

Article

Некоторые результаты симультанных фотографических, телевизионных, спектральных и радиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане

М. Нарзиев *¹ 

¹ Институт астрофизики Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, 734063, Таджикистан
mirhusseyn_narzi@mail.ru (M.N.)

* Correspondence: mirhusseyn_narzi@mail.ru; Tel.: +992 93 5806965 (M.N.)

Аннотация:

Институт астрофизики Национальной академии наук Таджикистана является одним из первых научно-исследовательских учреждений, где, начиная с конца 1960-х годов, в ГисАО была введена в действие различная наблюдательная оптическая аппаратура, такая как фотографическая, спектральная, телевизионная, а также комплекс радиолокационной аппаратуры: МИР-2 и МИР-3. В 1977–1980 гг. В Институте впервые были проведены комплексные фотографические, спектральные, телевизионные и радиолокационные наблюдения основных ежегодных метеорных потоков и спорадического фона. В результате анализа данных наблюдений были выявлены: один одновременно зарегистрированный фото-телевизионный метеор, восемь фоторадиолокационных (причём метеор № 770954 имеет спектр, полученный методом мгновенной экспозиции), а также 57 совместно зарегистрированных радио-телевизионных метеоров. Результаты симультанных радио-оптических наблюдений метеоров позволили авторам впервые получить: а) кривые свечения и ионизации для одних и тех же метеоров; б) измерения скорости тех же метеоров двумя способами: 1) радиолокационным; 2) по результатам комбинированных радиотелевизионных наблюдений; в) определение фотометрической и ионизационной массы метеороидов; г) провести исследование структуры поточных и спорадических метеороидов. Объединение результатов симультанных радио-оптических наблюдений метеоров в Таджикистане с аналогичными данными, полученными в Гарварде, Оттаве и Джодрелл-Бэнке, позволило исследовать зависимость логарифма отношения интенсивности свечения к ионизации от скорости для двух групп метеоров по звездным величинам: а) ярких и б) слабых метеоров. Полученные результаты также позволили исследовать зависимость радиовеличины метеоров от скорости, что крайне важно для взаимной интерпретации данных оптических и радиолокационных наблюдений.

Цитирование: М. Нарзиев. Некоторые результаты симультанных фотографических, телевизионных, спектральных и радиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане. 2025, 2, 1, 5. <https://doi.org/>

Полученный: 10.01.2025

Исправленный: 18.01.2025

Принято: 25.01.2025

Опубликованный: 30.01.2025

Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted to for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Ключевые слова: метеорные потоки, спорадические метеоры, радиолокационные наблюдения, оптические наблюдения, скорость метеоров, кривые свечения и ионизации, фотометрическая и ионизационная масса метеороидов.

Some Results of Simultaneous Photographic, Television, Spectral, and Radar Observations of Meteors in Tajikistan

Mirhusen Narziev *¹ 

¹ Institute of Astrophysics of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, 734063, Tajikistan
mirhusseyn_narzi@mail.ru (M.N.)

Abstract:

The Institute of Astrophysics of the National Academy of Sciences of Tajikistan is one of the first research institutions where, since the late 1960s, various optical observational instruments were

introduced at the Hisar Astronomical Observatory (HisAO), including photographic, spectral, and television systems, as well as a radar complex: MIR-2 and MIR-3. From 1977 to 1980, the Institute carried out comprehensive photographic, spectral, television, and radar observations of major annual meteor showers and the sporadic background for the first time. Analysis of the collected data revealed: one simultaneously recorded photo-television meteor, eight photo-radar meteors (meteor No. 770954 having a spectrum obtained via instantaneous exposure), and 57 jointly recorded radio-television meteors.

The results of simultaneous radio-optical observations of meteors allowed the authors to obtain for the first time: (a) light and ionization curves for the same meteors; (b) measurements of meteor velocities using two methods: (1) radar; and (2) based on combined radio-television observations; (c) determination of the photometric and ionization masses of meteoroids; and (d) a study of the structure of stream and sporadic meteoroids. Combining the results of simultaneous radio-optical observations of meteors in Tajikistan with similar data obtained in Harvard, Ottawa, and Jodrell Bank made it possible to investigate the dependence of the logarithm of the light-to-ionization intensity ratio on velocity for two groups of meteors by stellar magnitude: (a) bright and (b) faint meteors. The results also made it possible to analyze the dependence of meteor radio magnitude on velocity, which is crucial for the mutual interpretation of optical and radar observational data.

Keywords: meteor showers, sporadic meteors, radar observations, optical observations, meteor velocity, light and ionization curves, photometric and ionization mass of meteoroids.

Введение

В настоящее время одним из наиболее надежных и много информативных методов получения информации о метеороидах, основаны на результатах симультанных оптических (фотографические, спектральные, телевизионные, видео камеры и камеры регистрации болидов) и базисных радиолокационных наблюдений метеоров. При этом значительно расширяется объем полученной информации не только для изучения физико-кинематических и динамических характеристик метеороидов, но и для изучения физико-химических процессов, происходящих при взаимодействии метеороида с атмосферой Земли. Изучение физико-кинематических характеристик метеороидов помогает понять генезис Солнечной системы, изучить их свойства, происхождение и эволюцию, а также определить природу их родительских объектов: комет и астероидов. Следовательно, сбор наблюдательных данных, охватывающих широкий диапазон скоростей и яркостей метеоров на основе результатов одновременных радио-оптических наблюдений имеет исключительно важное научное и практическое значение.

Четко осознавая значимость симультанных радио-оптических наблюдений, за последние три десятилетия в ряде Обсерваторий развитых стран мира была осуществлена серия научных экспериментов, о чем свидетельствуют следующие публикации [1,9]. Однако полученные результаты не одинарные и в большинстве публикаций приводятся данные, характерные только для одной зеркально-отражающей точки радиоотражения, что недостаточно для изучения взаимосвязи интенсивностей процессов свечения и ионизации вдоль следа одних и тех же метеоров.

Материалы и методы

Институт астрофизики Национальной академии наук Таджикистана является одним из первых научно-исследовательских учреждений, где, начиная с конца 60-х годов, приобрели и разместили в ГисАО различные наблюдательные оптические оборудования, такие как фотографические, спектральные, телевизионные и комплекс радиолокационной аппаратуры: МИР-2, МИР-3. Для исследования комплексных физико-кинематических и химических свойств метеороидов, изучения взаимосвязи интенсивностей свечения и ионизации от скорости, исследования свойств Земной атмосферы в метеорной зоне, нами в 1977-1980 гг. в период действия ряда главных ежегодных метеорных потоков организовали и проводили комплексные фотографические, спектральные, телевизионные и базисные радиолокационные наблюдения метеоров с пяти пунктов, расположенных относительно центрального пункта на расстоянии от 4 до 11 км (рисунок 1).

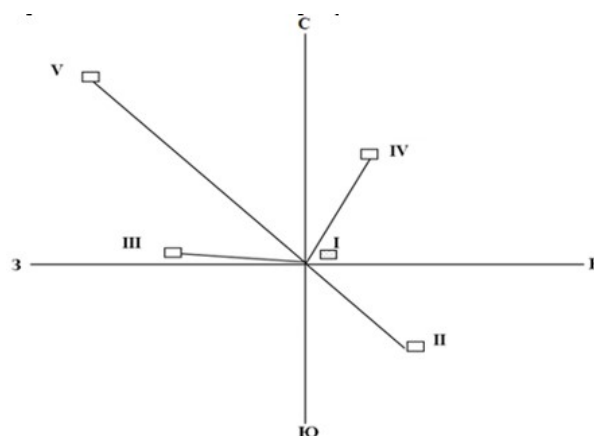


Рис. 1. Расположение четырёх выносных пунктов относительно центрального (I)

Fig. 1. Location of the four remote stations relative to the central one (I)

Результаты

В результате анализа первичных наблюдательных материалов автором выявлено: один одновременно зарегистрированный фото-телевизионный метеор, 8 фото-радиолокационных, где один имеет спектр, полученный методом мгновенной экспозиции, и 57 радио-телевизионных метеоров. Фото метеора номер 770954, зарегистрированного методом мгновенной экспозиции, приведено на рис. 2. На данный момент это единственный в мире метеор со спектром, зарегистрированный комбинированным оптическим, спектральным и радиолокационным методом.

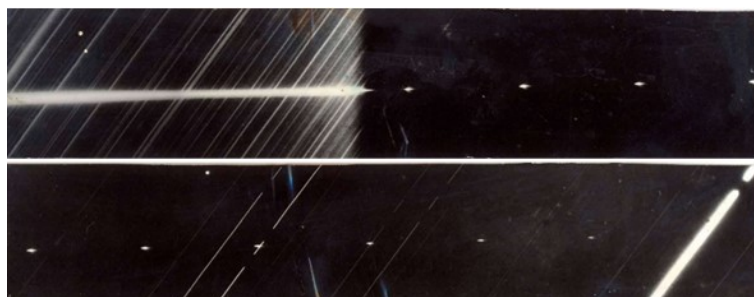


Рис. 2. Метеор номер 770954, зарегистрированный методом мгновенной экспозиции

Fig. 2. Meteor No. 770954 recorded using the instantaneous exposure method

Результаты совместных радиооптических наблюдений позволяли исследовать а) вариацию интенсивности свечения к ионизации от скорости; определять предельную звездную величину данного радиолокационного комплекса; б) осуществлять калибровку физических и кинематических характеристик радиометеоров относительно данных оптических наблюдений, которым свойственна высокая точность, в) исследовать корреляцию отношения интенсивности свечения к ионизации от скорости метеоров, установить шкалы масс радиометеоров; г) интерпретировать результаты оптических и радиолокационных наблюдений в единой системе и т.д.

Полученные данные радио-оптических наблюдений метеоров в Таджикистане позволили впервые в мире получить: а) кривые свечения и ионизации для одних и тех же метеоров; измерить скорость одних и тех же метеоров двумя способами: а) радиолокационным, б) по результатам комбинированных радиотелевизионных наблюдений; определить фотометрическую и ионизационную массу метеороида; изучить структуру поточных и спорадических метеороидов и т.д.

В таблице 1. Представлены данные атмосферных траекторий совместных фото-радиолокационных метеоров, вычисленные по результатам фотографических наблюдений. Здесь буквой N обозначен номер метеора по каталогу, α_r и δ_r – координаты радианта, V_∞ – внеатмосферная скорость, Z_r – зенитное расстояние радианта, h_b , h_m и h_e соответственно высоты начала, максимума, конца следа, M_m – абсолютная звёздная величина на высоте мак-

симула блеска метеора, и в последнем столбце указана принадлежность метеора к метеорным потокам.

Таблица 1. Данные атмосферной траектории совместных фото-радиолокационных метеоров, вычисленные по результатам фотографических наблюдений

Table 1. Atmospheric trajectory data of joint photo-radar meteors calculated from photographic observations

№	α_r , град.	δ_r , град.	V_∞ , КМ/с	$\cos Z_r$	h_b , КМ	h_m , КМ	h_e , КМ	Mm	Классификация
7709533	52.3	46.1	60.8	0.486	106.6	94.2	81.9	-2.02	Персеиды
770954	46.95	57.52	57.8	0.857	114.0	92.1	79.6	-7.2	Персеиды
770981	317.3	66.3	38.8	0.884	95.6	85.9	82.5	-4.8	Спорадические
771033	46.31	56.6	61.4	0.908	107.2	-	91.7	-2.3	Персеиды
781285с	48.65	58.0	61.9	0.844	110.5	94.8	91.9	-3.2	Персеиды
790846а	339.1	-16.0	42.7	0.573	93.8	83.8	78.0	-3.6	Ю.δ-Аквариды
800992в	45.12	56.7	61.7	0.756	110.8	98.3	91.2	-5.2	Персеиды
801061в	49.34	57.8	60.4	0.806	100.0	87.6	-	< -1	Персеиды

Данные о высоте отражающей точки на следе совместных фото-радиолокационных метеоров, определяемых по результатам комбинированных наблюдений, приведены в таблице 2., где N – номер метеора, V_∞ – внеатмосферная скорость, Z_r – зенитное расстояние радианта, h – высота отражающей точки, M и τ соответственно – абсолютная звёздная величина и измеренная длительность радиоэха радиолокатором МИР-2.

Таблица 2. Высоты точек радиоотражения $h_{\text{от}}$, значения абсолютных звёздных величин M_{от} и длительности радиоэха совместных метеоров

Table 2. Heights of radio reflection points h_{ref} , absolute stellar magnitudes M_{ref}, and radio echo durations of joint meteors

№	V_∞ , КМ/с	$\cos Z_r$	$h_{\text{от}}$, КМ	M _{от}	τ (с)
7709533	60.8	0.846	89.0	-1.9	23,0
770954	59.0	0.857	93.0	-7.2	170.0
770981	38.8	0.884	96.5	-2.1 3	0.68
771033	61.4	0.908	107.5	-1.5	4,05
781285 с	61.9	0.884	105.0	-2.0	4,2
790846 а	42.7	0.573	93.8	-0.5	5.3
800992 в	61.7	0.756	94.0	-3.4	35.0
801061 в	60.4	0.806	100.0	< -1.0	16,0

Таблица 3. Результаты одновременных радиотелевизионных наблюдений метеорных потоков в Таджикистане

Table 3. Results of simultaneous radio and television observations of meteor showers in Tajikistan

№ п/п	Период наблюдений (день, месяц, год)	Количество часов наблюдений	Количество метеоров по TV-наблюдениям	Среднее часовое число TV-метеоров	Предварительное число совместных метеоров	Число совместных метеоров
1	8.08–14.08.78	16	101	6.0	8	4
2	03.01–04.01.79	7.5	78	10.0	11	8
3	25.07–02.08.79	33	162	5.0	23	18
4	21.10–24.10.79	9	33	3.0	6	4
5	11.12–12.12.79	3	12	4.0	4	3
6	12.08–14.08.80	10.5	173	16.0	30	20

Предварительные результаты выявления совместных радиотелевизионных метеоров, наблюдавшихся во время активности метеорных потоков в ГисАО, представлены в табл. 3.

Используя экваториальные координаты начала (α_b и δ_b) и конца (α_e и δ_e) каждого метеорного следа, полученные из телевизионных наблюдений, и измеряя точные значения

расстояний, рассчитанные по данным радиолокационных наблюдений, мы рассчитали высоты начала, максимума и конца каждого метеорного следа. Результаты определения средних значений высоты начала H_b , максимума H_m и конца H_e свечения метеороидов в метеорных потоках представлены в таблице 4, где № — номер метеорного потока.

Таблица 4. Средние высоты метеорных потоков, полученные комбинированным радиотелевизионным методом

Table 4. Average heights of meteor showers obtained using the combined radio-television method

№	Название потока	$H_b \pm s.d$ (км)	$H_m \pm s.d$ (км)	$H_r \pm s.d$ (км)	$H_e \pm s.d$ (км)
1	Персеиды	111.28 ± 0.72	102.53 ± 1.15	103.75 ± 0.6	98.47 ± 1.55
2	S. δ -Аквариды	100.23 ± 0.57	94.96 ± 0.76	95.12 ± 0.97	92.71 ± 0.82
3	Квадрантиды	99.9 ± 1.74	97.27 ± 2.35	97.08 ± 1.95	93.25 ± 1.94
4	Геминиды	94.0 ± 1.0	86.15 ± 6.15	89.2 ± 2.2	81.5 ± 8.5
5	Ориониды	115.3 ± 1.3	110.25 ± 0.75	109.0 ± 1.5	107.1 ± 1.1

Согласно данным таблицы 4, средняя наблюдаемая высота максимальной светимости метеоров у Персеид составляет 102.53 ± 1.15 км, у Ю. δ -Акварид — 94.96 ± 0.76 км, у Квадрантид — 97.27 ± 2.35 км, у Геминид — 86.15 ± 6.15 км и у Орионид — 110.25 ± 0.75 км. Также из таблицы 4 можно сделать заключение, что средние высоты метеорных потоков, полученные комбинированным радиотелевизионным методом, подтверждают общую тенденцию увеличения высоты метеора с увеличением скорости.

Результаты фотометрической редукции данных совместных радио-телевизионных метеоров в Таджикистане позволили впервые получить кривые свечения и ионизации для одних и тех же метеоров, которые представлены на рис. 3.

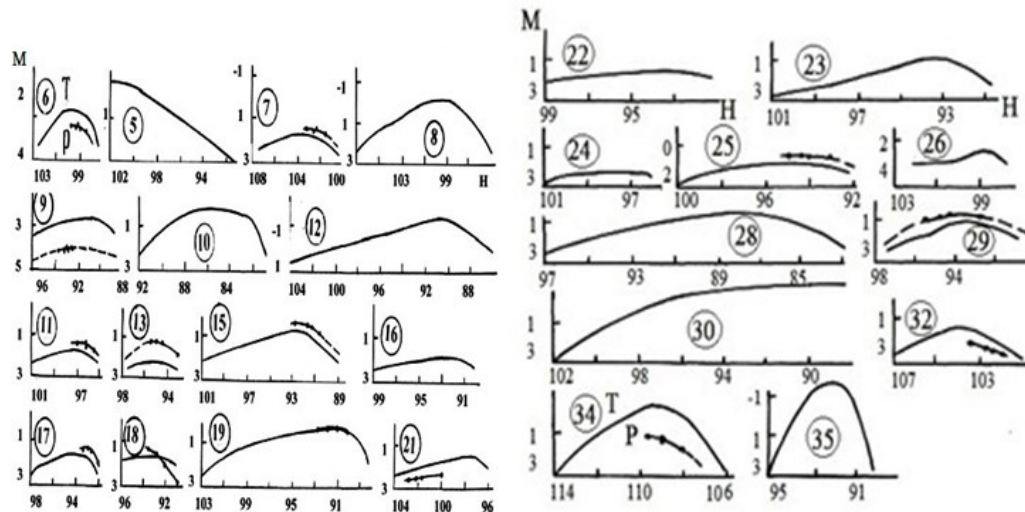


Рис. 3. Кривые блеска и ионизации радиотелевизионных метеоров [10]

Fig.3. Light and ionization curves of radio-television meteors [10]

Наличие кривой свечения и ионизации позволяло впервые определить массу этого метеора фотографическим и ионизационным методами. Массы метеороидов M при наличии кривых свечения и ионизации определяются по известным формулам:

$$M = \int_{H_H}^{P_K} \frac{I_\phi}{\tau_\phi V \cos Z} dh, \quad (1)$$

$$M = \int_{PH}^{HK} \mu m q_m dh / \beta \cos Z, \quad (2)$$

где I_ϕ — интенсивность свечения метеора, h_n и h_k — высоты начала и конца следа, V — скорость, Z — зенитное расстояние радианта, q — линейная электронная плотность следа метеора, H^* — высота однородной атмосферы, τ_ϕ и β — соответственно коэффициент свечения и коэффициент ионизации, μ — средняя атомная масса метеорного вещества и m_n — масса атома водорода. Из результатов базисных радиолокационных наблюдений метеоров в Душанбе и Гарварде следует, что не всегда удаётся получить полную форму ионизационной кривой. Следовательно, при вычислении масс метеороидов удобно использовать формулы, связывающие интенсивность свечения и линейную электронную плотность в точке максимума свечения и ионизации с массой метеора [11]. Однако в этой работе не учитывалось влияние процесса дробления и других факторов на формирование метеорного следа. В работах [12] на основании масс, определяемых по кривой свечения и ионизации, получен среднестатистический поправочный коэффициент, который позволяет приближённо учитывать влияние дробления и других факторов при определении масс метеороидов по величине интенсивности свечения или ионизации в точке максимума блеска и ионизации.

Исходные формулы с учётом вышеизложенного имеют вид:

$$m_\phi = 3HI_m 2\tau_\phi V^3 \cos Z \quad (3)$$

$$m_\Gamma = 3H \mu m_n q_m 4\beta \cos Z, \quad (4)$$

где H — высота однородной атмосферы. В формулах (3.1)–(3.6) параметры I , V , Z , h и q определяются непосредственно из наблюдений, а при расчётах в качестве среднего значения массы атомов метеорного вещества принимается величина $m_n = 3,82 \cdot 10^{-23}$ г. Таким образом, точность вычисления и степень согласия между фотографической и радиолокационной массами зависит от достоверности и надёжности определения коэффициентов свечения и ионизации и их зависимости от скорости. Подробный обзор методов исследования зависимости τ_ϕ от V и β от V приведён в монография [11]. Следует отметить, что результаты лабораторного исследования зависимости коэффициента свечения от скорости и данные, полученные по искусственным метеорам, как по абсолютной величине, так и по форме, хорошо согласуются с моделью В (экстремальная зависимость τ_ϕ от V), вычисленной теоретически Е. И. Örik [?] для слабых метеоров. Однако зависимость коэффициента ионизации β от скорости V в диапазоне скоростей 10–30 км/с как по экспериментам с искусственными метеорами, так и по данным параллельных оптических и радиолокационных наблюдений изучена недостаточно.

Коэффициент ионизации β при использовании данных параллельных наблюдений определяется выражением:

$$\beta = \tau_\phi q V^3 \mu m_n / 2 I_\phi. \quad (5)$$

Принимая среднюю массу атомов метеорного вещества равной $\mu m_n = 3,82 \cdot 10^{-23}$ г, используя численные значения I_ϕ/q , найденные на основании результатов параллельных радиооптических наблюдений, и вычисляя β согласно [11] по формулам:

$$\tau_\phi = 3,25 \cdot 10^{-1} V, \quad \text{при скорости } 10 \text{ км/с} < V < 17 \text{ км/с},$$

$$\tau_\phi = -9,6 \cdot 10^{-7} / V, \quad \text{при } V > 17 \text{ км/с}, \quad (6)$$

мы определили β при различных значениях скорости (таблица 5). Найденные нами численные значения β для скоростей от 20 до 60 км/с близки ко второй модели В. С. Тохташева [14], а для скорости $V = 40$ км/с хорошо согласуются с результатами, полученными в работе [11].

Таблица 5. Зависимость коэффициента ионизации β от скорости V по данным параллельных радио-оптических наблюдений

Table 5. Dependence of the ionization coefficient β on velocity V based on data from simultaneous radio-optical observations

V (км/с)	15	20	30	40	50	60
β	0.0001	0.0008	0.007	0.04	0.09	0.2

Данные, представленные о коэффициенте β в таблице 5 и значений интенсивности свечения, и величина линейной электронной плотности для каждого метеора, позволяют вычислить фотометрическую и ионизационную массы одного и того же метеора по формулам (3–4). В формулах (1–6) параметры I , V , Z , h и q определяются непосредственно из наблюдений, а при расчётах в качестве среднего значения массы атомов метеорного вещества принимается величина $\mu m_H = 3,82 \cdot 10^{-23}$ г. Результаты вычисления фотометрической и ионизационной массы метеороида приведены в табл. 6.

Таблица 6. Средние значения фотометрической (m_{ph}), радиолокационной (m_r) и фотометрической масс (m_{ph1}) для шести групп метеороидов по скоростям.

Table 6. Average values of photometric mass (m_{ph}), radar mass (m_r), and photometric mass (m_{ph1}) for six meteoroid groups by velocity.

V , км/с	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
m_{ph} (Г)	0,00294±0,0015	0,15251±0,0818	0,02666±0,0110	0,03114±0,0063	0,01546±0,0046	0,0104±0,0013
m_r (Г)	0,00296±0,0001	0,4700±0,3113	0,02474±0,0099	0,03044±0,0063	0,01923±0,0081	0,009178±0,0020
m_{ph1} (Г)	0,003165±0,001735	0,22775±0,138307	0,047514±0,029332	0,05128±0,014526	0,0209±0,006352	0,0164±0,0028
N	2	4	7	15	10	8

Результаты, представленные в таблице 6, показывают, что в диапазоне звёздных величин от 0 до $+8^m$ фотометрические и ионизационные массы, вычисленные по интенсивности свечения и величине линейной электронной плотности на высоте зеркальной точки, хорошо согласуются между собой. Следовательно, эти результаты дают основание полученные нами шкалы масс метеоров использовать для интерпретации результатов радиолокационных наблюдений метеоров, полученных с одной приёмной станции.

Таблица 7. Плотность поточных метеороидов по результатам параллельных радиотелевизионных и фото-радиолокационных наблюдений [15][15]

Table 7. Density of stream meteoroids based on the results of simultaneous radiotelevision and photo-radar observations [15]

Поток	N	$\delta_0 \pm \delta_0$, Г/см ³	m_0 , Г	Поток	N	$\delta_0 \pm \delta_0$, Г/см ³	m_0 , Г
δ -Аквариды	9	3.5±0.3	$10^{-6} - 10^{-5}$	Квадрантиды	4	2.1±0.6	$10^{-6} - 10^{-5}$
Персеиды	17	1.0±0.2	$5 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-5}$	Каприкорниды	1	1.4	$5 \cdot 10^{-6}$
Ориониды	2	0.5±0.2	10^{-6}	С. Виргиниды	1	5.0	
Геминиды	1	3.6	10^{-6}	Ю. Тауриды	1	1.8	$5 \cdot 10^{-6}$
Леониды	2	0.6±0.2	10^{-6}	Спорадические	18	1.3±0.2	$10^{-7} - 10^{-5}$

Ранее плотность метеороидов определялась по результатам фотографических наблюдений на основе уравнения торможения Лебединца [16], а Бабаджанов [17] определил минералогическую и пористую плотность для ярких фотографических метеоров. Пористость метеороидов метеорных потоков определялась также Бенюх [18], результаты которой представлены в табл. 8. Средние значения минералогической плотности, определенные Бенюх и Бабаджановым для отдельных массивов, весьма близки между собой. Поэтому, зная объемную плотность и используя минералогическую плотность, определенную Банюх, мы определили пористость метеороидов для метеорных потоков (таблица 8).

Наиболее плотным среди изученных слабых метеоров является вещество Геминид и Южных δ -Акварид, что соответствует прочному и плотному кометному материалу, а наименьшая объёмная плотность, соответствующая материалу комет типа IIIA, получена для Орионид и Леонид.

Таблица 8. Плотность и пористость поточных и спорадических метеороидов по результатам фотографических и комбинированных радиооптических наблюдений [19]

Jadval 8. Density and porosity of stream and sporadic meteoroids based on photographic and combined radio-optical observations [19]

Поток	$\delta_0 \pm \Delta \delta$, г/см ³ , настоящая работа	$\delta_0 \pm \Delta \delta_0$, г/см ³ [17]	δ_0 [16]	δ_m , г/см ³ [18]	δ_m , г/см ³ [17]	K, настоящая работа	K [17]
δ -Аквариды	3.5±0.3	2.4±0.6	3.3	4.1	3.4±0.4	7	29
Персеиды	1.0±0.2	1.2±0.2	-	2.4	2.25±0.04	57	45
Ориониды	0.5±0.2	0.9±0.5	-	-	2.4±0.2	79	62
Геминиды	3.6	2.9±0.6	-	3.3	2.9±0.2	0	0
Леониды	0.6±0.2	0.4±0.1	-	-	2.3±0.2	74	83
Квадрантиды	2.1±0.6	1.9±0.2	2.8	3.4	3.4±0.8	38	44
Каприкорниды	1.4	2.1	-	2.8	3.4±0.8	55	38
С. Виргиниды	5.0	-	-	-	-	-	-
Ю. Тауриды	1.8	1.6±0.4	2.3	2.7	2.7±0.2	32	41
Спорадич.	1.3±0.2	1.8±0.3		2.7	3.0±0.1	36	40

Заключение

1. В результате одновременных комплексных фотографических, спектральных, телевизионных и радиолокационных наблюдений метеоров в 1977-1980 гг. в Институте астрофизики НАНТ выявлены: один общий зарегистрированный фотографический и телевизионный метеор, один фотографический и радиолокационный болид со спектральными данными, 8 одновременно зарегистрированных фотографических и радиолокационных и 57 радиотелевизионных метеоров.
2. Впервые в мире по результатам одновременных телевизионных и базисных радиолокационных наблюдений метеоров с пяти пунктов получены кривые блеска и ионизации одних и тех же метеоров ярче +4 звёздной величины. Скорости метеоров находятся в диапазоне от 14 до 69 км/с. Анализ вариаций интенсивности свечения и ионизации вдоль следа одних и тех же метеоров с разными скоростями, указывают на удовлетворительную согласованность хода интенсивности этих процессов между собой. Синхронный ход вариации интенсивности свечения и ионизации подтверждает ранее выдвинутое предположение о непосредственной зависимости интенсивности этих процессов от единицы секундного расхода масс для обоих процессов.
3. Исследованы взаимосвязи отношения интенсивности свечения к ионизации от скорости для двух групп метеоров по яркостям: а) слабых метеоров в диапазоне от 0^m до +8^m и б) ярких метеоров с магнитудой от -0^m до -7,2^m. Установлено, что отношение интенсивности свечения к линейной электронной плотности для метеоров от 0^m до +8^m с увеличением скорости (в диапазоне метеорных скоростей) уменьшается более чем на порядок. Впервые на основе данных лабораторных экспериментов с микронных плёнок исследованы зависимости отношения логарифма интенсивности свечения к ионизации от химического состава вещества. Получено, что по мере увеличения химического состава вещества, отношение интенсивности свечения к ионизации возрастает от (-5.4) до (-3.6) (то есть, более чем на порядок).
4. Впервые по результатам одновременных радиооптических наблюдений метеоров установлены шкалы масс (зависимость коэффициента ионизации от скорости) как слабых, так и ярких метеоров. Установлено, что в диапазоне метеорных скоростей с ростом скорости, коэффициент ионизации увеличивается более чем на три порядка.

5. Впервые по результатам одновременных радиооптических наблюдений для двух групп метеоров со звёздной величиной: а) $0^m \div +8^m$ и б) $0^m \div -7.2^m$ и скоростями в диапазоне от 12 до 69 км·с⁻¹, рассчитаны фотометрические и ионизационные массы метеороидов. Анализ полученных фотометрических и ионизационных масс одних и тех же метеоров с использованием шкалы масс, полученной автором, показывает на хорошую согласованность между массами, вычисленными с использованием шкалы масс, полученной автором. Полученные результаты диссертантом (о шкале масс) дают основание исследователям физики метеороидов использовать данную шкалу для интерпретации массива данных радиолокационных наблюдений метеоров, полученных на разной аппаратуре.
6. Изучен механизм разрушения метеороидов и определены плотности поточных и спорадических метеороидов на основании данных параллельных радиотелевизионных и фото-радиолокационных наблюдений метеоров. Получено, что по сравнению с плотностями метеороидов из тех же потоков (ярких фотографических метеоров с массами $M > 1$ г), мелкие метеороиды более однородны по структуре. Наиболее плотными среди изученных слабых метеоров представляются Геминиды и Южные δ - Акварида, что соответствует прочному и плотному кометному материалу, а наименьшая объёмная плотность, соответствующая материалу комет типа ША, получена для Орионид и Леонид.

Вклад авторов.

Концептуализация, М.Н.; методология, М.Н.; программное обеспечение, не применимо; валидация, М.Н.; формальный анализ, М.Н.; исследование, М.Н.; ресурсы, Х.Х.; кураторство данных, М.Н.; написание оригинального текста, М.Н.; написание и редактирование, М.Н.; визуализация, М.Н.; руководство, М.Н.; администрирование проекта, М.Н.; привлечение финансирования, не применимо. Все авторы ознакомлены с опубликованной версией рукописи и согласны с ней.

Authors' contribution.

Conceptualization, M.N.; methodology, M.N.; software, not applicable; validation, M.N.; formal analysis, M.N.; investigation, M.N.; resources, M.N.; data curation, M.N.; writing—original draft preparation, M.N.; writing—review and editing, M.N.; visualization, M.N.; supervision, M.N.; project administration, M.N.; funding acquisition, not applicable. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Источник финансирования.

Это исследование не получало внешнего финансирования.

Funding source.

This study did not receive external funding.

Соответствие принципам этики.

Это исследование не требовало этического одобрения, так как оно не включало исследования с участием людей.

Ethics approval.

This study did not require ethical approval, as it did not include human studies.

Информированное согласие на публикацию.

Письменное информированное согласие было получено от всех участников исследования для публикации данной статьи.

Consent for publication.

Written informed consent was obtained from all the study participants for the publication of this article.

Заявление о доступности данных

Мы призываем всех авторов статей, опубликованных в журнале, делиться своими исследовательскими данными. Данные, поддерживающие результаты данного исследования, доступны по запросу у авторов. Если новые данные не были созданы или данные недоступны из-за

конфиденциальности или этических ограничений, необходимо предоставить соответствующее заявление.

Data Availability Statement

We encourage all authors of articles published in the journal to share their research data. Data supporting the results of this study is available upon request from the authors. If no new data has been created or the data is unavailable due to confidentiality or ethical restrictions, an appropriate statement must be provided.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Институту астрофизики Национальной академии наук Таджикистана за предоставленные ресурсы и поддержку в проведении исследования. Также благодарим всех коллег и сотрудников Гиссарской астрономической обсерватории за помощь в сборе данных и техническую поддержку.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Institute of Astrophysics of the National Academy of Sciences of Tajikistan for the resources and support provided in conducting the research. We would also like to thank all our colleagues and staff at the Hisar Astronomical Observatory for their help in data collection and technical support.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Сокращения

HisAO Гиссарская астрономическая обсерватория

V_{∞} Внеатмосферная скорость

Литература

- [1] Fujiwara, Y. Simultaneous observations of meteors with the radar and TV systems / Y. Fujiwara, M. Ueda, T. Nakamura, M. Tsutsumi // *Earth, Moon, and Planets.* – 1995. – V. 68. – P. 277–282.
- [2] Nishimura, K. High sensitivity radar-optical observations of faint meteors / K. Nishimura, T. Sato, T. Nakamura, M. Ueda // *Proceedings.* – 2001. – P. 1877–1884.
- [3] Pupillo, G. Radio-optical observations of meteors by BLM radar: preliminary results / G. Pupillo, G. Cevolani [et al.] // *Mem. S.A. It. Suppl.* – 2007. – V. 11. – P. 100–102.
- [4] Michell, R. G. Simultaneous optical and radar observations of meteor head-echoes utilizing SAAMER / R. G. Michell, D. Janches, M. Samara [et al.] // *Planet. Space Sci.* – 2015. – V. 118. – P. 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.04.018>.
- [5] Edwards, W. N. Infrasonic observations of meteoroids: preliminary results from a coordinated optical-radar-infrasound observing campaign / W. N. Edwards, P. G. Brown, P. J. Weryk, D. O. Revelle // *Earth, Moon, and Planets.* – 2008. – V. 102. – P. 221–229.
- [6] Weryk, R. J. Simultaneous radar and video meteors / R. J. Weryk // *Electronic Thesis and Dissertation Repository.* – 2012. – № 1021. 240 p. URL: <https://ir.lib.uwo.ca/etd/1021>
- [7] Li, G. Z. First results of optical meteor and meteor trail irregularity from simultaneous Sanya radar and video observations / G. Z. Li, B. Q. Ning, A. Li [et al.] // *Earth Planet. Phys.* – 2018. – V. 2. – P. 15–21. <https://doi.org/10.26464/epp2018002>.
- [8] Ohsawa, R. Relationship between radar cross section and optical magnitude based on radar and optical simultaneous observations of faint meteors / R. Ohsawa, A. Hirota, K. Morita [et al.] // *Planetary Space Science.* – 2020. – V. 194. – P. 105011. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.105011>.
- [9] Tarnecki, L. K. Mass estimation from simultaneous optical and radar meteor observations / L. K. Tarnecki, R. A. Marshall, P. Brown, G. Stober // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* – 2024. – V. 129. – P. 032281. <https://doi.org/10.1029/2023JA032281>.
- [10] Нарзиев, М. Вариации свечения и ионизации вдоль следа одних и тех же метеоров / М. Нарзиев // *Радиотехника.* – 2016, – Вып.184, – С.53-58.
- [11] Лебединец, В. Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Метеоры / В. Н. Лебединец. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 246 с.

- [12] Бибарсов, Р. Ш. Определение масс и плотностей метеорных тел по радиолокационным наблюдениям с одного пункта / Р. Ш. Бибарсов, М. Нарзиев, Р. П. Чеботарев // *Астрономический вестник*. – 1990. – Т. 24. – № 4. – С. 326–332.
- [13] Орик, Е. J. Physics of meteor flight in the atmosphere / Е. J. Orik. – N. Y.: Interscience Publ., 1958. – 474 p.
- [14] Тохтасьев, В. С. Вероятность ионизации в метеорных следах / В. С. Тохтасьев // *Метеорное распространение радиоволн*. – Казань: Изд-во КГУ, 1970. – № 7. – С. 33–49.
- [15] Коновалова, Н. А. О механизме разрушения и физических характеристиках совместных радио-оптических метеороидов / Н. А. Коновалова, М. Нарзиев // *Радиотехника*. – 2010. – № 160. – С. 118–123.
- [16] Лебединец, В. Н. Оценка плотности дробящихся метеорных тел по наблюдаемому торможению метеоров / В. Н. Лебединец // *Доклады АН СССР*. – 1986. – Т. 291. – № 2. – С. 313–316.
- [17] Бабаджанов, П. Б. Плотность и пористость метеороидов / П. Б. Бабаджанов, Г. И. Кохирова // *Доклады АН Республики Таджикистан*. – 2006. – Т. 49. – № 6. – С. 493–500.
- [18] Бенюх, В. В. О минералогической плотности метеорных тел в некоторых потоках / В. В. Бенюх // *Астрономический вестник*. – 1974. – Т. 8. – № 2. – С. 96–101.
- [19] Нарзиев, М. Общность в форме распределения блеска и ионизации вдоль следа метеоров разных диапазонов интенсивностей / М. Нарзиев, Ш.Ш. Шоёкубов // *Радиотехника*. – 2020. – Вып.201, – С.72-77.

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельным лицам. Авторы и участники, а Журнал и редакторы. Журнал и редакторы не несут ответственности за любой ущерб, нанесенный людям или имуществу, возникшее в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.

Disclaimer of liability/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications belong exclusively to individuals. The authors and participants, and the Journal and the editors. The journal and the editors are not responsible for any damage caused to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products mentioned in the content.