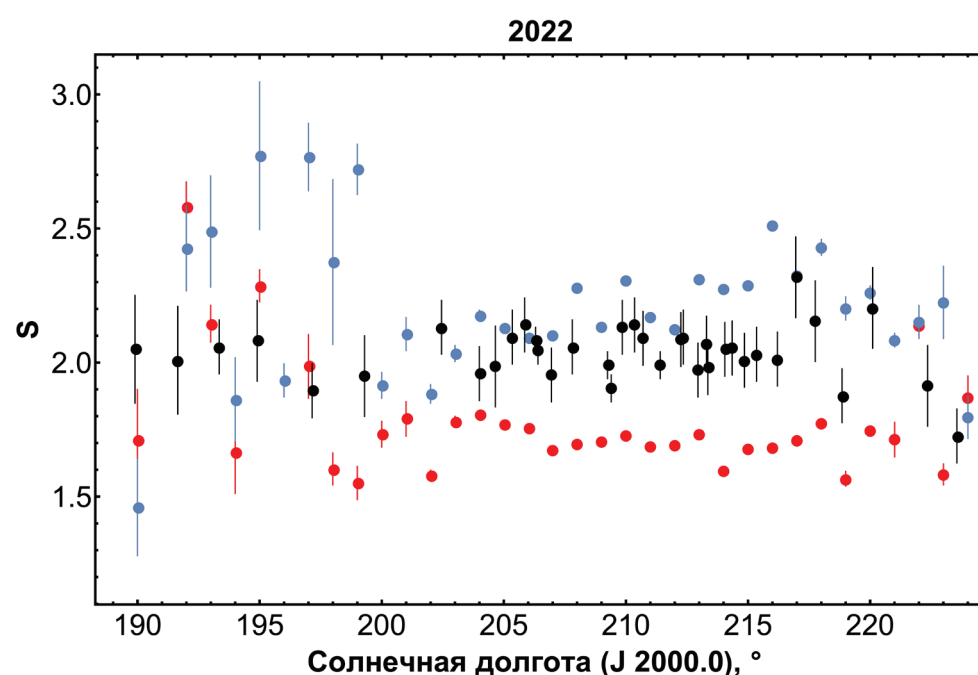


Рис. 7. Показатель s для потока Орионид для 2022 г. по базе IMO (черные точки) и значения, полученные по данным GMN: по фотометрической массе – синие, по эмпирической массе – красные

Заключение

В данной работе был проведен анализ оценки параметра s для сильных метеорных потоков Персеид, Орионид и Геминид. Результаты, представленные выше, могут дать нам информацию о структурах метеорных потоков и процессе разрушения связанных с ними родительских тел.

Исследования проводились на основе наблюдательных данных Глобальной метеорной сети [Vida et al., 2020b; Vida et al., 2021]. Данные использовались без учета наблюдательной селекции, которая будет учтена в дальнейшей работе. Согласно нашим оценкам s для потока Персеид принимает значения от 1.84 ± 0.03 до 2.09 ± 0.06 , Геминид – от 1.77 ± 0.06 до 1.94 ± 0.03 , Орионид – от 1.58 ± 0.02 до 2.22 ± 0.04 для 2021–2022 гг. Наши оценки s в пределах оценок других авторов. Таким образом, показатель степени распределения метеорных тел по массе для исследуемых потоков не превышает 2.

Различия в оценках параметра s при использовании фотометрической массы [Бронштэн, 1981] и эмпирической оценки массы [Vida et al., 2018] могут достигать до 20% (например, для Орионид, Табл. 2). Различие в оценке массы одного и того же метеороида может достигать шести раз. Данный факт особенно следует учитывать при решении задач по оценке влияния метеорных тел на работу космических аппаратов и разработку защиты для них.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (ИДГ РАН – тема № 122032900176-3; ИНАСАН – № АААА-А19-119031990073-9).

Благодарности

Авторы выражают благодарности всем участникам Глобальной метеорной сети и Video Meteor Network IMO за предоставленный материал.

Список литературы

- Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М. : Наука. 1981. – 416 с.
- Рябова Г.О. Возраст метеорного потока Геминид (обзор) // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 1999. Т. 33. №. 3. С. 258–273. <https://elibrary.ru/ufhtjt>
- Beech M. Large-body meteoroids in the Leonid stream // The Astronomical Journal. 1998. Vol. 116 (1). С. 499. <http://dx.doi.org/10.1086/300435>
- Blaauw R.C. The mass index and mass of the Geminid meteoroid stream as determined with radar, optical and lunar impact data // Planetary and Space Science. 2017. Vol. 143. P. 83–88. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.04.007>
- Blaauw R.C., Campbell-Brown M.D., Weryk R.J. A meteoroid stream survey using the Canadian Meteor Orbit Radar–III. Mass distribution indices of six major meteor showers // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2011. Vol. 414 (4). P. 3322–3329. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18633.x>
- Brown P. On the Cause and Nature of error in Zenithal Hourly Rates // WGN. 1990. Vol. 18. P. 141–145. <https://adsabs.harvard.edu/full/1990JIMO...18..141B>
- Brown P., Jones J. Simulation of the formation and evolution of the Perseid meteoroid stream // Icarus. 1998. Vol. 133 (1). P. 36–68. <https://doi.org/10.1006/icar.1998.5920>
- Brown P., Rendtel J. The Perseid meteoroid stream: characterization of recent activity from visual observations // Icarus. 1996. Vol. 124 (2). P. 414–428. <https://doi.org/10.1006/icar.1996.0219>
- Caswell R.D., McBride N., Taylor A. Olympus end of life anomaly – A perseid meteoroid impact event? // International Journal of Impact Engineering. 1995. Vol. 17(1–3). P. 139–150. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)99843-G](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)99843-G)
- Cepelcha Z., Borovička J., Elford W.G., ReVelle D.O., Hawkes R.L., Porubčan W., Šimek M. Meteor phenomena and bodies // Space Science Reviews. 1998. Vol. 84. P. 327–471. <https://doi.org/10.1023/A:1005069928850>
- Egal A., Wiegert P., Brown P.G., Campbell-Brown M., Vida D. Modeling the past and future activity of the Halleyid meteor showers // Astronomy & Astrophysics. 2020. V. 642. P. A120. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038953>
- Efremov V., Popova O., Glazachev D., Kartashova A., Margonis A., Oberst J. Estimation of the parameters of small meteoroids: A porous body model // Planetary and Space Science. 2023. Vol. 237. P. 105769. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2023.105769>

- Ehlert S., Erskine R.B. Measuring fluxes of meteor showers with the NASA All-Sky Fireball Network // Planetary and Space Science. 2020. Vol. 188. P. 104938. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104938>
- Hajduk A. Structure of the meteor stream associated with comet Halley // Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia. 1970. Vol. 21. P. 37. <https://adsabs.harvard.edu/full/1970BAICz..21...37H>
- Hughes D.W., McBride N. The mass of meteoroid streams // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1989. Vol. 240 (1). P. 73–79. <https://doi.org/10.1093/mnras/240.1.73>
- Jenniskens P., Betlem H., De Lignie M., Ter Kuile C., Van Vliet M.C.A., Van 't Leven J. On the unusual activity of the Perseid meteor shower (1989–96) and the dust trail of comet 109P/Swift–Tuttle // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1998. Vol. 301(4). C. 941–954. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.02020.x>
- Jenniskens P., Miskotte K. Perseid outburst 2021 // eMeteorNews. 2021. Vol. 6(6). P. 460–461.
- Kartashova A., Efremov V., Popova O. Estimates of parameters of selected meteor streams. In: The 43rd International Meteor Conference (IMC 2024). Kutná Hora, Czech Republic. 2024. Abstract book
- Moorhead A.V., Egal A., Brown P.G., Moser D.E., Cooke W.J. Meteor shower forecasting in near-Earth space // Journal of Spacecraft and Rockets. 2019. Vol. 56(5). P. 1531–1545. <https://doi.org/10.2514/1.A34416>
- Moorhead A.V., Kingery A., Ehlert S. NASA's meteoroid engineering model 3 and its ability to replicate spacecraft impact rates // Journal of Spacecraft and Rockets. 2020. Vol. 57(1). P. 160–176. <https://doi.org/10.2514/1.A34561>
- Miskotte K. The Geminids of 2018: an analysis of visual observations // e-Zine for meteor observers meteornews. net. 2019. P. 207.
- Miskotte K., Vandeputte M. The magnificent outburst of the 2016 Perseids, the analyses. Copyright notices. 2017. P. 61.
- Miskotte K., Sugimoto H., Martin P. The big surprise: a late Perseid outburst on August 14, 2021! // eMeteorNews. 2021. Vol. 6(7). P. 517–525.
- Molau S., Crivello S., Goncalves R., Saraiva C., Stomeo E., Strunk J., Kac J. WGN // J. Int. Meteor Organ. 2019. Vol. 47. P. 121.
- Nesvorný D., Jenniskens P., Levison H.F., Bottke W.F., Vokrouhlický D., Gounelle M. Cometary origin of the zodiacal cloud and carbonaceous micrometeorites. Implications for hot debris disks // The Astrophysical Journal. 2010. Vol. 713(2). P. 816. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/713/2/816>
- Plane J.M.C. Cosmic dust in the earth's atmosphere // Chemical Society Reviews. 2012. Vol. 41(19). P. 6507–6518. <https://doi.org/10.1039/C2CS35132C>
- Rendtel J. Evolution of the Geminids observed over 60 years // Modern meteor science: an interdisciplinary view. 2005. C. 27–32. <https://doi.org/10.1007/s11038-004-6958-5>
- Rendtel J. The Orionid Meteor Shower Observed Over 70 Years // Earth Moon and Planets. 2008. Vol. 102. P. 103–110. <https://doi.org/10.1007/s11038-007-9192-0>
- Rendtel J. Handbook for Meteor Observers // International Meteor Organization Potsdam, Germany. 2020.
- Ryabova G.O. The comet Halley meteoroid stream: just one more model // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2003. Vol. 341. P. 739–746. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06472.x>
- Ryabova G.O. Mathematical modelling of the Geminid meteoroid stream // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2007. Vol. 375(4). P. 1371–1380. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11392.x>
- Ryabova G.O. The Geminid meteor shower radiant: a mathematical model // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2021. Vol. 507(3). P. 4481–4486. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2286>
- Šimek M., Pecina P. Perseid meteor stream: cross and longitudinal structures from radar observations // Planetary and space science. 1998. Vol. 47(1–2). P. 281–289. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(98\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(98)00061-0)
- Trigo-Rodríguez J. M., Madieto J.M., Llorca J., Gural P.S., Pujols P., Tezel T. The 2006 Orionid outburst imaged by all-sky CCD cameras from Spain: meteoroid spatial fluxes and orbital elements // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2007. Vol. 380(1). P. 126–132. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11966.x>
- Vida D., Brown P.G., Campbell-Brown M. Modelling the measurement accuracy of pre-atmosphere velocities of meteoroids // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2018. Vol. 479(4). P. 4307–4319. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1841>
- Vida D., Gural P.S., Brown P.G., Campbell-Brown M., Wiegert P. Estimating trajectories of meteors: an observational Monte Carlo approach—I. Theory // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2020a. Vol. 491(2). P. 2688–2705. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz3160>
- Vida D., Campbell-Brown M., Brown P. G., Egal A., Mazur M.J. A new method for measuring the meteor mass index: application to the 2018 Draconid meteor shower outburst // Astronomy & Astrophysics. 2020b. Vol. 635. P. A153. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937296>

Vida D., Segon D., Gural P.S., Brown P.G., McIntyre M.J., Dijkema T.J., Pavletic L., Kukic P., Mazur M.J., Eschman P., Roggemans P. The global meteor network—methodology and first results // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2021. Vol. 506(4). P. 5046–5074. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2008>

Vida D., Blaauw Erskine R.C., Brown P.G., Kambulow J., Campbell-Brown M., Mazur, M.J. Computing optical meteor flux using global meteor network data // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2022. Vol. 515(2). P. 2322–2339. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1766>

ESTIMATION OF INDEX MASS OF PERSEID, ORIONID AND GEMINID METEOR SHOWERS BY THE GLOBAL METEOR NETWORK DATA

© 2024 V. Efremov^{1,*}, O. Popova¹, A. Kartashova²

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Institute of Astronomy of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**E-mail: efremov.vv@phystech.edu*

The mass distribution of meteoroids is described by a power law, where the degree exponent is the parameter s . The parameter s of selected meteoroid streams (Perseids, Geminids, and Orionids) was calculated for 2021–2022 from the Global Meteor Network (GMN) data. Parameter s estimate was based on photometric estimates of meteoroid masses and mass estimates from empirical relationships. The variation of the s estimates during the period of activity of selected meteoroid streams was analyzed. It was found that the influence of different estimates of particle masses on the parameter s can reach 20%.

Keywords: meteor showers, index mass, mass distribution.