

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТЕОРНОГО ПОТОКА ГЕМИНИДЫ ПО ДАННЫМ БАЗИСНЫХ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЙ 2021 Г.

STUDYING THE MAIN CHARACTERISTICS OF THE GEMINID METEOR SHOWER FROM BASELINE VIDEO OBSERVATIONS IN 2021

К.И. Иванов 

Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, ivorypalace@gmail.com

Е.С. Комарова

Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, eskomarik@gmail.com

С.А. Язев

Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, syazev@gmail.com
Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия

K.I. Ivanov

Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, ivorypalace@gmail.com

E.S. Komarova

Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, eskomarik@gmail.com

S.A. Yazev

Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, syazev@gmail.com
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia

Аннотация. Исследован метеорный поток Геминиды на основе данных, полученных в период с 01.12.2021 по 17.12.2021 методом базисных видеонаблюдений. Изучены метеоры в диапазоне блеска от -3^m до 2^m и с угловой длиной трека не менее 2° , объем выборки 327 событий. Поведение потока рассматривается в контексте взаимодействия ветвей DRG (декабрьские ρ -Геминиды) и GEM (Геминиды), тесно связанных друг с другом и объединенных общим происхождением. Активность потока составила $ZHR=127$, $Flux=19$ на момент общего максимума DRG+GEM ($\lambda_{sol} \sim 261.8^\circ$) и $ZHR=32$, $Flux=4$ на момент предположительного локального максимума DRG ($\lambda_{sol} \sim 258.8^\circ$). Получены значения суточного дрейфа для GEM ($\Delta\alpha=0.84^\circ$, $\Delta\delta=-0.27^\circ$, $\Delta\lambda_{ec}=0.75^\circ$, $\Delta\beta=-1.17^\circ$) и DRG ($\Delta\alpha=1.29^\circ$, $\Delta\delta=0.09^\circ$, $\Delta\lambda_{ec}=1.09^\circ$, $\Delta\beta=0.23^\circ$) в экваториальной и эклиптической системах координат, собственный дрейф в системе $\lambda_{ec}-\lambda_{sol}$ составил 0.09° и -0.26° для компонент DRG и GEM соответственно. Обнаружен встречный дрейф обеих ветвей с тенденцией к пересечению в точке $\alpha=112.1^\circ$, $\delta=32.5^\circ$, $\lambda_{sol}=259.8^\circ$. Определены кинематические и орбитальные параметры метеороидов, выявлены различия наиболее вероятных геоцентрических скоростей для ветвей DRG ($v_g=35$ км/с) и GEM ($v_g=34$ км/с). Исследована морфология распределения орбит в пределах шлейфа. Даны рекомендации для надежного определения принадлежности метеоров к той или иной ветви.

Ключевые слова: метеор, метеороид, метеорный поток, Геминиды, базисные наблюдения, орбитальные параметры.

Abstract. The Geminid meteor shower has been studied using data obtained by the method of baseline video observations during the period from December 01, 2021 to December 17, 2021. The meteors were examined in the brightness range from -3^m to 2^m and with an angular track length of at least 2° ; the sample size was 327 events. The behavior of the shower is considered in terms of the interacting DRG (December ρ -Geminids) and GEM (Geminids) branches, which are closely related to each other and share a common origin. The shower activity was $ZHR=127$, $Flux=19$ at the general maximum of DRG+GEM ($\lambda_{sol} \sim 261.8^\circ$) and $ZHR=32$, $Flux=4$ at the putative local maximum of DRG ($\lambda_{sol} \sim 258.8^\circ$). Daily drift values were obtained for GEM ($\Delta\alpha=0.84^\circ$, $\Delta\delta=-0.27^\circ$, $\Delta\lambda_{ec}=0.75^\circ$, $\Delta\beta=-1.17^\circ$) and DRG ($\Delta\alpha=1.29^\circ$, $\Delta\delta=0.09^\circ$, $\Delta\lambda_{ec}=1.09^\circ$, $\Delta\beta=0.23^\circ$) in the equatorial and ecliptic coordinate systems; the intrinsic drift in the $\lambda_{ec}-\lambda_{sol}$ system was 0.09° and -0.26° for the DRG and GEM components respectively. We have found the opposite nature of the drift of both branches with a tendency for them to intersect at the point $\alpha=112.1^\circ$, $\delta=32.5^\circ$, $\lambda_{sol}=259.8^\circ$. We have determined the kinematic and orbital parameters of meteoroids and have identified differences between the most probable geocentric velocities for the DRG ($v_g=35$ km/s) and GEM ($v_g=34$ km/s) branches. The morphology of the distribution of orbits within the plume has been studied. We give recommendations for reliably determining whether the meteors belong to one or another branch.

Keywords: meteor, meteoroid, meteor shower, Geminids, baseline observations, orbital parameters.

ВВЕДЕНИЕ

Геминиды — ежегодный метеорный поток высокой интенсивности ($ZHR_{max} \sim 120$), наблюдающийся в Северном полушарии. Период активности Геминид

приходится на 7–17 декабря при максимуме 13–14 декабря (долгота Солнца в эклиптической системе координат $\lambda_{sol}=262.2^\circ$). Радиант потока в период максимума активности расположен в точке $\alpha=112^\circ$, $\delta=+33^\circ$, среднесуточный дрейф составляет $\Delta\alpha=+1.04^\circ$,

$\Delta\delta = -0.23^\circ$, средняя геоцентрическая скорость метеороидов $v_g \sim 35$ км/с [Jopek et al., 2003] (параметры и их обозначения см. в табл. 3). Ежегодные вариации указанных параметров выражены незначительно. Родительским телом считается астероид (3200) Фаэтон [Hanuš et al., 2016].

Поток является предметом многочисленных научных исследований, актуальность которых обусловлена неоднозначностью его происхождения и наличием ряда признаков, указывающих на неоднородность структуры. В частности, существует тенденция рассматривать Геминиды как совокупность двух отдельных компонент (DRG — декабрьские ρ -Геминиды, GEM — Геминиды), имеющих общее происхождение и эволюционирующих совместно [Jenniskens et al., 2016; Koseki, 2023]. С одной стороны, наличие тонкой структуры может свидетельствовать о кометном происхождении потока, что подтверждается методами численного моделирования [Ryabova, 2016, 2021]. С другой стороны, различия кинематических параметров частиц, принадлежащих разным частям Геминид, незначительны и могут быть объяснены в рамках классических представлений при условии рассмотрения родительского тела (3200) Фаэтон как активного астероида [Ryabova, 2012, 2018; Jewitt, 2012]. Третья точка зрения, не отрицая значимости начальных условий и факторов [Williams, Ryabova, 2011], предполагает, что причиной возникновения и развития тонкой структуры потока являются естественные эволюционные процессы (гравитационные, радиационные, эрозионные). Таким образом, несмотря на обилие экспериментальных данных, проблема далека от решения.

Настоящее исследование может способствовать разрешению имеющихся противоречий. В основу работы легли экспериментальные данные, полученные в ходе реализации проекта SkyLine [Иванов, Комарова, 2016а, б].

1. ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдательный материал получен на территории Тункинской долины (Республика Бурятия) в период с 01.12.2021 по 17.12.2021. Метеоусловия в моменты регистрации оценивались как благоприятные: минимальное влияние облачности и лунной засветки. Наблюдения проводились в базисном режиме ($d=150$ км), ориентация детекторов — смежно-встречная с частичным перекрытием смежных областей [Иванов и др., 2022]. Основной пункт наблюдений — Саянская солнечная обсерватория ИСЗФ СО РАН (ССО, $51^\circ 37' 18''$ N, $100^\circ 55' 07''$ E, 2010 м над ур. м.), корреспондирующий пункт — Геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН ($51^\circ 48' 37.5''$ N, $103^\circ 04' 37.4''$ E, 680 м над ур. м.) [https://ru.iszf.irk.ru/Заглавная_страница].

Регистрация метеоров выполнялась в автоматическом режиме детекторами на базе высокочувствительных ПЗС-видеокамер Watec WAT-910NHX с объективами Smartec STL-3080DC (F0.95, 6 мм), формирующих видеоряд с разрешением 768×576 точек при частоте 25 кадр/с. Поле зрения каждого детектора составляет $47^\circ \times 36^\circ$ в масштабе 3.75"/пиксель,

суммарное поле зрения детекторов в каждом пункте 5000 град². Общий объем детектируемого слоя атмосферы в диапазоне высот 80–120 км превышает 6 млн км³. Эффективность в базисном режиме достигает 55 % регистрируемых событий.

Детектирование и захват событий осуществлялись в реальном времени с помощью программного обеспечения (ПО) SonotaCo UFOCapture v.2.24 [https://sonotaco.com/soft/e_index.html#ufoa]. Данные записывались в формате AVI, промежуточное сжатие не применялось. Первичный отбор материала выполнен визуально, основными критериями качества выступали целостность трека, наличие моментов зажигания и погасания в кадре, отсутствие внешних помех и достаточное количество звезд сравнения. Астрометрическая обработка односторонних наблюдений выполнялась с помощью ПО SonotaCo UFOAnalyzer v.4.24 [https://sonotaco.com/soft/e_index.html#ufoa] на базе звездного каталога сравнения SKY2000 [<http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/sky2k.html>] в ручном режиме с постоянным контролем моментов зажигания и погасания метеора (критерий $S/N=2$), состояния фотометрической кривой блеска, а также точности построения траектории. Обработка базисных наблюдений, определение орбитальных параметров и моделирование внеатмосферных траекторий движения метеороидов осуществлялись ПО SonotaCo UFOOrbit v.3.02 [https://sonotaco.com/soft/e_index.html#ufoa].

Результаты обработки были подвергнуты дополнительной селекции согласно критериям, приведенным в табл. 1, и было отобрано 327 событий, надежно ассоциированных с потоком Геминиды. Усредненные погрешности вычислений значений параметров приведены в табл. 2.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для визуальной оценки активности метеорных потоков традиционно применяется параметр ZHR (Zenith Hour Rate) [Brown, 1990], характеризующий число метеоров ярче $+6.5^m$ при нахождении радианта в зените. Используется также плотность падающего потока (Incident Flux Density, *Flux*) [Molau et al., 2014], т. е. число метеоров ярче $+6.5^m$, приходящихся на единицу площади атмосферы в единицу времени. Оценка активности метеорного потока Геминиды выполнялась согласно обоим критериям по методике, подробно рассмотренной в [Vida et al., 2022; Koschack, Rendtel, 1990a, b], с учетом особенностей применяемого аппаратного и программного обеспечения. В качестве исходных данных использовались результаты наблюдений, полученные в ССО. Для обеспечения максимальной точности анализа из выборки были исключены события, зафиксированные при частичной облачности. Результаты представлены на рис. 1.

Пик активности потока пришелся на $\lambda_{sol} \sim 261.8^\circ$ (ночь с 13 на 14 декабря). Максимальные значения индексов *Flux* и ZHR составили 19 и 127 соответственно, что является характерным для Геминид и согласуется со справочными данными [<https://www.ta3.sk/IAUC22DB/MDC2022/Etc/streamfulldata2022.txt>] и результатами других научных групп

Таблица 1

Критерии отбора результатов предварительной обработки для последующего анализа

Параметр	Значение
Число опорных звезд n	≥ 10
Пиковая звездная величина метеора m_{\max}	$-3^m \leq m \leq 2^m$
Ошибка определения произвольной точки траектории (α, δ)	$\pm 0.1^\circ$
Ошибка определения радианта (α, δ)	$\pm 0.1^\circ$
Ошибка синхронизации времени Δt	± 0.5 с
Угловая длина трека l	$\geq 2^\circ$
Отклонение значения геоцентрической скорости от каталога Δv_g	± 10 %
Гелиоцентрическая скорость v_h	> 12 км/с
Эксцентриситет орбиты e	< 1
Внутренний параметр оценки качества UFOOrbit [Vereš, Toth, 2010]	> 0.7

Таблица 2

Усредненные погрешности вычислений значений параметров для анализируемой выборки метеороидов потока Геминиды

Параметр	GEM+DRG		GEM		DRG	
	$\pm \Delta x_{\text{cp}}$	σ_{cp}	$\pm \Delta x_{\text{cp}}$	σ_{cp}	$\pm \Delta x_{\text{cp}}$	σ_{cp}
Прямое восхождение α (RA), $^\circ$	0.24	0.60	0.26	0.67	0.21	0.52
Склонение δ (Dec), $^\circ$	0.23	0.58	0.28	0.70	0.18	0.47
Солнечная долгота λ_{sol} , $^\circ$	0.24	0.57	0.25	0.65	0.20	0.49
Эклиптическая долгота λ_{ec} , $^\circ$	0.22	0.54	0.24	0.61	0.19	0.51
Эклиптическая широта β , $^\circ$	0.23	0.57	0.25	0.63	0.21	0.56
Скорость геоцентрическая v_g , км/с	0.54	1.38	0.66	1.65	0.42	1.08
Скорость гелиоцентрическая v_h , км/с	0.40	1.02	0.43	1.07	0.37	0.93
Большая полуось орбиты a , а.е.	0.13	0.33	0.11	0.28	0.15	0.38
Перигелийное расстояние q , а.е.	0.026	0.067	0.021	0.052	0.031	0.077
Эксцентриситет орбиты e	0.033	0.083	0.028	0.069	0.038	0.095
Орбитальный период p , лет	0.11	0.27	0.09	0.23	0.12	0.32
Аргумент перигелия Π , $^\circ$	0.20	0.51	0.14	0.35	0.26	0.67
Долгота восходящего узла Ω , $^\circ$	0.24	0.62	0.17	0.43	0.31	0.82
Наклонение орбиты i , $^\circ$	0.51	1.24	0.33	0.83	0.67	1.72

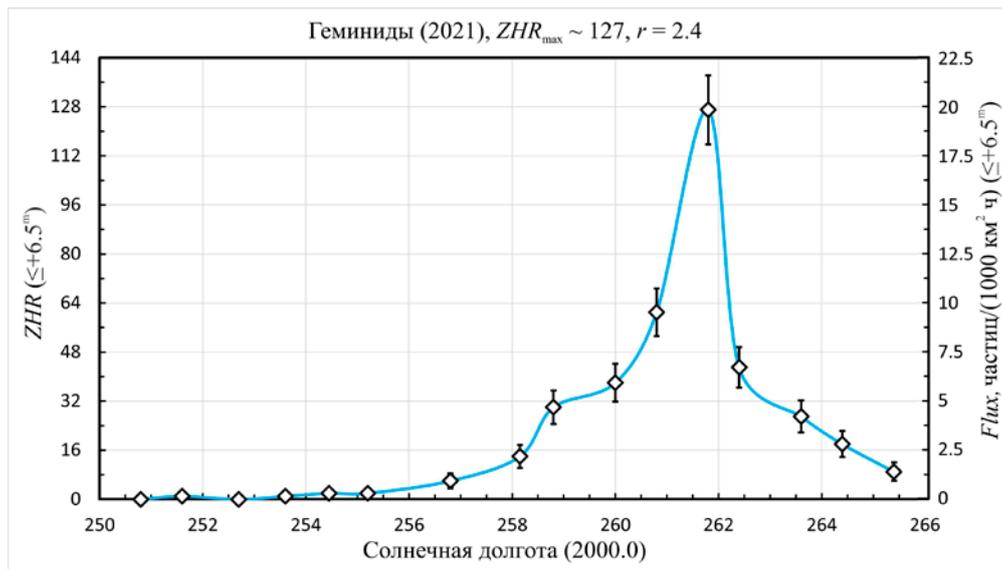


Рис. 1. Активность метеорного потока Геминиды (2021)

[Vida et al., 2022; https://www.imo.net/members/imo_live_shower/summary?shower=QUA&year=2021]. Весь период наблюдений поток демонстрирует ти-

пичную динамику активности, характеризующуюся ярко выраженным, хорошо локализованным пиком вблизи момента максимума GEM ($\lambda_{\text{sol}} \sim 261.8^\circ$), а также

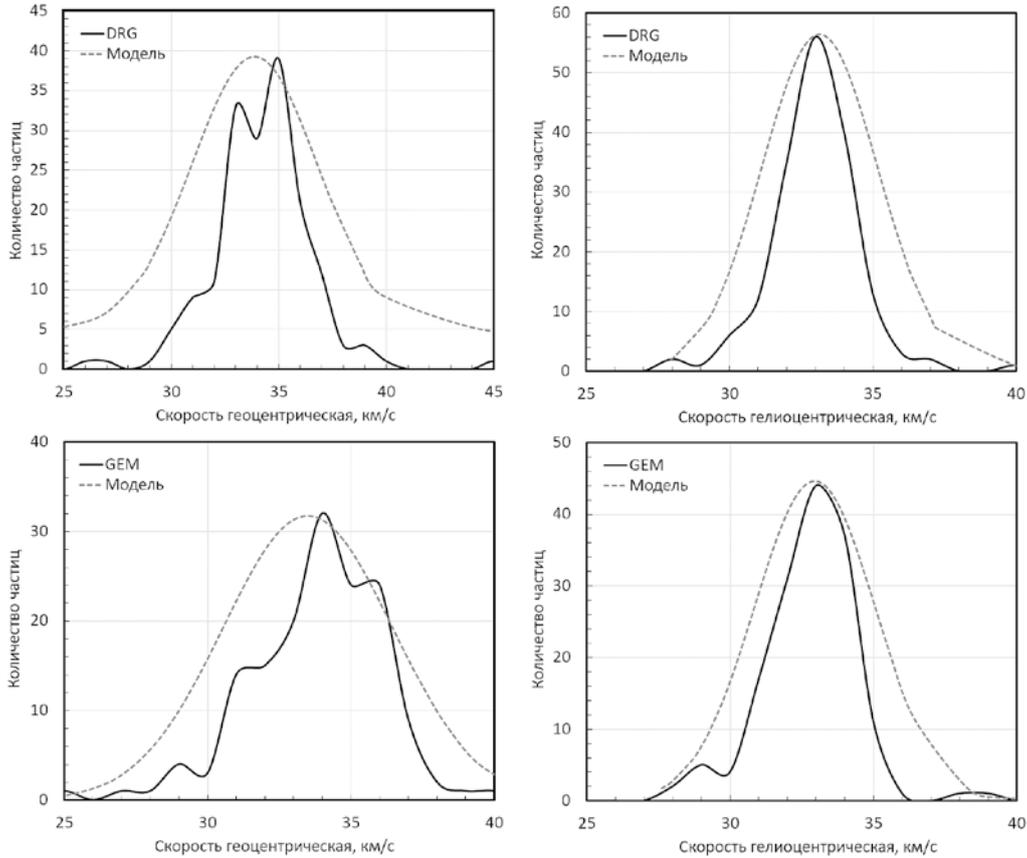


Рис. 2. Частотное распределение скоростей метеороидов DRG и GEM потока Геминиды (2021) в сравнении с математической моделью нормального распределения

плавными нарастанием и спадом вокруг него. Незначительная асимметрия профиля слева от максимума около $\lambda_{sol} \sim 258.8^\circ$ может указывать на всплеск активности компоненты DRG (декабрьские ρ -Геминиды), входящей в состав комплекса Фазтона и, вероятно, тесно связанной с основным потоком. Измеренная активность потока на момент предполагаемого локального максимума DRG составила $ZHR=32$ и $Flux=4$. Наблюдения были прекращены 17.12.2021 из-за неблагоприятных метеоусловий. Аномальных изменений активности потока в большую либо меньшую сторону зафиксировано не было.

Кинематические характеристики метеороидов проанализированы по результатам обработки данных. Анализ частотного распределения гео- и гелиоцентрических скоростей частиц выполнен отдельно для DRG- и GEM-компонент потока в сравнении с математической моделью — функцией Гаусса, нормированной на максимальное число частиц в интервале скоростей с шагом 1 км/с:

$$\varphi(v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(v-a)^2/2\sigma^2}. \tag{1}$$

Здесь a и σ — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение соответственно, рассчитанные индивидуально для каждой выборки:

$$a(v) = \sum_{i=1}^n v_i p_i, \tag{2}$$

$$\sigma = \sqrt{D(v)}, \tag{3}$$

$$D(v) = \sum_{i=1}^n (v_i - a)^2 p_i, \tag{4}$$

где p_i — вероятность обнаружения значения из интервала $v_i - v_{i+1}$ в общей выборке. Частотное распределение расчетных скоростей с шагом 1 км/с показано на рис. 2.

Измеренные гелиоцентрические скорости v_h метеороидов обеих компонент Геминид демонстрируют достаточно высокую степень соответствия математической модели и выраженную симметрию профиля, что свидетельствует о равномерной дисперсии кинематических параметров частиц в потоке на данном участке орбиты. Наиболее распространенные гелиоцентрические скорости DRG и GEM составляют ~ 33 км/с и не показывают значимого различия в рамках исследуемой выборки. Геоцентрические скорости v_g обеих компонент потока, напротив, неустойчивы, что может быть обусловлено особенностями наблюдений (преимущественно в вечернее и утреннее время ввиду необходимости селекции данных по метеорологическому признаку), погрешностями измерений и малым объемом выборки. Наиболее вероятное значение для метеороидов GEM $v_g \sim 34$ км/с соответствует справочным данным, тогда как для метеороидов DRG геоцентрическая скорость в среднем несколько выше и составляет ~ 35 км/с.

Параметры дрейфа рассчитывались в линейном приближении методом наименьших квадратов отдельно

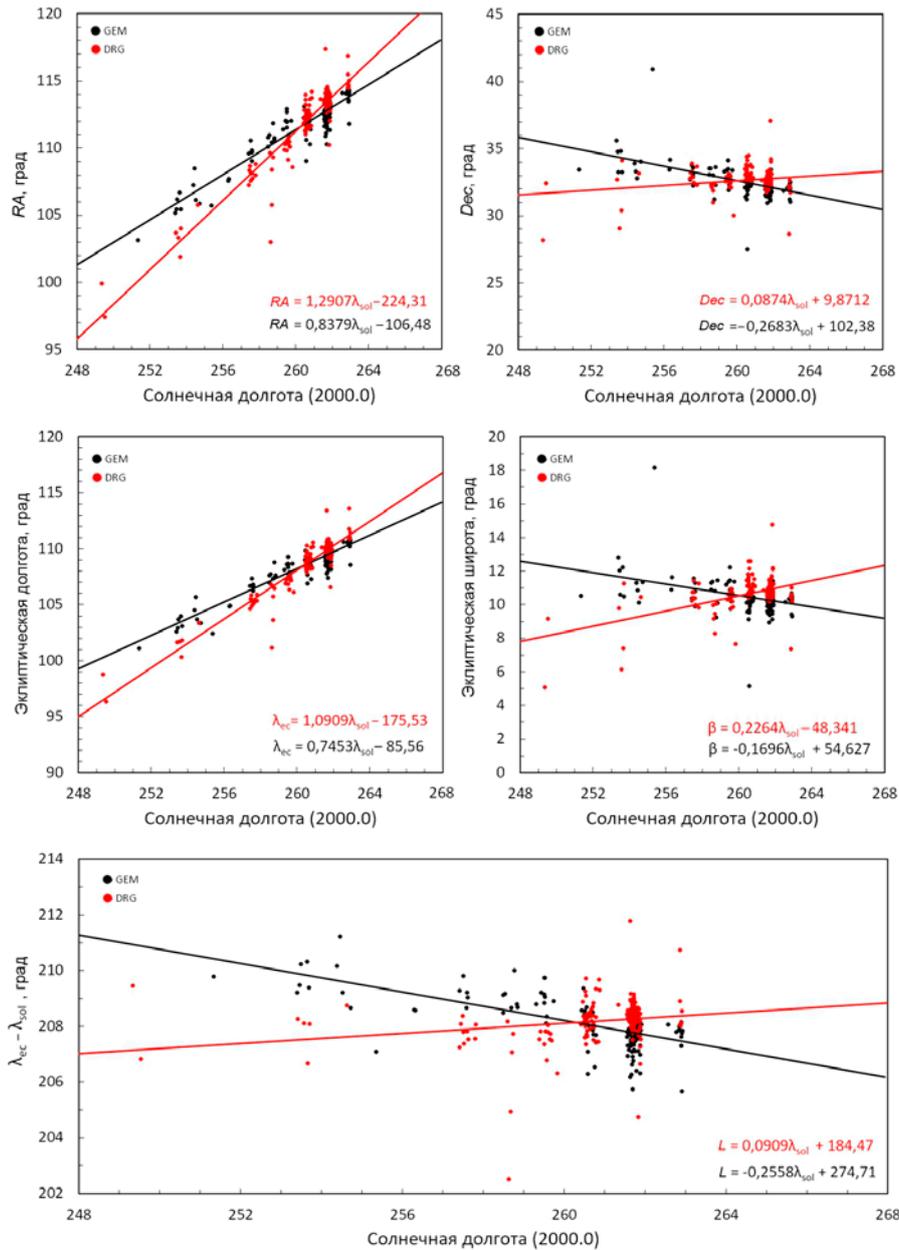


Рис. 3. Параметры дрейфа компонент DRG и GEM потока Геминиды (2021)

для DRG и GEM, результаты показаны на рис. 3. Выявлен выраженный дрейф обеих компонент навстречу друг другу вдоль каждой оси, что может быть объяснено особенностями конфигурации шлейфа.

Суточный дрейф вдоль осей прямого восхождения, склонения, эклиптической долготы и широты составляет для DRG-компоненты $\Delta\alpha=1.29^\circ$, $\Delta\delta=0.09^\circ$, $\Delta\lambda_{ec}=1.09^\circ$, $\Delta\beta=0.23^\circ$ и для GEM-компоненты $\Delta\alpha=0.84^\circ$, $\Delta\delta=-0.27^\circ$, $\Delta\lambda_{ec}=0.75^\circ$, $\Delta\beta=-1.17^\circ$.

Помимо суточного, компоненты демонстрируют собственный дрейф, не обусловленный орбитальным движением Земли: 0.09° и -0.26° для DRG и GEM соответственно в системе координат $\lambda_{ec}-\lambda_{sol}$. Обе компоненты имеют практически одновременный максимум активности около $\lambda_{sol}\sim 261.8^\circ$, при этом точка их пересечения расположена вблизи максимума, но

не совпадает с ним ($\lambda_{sol}\sim 259.9^\circ$), что также может объясняться особенностями конфигурации потока и распределения частиц. Взаимное расположение областей радиации DRG и GEM как функция экваториальных координат и солнечной долготы показано на рис. 4. Радиус областей соответствует $3\sigma_{cp}$ (см. табл. 2). Информация о параметрах дрейфа приведена в табл. 3.

На рис. 5 представлено распределение индивидуальных радиантов в экваториальной и эклиптической системах координат после редукции к моменту максимума ($\lambda_{sol}\sim 261.8^\circ$).

Компоненты DRG и GEM образуют единое поле радиации с достаточно заметным разграничением областей влияния, что может косвенно свидетельствовать об анизотропии потока на данном отрезке орбиты. Следует, однако, учитывать крайнюю бли-

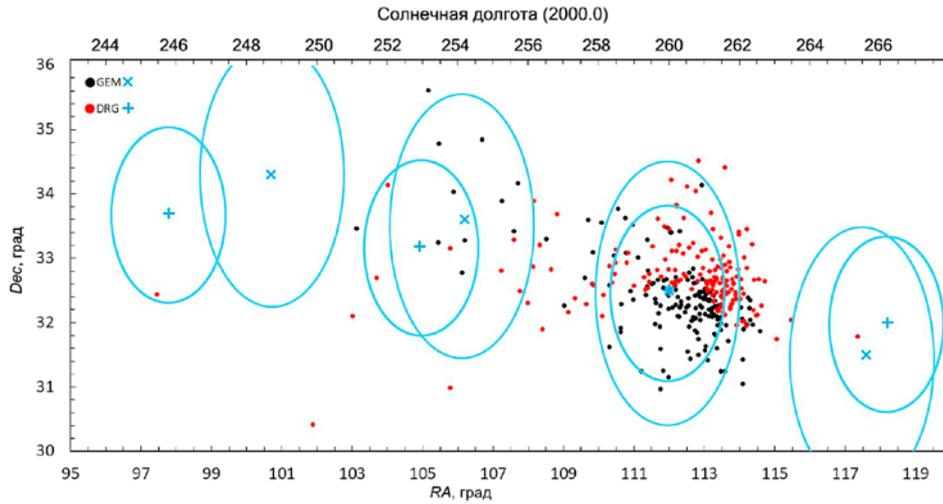


Рис. 4. Собственный дрейф областей радиации компонент DRG и GEM потока Геминиды (2021). Расчетная точка пересечения радиантов: $\alpha = 112.1^\circ$, $\delta = 32.5^\circ$, $\lambda_{sol} = 259.8^\circ$

Таблица 3

Расчетные параметры суточного дрейфа компонент GEM и DRG

	$\Delta\alpha, ^\circ$	$\Delta\delta, ^\circ$	$\Delta\lambda_{ec}, ^\circ$	$\Delta\beta, ^\circ$	$\Delta(\lambda_{ec} - \lambda_{sol}), ^\circ$
GEM	+0.84	-0.27	+0.75	-1.17	-0.26
DRG	+1.29	+0.09	+1.09	+0.23	+0.09

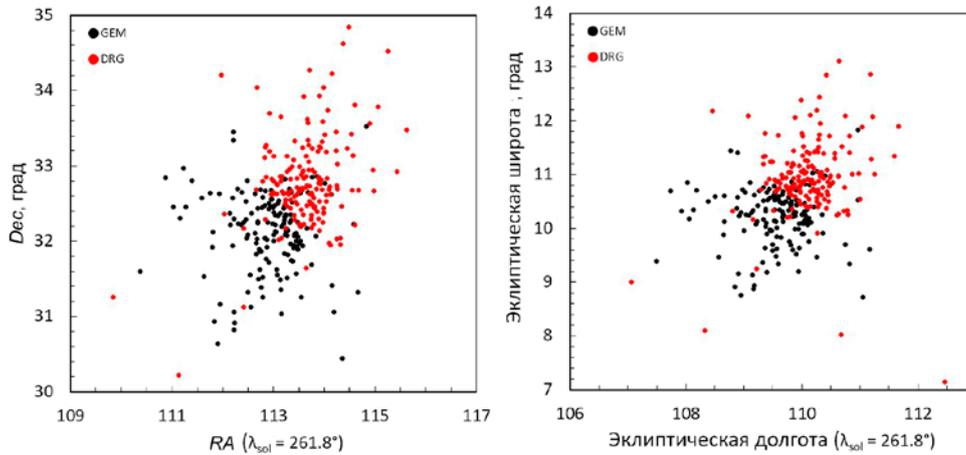


Рис. 5. Распределение радиантов компонент DRG и GEM потока Геминиды (2021) за вычетом суточного дрейфа

зость радиантов, особенно вблизи максимума, вследствие чего часть метеоров могла быть отнесена не к той компоненте на этапе обработки. В целом поток характеризуется высокой концентрацией и относительной однородностью распределения частиц в центре шлейфа и нарастанием дисперсии и анизотропии к периферии. Последняя может быть обусловлена как естественными физическими процессами, сопровождающими эволюцию потока, так и случайными флуктуациями параметров на фоне выборки незначительного объема. В любом случае поток отличается достаточно компактной областью радиации, расчетные размеры которой составляют $\Delta\alpha = 6.12^\circ$, $\Delta\delta = 4.98^\circ$; $\Delta\lambda_{ec} = 5.67^\circ$, $\Delta\beta = 5.71^\circ$. Вычисленные экваториальные координаты центра радианта: $\alpha = 113.52^\circ$, $\delta = 32.48^\circ$.

Результаты расчетов наклона и аргументов перицентра для DRG и GEM показаны рис. 6. Соотношение данных параметров характеризует распре-

ление частиц в поперечном сечении шлейфа вблизи перигелия, которое представляется достаточно компактным, изотропным и однородным. Обе части потока показывают равномерное рассеяние вокруг центра и соизмеримый вклад в общую картину. Дисперсия закономерно растет от центра к периферии, при этом наблюдается незначительная тенденция к уменьшению значений аргумента перицентра и наклона, что может являться результатом естественных эволюционных процессов. Выраженных сгустков и ответвлений поток не демонстрирует.

Распределение соотношений большой полуоси орбиты и перигелийного расстояния для обеих компонент (рис. 6) достаточно плотное, что свидетельствует о высокой степени компактности шлейфа. DRG и GEM вносят соизмеримый вклад в общую картину распределения частиц и локализованы в области с центром в точке $q = 0.15$ а.е., $a = 1.24$ а.е., что с высокой

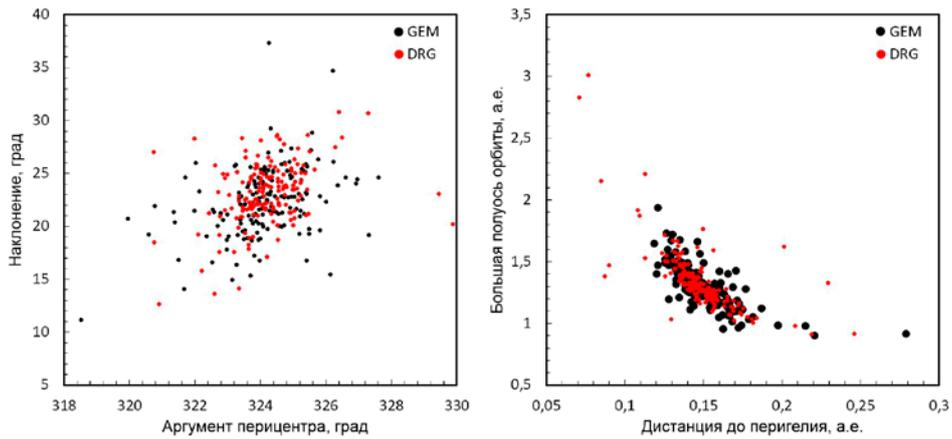


Рис. 6. Структура потока Геминиды (2021) вблизи перигея

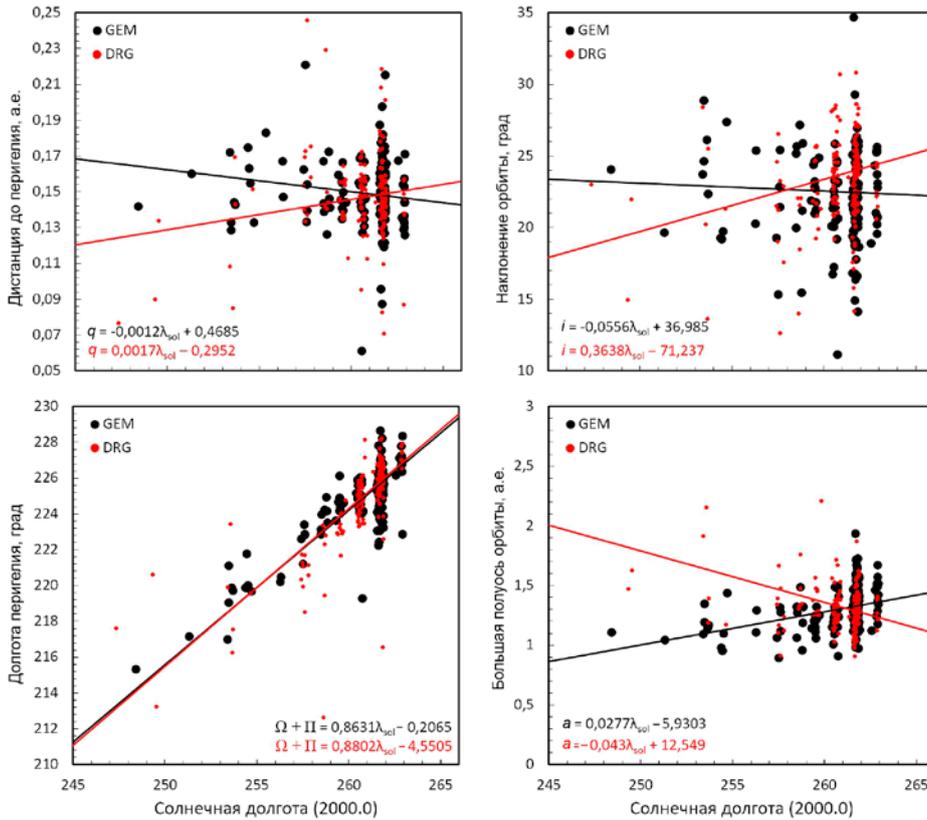


Рис. 7. Основные орбитальные параметры компонент DRG и GEM потока Геминиды (2021) как функция солнечной долготы

точно соответствует значениям аналогичных параметров предполагаемого родительского тела ((3200) Фаэтон: $q=0.14$ а.е., $a=1.27$ а.е.) и может свидетельствовать об относительно малом возрасте потока и/или незначительном внешнем влиянии на его эволюцию. Заметной особенностью DRG является наличие частиц, имеющих более вытянутые орбиты при достаточно малом перигелийном расстоянии: по всей видимости, именно данный фактор обуславливает их более высокую скорость, что, наряду с более ранним моментом наступления максимума, дает повод рассматривать DRG как отдельный структурный элемент.

Зависимость основных орбитальных параметров от солнечной долготы приводится на рис. 7. DRG

и GEM показывают симметричный встречный тренд перигелийного расстояния с точкой пересечения в районе максимума, при этом поток как целое имеет устойчивое значение $q \sim 0.15$ а.е. весь период наблюдений. Подобное поведение может быть объяснено как механикой самого потока, так и вероятной перекрестной идентификацией метеоров ввиду близости областей радиации. Для более точного определения причины наблюдаемого эффекта требуются дополнительные исследования на основе выборки большего объема.

Похожие выводы справедливы и для наклонений орбит. Компоненты потока демонстрируют сходное поведение и встречный тренд, однако для потока в целом тренд оказывается положительным и состав-

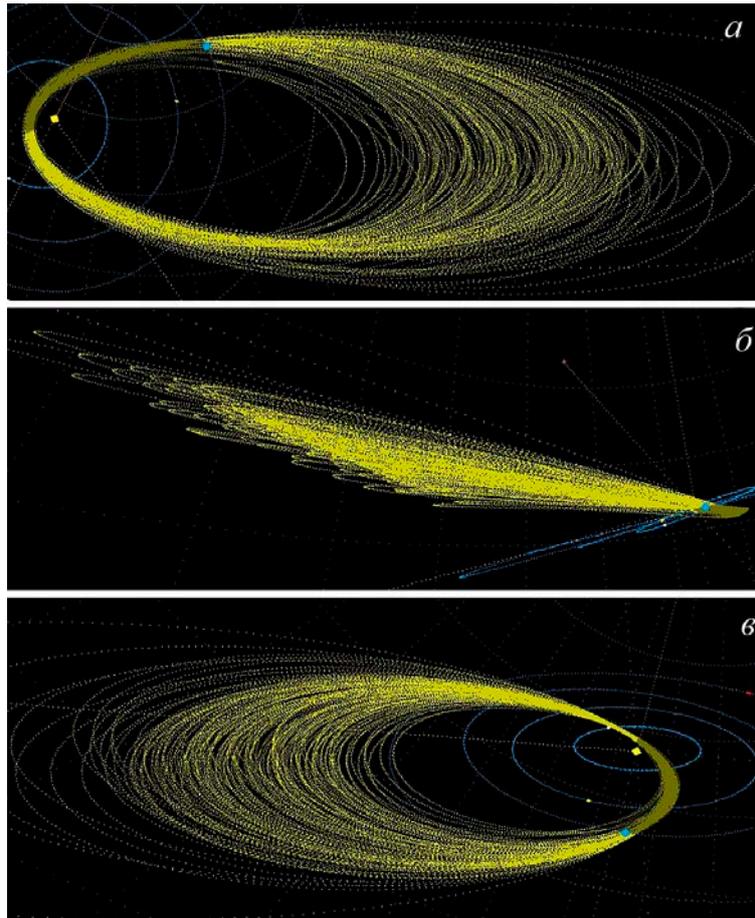


Рис. 8. Индивидуальные орбиты метеороидов потока Геминиды (2021), построенные по результатам анализа наблюдательных данных

ляет ~ 0.16 °/сут, при этом усредненное наклонение шлейфа устойчиво равно $\sim 22^\circ$ и соответствует такому у родительского тела. Дисперсия параметра растет со временем вплоть до 20° в максимуме.

Долготы перигелия DRG и GEM демонстрируют практически синхронный тренд в сторону роста и малый уровень разброса (около 7°), что позволяет рассматривать поток как единое целое. Большая полуось орбиты, несмотря на встречный тренд отдельных компонент, остается практически постоянной для потока в целом и составляет ~ 1.3 а.е. (при $a=1.27$ а.е. для родительского тела). Измеренная дисперсия данного параметра не превышает 1 а.е. и не имеет выраженной зависимости от времени.

Совокупность индивидуальных орбит метеороидов потока Геминиды представлена на рис. 8. Как видно на рисунке, шлейф потока вблизи перигелия имеет весьма плотную структуру и компактные размеры, подобная ситуация при несколько большей дисперсии сохраняется и на момент встречи с Землей (см. проекции А и С). Все орбиты метеороидов, входящих в выборку, лежат в пределах орбиты Юпитера.

Поток визуально сохраняет относительную изотропность и однородность на всех участках орбиты, однако демонстрирует выраженную тенденцию к увеличению больших полуосей орбит частиц по мере роста наклонения орбит (рис. 8, проекция В), предположительно вызванную естественными эволюци-

онными процессами. Как показывает рис. 9, значительная часть метеороидов обеих частей потока равномерно распределена внутри относительно компактной области, при этом частицы DRG имеют в целом большие наклонения орбит, нежели частицы GEM. Очевиден положительный тренд наклонений орбит обеих компонент с увеличением больших полуосей, однако аппроксимированный рост наклонений орбит для DRG несколько ниже по причине значений, образующих практически равномерный ряд ниже основной области. Устойчивый характер ряда и принадлежность всех значений к DRG позволяют предположить его естественное происхождение, однако нельзя исключить влияние погрешностей измерений.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Имеющиеся в распоряжении авторов данные наблюдений свидетельствуют о бимодальности профилей *ZHR* и *Flux* потока Геминиды. Некоторый всплеск активности вблизи $\lambda_{\text{sol}} \sim 258.8^\circ$, предположительно, характерен для компоненты DRG и может рассматриваться как дополнительный аргумент в пользу существования отдельного структурного элемента. Другой важной особенностью DRG, отмечаемой научными группами, являются более высокие геоцентрические скорости метеороидов — до 40 км/с против

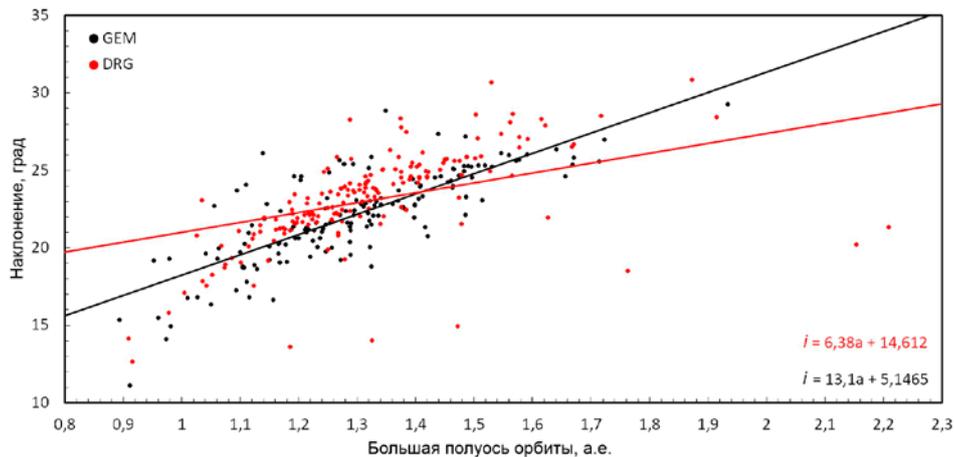


Рис. 9. Наклонения орбит метеороидов DRG и GEM потока Геминиды (2021) как функция больших полуосей орбит

35 км/с для GEM [Jenniskens et al., 2016]. Несмотря на то, что в рамках настоящей работы разность геоцентрических скоростей DRG и GEM не превышала 1 км/с, при оперативной дифференциации компонент целесообразно учитывать данный признак, не уступающий по значимости общепринятым критериям, основанным на определении координат индивидуальных радиантов и прогнозируемых моментов максимума [Neslušan, Najduková, 2017; Jopek et al., 1999]. Это особенно актуально ввиду близости радиантов DRG и GEM, незначительных различий орбитальных параметров входящих в их состав метеороидов, а также наличия признаков, свидетельствующих о встречном движении компонент с тенденцией к пересечению вблизи максимума GEM. Необходимо подчеркнуть, что указанные особенности и неизбежные погрешности измерений и расчетов могут стать причиной ошибочного отнесения метеоров к той или иной части потока. Для подтверждения либо опровержения обнаруженных эффектов требуются дальнейшие исследования.

Поскольку морфологическая структура потока Геминиды представляется достаточно однородной (особенно вблизи перигелия) и не обладает ярко выраженными особенностями даже с учетом признаков наличия двух пересекающихся компонент DRG и GEM, у нас пока нет достаточных оснований утверждать их различное происхождение. Принимая во внимание весьма близкие характеристики метеороидов, наиболее целесообразно считать DRG структурным элементом основного потока GEM, образовавшимся в ходе естественных эволюционных процессов, либо косвенным признаком активности родительского астероида (3200) Фаэтон [Licandro et al., 2007]. Предположение о наличии отдельного родительского тела, выдвигаемое некоторыми авторами в качестве альтернативной гипотезы происхождения компонент потока GEM [Ohtsuka et al., 2006], не находит подтверждения в настоящей работе.

В ходе исследования получены независимые данные об основных параметрах потока Геминиды, не противоречащие уже известным и уточняющие их. Активность потока вблизи максимума ($\lambda_{\text{sol}} \sim 261.8^\circ$) составила $ZHR=127$, $Flux=19$, вклад компонент

DRG и GEM оценивается как соизмеримый. Суточный дрейф в экваториальной и эклиптической системах координат составляет $\Delta\alpha=0.84^\circ$, $\Delta\delta=-0.27^\circ$, $\Delta\lambda_{\text{ec}}=0.75^\circ$, $\Delta\beta=-1.17^\circ$ для GEM и $\Delta\alpha=1.29^\circ$, $\Delta\delta=0.09^\circ$, $\Delta\lambda_{\text{ec}}=1.09^\circ$, $\Delta\beta=0.23^\circ$ для DRG, собственный дрейф в системе $\lambda_{\text{ec}}-\lambda_{\text{sol}}$ равен 0.09° и -0.26° для компонент DRG и GEM соответственно. Также были получены данные, свидетельствующие о встречном дрейфе обеих частей с пересечением в точке $\alpha=112.1^\circ$, $\delta=32.5^\circ$, $\lambda_{\text{sol}}=259.8^\circ$. Похожая тенденция прослеживается для некоторых орбитальных параметров, включая перигелийное расстояние ($\Delta q_{\text{GEM}}=-0.0012$ а.е., $\Delta q_{\text{DRG}}=+0.0017$ а.е.), наклонение ($\Delta i_{\text{GEM}}=-0.056^\circ$, $\Delta i_{\text{DRG}}=+0.0364^\circ$) и большую полуось ($\Delta a_{\text{GEM}}=+0.028$ а.е., $\Delta a_{\text{DRG}}=-0.043$ а.е.) орбиты. При этом дрейф долготы перигелия для обеих компонент сонаправленный и практически синхронный ($\Delta\Omega_{\text{GEM}}+\Pi_{\text{GEM}}=+0.86^\circ$, $\Delta\Omega_{\text{DRG}}+\Pi_{\text{DRG}}=+0.88^\circ$), незначительные различия могут быть следствием погрешности измерений. Зависимость $i(a)$, напротив, имеет встречный тренд, выражена явно и составляет $\Delta i_{\text{GEM}}=+6.38^\circ$, $\Delta i_{\text{DRG}}=+13.10^\circ$.

Описанные особенности поведения DRG и GEM могут являться объективным следствием процессов, сопровождающих эволюцию потока, однако необходимо учитывать возможность перекрестного отождествления событий, обусловленного весьма близкими характеристиками метеороидов обеих компонент.

Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ», поддержана Минобрнауки России (соглашение ЕВ-075-15-2021-675, гос. задание FZZE-2020-0024, FZZE-202-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Иванов К.И., Комарова Е.С. Проект SkyLine — новый этап развития метеорной астрономии в Прибайкалье. *Избранные проблемы астрономии: Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», посвященной 85-летию астрономической обсерватории ИГУ.* 2016а. С. 76–83.

Иванов К.И., Комарова Е.С. SkyLine — универсальный проект видеонаблюдения метеоров. *Известия ИГУ. Серия «Науки о Земле».* 2016б. Т. 16. С. 55–66.

Иванов К.И., Комарова Е.С., Язев С.А. Комплексное исследование болида потока Персеиды по данным системы базисного видеомониторинга SkyLine. *Астрономический журнал*. 2022. Т. 99, № 6. С. 520–528. DOI: [10.31857/S0004629922070039](https://doi.org/10.31857/S0004629922070039).

Brown P. On the cause and nature of error in zenithal hourly rates. *WGN, Journal of the IMO*. 1990. Vol. 18. P. 141–145.

Hanuš J., Delbo M., Vokrouhlický D., et al. Near-Earth asteroid (3200) Phaethon: Characterization of its orbit, spin state, and thermophysical parameters. *Astron. Astrophys.* 2016. Vol. 592. A34. DOI: [10.1051/0004-6361/201628666](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628666).

Jenniskens P., Nénon Q., Albers J., et al. The established meteor showers as observed by CAMS. *Icarus*. 2016. Vol. 266. P. 331–354. DOI: [10.1016/j.icarus.2015.09.013](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.09.013).

Jewitt D. The active asteroids. *Astron. J.* 2012. Vol. 143, no. 3. P. 66–80. DOI: [10.2458/azu_uapress_978_0816532131-ch012](https://doi.org/10.2458/azu_uapress_978_0816532131-ch012).

Jopek T.J., Valsecchi G.B., Froeschle Cl. Meteoroid stream identification: a new approach – II. Application to 865 photographic meteor orbits. *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 1999. Vol. 304. P. 751–758. DOI: [10.1046/j.1365-8711.1999.02265.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02265.x).

Jopek T.J., Valsecchi G.B., Froeschle Cl. Meteor stream identification: a new approach – III. The limitations of statistic. *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 2003. Vol. 344. P. 665–672. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06888.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06888.x).

Koschack R., Rendtel J. Determination of spatial number density and mass index from visual meteor observations (I). *WGN, Journal of the IMO*. 1990a. Vol. 18-2. P. 44–58.

Koschack R., Rendtel J. Determination of spatial number density and mass index from visual meteor observations (I). *WGN, Journal of the IMO*. 1990b. Vol. 18-4. P. 119–140.

Koseki M. Major meteor showers based on Global Meteor Network data. *eMetN Meteor J.* 2023. Vol. 8, no. 4. P. 231–245.

Licandro J., Campins H., Mothé-Diniz T., et al. The nature of comet-asteroid transition object (3200) Phaethon. *Astron. Astrophys.* 2007. Vol. 461, no. 2. P. 751–757. DOI: [10.1051/0004-6361:20065833](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20065833).

Molau S., Barentsen G., Crivello S. Obtaining population indices from video observations of meteors. *Proc. of the IMC*. 2014. P. 74–80.

Neslušan L., Hajduková M. Separation and confirmation of showers. *Astron. Astrophys.* 2017. Vol. 598. DOI: [10.1051/0004-6361/201629659](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629659).

Ohtsuka K., Sekiguchi T., Kinoshita D., et al. Apollo asteroid 2005 UD: split nucleus of (3200) Phaethon? *Astron. Astrophys.* 2006. Vol. 450. P. L25–L28. DOI: [10.1051/0004-6361:200600022](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200600022).

Ryabova G.O. On the possible ejection of meteoroids from asteroid (3200) Phaethon in 2009. *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 2012. Vol. 423, iss. 3. P. 2254–2259. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.21033.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21033.x).

Ryabova G.O. A preliminary numerical model of the Geminid meteoroid stream. *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 2016. Vol. 456, iss. 1. P. 78–84. DOI: [10.1093/mnras/stv2626](https://doi.org/10.1093/mnras/stv2626).

Ryabova G.O. Could the Geminid meteoroid stream be the result of long-term thermal fracture? *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 2018. Vol. 479, iss. 1. P. 1017–1020. DOI: [10.1093/mnras/sty1532](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1532).

Ryabova G.O. The Geminid meteor shower radiant: a mathematical model. *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 2021. Vol. 507, iss. 1. P. 4481–4486. DOI: [10.1093/mnras/stab2286](https://doi.org/10.1093/mnras/stab2286).

Vereš P., Toth J. Analysis of the SonotaCo video meteoroid orbits. *WGN, Journal of the IMO*. 2010. Vol. 38, no. 2. P. 54–57.

Vida D., Blaauw E., Brown P., et al. Computing optical meteor flux using Global Meteor Network data. *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 2022. Vol. 515, iss. 2. P. 2322–2339. DOI: [10.1093/mnras/stac1766](https://doi.org/10.1093/mnras/stac1766).

Williams I.P., Ryabova G.O. Meteor shower features: are they governed by the initial formation process or by subsequent gravitational perturbations? *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 2011. Vol. 415, iss. 4. P. 3914–3920. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.19010.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19010.x).

URL: <http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/sky2k.html> (дата обращения 2 сентября 2024 г.).

URL: https://ru.iszf.irk.ru/Заглавная_страница (дата обращения 2 сентября 2024 г.).

URL: https://sonotaco.com/soft/e_index.html#ufoa (дата обращения 2 сентября 2024 г.).

URL: <https://www.ta3.sk/IAUC22DB/MDC2022/Etc/streamfulldata2022.txt> (дата обращения 2 сентября 2024 г.).

URL: https://www.imo.net/members/imo_live_shower?shower=GEM&year=2021 (дата обращения 2 сентября 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

Иванов К.И., Комарова Е.С., Язев С.А. Исследование основных характеристик метеорного потока Геминиды по данным базисных видеонаблюдений 2021 г. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 4. С. 122–131. DOI: [10.12737/szf-104202413](https://doi.org/10.12737/szf-104202413).