

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА  
ИНСТИТУТ АСТРОФИЗИКИ**

УДК 523. 503+523.682+523.53+523.031

На правах рукописи



**НАРЗИЕВ МИРХУСЕН**

**ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-КИНЕМАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
МЕТЕОРОИДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМБИНИРОВАННЫХ  
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени

доктора физико-математических наук

специальность: 1.3.42 - Астрометрия и небесная механика

Душанбе – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>13</b>
<b>ГЛАВА 1. АБЛЯЦИЯ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ. ФОРМИРОВАНИЕ И РАСПАД МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ .....</b>	<b>24</b>
1.1. Процессы, сопровождающие полёт метеорного тела в атмосфере Земли. Абляция метеорного тела.....	24
1.2. Уравнения свечения и ионизации с учётом различных форм абляции метеоров .....	29
1.3. Рассеяние радиоволн на метеорных следах и некоторые характеристики радиоэха от них .....	38
1.4. Влияние процессов деионизации на длительность радиоотражения .....	42
<b>ГЛАВА 2. ОПТИКО-РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ ВДОЛЬ СЛЕДОВ МЕТЕОРОВ РАЗНЫХ СКОРОСТЕЙ .....</b>	<b>47</b>
2.1. История, состояние и перспективы комбинированных методов исследования метеоров в Земной атмосфере .....	49
2.2. Обзор, нынешнее состояние исследования метеоров по результатам одновременных радиооптических наблюдений .....	56
2.3. Комплекс аппаратуры Института астрофизики НАНТ для оптических и радиолокационных наблюдений метеорных явлений в Земной атмосфере ....	64
2.4. Поиск одновременно зарегистрированных радиотелевизионных метеоров. Определение азимута и зенитного расстояния зеркальных точек.....	79
2.5. Результаты комплексных радиотелевизионных (ТВ) наблюдений метеорных потоков в Таджикистане.....	83

2.6. Отождествление одновременно зарегистрированных радиотелевизионных метеоров и методика нахождения отражающей точки на следе метеора .....	84
2.7. Методика фотометрической редукции данных радиотелевизионных (ТВ) наблюдений метеоров в Таджикистане .....	89
2.8. Результаты определения кривых блеска метеоров по данным комбинированных радиотелевизионных наблюдений.....	93
2.9. Вариации свечения и ионизации вдоль следа одних и тех же метеоров при разных скоростях .....	96
2.10. Метод определения кривой ионизации метеора.....	98
2.11. Результаты совместных фото-радиолокационных наблюдений поиска метеоров в Таджикистане.....	101
2.12. Исследование свечения и ионизации метеоров по результатам комбинированных радиооптических наблюдений и данных лабораторного моделирования .....	107
2.13. Свечения и ионизация при различных значениях скоростей метеоров	114
2.14. Общность в форме распределения блеска и ионизации вдоль следа метеоров разных диапазонов интенсивностей.....	122
2.15. Распределение интенсивности свечения вдоль следа метеоров разных метеороидных популяций .....	129
2.16. Определение высот начала, максимума и конца следа метеороидов на основе данных комбинированных радиолокационных и телевизионных наблюдений.....	136
2.17. Определение масс и плотностей метеорных тел по радиолокационным наблюдениям с одного пункта.....	141
<b>ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ</b>	
<b>МЕТЕОРОИДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМБИНИРОВАННЫХ</b>	
<b>ОПТИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ .....</b>	<b>145</b>

3.1. Определение масс метеорных тел по кривым блеска метеоров .....	146
3.2. О массе параллельных радиооптических слабых метеоров по величине интенсивности свечения и ионизации на высоте зеркальной точки .....	149
3.3. Фотометрические и ионизационные массы одних и тех же ярких оптических и радиолокационных метеоров .....	157
3.5. Определение плотности метеороидов. Применение критерия конечных высот для определения плотности параллельных радиооптических метеороидов .....	166
3.6. О дроблении и плотностях метеорных тел по данным комбинированных радиооптических наблюдений .....	172
3.7. Оценка физических характеристик суперболида Таджикистан по результатам комбинированных спутниковых и наземных наблюдений .....	182
3.8. Распределение метеорных тел по массам в некоторых метеорных потоках .....	193

**ГЛАВА 4. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАНТОВ, СКОРОСТЕЙ, ОРБИТ И ДАННЫХ АТМОСФЕРНЫХ ТРАЕКТОРИЙ МЕТЕОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИООПТИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ .....**

4.1. Измерение радиантов и скоростей метеоров по результатам радиолокационных наблюдений.....	203
4.2. Аппаратура для измерений радиантов и скоростей метеоров пеленгационно-временным радиометодом .....	208
4.3. Измерение скоростей метеоров по результатам совместных радиотелевизионных наблюдений .....	209
4.4. Радианты, скорости и орбиты метеоров по результатам радиотелевизионных наблюдений .....	215

4.5. Результаты наблюдений и методика измерений радиантов и скоростей метеоров пеленгационно-временным радиометодом .....	221
4.6. Обработка наблюдательного материала для определения горизонтальных координат зеркально-отражающей точки и высоты метеора.....	223
4.7. Обработка наблюдательного материала для определения скорости и горизонтальных координат радианта метеора .....	224
4.8. Вычисление элементов орбит .....	226
4.9. Методика вычисления данных атмосферной траектории метеора.....	230
4.10. Распределение радиантов, скоростей, элементов орбит и данные атмосферных траекторий 8916 радиометеоров .....	232
<b>ГЛАВА 5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ И АССОЦИАЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ТАДЖИКИСТАНЕ .....</b>	<b>240</b>
5.1. О формировании метеорных роёв, потоков и ассоциаций метеороидов	240
5.2. Вклад визуальных, фотографических, видео-, телевизионных и радионаблюдений в изучение метеорных потоков .....	243
5.3. Идентификация метеорных потоков и ассоциаций по результатам радиолокационных наблюдений в Таджикистане .....	245
5.4. Распределение метеорных потоков и ассоциаций по элементам орбит .	249
5.5. Изучение физических характеристик метеороидов в потоках и ассоциациях .....	254
5.6. Плотность метеорных тел потоков-близнецов и оценка величины их пористости .....	256
<b>ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....</b>	<b>261</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>266</b>
<b>ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....</b>	<b>300</b>

## **ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

Р-Тв – Радиотелевизионные

ФР – Фотографические и радиолокационные

КОР – Комплексные оптические и радиолокационные

КРОН – комбинированные радиооптические наблюдения

КФКСМ – комплексные физико-кинематические свойства метеора

РОН – Радиооптические наблюдения

СС – Солнечная система

ГисАО – Гиссарская астрономическая обсерватория

РЛС – Радиолокационная станция

ИА НАНТ – Институт астрофизики Национальной академии наук

Таджикистана

МИР-2 – Метеорный исследовательский радиолокатор второго поколения

АВХ – амплитудно-временные характеристики

ИДМ – импульсно-дифракционный метод

ПВР - пеленгационно-временной радиометод

АКО - астероидно-кометная опасность

СМОР – Канадский радар радиометеорных орбит

ИМО – Международная метеорная организация

IAU MDC (ЦМД МАС) – Центр метеорных данных Международного астрономического союза

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы (предмета) исследования.** Освоение космического пространства неразрывно связано с исследованием природы малых тел, включая метеороиды и их распределение в околоземной и межпланетной среде. Метеороиды являются одними из самых многочисленных представителей малых тел и содержат первичную информацию о состоянии вещества, из которого сформировалась Солнечная система. Метеороиды при вторжении в земную атмосферу со скоростями от 11,2 до 72,8 км/с испытывают соударения с молекулами атмосферы, нагреваются до температур 2000 К и более, при этом происходят плавление, кипение и различные формы абляции (включая квазинепрерывную, осколочную, вспышечную, прогрессивную, либо одновременно протекают все формы дробления). Конечной формой абляции метеороида и его фрагментов является испарение вещества с их поверхности. Испарившиеся атомы и молекулы при дальнейших столкновениях с атомами и молекулами воздуха взаимно диссоциируются, возбуждаются, ионизируются наряду с атомами и молекулами окружающей атмосферы и оставляют за собой световые и ионизационные следы, которые регистрируются оптическими и радиолокационными средствами наблюдений. В настоящее время один из важнейших аспектов исследования метеороидов основан на результатах одновременных радиооптических наблюдений. При этом существенно расширяется объём получаемой информации не только о физико-кинематических и динамических свойствах метеороидов, но и о процессах, протекающих при вторжении метеороидов в земную атмосферу.

Исследование метеоров как в оптическом, так и в радиолокационном диапазоне становится всё более важным. Оно оказывает влияние на такие различные области науки, как геофизика, космология, исследование космического пространства, распространение радиоволн, обеспечение безопасности полётов космических миссий, а также на решение ряда теоретических и прикладных задач и т.д. В частности, изучение метеороидов и их взаимодействия с атмосферой Земли и ионосферой может способствовать

решению некоторых проблем, важных для жизни людей. Среди многочисленных факторов, вызывающих человеческие жертвы и разрушения на Земле, особенно опасны такие явления, как землетрясения и проникновение в атмосферу Земли метровых и дециметровых метеороидов, которые сосредоточены в некоторых метеорных потоках, ассоциациях [1–3] и группах метеоритообразующих метеороидов [4] и могут приземляться с разрушительными последствиями. Особенно опасны такие явления для тех областей Земли, где расположены атомные станции, химические заводы, дамбы (плотины) гидроэлектростанций и плотно населённые жилые районы. Эти события могут приводить к региональным разрушениям и несчастным случаям с людьми, что было наглядно продемонстрировано падением Челябинского метеорита 15 февраля 2013 года в России [5]. Известно, что активное влияние метеороидов на верхнюю атмосферу вызывает первичное накопление ионов  $M^+$  [6-8]. Следовательно, исследование физико-кинематических свойств метеороидов является неотложной задачей как в прикладных, так и в фундаментальных исследованиях.

Исследование комплексных физико-кинематических свойств метеороидов комбинированным радиооптическим методом может помочь в понимании генезиса Солнечной системы и процессов, происходивших после образования малых тел, то есть в изучении космогонии Солнечной системы, их свойств, происхождении и эволюции, а также в определении природы их родительских объектов - комет и астероидов. Чрезвычайно важны организация наблюдений, сбор и накопление наблюдательного материала, охватывающего широкий диапазон скоростей и яркостей метеоров по результатам одновременных радиооптических наблюдений. Подобные данные позволяют: а) определить предельно регистрируемую звёздную величину заданного радиокомплекса; б) калибровать физико-кинематические данные радионаблюдений относительно оптических; в) исследовать взаимосвязь интенсивностей процессов свечения и ионизации со скоростью (то есть установить шкалы масс и радиовеличины и т.д.); г) обеспечить переход данных

одновременных наблюдений в единую систему, что весьма необходимо для определения параметров распределения метеорных тел по массам, оценки плотности падающего потока метеороидов на Землю и т.д.; д) исследовать ряд вопросов геофизики, космонавтики и космогонии Солнечной системы.

**Степень изученности научной темы.** Учитывая чрезвычайную актуальность данных радиооптических наблюдений для решения задач метеорной астрономии, геофизики и в области обеспечения безопасности полётов космических миссий, в последние три десятилетия существенно возрос интерес к проведению целого ряда различных научно-технических экспериментов, о чём свидетельствуют следующие публикации: [9–20, 21–29]. Однако в подавляющем большинстве публикаций представляется информация лишь для одной зеркально-отражающей точки, что недостаточно для симультанного исследования вариаций свечения и ионизации вдоль следа метеоров. Ранее полученные сведения о кривых свечения и ионизации в работе Cook et al., 1973 [29], а также данные о массах и плотностях, полученные Верниани и др. [30-33], относятся к метеорам слабее от  $+6^m$  до  $+12^m$ . Вместе с тем форма индивидуальных ионизационных кривых в случае слабых метеоров была задана в виде подходящей параболы, и при определении плотности в работах Верниани и др., а также масс и плотностей в работах Бибарсова, Чеботарёва, Гартмана и др. [34-36] не учитывалось влияние дробления и других факторов, что искажает полученные конечные результаты. Ныне экспериментальные кривые ионизации, полученные в работах [37-41], основаны на редукции данных головного эхо, а кинематические свойства, приведённые в ранее опубликованных Каталогах, не калиброваны с результатами оптических наблюдений.

Исходя из вышеизложенного, докторантом в диссертации поставлен ряд целей, достижение которых существенно расширяет наши знания о природе метеороидов и их распределении в Солнечной системе. К ним, прежде всего, относятся:

А) Решение таких важных и до конца не решённых проблем метеорной астрономии, как определение физических свойств радиометеоров, наблюдаемых с одного пункта, исследование параметра распределения метеорных тел по массам  $S$ , расчёт притока метеорного вещества и плотности потока метеороидов, падающих на Землю, исследование строения, возраста и происхождения метеорных тел и т.д., не представляется возможным без правильной интерпретации и точного определения значений радиантов, скоростей и орбит, а также без изучения таких параметров атмосферной траектории, как кривые блеска и ионизации, определения фотометрических и ионизационных масс, плотности и структуры метеороидов. Все ранее проводимые оценки параметра распределения метеорных тел по массам радиометодом были основаны на изучении интегрального распределения метеоров по амплитудам или по длительностям радиоэхо, полученного с одного пункта. Однако:

1) современная физическая теория метеоров [7, 42] не пригодна для интерпретации данных радионаблюдений метеоров с одного пункта;

2) при определении параметра  $S$  предполагалось, что высоты зеркальной точки совпадают с высотами максимума свечения или ионизации;

3) распределение метеороидов по массам тождественно с распределением по длительностям или амплитудам радиоэхо. Однако допустимость таких предположений нуждается в экспериментальном подтверждении.

Б) В настоящее время задача совершенствования методов исследования оптических и радиолокационных наблюдений относится к числу наиболее актуальных проблем метеорной астрономии. Особенно актуально совершенствование методов изучения метеоров по результатам радионаблюдений, так как данный способ является единственным средством получения информации о комплексных физико-кинематических свойствах метеороидов, наблюдаемых в дневное время суток. Ранее, во второй половине XX века, для исследования радиантов, скоростей и орбит метеоров по нескольким международным и национальным программам проводились

наблюдения в Джодрелл-Бэнк, Гарварде, Оттаве, Аделаиде, Харькове, Казани, Обнинске, Могачишо [43-50] и т.д. Учитывая ключевую роль данных радиолокационных наблюдений, в настоящее время продолжают конструирование и развёртывание более высокочувствительных и мощных радиолокационных станций, таких как средне- и верхнеатмосферный радар Arecibo 430 MHz UHF radar и Arecibo 46.8 MHz common-volume VHF radar, среднеатмосферная радиолокационная система ALOMAR MAARSY, Южно-Аргентинская метеорная станция (SAAMER), радар некогерентного рассеяния Poker Flat (PFISR) и чувствительный радар некогерентного рассеяния (RISR) [51-59].

На основе этих наблюдательных материалов, полученных на большинстве станций, импульсно-дифракционным методом (ИДМ) были рассчитаны координаты радиантов и скорости нескольких тысяч радиометеоров, результаты чего отражены в десятках научных статей и ряде каталогов. Однако эти каталоги не содержат информации о высотах и физических свойствах метеороидов, а ИДМ, как правило, позволяет обработать лишь около 15–25% обнаруженных метеоров [60], что приводит к потере значительной части наблюдательного материала. Исключение столь большого количества из обработки искажает реальную картину распределения радиантов метеоров на небесной сфере.

Более того, погрешность в определении зенитного угла радианта  $\sigma Zr$  ИДМ возрастает в 2–3 раза при зенитных углах 60–70°, а при дальнейшем увеличении зенитного угла растёт ещё быстрее, так что измерения теряют смысл. Поэтому южные радианты, имеющие в момент верхней кульминации зенитные углы более 70°, практически невозможно измерять ИДМ. Измерения радиантов и скоростей метеоров на основе нового пеленгационно-временного радиометода (ПВР) в диссертации превосходят ИДМ как по точности (в 1,7 раза), так и по чувствительности (в 3 раза), исключая недостатки, присущие ИДМ.

В) В рамках проблемы астероидно-кометной опасности важной задачей является поиск новых потоков и ассоциаций метеороидов, наблюдаемых наземными методами. Выявление новых потоков и ассоциаций метеороидов имеет важное значение для изучения метеороидной обстановки в окрестностях Земли, а также для поиска их родительских тел - комет и астероидов - в целях обеспечения безопасности полётов космических аппаратов и спутников. Однако физическая природа большинства потоков и ассоциаций метеороидов в настоящее время ещё не выяснена.

Г) Немаловажную ценность представляет сбор и анализ данных о кривых блеска и ионизации метеоров в широком диапазоне звёздных величин и для разных популяций. К настоящему времени на основе результатов базисных наземных оптических наблюдений метеоров камерами болидной сети [61, 62], камерами НАФА [63-65], светосильной камерой Супер-Шмидта [66, 67], телевизионными камерами [68-70], комплексом радиолокационной аппаратуры МИР-2 [71], а также по результатам комплексных наблюдений болидов, завершившихся падением метеоритов [72], накоплено определённое количество кривых блеска и ионизации, охватывающих широкий диапазон звёздных величин ( $+12^m \div -20^m$ ). Однако общность и различия между кривыми свечения и ионизации метеоров в широком диапазоне звёздных величин и разных популяций до настоящего времени остаются недостаточно изученными.

Д) Для взаимной редукции и интерпретации данных оптических и радиолокационных наблюдений в широком диапазоне масс (особенно при определении параметра распределения метеорных тел по массам, оценке плотности падающего потока метеорных тел на Землю и т.д.), а также для сопоставления данных радиолокационных наблюдений с оптическими, необходимо знание зависимости шкалы радиовеличин от скорости метеоров. Однако имеющиеся в настоящее время данные носят разрозненный характер и относятся лишь к узким диапазонам скоростей, а вопрос зависимости радиовеличины от скорости остаётся одной из нерешённых проблем метеорной астрономии.

**Связь исследования с программами (проектами) и научной тематикой.** Тема диссертационного исследования соответствует Приоритетным направлениям научных и (или) научно-фундаментальных исследований, утверждённых в “Стратегии Республики Таджикистан в сферах науки, технологий и инноваций на период до 2030 года” (Решение Правительства Республики Таджикистан от 30 июня 2021 г., №263), и реализована в рамках проекта МНТЦ Т-2113 «Оптические и радиолокационные исследования физических свойств метеороидов различной массы» и государственных проектов. Исследование направлено на реализацию Плана мероприятий на 2020-2025 годы по реализации объявления 2020-2040 годов «Двадцатилетием изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере образования и науки», утверждённого Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июля 2020 года, №427.

### **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

#### **Цели исследования:**

- выявить совместно зарегистрированные радиооптические метеоры, исследовать вариации интенсивностей свечения и ионизации вдоль следа и определить фотометрические и ионизационные массы одних и тех же метеоров, а также выполнить калибровку результатов радионаблюдений с оптическими;
- изучить экспериментальные кривые ионизации метеоров, классифицировать наблюдаемые формы ионизационных кривых; исследовать расположение высоты точки зеркального радиоотражения относительно высоты максимума свечения и ионизации и разработать методику определения масс и плотностей метеоров, наблюдаемых с одного пункта;
- измерить радианты, скорости и орбиты совместных метеоров с применением нового пеленгационно-временного радиометода, впервые создать новый Каталог радиантов, скоростей, орбит и данных атмосферной траектории метеоров ярче  $+5^m$ , идентифицировать потоки и ассоциации метеороидов и изучить их физические свойства.

### **Задачи исследования:**

– отождествить совместно зарегистрированные метеоры фото-радиолокационным и радиотелевизионным методами на основе опубликованного сводного каталога фотографических метеоров и результатов первичных радиотелевизионных наблюдений метеоров;

– исследовать одновременные вариации интенсивности свечения и ионизации вдоль следа и изучить зависимости отношения интенсивности свечения к ионизации от скорости, определить шкалы радиовеличины и масс, вычислить фотометрические и ионизационные массы одних и тех же радиооптических метеороидов;

– получить экспериментальные кривые ионизации поточных и спорадических метеоров, классифицировать наблюдаемые формы отрезков и ионизационных кривых; исследовать расположение высоты точки зеркального радиоотражения относительно высоты максимума свечения и ионизации и разработать методику определения физических характеристик радиометеоров, наблюдаемых с одного пункта;

– изучить форму распределения блеска вдоль следа метеоров широких диапазонов звёздной величины и разных популяций;

– измерить скорость совместного радиотелевизионного метеора тремя способами: а) комбинированным R-TV, б) импульсно-дифракционным и в) впервые пеленгационно-временным радиометодом; создать новый каталог радиометеоров ярче +5 звёздной величины и исследовать распределение метеороидов по кинематическим и физическим свойствам;

– идентифицировать метеороиды, принадлежащие метеорным потокам и ассоциациям, по циклу годичных радиолокационных наблюдений метеоров в ГисАО, определить параметры распределения метеорных тел по массам в некоторых дневных и ночных метеорных потоках.

**Объектом исследования** являются данные совместно-зарегистрированных радиооптических и результаты базисных, ежемесячных, годичных наблюдений метеоров в Таджикистане.

**Предметом исследования** является изучение комплексных физико-кинематических свойств и данных атмосферных траекторий метеороидов на основе данных симультанных радиооптических и годичных базисных радиолокационных наблюдений метеоров.

**Теоретические основы исследования.** Теоретические основы диссертации составляют совокупность концепций, теорий и закономерностей небесной механики малых тел Солнечной системы, обеспечивающих методологическую базу работы. Исследование опирается на классические и современные представления теории разрушения метеороидов в атмосфере Земли, движения метеороидов и их принадлежности к метеорным потокам и ассоциациям, а также на критерии динамического сходства орбит Саутворта-Хокинса и Йопека. В качестве основного метода использованы одновременные радиооптические и базисные радиолокационные наблюдения метеоров, а также впервые использован новый метод - пеленгационно-временной радиометод, позволяющий исследовать распределение радиантов, скоростей и орбит метеороидов в небесной сфере. На основе анализа данных радиолокационных измерений радиантов, скоростей и орбит свыше 10600 метеоров, и применения методов кластеризации автором проведена идентификация 431 потоков и ассоциаций метеороидов, что подтверждает теоретическую и методологическую состоятельность исследования.

**Научная новизна исследования.** К основным научным результатам, относятся следующие:

1. **Выявлены** 8 совместных фото-радиолокационных метеоров за 1977–1980 гг., из которых 6 относятся к Персеидам, 1 - к потоку  $\delta$ -Акварид и 1 - к спорадическому фону. Метеор № 770954 имеет спектр, полученный методом мгновенной экспозиции, что является единственным случаем в мире, и 57 радиотелевизионных метеоров.

2. **Впервые** исследована вариация блеска и ионизации вдоль следа одних и тех же метеоров разных диапазонов скоростей. Показано, что ход вариации

интенсивности свечения и ионизации вдоль следа один и тех же метеоров удовлетворительно согласуется между собой.

3. **Изучена** взаимосвязь отношения интенсивности свечения к ионизации от скорости для двух групп метеоров по звёздной величине: а)  $0^m \div +8^m$  и б)  $-0^m \div -14^m$ . Впервые выявлено, что у метеоров слабее  $0^m$  звёздной величины с увеличением скорости и атомного веса (по данным лабораторного моделирования) логарифм отношения интенсивности свечения к ионизации уменьшается на порядок. Для метеоров ярче  $-0^m \div -8^m$   $\lg I/q$  остаётся постоянным и составляет  $-4,2$ .

4. **Установлены** шкалы масс и зависимости радиовеличины от скорости метеоров на основе объединённых данных одновременных оптических и радиолокационных наблюдений. Причем разница в шкале радиовеличины между двумя крайними группами скоростей метеоров составила  $1,7 \div 3^m$ .

5. Определены шкалы масс как для ярких ( $m > 0$ ), так и для слабых ( $8 \leq m \leq 0$ ) радиометеоров. Рассчитаны впервые фотометрические и ионизационные массы радиооптических метеороидов, которые согласуются между собой.

6. **Получены** экспериментальные ионизационные кривые 1100 метеороидов, проведена классификация наблюдаемых форм отрезков и ионизационных кривых. Впервые изучено расположение высоты зеркальной точки относительно высоты максимума ионизации. Оказались, что высоты зеркальных точек на 0,4 км ниже высот максимума ионизации. Разработана методика определения физических характеристик радиометеоров, наблюдаемых с одного пункта.

7. **Выявлены** общие закономерности и различия между кривыми блеска и ионизации метеоров в широком диапазоне звёздных величин ( $+8,5^m \div -18^m$ ) и разных метеорных популяций. Установлено, что параметр  $R$  ( $R = (H_b - H_m)/(H_b - H_e)$ ), где  $H_b$ ,  $H_m$  и  $H_e$  - высоты начала, максимума и конца следа) на первой половине гистограммы распределения метеоров возрастает экспоненциально, а на второй половине убывает более плавно. Для болидов  $R$  находится в диапазоне  $0,7-0,8$ , тогда как для ТВ- и Супер-Шмидтовских метеоров при

переходе от популяции типа А к С2 и D наблюдается смещение положения максимума интенсивности свечения в гистограмме распределения по параметру R.

8. **Измерены** впервые скорость совместного радиотелевизионного метеора тремя способами: а) комбинированным R-TV, б) импульсно-дифракционным и в) впервые пеленгационно-временным методом. Скорость, измеренная комбинированным R-TV, оказалась на 1,5–3 км/с выше, чем скорость тех же метеоров, измеренная радиометодами.

9. **Создан впервые** новый каталог радиантов, скоростей, орбит и данных атмосферных траекторий 8916 радиометеоров ярче +5<sup>m</sup>. Проведен анализ распределения радиантов, скоростей, орбит и физических свойств метеоров на небесной полусфере. Выявлено, что радианты метеоров ярче +5<sup>m</sup> в северной части небесной полусферы распределены почти равномерно.

10. **Идентифицированы** 431 метеорных потоков и ассоциаций на основе анализа данных ежемесячных и годовых измерений радиантов, скоростей и орбит 10 913 радиометеоров, наблюдаемых в Таджикистане, при этом около половины потоков выявлены впервые. Определены параметры распределения метеорных тел по массам S для дневных потоков η-Акварид, о-Цетид, Писцид, ν-Писцид и Ариетид, а также для ночных потоков δ-Акварид, Квадрантид, Геминид, Северных и Южных δ-Акварид, i-Акварид.

11. Проведена калибровка данных радионаблюдений относительно оптических. Полученные результаты сопоставлены с данными других авторов и результатами наблюдений с космических аппаратов и опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РТ.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты комбинированных радио-оптических наблюдений метеоров в Таджикистане;

- изучение вариаций интенсивности свечения и ионизации вдоль следов метеоров и исследование отношения интенсивности этих процессов от скорости и химсостава, определение шкалы радио величины и масс ярких и

слабых метеоров, результаты вычислений фотометрических и ионизационных масс одних и тех же метеороидов;

- данные ионизационных кривых метеоров, их квалификации по форме, исследование месторасположения высоты точки зеркального радиоотражения и разработка методики определения физических характеристик радиометеоров, наблюдаемых с одного пункта;

- результаты анализа общности и различий в форме распределения интенсивности свечения и ионизации вдоль следов метеоров широких диапазонов звёздной величины и разных популяций;

- измерение скорости метеоров: а) комбинированным R-TV и б) впервые пеленгационно-временным радиометодами, создание нового Каталога радиометеоров ярче  $+5^m$  и исследование распределения метеороидов по кинематическим и физическим свойствам;

- результаты идентификации метеорных потоков и ассоциаций и определение параметров распределения метеорных тел по массам в основных ежегодных дневных и ночных метеорных потоках.

#### **Теоретическая и практическая значимость исследования:**

- Выявлены исходные уравнения ионизации метеороидов с учётом КНД, осколочного и прогрессивного дробления.

- Результаты комбинированных оптических (фотографических, телевизионных, спектральных) и радиолокационных наблюдений метеоров полученные впервые докторантом, представляют ценнейший наблюдательный материал как в области метеорной астрономии, так и в области геофизики и решения ряда теоретических и практических аспектов исследования.

- Создан новый «Каталог радиантов, скоростей, орбит и атмосферных траекторий 8916 радиометеоров, наблюдаемых в Таджикистане». Каталог зарегистрирован для использования в Базе данных метеоров Международного астрономического союза (МАС).

- Данные о физико-кинематических характеристиках метеороидов, включая распределение метеоров в экваториальных, эклиптических и

гелиоцентрических координатах, а также по скоростям и элементам орбит, массе и плотности в небесной сфере, являются ценнейшим наблюдательным материалом. Эти данные представляют интерес не только в области метеорной астрономии, космонавтики и космогонии Солнечной системы, но также необходимы для решения задач обеспечения безопасности космических полётов, прогнозирования столкновений опасных космических объектов с Землёй и изучения процессов формирования Солнечной системы.

- Информация о физических свойствах метеороидов в потоках и ассоциациях важна для исследования их структуры, определения параметров распределения метеорных тел по массам, оценки плотности падающего потока метеороидов на Землю и других аспектов, связанных с метеорной активностью.

- Создан новый «Каталог радиантов, скоростей, элементов орбит и атмосферных траекторий радиометеоров, наблюдаемых в Таджикистане», зарегистрированный в ЦМД МАС, в него включены результаты одновременных фото-радиолокационных (ОФР) и радиотелевизионных (Р-ТВ) наблюдений метеоров в Таджикистане, экспериментальные данные кривых свечения и ионизации одних и тех же метеоров ярче  $+5^m$ ; физико-кинематические свойства метеороидов, зарегистрированных оптико-радиолокационным методом; данные о шкалах масс ярких и слабых метеороидов; параметры распределения метеорных тел по массам в дневных и ночных метеорных потоках; распределение метеоров по эклиптическим и гелиоцентрическим координатам, по скоростям и элементам орбит на небесной сфере, что представляет собой ценный наблюдательный материал не только для метеорной астрономии, космонавтики и космогонии Солнечной системы, но и является необходимым для обеспечения безопасности полётов космических миссий, прогнозирования возможных столкновений опасных космических объектов с Землёй, а также для решения вопросов формирования и эволюции Солнечной системы.

**Степень достоверности результатов диссертации.** Выводы и результаты работы обеспечены на основе фактического наблюдательного оптико-

радиолокационного материала и данных многостанционных радиолокационных наблюдений метеоров в ГисАО, опубликованных в международных и национальных журналах. В частности, опубликованный «Каталог радиантов, скоростей, орбит и атмосферных траекторий 8916 радиометеоров, наблюдаемых в Таджикистане» зарегистрирован для использования в Центре метеорных данных Международного астрономического союза (ЦМД МАС). Полученные результаты сопоставлялись с данными других авторов и с результатами, полученными с космических аппаратов, опубликованы в рецензируемых изданиях, включённых в перечень ВАК. Разработанные автором новые методы редукции данных наблюдений в ИА НАНТ, а также научные результаты, были апробированы и доказали высокую степень достоверности и надёжности.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Тема диссертационного исследования полностью соответствует Паспорту номенклатуры специальностей ВАК при Президенте Республики Таджикистан по специальности 1.3.42 – Астрометрия и небесная механика, в частности следующим пунктам:

*п.2. Разработка методов определения положения в пространстве и движения небесных тел. Сюда относятся все методы, основанные на наземных и внеатмосферных астрономических наблюдениях, включая радиолокацию и лазерную локацию, а также определение массы, формы и гравитационных полей небесных тел на основе анализа наблюдений с Земли и данных космических аппаратов.*

*п.4. Исследование динамической эволюции систем небесных тел на различных временных масштабах.*

*п.7. Интерпретация результатов изучения движения небесных тел с целью построения геометрической, кинематической и физической картины мира.*

Содержание и результаты докторской диссертации полностью соответствуют Паспорту специальности 1.3.42 – Астрометрия и небесная

механика.

### **Личный вклад соискателя учёной степени в подготовке диссертации.**

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в организацию и проведение наблюдений, получение и анализ наблюдательного материала, поиск и выявление совместно зарегистрированных оптико-радиолокационных метеоров, редукцию данных и исследование вариаций интенсивности свечения и ионизации вдоль следов одних и тех же метеоров с разными скоростями. Автор разработал методику определения масс, плотностей, звёздных величин и величин линейной электронной плотности метеоров, руководил работой лаборантов и непосредственно участвовал в редукции данных около 11000 радиометеоров, расчёте исходных данных, создании программ для определения кинематических и физических характеристик метеороидов, а также в создании и оформлении Каталога 8916 радиометеоров и идентификация метеорных потоков и ассоциаций. Подготовка к публикации наблюдательных материалов осуществлялась как самостоятельно, так и совместно с соавторами, при этом вклад диссертанта является определяющим. Представленные в диссертации результаты получены преимущественно автором.

### **Апробация и внедрение.**

Основные результаты диссертации докладывались на семинаре «Малые тела СС» Института астрофизики НАНТ, а также на следующих региональных и международных конференциях и симпозиумах: Всесоюзном симпозиуме «Метеорные тела в межпланетном пространстве и земной атмосфере» (Казань, 1980 г.); Всесоюзных конференциях «Физика и динамика малых тел Солнечной системы» (Душанбе, 1982 г.), «Метеорное вещество в атмосфере Земли и межпланетном пространстве» (Суздаль, 1984 г.); «Взаимодействие метеорного вещества с атмосферой Земли» (Кацивели, 1986 г.); «Физика и динамика комет, астероидов и метеорного вещества» (Душанбе, 1987 г.); Международном симпозиуме ГЛОБМЕТ-2 (Казань, 1988 г.); Международном научном семинаре, посвящённом 90-летию со дня рождения профессора Б. Л. Кащеева

(Харьков, 2009 г.), International Conferences of Meteoroids «The Smallest Solar System Bodies. NASA/CP-2011-216469» (Breckenridge, Colorado, USA, 2011 г.); Международной конференции (Красноярск, 2011 г.), International Conferences «Dust, Atmosphere and Plasma Environment of the Moon and Small Bodies (DAP-2012)» (Boulder, Colorado, 2012 г.); Международной конференции «Околоземная астрономия» (Краснодар, 2013 г.); International Conferences "On Lunar and Planetary Science Conference» (Woodlands, Texas, 2012 г.); Международной конференции Meteoroids (Poznan, Poland, 2013 г.); 43<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly (Moscow, Russia, 2014 г.); 45<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference (2014 г.); Международной конференции «Околоземная астрономия» (Терскол, 2015 г.); Международной научной конференции «Роль молодых учёных в развитии науки, инноваций и технологий» посвящённой 25-летию Государственной независимости Республики Таджикистан (Душанбе, 2016 г.); Международной конференции "Comets, Asteroids, Meteors, Meteorites, Astroproblemes, Craters» (Винница, Украина, 2017 г.); Международной конференции Околоземная астрономия» (Мариуполь, Украина, 2017 г.); X International Conference «Near-Earth Astronomy-2017» (Krasnodar, Russia, 2017 г.); International Conference САММАС-2017 (Винница, Украина, 2017 г.); On the 3<sup>rd</sup> COSPAR Symposium (ICC) (Jeju, South Korea, 2017 г.); VI Международной конференции «Современные проблемы физики» (Душанбе, 2018 г.); Международной научно-практической конференции «Электроэнергетика: Проблемы и перспективы развития энергетики региона» (Душанбе, 2018 г.); Научно-практической конференции с международным участием (Москва, 2022 г.); Международной научно-практической конференции «Современные проблемы малых тел Солнечной системы – текущее состояние и перспективы»; посвящённой 90-летию Института астрофизики НАН Таджикистана (Душанбе, 2022 г.); Международной научно-практической конференции «Современные проблемы астрофизики»; посвящённой «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования (2020-2040 годы)» и 80-летию чл.-корр. НАНТ, д.ф.-м.н., профессора

Ибадинова Х.И. (Душанбе, ТНУ, 2024 г.); International symposium “The fifteenth Moscow solar system symposium (15MS<sup>3</sup>-SB-PS-12) (Москва, 2024 г.); II International Conference Fundamental and Applied Research in Physics (NUUz, 2025 г.); Научно-практической конференции с международным участием (Москва, 2025 г.); XXIX Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (РРВ’2025) (Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ), Россия, 2025 г).

**Публикации по теме диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 52 печатных работах, из которых 1 монография, 29 статей опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК при Президенте Республики Таджикистан, и 22 статьи – в сборниках трудов конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы. Она содержит 307 страниц машинописного текста, включает 44 рисунка и 39 таблиц. Список литературы включает 307 наименований зарубежных и отечественных авторов.

## ГЛАВА 1. АБЛЯЦИЯ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ.

### ФОРМИРОВАНИЕ И РАСПАД МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ

#### 1.1. Процессы, сопровождающие полёт метеорного тела в атмосфере Земли.

##### Абляция метеорного тела

Теории абляции метеороидов в Земной атмосфере посвящено достаточно много работ, результаты которых обобщены и представлены в монографиях [73-82]. Метеорную частицу, проникающую в атмосферу Земли из космического пространства со скоростью 11-72 км/с, можно рассматривать как тело, движущееся в сопротивляющейся среде. Рассматривая движение метеорного тела относительно молекул воздуха, мы можем принять, что метеорное тело тормозится за счёт импульса, передаваемого встречными молекулами воздуха. В результате соударения метеорного тела с Земной атмосферой оно тормозится, и нагревается до двух и более тысяч градусов, воспламеняется, расплавляется и испытывает такие различные формы абляции, как испарение, плавление и разбрызгивание жидкости путём распыления, дробления или путём комбинации этих процессов [7, 42, 73-82, 83-96] и создаёт светящийся ионизационный след. Из этих соображений выводятся основные уравнения физической теории метеоров.

*Абляция (разрушение) метеорных тел.* Уравнения расхода массы метеороида для каждой из отдельно взятых форм абляции будут рассматриваться во 2 параграфе данной главы. В зависимости от размера и массы метеороидов их абляция в Земной атмосфере происходит не одинарным, а разными способами [7]. В судьбе метеороида микронного размера основную роль играет химическая абляция. В настоящее время эта модель в сочетании с метеороидной моделью входа в Земную атмосферу отдельных элементов в зависимости от времени суток, местоположения и времени года, проверяется разными экспериментами (в частности, эксперимент с использованием камеры AIDA в Карлсруэ). Эта модель наряду с моделью UK Met Office также была использована для прогнозирования, где метеорный мусор оседает на поверхности Земли: тремя «горячими точками» являются центральная

Гренландия, Гималаи и глубинка Антарктиды, что хорошо согласуется с оценками MSP осаждения из измерений иридия и платины в ледяной cores (сажа метеорного происхождения СМП) [8].

Абляция метеороидов с массой более  $10^{-6}$  г может происходить путём испарения, плавления и разбрызгивания жидкости, распыления, дробления или путём комбинации этих процессов.

*Испарение* является наиболее существенным из них и конечной (завершающей) стадией всех типов абляции. Плавление приводит к образованию единственной капли или ко многим каплям путём разбрызгивания или к осколкам с последующим их испарением.

Тем не менее, разбрызгивание жидкости на мелкие капельки является особым типом абляции. Скорость абляции метеороида в этом случае определяется теплотой плавления. Расплавление в одну каплю, однако, приводит только к преобразованию формы и не является конечной стадией абляции.

*Распыление*, как процесс абляции в атмосфере Земли, рассматривалось в ряде работ [7, 77]. Однако его роль в уменьшении массы метеорных тел является несущественной за исключением для микрометеоритов высоких скоростей.

*Дробление* является распространённой среди метеороидов формой абляции. Дробление вследствие аэродинамического давления на жидкую каплю, теряемую метеороидом, является другим случаем. Дробление пылевых шариков (dustballs) вследствие очень слабого торможения, порядка  $10^4$  дин/см<sup>2</sup>, приводит к большому числу мелких, вероятно, жидких фрагментов, каждый из которых является микрометеором со своей собственной траекторией.

Для метеороидов в жидком состоянии тип абляции зависит от размера, скорости, удельной теплопроводности, вязкости жидкости, воздушной шапки и вращения. С увеличением размера метеороида последовательность разрушения следующая [7]: 1) нет абляции для слабых, и абляция распылением для прочных микрометеороидов без плавления; 2) расплавление микрометеоритов в

одну каплю и последующее частичное испарение с диссипацией энергии в основном посредством излучения; 3) расплавление метеороидов в одну каплю и почти полное испарение; 4) также как предыдущее, но капля разбивается на второстепенные фрагменты, каждый из которых испаряется; 5) абляция посредством плавления и разбрызгивания жидкости; 6) частичное разбрызгивание с испарением с поверхности жидкости; 7) испарение «до пятна» (начисто) без заметного разбрызгивания.

Сфера действия каждого типа абляции зависит от физических констант вещества и от вращения, и она больше для железных, чем для каменных метеороидов.

#### **а) Уравнение движения**

Метеорное тело за время  $dt$  встречает массу воздуха  $dm_a$  атмосферы:

$$dm_a = S \cdot \rho \cdot V \cdot dt, \quad (1.1)$$

где:  $S$  – площадь лобового сечения метеорного тела,

$\rho$  - плотность атмосферы,

$V$  – скорость метеора.

Эта масса воздуха обладает кинетической энергией  $dE_a$  и количеством движения  $dP_a$ :

$$dE_a = dm_a \cdot V^2 / 2 = 1/2 (S \cdot \rho \cdot V^3 \cdot dt), \quad (1.2)$$

$$dP_a = dm_a V = S \cdot \rho \cdot V^2 dt.$$

Площадь лобового сечения  $S$  метеорного тела выразим через его массу  $m$  и плотность  $\rho$ , и имеем:

$$S = A \cdot m^{2/3} \delta^{-2/3}, \quad (1.3)$$

где  $A$  – коэффициент формы.

По закону сохранения количества движения находим уравнение торможения метеорного тела в виде:

$$m \cdot d \cdot V / dt = -\Gamma \cdot S \cdot \rho \cdot V^2. \quad (1.4)$$

Подставляя значение  $S$  из (1.3), получим:

$$dV / dt = -\Gamma \cdot A \cdot m^{1/3} \delta^{2/3} \rho \cdot V^2, \quad (1.5)$$

здесь  $\Gamma$  – коэффициент сопротивления (доля количества движения налетающих молекул воздуха, передаваемая телу). Он зависит от ориентации и формы метеорного тела.

Вообще для тел неправильной формы среднее значение  $A$  может быть принято, как у сферы  $A=1.21$ . При выводе уравнения торможения (1.5) не учитывалось земное притяжение, поскольку оно намного меньше силы сопротивления воздуха.

### **б) Нагревание и испарение метеорного тела**

Как мы уже отмечали, метеорные тела проникают в атмосферу Земли со скоростью в несколько десятков километров в секунду. Кинетическая энергия, теряемая молекулой воздуха при ударе о преграду и переданная молекуле метеора [7, 74, 75], равна  $a m V^2 / 2$ , где,  $a$  – коэффициент аккомодации, представляющий собой отношение кинетической энергии, потерянной молекулой при ударе, к той потере, которая имела бы место, если бы кинетическая энергия отлетающей молекулы соответствовала температуре преграды,  $m$  – масса молекулы. Масса молекул, сталкивающихся за время  $dt$  с одним квадратным сантиметром поверхности метеороида, будет равна  $V dt \cos \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между нормалью к поверхности и направлением движения. Следовательно, поток энергии, приходящийся на  $1 \text{ см}^2$  лобовой поверхности метеороида, выразится соотношением:

$$W = \frac{1}{2} (a \cdot \rho \cdot V^2 \cos \alpha). \quad (1.6)$$

Рассмотрим нагревание метеороида на высотах, где торможение незначительно. При этом можно считать  $V=V_{\infty}=\text{Const}$  и поэтому потеря высоты метеороида будет равна:

$$h-h_0 = V t \cos Z_r, \quad (1.7)$$

где  $Z_r$  - зенитное расстояние радианта.

В пределах не слишком толстых слоёв изменение плотности атмосферы с высотой  $h$  может быть представлено показательным законом:

$$\rho = \rho_0 e^{-(h-h_0)/H^*}, \quad (1.8)$$

где  $\rho_0$  – плотность атмосферы на высоте  $h_0$ ,  $H^*$  – высота однородной атмосферы, зависящая от температуры  $T$  и массы молекул воздуха:

$$H = R T / \mu g, \quad (1.9)$$

здесь:  $R$  – газовая постоянная,

$g$  – ускорение силы тяжести,

$\mu$  – средний атомный вес метеорного вещества.

Учитывая уравнения (1.7) - (1.9), получим:

$$W = 1/2(a \cdot \rho_0 \cos \alpha \cdot V \cdot e^{\cos Z_r V t/H^*}). \quad (1.10)$$

Уравнение (1.10) представляет собой поток энергии, направленный внутрь метеорного тела и идущий на его нагревание. Постепенное нагревание метеорных тел приводит к испарению, и когда метеорное тело нагревается до температуры кипения, начинается его быстрое испарение (термическая абляция). Скорость испарения будет определяться потоком энергии, получаемым метеорным телом. Следовательно, за счёт этой энергии разогреваются следующие более глубокие слои. Обозначим энергию для нагревания и испарения 1 г метеорного вещества через  $Q$ . Тогда имеем

$$dm / dt = -W_s / Q, \quad (1.11)$$

но

$$W_s = 1/2 (\rho \cdot \lambda \cdot V^3 \cdot S) \quad \text{и} \quad V dt = -dh / \cos Z_r, \quad (1.12)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопередачи.

Подставляя (1.12) в (1.11), находим:

$$dm = (\lambda / 2Q \cdot \cos Z_r) \cdot S \cdot V^2 \rho \cdot dh. \quad (1.13)$$

Это уравнение также может быть записано в виде:

$$dm/dt = -(1 / 2Q) \cdot \lambda \cdot S \cdot \rho \cdot V^3. \quad (1.14)$$

С учётом (1.3), уравнение (1.14) примет вид:

$$dm / dt = -(1 / 2Q) \cdot \lambda \cdot A \cdot \rho \cdot (m / \delta)^{2/3} \cdot V^3. \quad (1.15)$$

Уравнение (1.15) носит название уравнения испарения, и подобный тип расхода массы называется термической абляцией.

## 1.2. Уравнения свечения и ионизации с учётом различных форм абляции метеоров

Испарившиеся с поверхности родительского тела атомы и молекулы двигаются в атмосфере со скоростью самого метеорного тела, и при их соударениях с атомами и молекулами окружающей среды (атмосферой) происходят процессы упругого рассеяния, диссоциации, возбуждения и ионизации. Так как при метеорных скоростях сечение диссоциации значительно больше, чем сечение диффузии, возбуждения и ионизации [7, 60, 74], то большинство испарившихся метеорных молекул диссоциируют до того, как они будут возбуждены или ионизированы. Таким образом, свечение происходит в основном в результате соударений метеорных атомов с молекулами атмосферы.

Учитывая, что сила света метеора  $I$  пропорциональна кинетической энергии секундного расхода массы метеорного вещества  $dm/dt$ , уравнение свечения метеора можно записать в виде [7]:

$$I = \tau (-dm / dt) V^2 / 2, \quad (1.16)$$

где  $\tau$  – коэффициент светимости, характеризующий долю кинетической энергии, переходящей в излучение.

Как уже было сказано, испаряющиеся атомы в зависимости от скорости метеорных тел в атмосфере Земли обладают различной кинетической энергией, от нескольких десятков до нескольких сотен эВ. Этой энергии более чем достаточно для возбуждения и ионизации атомов метеорного вещества. Степень ионизации метеорных атомов характеризуется коэффициентом ионизации (среднее количество свободных электронов, образуемых при столкновении испаряющегося метеорного атома с другими частицами). Число электронов, образующихся на единице длины траектории метеорного тела, можно записать, как:

$$q = -(\beta / \mu V) \cdot (dm / dt), \quad (1.17)$$

где  $\beta$  – среднее число свободных электронов, порождаемых одним испарившимся метеорным атомом.

Таким образом, интенсивность свечения и ионизации зависит как от параметров самого метеорного тела, так и от параметров атмосферы. Формулы простейшей физической теории метеоров, описывающие формы кривых свечения и ионизации с учётом только испарения, имеют вид [60, 73-76]:

$$I = (9 / 4) I_{\max} (\rho / \rho_{\max}) [1 - 1/3(\rho / \rho_{\max})]^2, \quad (1.18)$$

$$q = (9 / 4) q_{\max} (\rho / \rho_{\max}) [1 - 1/3(\rho / \rho_{\max})]^2. \quad (1.19)$$

Здесь  $I_{\max}$  и  $q_{\max}$  – максимальная интенсивность свечения и линейная электронная плотность на высоте, где плотность атмосферы равна  $\rho_{\max}$ . Интенсивность максимального свечения  $I_{\max}$  и максимальной линейной электронной плотности  $q_{\max}$  связаны с параметрами метеорного тела известными формулами:

$$I_{\max} = (m_0 V \cos Z_r) / (18\pi \cdot H), \quad (1.20)$$

$$q_{\max} = (4m_0 \cos Z_r) / (9\mu H). \quad (1.21)$$

Плотность атмосферы на высоте максимума свечения и ионизации  $\rho_{\max}$  связана с параметрами метеорного тела зависимостью:

$$\rho_{\max} = (2Q m_0^{1/3} \delta^{2/3} \cos Z_r) / \lambda A H V^2, \quad (1.22)$$

где  $\delta$  – плотность метеорного тела.

Уравнения свечения и ионизации с учётом торможения и расхода энергии на тепловое излучение были получены в работе В. Н. Лебединца и Н. А. Коноваловой [93-96], где показано, что торможением для метеоров со скоростью больше 20 км/с можно пренебречь. Различие между классической и усовершенствованной теорией, описывающей форму кривой свечения, будет существенным только для более медленных метеорных тел с относительно большими массами. Длина следа зависит от отношения  $m_0/m_0''$ , и для масс  $m_0 = m_0''$  и  $m_0 = 10^{-4}m_0''$  меняется от 4.8 до 16 км. Здесь  $m_0''$  – граничное значение массы, при которой происходит прогревание насквозь мелких метеорных тел. Согласно оценкам, проведённым в [7], граничное значение массы плотного каменного метеорного тела, при которой начинается интенсивное испарение, меняется в интервале  $10^{-3}$ - $7 \cdot 10^{-5}$  г.

Сравнения наблюдаемых кривых силы света и ионизации с теоретическими кривыми классической физической теории, проводимые в работах [7, 60, 79, 80] показали, что в подавляющем большинстве случаев наблюдаемая длина следа в 1.5 и более раз короче, чем теоретическая, а наблюдаемые  $I_{\max}$  и  $q_{\max}$  больше, чем ожидаемые по физической теории. Это различие, по мнению многих исследователей, обусловлено дроблением метеорных тел. На наличие дробления указывают результаты наблюдений метеоров (включая метод мгновенной экспозиции) [79, 83, 85, 86, 88,], результаты лабораторного моделирования явления метеора [86] и вспышки метеоров [90-92].

Вопросу изучения дробления в процессе абляции метеорного тела и его влиянию на кривые силы света метеоров посвящён ряд работ. В частности, А. Н. Симоненко в своих работах [87-89] анализировала формы фотометрических кривых, провела анализ влияния различных форм дробления на кривую свечения, определила размеры частиц, отделившихся при вспышке. Она разработала метод построения фотометрических кривых метеоров для следующих частных случаев дробления: осколочного, прогрессивного и квазинепрерывного.

В работе В. В. Калениченко [90] была развита теория квазинепрерывной фрагментации с поверхностного слоя с учётом эффекта переменности коэффициента теплопередачи. На основании результатов фотографических наблюдений по этой методике была определена комбинация физических параметров ярких метеоров, удовлетворяющих условиям разработанной модели.

Теоретическая задача влияния квазинепрерывного, однократного и прогрессивного дробления (особенно влияние КНД) на форму кривых силы света наиболее всесторонне рассматривалось В. Н. Лебединцом [7]. Используя результаты фотографических наблюдений, полученных с помощью камер Супер-Шмидт, им по наблюдаемому торможению была определена плотность метеорных тел (при выполнении условия КНД) в некоторых метеорных роях

[93]. Теория КНД в дальнейшем была развита в работах [42, 92, 97], где в отличие от предыдущих работ учитывается влияние торможения фрагментов на кривую силы света.

Автором в работе [97] построен теоретический профиль кривой блеска, с учётом одновременно нескольких видов дробления и эта модель применялась для выяснения механизма разрушения по наблюдаемым кривым блеска метеоров с конечными вспышками.

Задача построения теоретического профиля кривой свечения с учётом различных видов КНД и переменности коэффициента теплопередачи, для различного химического состава рассматривалась в работах [96, 97]. В частности, показано, что влияние переменности коэффициента теплопередачи в случае быстрой и промежуточной формы КНД пренебрежимо мало. Некоторые различия в формах кривых наблюдаются только в случае медленного КНД с переменными  $\lambda$ , когда происходит перераспределение излучения, то есть сила света в восходящей ветви идёт менее круто и затем выходит на характерное плато и некоторое время  $I(t) = \text{const}$ .

Таким образом, вопросу учёта влияния дробления, как одного из вероятных механизмов абляции на кривые силы света и применение теоретических моделей для интерпретации данных фотографических наблюдений посвящено довольно много работ. Ниже мы кратко рассмотрим влияние квазинепрерывного, осколочного и вспышечного дробления на формирование кривой ионизации метеоров.

*Квазинепрерывное дробление* - это один из вероятных видов абляции (дробления), в результате которого от родительского тела постепенно отделяется большое число очень мелких осколков. Возможными физическими механизмами, приводящими к КНД, являются [7]: а) сдувание расплавленной плёнки, преимущественно в случае железных метеорных тел; б) сброс нагретого поверхностного слоя метеорного тела в случае быстрого испарения более летучих примесей; в) терморазрушение поверхностного слоя в твёрдом состоянии; г) отделение твёрдых зёрен в случае справедливости гипотезы

зернистой структуры метеорных тел.

Уравнение расхода массы в случае КНД можно представить и виде [42, 97]:

$$-\frac{dM}{dt} = \int_{\rho_H}^{\rho} n(\rho_0) \frac{dM_{xk}}{dt} d\rho, \quad (1.23)$$

здесь  $n(\rho_0)$  – скорость инъекции осколков. Причём:

$$n(\rho_0) = \frac{\Lambda A H \vartheta^2}{2 Q_A \delta^{\frac{2}{3}} M_{xk} \cos Z} \left[ M_0^{\frac{1}{3}} - \frac{\Lambda A H \vartheta^2}{6(Q-Q_A) \delta^{\frac{2}{3}} \cos Z} (\rho_0 - \rho_H) \right]^2, \quad (1.24)$$

где:  $M_{xk}$  – масса осколка,

$Q_A$  – энергия дробления,

$\rho_0$  – плотность атмосферы на высоте  $h_0$ ,

$\rho_H$  – плотность атмосферы на высоте начала.

Уравнение расхода массы осколка имеет вид:

$$\frac{dM_{xk}}{dt} = \frac{A^* \vartheta^3 \Lambda^* \rho}{2(Q-Q_A) \delta^{\frac{2}{3}}} \left[ M_{xk} r^{\frac{1}{2}} - \frac{A^* \vartheta^2 \Lambda^* H}{6(Q-Q_A) \delta^{\frac{2}{3}} \cos Z} (\rho - \rho_0) \right]^2. \quad (1.25)$$

Причём плотность атмосферы на высоте исчезновения  $\rho_{дк}$  и максимума абляции родительского тела  $\rho_{дм}$  соответственно равны:

$$\rho_{дк} = \rho_H + \frac{6 Q_A \delta^{\frac{2}{3}} M_0^{\frac{1}{3}} \cos Z}{A H \vartheta^2 \Lambda} \quad \text{и} \quad (1.26)$$

$$\rho_{дм} = \frac{2 Q M_0^{\frac{1}{3}} \delta^{\frac{2}{3}} \cos Z}{A H \Lambda \vartheta^2} + \frac{1}{3} \rho_H. \quad (1.27)$$

Плотность атмосферы  $\rho_{он}$ , соответствующая высоте начала испарения осколка  $h$ , имеет вид:

$$\rho_{он} = \rho - \frac{6(Q-Q_d) \delta^{\frac{2}{3}} M_{кх}^{\frac{1}{3}} \cos Z}{\Lambda^* A^* H \vartheta^2}, \quad (1.28)$$

где  $A^*$  – коэффициент формы,  $\lambda^*$  – коэффициент теплопередачи осколка.

Суммарную скорость испарения всех осколков можно найти из уравнений (1.24)-(1.26) и (1.28). Но следует различать следующие три случая:

1) Высота начала испарения фрагмента больше, чем высота начала испарения родительского тела. Для этого случая уравнение расхода массы имеет вид [244]:

$$\begin{aligned}
-\frac{dM}{dt} &= \int_{\rho_H}^{\rho} n(\rho_0) \frac{dM_{kx}}{dt} d\rho = \frac{9M_0 v \cos Z \rho}{H(\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{н}})^3 (\rho - \rho_{\text{он}})^3} * \\
&* (1/5[(\rho - \rho_{\text{он}}) - (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{он}})]^5 - \frac{1}{2(\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{он}})} * \\
&* [(\rho - \rho_{\text{он}})^4 - (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{он}})^4] + 1/3(\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{он}})^3 * \\
&* [(\rho - \rho_{\text{он}})^3 - (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{он}})^3]). \tag{1.29}
\end{aligned}$$

Кривая ионизации, согласно (1.17) и (1.29), имеет вид:

$$\begin{aligned}
q &= \frac{9\beta\rho M_0 \cos Z}{\mu m_H H(\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{н}})(\rho - \rho_{\text{он}})} (1/5[(\rho - \rho_{\text{он}}) - (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{он}})]^5) - \\
&- \frac{1}{2(\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{он}})} [(\rho - \rho_{\text{он}})^4 - (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{он}})^4] + 1/3(\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{он}})^3 * \\
&* [(\rho - \rho_{\text{он}})^3 - (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{он}})^3]). \tag{1.30}
\end{aligned}$$

Для высот, близких к  $h_{\text{н}}$ , при выполнении условия  $(\rho - \rho_{\text{н}}) < (\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{н}})$  формула примет вид:

$$q = \frac{9\beta M_0 \cos Z}{\mu m_H H} \frac{\rho}{(\rho - \rho_{\text{он}})} \left[ 1 - \frac{(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{он}})^3}{(\rho - \rho_{\text{он}})} \right]. \tag{1.31}$$

2) Когда высота начала испарения фрагмента составляет  $h_{\text{он}} < h_{\text{н}} < h_{\text{дк}}$ , уравнение испарения имеет вид:

$$\begin{aligned}
-\frac{dM}{dt} &= \frac{9M_0 V \cos Z}{H} \frac{\rho}{(\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{н}})} \left[ \frac{1}{5}(\rho - \rho_{\text{он}})^2 - \frac{1}{2}(\rho - \rho_{\text{он}}) * \right. \\
&* (\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{он}}) + \frac{1}{3}(\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{он}})^2 \left. \right]. \tag{1.32}
\end{aligned}$$

Следовательно, уравнение ионизации согласно (1.17) и (1.32) будет следующим:

$$\begin{aligned}
q &= \frac{9\beta\rho M_0 \cos Z}{\mu m_H H(\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{н}})} \left[ \frac{1}{5}(\rho - \rho_{\text{он}})^2 - \frac{1}{2}(\rho - \rho_{\text{он}}) * \right. \\
&* (\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{он}}) + \frac{1}{3}(\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{он}})^2 \left. \right]. \tag{1.33}
\end{aligned}$$

3) Высота начала испарения фрагмента  $h_{\text{он}} < h_{\text{дк}}$ . Уравнение испарения в этом случае имеет вид:

$$-\frac{dM}{dt} = \frac{6M_0 V \cos Z}{10H} \frac{(\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{он}})^5}{(\rho_{\text{дк}} - \rho_{\text{н}})(\rho - \rho_{\text{он}})}. \tag{1.34}$$

Из (1.17) и (1.34) найдём уравнение ионизации:

$$q = \frac{6M_0 \cos Z}{10 \mu m_H H} \frac{(\rho_{дк} - \rho_{он})^5}{(\rho_{дк} - \rho_H)(\rho - \rho_{он})}. \quad (1.35)$$

*Осколочное дробление.* Основные физические механизмы, приводящие к осколочному дроблению, упомянуты в [7, 90, 91]. К ним относятся: а) взрыв относительно не крупного, прогревающегося почти насквозь каменного метеорного тела за счёт бурного выделения из него различных газов и паров; б) дробление относительно мелкого полностью расплавленного метеорного тела под действием аэродинамического давления и в) «плавление легкоплавких связей» между более тугоплавкими пылинками в «пылевых комочках». При осколочном дроблении могут образоваться, как осколки, сравнимые по массе, так и осколки, существенно различающиеся по массе. Для простоты будем считать, что осколки имеют одинаковые размеры. При этом в зависимости от высоты дробления и значения масс осколков, следует различать следующие случаи:

а) когда  $h_d > h_H$  и  $M_d < M_0$ :

$$q = \frac{\Lambda \beta V_H'^2}{2(Q - Q_H) \delta^3 \mu m_H} (\rho - \rho''_H) [1 - \gamma'' \rho (\rho - \rho_H)]^2 * \\ * [(M_0/N)^{\frac{1}{3}} - \frac{A H V_H'^2}{6(Q - Q_H) \delta^3 \cos Z} [\rho - \rho''_H (1 + \text{tg} \frac{\rho}{\rho''_H}) - 2/3 \gamma'' * \\ * (\rho - \rho_H)^3]]^2. \quad (1.36)$$

б) при  $h_d > h_H$  и  $M_0 < M_{до} < M_0$ , уравнение ионизации можно писать в виде:

$$q = \frac{M_0 \cos Z Q_H \beta}{\mu m_H (Q - Q_H) V_H'^2} \left[ 1 - \frac{Q_H}{3(Q - Q_H) V^2} \left[ \left( V_H'^2 + \frac{2\gamma V_H'^{\frac{1}{3}} Q_H}{\Sigma} \right) * \right. \right. \\ * \left. \left( \frac{\rho}{\rho_H} - 1 \right) - \left[ V_H' - \frac{\gamma V_H'^{\frac{1}{3}} Q_H}{\Sigma} \left( \frac{\rho^2}{\rho_H'^2} - 1 \right) \right]^2 \left[ \left( V_H'^2 + \frac{2\gamma V_H'^{\frac{1}{3}} Q_H}{\Sigma} \right) * \right. \right. \\ * \left. \left. \left( \frac{\rho}{\rho_H} - 1 \right) \right]^{\frac{5}{2}} \frac{\rho}{\rho_H} \right], \quad (1.37)$$

где  $\gamma' = 1,74 * 10^{-13}$  – постоянная,  $v'_H$  – скорость метеора на высоте начала интенсивного испарения  $h'_H$ .

в) когда  $h_H < h_D < h'_H$  и уравнение ионизации согласно (1.16), (1.17) и с учетом зависимости  $V$  от  $\rho$ , полученной в виде [72]

$$V = [V_0^2 - \frac{AH(\rho - \rho_H)V_0^{\frac{7}{3}}}{M_0^{\frac{1}{3}}\delta^{\frac{1}{3}}\cos Z}]^{\frac{1}{2}} \quad (1.38)$$

примет следующий вид:

$$q = \frac{\beta N \Lambda A}{\mu_{mH} Q^{\frac{2}{3}}} \left[ \left( \frac{M_0}{N} \right)^{\frac{1}{3}} - * \left[ \left( V_0^2 + \frac{\gamma V_0^{\frac{2}{3}} \rho_H N^{\frac{1}{3}}}{\delta^{\frac{2}{3}} M_0^{\frac{1}{3}} \cos Z} \right) (\rho - \rho_H) - \frac{\gamma V_0^{\frac{2}{3}} N^{\frac{1}{3}}}{2 \delta^{\frac{2}{3}} M_0^{\frac{1}{3}} \cos Z} (\rho^2 - \rho_H^2) \right] * \right. \\ \left. \left[ V_0^2 - \frac{(\rho - \rho_H) V_0^{\frac{2}{3}} N^{\frac{1}{3}}}{\delta^{\frac{2}{3}} M_0^{\frac{1}{3}} \cos Z} \right] \right] \quad (1.39)$$

$$\gamma = 1,19 * 10^{-13}.$$

*Вспышка (вспышечное дробление).* Вспышка, как известно, это мгновенное отделение большого количества фрагментов от родительского тела. Оценка масс фрагментов при вспышке, их размеров, некоторые характеристики вспышечных ярких метеоров и формы вспышек были изучены в ряде работ [86-88]. Кривая силы света метеора при вспышке описывается уравнением [7]:

$$I = \frac{N \Lambda A \tau}{16 \pi Q \delta^{\frac{2}{3}}} \left[ \left( \frac{M}{N} \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{A N \Lambda}{6 Q \delta^{\frac{2}{3}} \cos Z} * \right. \\ \left. \left[ \left( V_D^2 + \frac{N^{\frac{1}{3}} V_A^{\frac{7}{3}}}{\Sigma \delta^{\frac{2}{3}} M^{\frac{1}{3}} \cos Z_R} \right) (\rho - \rho_D) - \left( \frac{N^{\frac{1}{3}} \gamma V_D^{\frac{7}{3}}}{2 \Sigma \delta^{\frac{2}{3}} M^{\frac{1}{3}} \cos Z} \right) (\rho - \rho_D) - \right. \right. \\ \left. \left. \left( \frac{N^{\frac{1}{3}} \gamma V_D^{\frac{7}{3}}}{2 \Sigma \delta^{\frac{2}{3}} M^{\frac{1}{3}} \cos Z} \right) (\rho^2 - \rho_D^2) \right] \right]^2 \left[ V_D^2 - \frac{N^{\frac{1}{3}} \gamma V_A^{\frac{7}{3}}}{\Sigma \delta^{\frac{2}{3}} M^{\frac{1}{3}} \cos Z} (\rho - \rho_D) \right], \quad (1.40)$$

здесь  $V_D$  – скорость метеора, которая вычисляется с помощью формулы (1.38).

Зависимость линейной электронной плотности от параметров метеора в случае вспышки можно получить из уравнений (1.16), (1.17) и (1.40):

$$q = \frac{N\Lambda A}{2\mu m_H Q V_D^3 \delta^3} \left[ \left( \frac{M}{N} \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{\Lambda A H}{6Q\delta^3 \cos Z} \left[ V_D^2 + \frac{N^{\frac{1}{3}} \gamma V_A^{\frac{7}{3}}}{\Sigma \delta^3 M^{\frac{1}{3}} \cos Z} \right] \right] * \\ * (\rho - \rho_D) - \left( \frac{N^{\frac{1}{3}} \gamma V_D^{\frac{7}{3}}}{2\Sigma \delta^3 M^{\frac{1}{3}} \cos Z} \right) (\rho^2 - \rho_D^2) \left[ V_D^2 - \frac{N^{\frac{1}{3}} \gamma V_A^{\frac{7}{3}}}{\Sigma \delta^3 M^{\frac{1}{3}} \cos Z} (\rho - \rho_D) \right], \quad (1.41)$$

здесь  $\gamma$  – постоянная и составляет  $1,19 \cdot 10^{-13}$ .

Из формул (1.30), (1.31), (1.33), (1.35), (1.36), (1.37), (1.39) и (1.40) следует, что для применения этих формул необходимо знание высоты начала, максимума и конца следа, соответствующих высот для осколков, массы родительского тела, скорости, зенитного расстояния радианта, масс осколков, числа осколков, на которые распадается родительское тело (особенно в случае осколочного дробления), энергии испарения, энергии дробления и т.д. Кроме того, на форму ионизационных кривых могут оказывать влияние вращение метеорного тела, переменность коэффициента теплопроводности, коэффициента формы тела, химический состав и т.д.

Масса осколков, согласно оценкам В. Н. Лебединца [7], примерно одинакова и для плотного каменного вещества составляет  $4 \cdot 10^{-6}$  г. Предполагаем, что основным механизмом абляции осколков является испарение, а влияние торможения осколков на родительское тело пренебрежимо мало. Имеется косвенный факт, подтверждающий испарение, как механизм разрушения мелких частиц или осколков. В частности, нами в [84] была исследована зависимость фактора дробления  $F$  от массы в диапазоне  $10^{-4}$ - $10^{-1}$  г. Результаты этих исследований показали, что наибольшее дробление испытывают частицы с массами  $10^{-1}$  г. Далее с уменьшением масс до  $10^{-4}$  г фактор дробления увеличивается. Если  $F$  экстраполировать в сторону ещё меньших масс, то в районе  $5 \cdot 10^{-5}$ - $10^{-6}$  г  $F$  достигает единицы, то есть метеорные тела с такими массами практически не дробятся.

Согласно работам [7, 74, 88, 91], для определения физических характеристик метеороидов с учётом теории дробления необходимо знание

высоты начала, максимума и конца следа, соответствующих высот для осколков, массы родительского тела, скорости, зенитного расстояния радианта, массы осколков, числа осколков, на которое распадается родительское тело (особенно в случае осколочного дробления), энергии испарения, энергии дробления и т.д.

Кроме того, на форму кривых блеска и ионизационных кривых могут оказывать влияние вращение метеорного тела, переменность коэффициента теплопроводности, коэффициента формы тела, химический состав и т.д. При многостанционных радионаблюдениях наиболее уверенно определяется высота максимума ионизации. Что касается высот начала и конца следа, то они в основном восстанавливаются путём экстраполяции. В большинстве случаев радиолокационные наблюдения проводятся только с одного пункта. Следовательно, интерпретация таких данных требует разработки специальной методики, которая применима для определения физических характеристик метеороидов. Следовательно, нами на основе результатов многостанционных радионаблюдений метеоров и данных радиотелевизионных наблюдений в ГисАО предложен полуэмпирический метод определения масс и плотностей метеороидов, приемлемый для редукции данных радиолокационных наблюдений с одного пункта [97, 99, 101].

### **1.3. Рассеяние радиоволн на метеорных следах и некоторые характеристики радиоэха от них**

В предыдущем параграфе мы рассмотрели современные взгляды на процесс образования ионизированных метеорных следов и зависимость интенсивности ионизации (линейной электронной плотности) от параметров метеорного тела и атмосферы. Как известно, ионизационный след после своего образования содержит три вида элементарных заряженных частиц: свободные электроны, отделившиеся от нейтральных атомов, положительные ионы, отрицательные ионы, образовавшиеся в результате соединения электронов с нейтральными атомами. При прохождении пакета радиоволн, посланных передатчиком через ионизационный след метеора, эти частицы подвергаются

действию переменного электрического поля и начинают колебаться, что сопровождается поглощением части падающей волны и обратным излучением. Отражающая способность положительных и отрицательных ионов по сравнению с отражающей способностью электронов на частотах в несколько десятков МГц незначительна, и мы можем сказать, что отражение радиоволн от метеорных следов обуславливается наличием свободных электронов.

А.С. Ловелл [78, 102] получил следующее выражение для мощности сигнала, рассеянного следом на входе приёмника:

$$P = P_t G_t G_r \lambda^3 q^2 / 32 \pi^2 R^3 \cdot [e^2 / (m c^2)]^2, \quad (1.42)$$

где:  $P_t$  – мощность передатчика,

$G_r, G_t$  – коэффициенты направленности приёмной и передающей антенн (по отношению к изотропному излучателю),

$\lambda$  – длина волны радиолокатора,

$R$  – дальность от РЛС до точки зеркального отражения на следе;

$e, m$  – заряд и масса электрона;

$c$  – скорость света.

Согласно [7, 102], следует различать три типа ионизационных метеорных следов: недоуплотнённый, промежуточный и переуплотнённый. При классификации метеоров по их линейной электронной плотности учитывается значение критической линейной электронной плотности:

$$q_{cr} = 2,4 \cdot 10^{12} [1 + (L r)]^2, \quad (1.43)$$

где  $L = 2\pi/\lambda$ ,  $r$  – начальный радиус метеорного следа.

#### **а) Недоуплотнённые следы**

В следах такого типа падающая волна без существенных искажений проникает в любую точку следа и рассеяние на каждом электроне рассматривается, как независимое и когерентное. Значение линейной электронной плотности у таких следов значительно меньше, чем  $q_{cr}$ . Согласно работ [7, 102], метеоры с  $q < 10^{11} \text{ см}^{-1}$  относятся к ненасыщенным (недоуплотнённым).

### **б) Промежуточные следы**

Если  $q$  порядка  $q_{cr}$  или чуть выше критической, то такие следы называются промежуточными. В следах такого типа амплитуда отражённой волны зависит от ориентации электрического вектора падающей волны относительно оси следа, а для волны с поперечной поляризацией возможно явление резонанса, которое приводит к увеличению амплитуды отражённого сигнала. Согласно более точным расчётам [7], у таких следов значения линейной электронной плотности заключаются в диапазоне  $10^{11} \text{ см}^{-1} \leq q \leq 10^{13} \text{ см}^{-1}$ .

### **в) Переуплотнённые следы**

В случае таких следов отражение радиоволн происходит, как от металлического цилиндра, и значение  $q > q_{cr}$ . При обработке следов различных типов их обычно по форме амплитудно-временной характеристики (АВХ) относят к той или иной группе. Классификация следов по форме АВХ приводится в работе [56] и приемлема только для определённой длины волны. При наблюдении метеоров на двух и более радиолокаторах с различными длинами волн  $\lambda$ , один и тот же след может быть отнесён по виду АВХ к различным типам. В таких случаях граница между следами различных типов должна быть установлена с учётом  $q$ ,  $\lambda$ ,  $r$  и параметра распределения метеорных тел по массам  $s$ .

Рассмотрим важнейшие характеристики радиоэха для следов различных типов. К важнейшим характеристикам радиоэха относятся, как уже отмечалось, мощность эхосигнала, АВХ и длительность радиоотражения [104-108]. Для случая недоуплотнённых следов мощность сигнала через  $t$  секунд после пролёта метеорным телом середины 1-й зоны Френеля [7] определяется по соотношению:

$$P_H = A_i \cdot (P_i G^2 \lambda^3) / R^3 \cdot (q^2 e^{-2(2\pi/\lambda)^2 (r^2 + 4D t) \xi^2 \eta^2}), \quad (1.44)$$

здесь:  $P_i$  – излучаемая мощность в импульсе;

$r$  – начальный радиус ионизированного следа,

$D$  – коэффициент диффузии,

$\xi$  – коэффициент, характеризующий уменьшение начальной амплитуды эхо сигнала,

$\eta$  – коэффициент, характеризующий увеличение интенсивности эхо сигнала за счёт резонанса плазмы в ионизированном следе,

$A$  – постоянная, равная  $3,5 \cdot 10^{-28} \text{ см}^2$ .

$\xi$  определяется в виде:

$$\xi = 1 - e^{-1.5 \Delta} / 1.5 \Delta^{0.5}, \quad (1.45)$$

причём:

$$\Delta = 16 \pi^2 D R^{1/2} / V \lambda^{3/2}.$$

Из (1.44) и (1.45) следует, что время  $\tau$ , в течение которого эхо сигнала превышает пороговый уровень определяется как

$$\tau = \tau_e \ln [A'(P_i G^2 \lambda^3 / \epsilon_n R^3)^{1/2} \xi \eta q e^{-(2 \pi r / \lambda)}], \quad (1.46)$$

где  $\tau_e$  – длительность на уровне  $1/e$  начальной амплитуды:

$$\tau_e = \lambda^2 / (16 \pi^2 D). \quad (1.47)$$

В (1.46)  $\epsilon_n$  – мощность порогового сигнала;  $A' = 1,87 \cdot 10^{-14} \text{ см}$ .

Рассеяние радиоволн в случае насыщенных метеорных следов происходит, как отражение от металлического цилиндра радиусом  $r$ , который определяется из выражения [7, 60, 102]:

$$r^2 = (4Dt + r^2) \ln (\lambda^2 e^2 q) / \pi^2 m c^2 (4 Dt + r^2), \quad (1.48)$$

мощность радиоотражения от таких следов равна:

$$P_r = P_t G_t G_r \lambda^2 r / 64 \pi^2 R^3 64 \pi^2 R^3. \quad (1.49)$$

Длительность радиоотражения (время уменьшения электронной концентрации на оси следа до критической) можно определить из (1.29) в виде:

$$\tau = (q \lambda^2 / 4 \pi^2 D m c^2) - (e^2 r^2 / 4D). \quad (1.50)$$

В работах [105-108] показано, что рефракция радиоволн во внешней части следа, где  $q < q_{cr}$ , может приводить к уменьшению мощности радиоэха в несколько раз, а его влияние на длительность пренебрежимо мало. Уравнение (1.50) получено в предположении, что уменьшение электронной плотности

происходит только под влиянием амбиполярной диффузии. В реальных условиях на длительность радиоотражения (особенно при  $\tau > 10$  с) следов переуплотнённого типа оказывает влияние ещё ряд других факторов, таких как прилипание электронов, турбулентная диффузия, рекомбинация и т.д. Влияние этих процессов на длительность радиоотражения как в отдельности, так и в целом рассматривалось в работах [108-112]. Влияния этих процессов на длительность радиоэха будем рассматривать в следующем параграфе.

#### **1.4. Влияние процессов деионизации на длительность радиоотражения**

Как известно, метеорные тела с массами более  $10^{-3}$  г и со звёздной величиной ярче  $+5^m$  при взаимодействии с атмосферой Земли образуют так называемые переуплотнённые следы, начальная линейная электронная концентрация  $q$  в которых превышает  $2 \cdot 10^{12}$  эл/см. В таких следах концентрация электронов убывает под действием не только амбиполярной диффузии, но и рекомбинации, прилипания электронов к нейтральным частицам и турбулентной диффузии. В метеорном следе, представляющим собой низкотемпературную слабоионизованную плазму, протекают и другие реакции, связанные с перезарядкой частиц, фотоотрывом электронов в освещённом Солнцем следе и другие процессы. Поэтому длительность метеорного радиоэха, которая служит основным параметром для определения линейной электронной плотности, масс метеорных тел радиометодом и параметром распределения метеорных тел по массам, является функцией скоростей различных реакций. Для того чтобы перейти от видимой величины (например, от наблюдаемой длительности метеорного радиоэха) к истинной (начальной электронной плотности), необходимо знать скорости реакций и вид зависимости от них длительности отражённого радиоэха от метеорного следа сигнала. Все эти вопросы были предметом изучения ряда исследователей [108-113]. Основным недостатком всех этих работ является то, что авторы не принимали во внимание нейтральную компоненту метеорного вещества, а рассматривали только те реакции, которые происходят в атмосфере. А

химический состав же метеорного следа существенно отличается от атмосферного. Следовательно, такой подход к решению задачи не позволяет решить проблему взаимосвязи наблюдаемой длительности метеорного радиоэха и начальной электронной концентрации следа.

Вопрос роли нейтралов метеорного происхождения (НМП) в образовании отрицательных ионов, диссоциации молекул кислорода испарившимися атомами метеорного вещества, образовании метеорного озона, образовании отрицательных ионов в метеорных следах, возможность образования озона при взаимодействии метеорного тела с атмосферой Земли [111], разрушение отрицательных ионов в метеорных следах и процессы, определяющие длительность метеорного радиоэха, таких как амбиполярная диффузия, радиоактивная рекомбинация, диссоциативная рекомбинация, трёхчастичная рекомбинация, прилипание электронов к нейтральным частицам, турбулентная диффузия и оценка эффективности этих процессов на длительность радиоэха наиболее всесторонне рассмотрена в Институте астрофизики НАН Таджикистана Р. Ш. Бибарсовым [107-112].

В частности, в результате многолетних исследований автором:

а) определена энергия электронного сродства ионообразующих частиц как на основе многолетних радиолокационных наблюдений метеоров, так и по результатам параллельных фотографических и радиолокационных наблюдений одних и тех же ярких метеоров. Получено, что оба этих независимых метода дают совпадающий в пределах ошибок результат. На основе этих данных сделан вывод, что основными ионообразующими частицами в метеорных следах могут быть оксиды кремния ( $\text{SiO}$  и  $\text{SiO}_2$ ). Результаты спектрофотометрических измерений ионного состава метеорной зоны, проводимые позже неоднократно, полностью подтверждали предположение автора. В частности:

б) показано, что увеличение концентрации атомарного кислорода в метеорном следе приводит к существенному росту скорости реакций с участием атомарного кислорода и образованию дополнительного озона;

в) рассмотрено образование так называемого метеорного озона, что также значительно повышает скорость реакций, приводящих к уменьшению электронной концентрации в метеорных следах;

г) впервые рассмотрен вопрос, связанный с ролью нейтралов метеорного происхождения (НМП) в образовании отрицательных ионов. Используя результаты одновременных фотографических и радиолокационных наблюдений ярких метеоров, был определён коэффициент прилипания электронов к НМП. Вычислена также энергия электронного сродства нейтральных частиц, которая оказывается равной  $2,35 \pm 0,15$  эВ. Сделан вывод, что в метеорных следах ионообразующими частицами могут быть оксиды кремния ( $\text{SiO}$  и  $\text{SiO}_2$ ). Исследован вопрос диссоциации молекул кислорода испарившимися атомами метеорного вещества. Получена зависимость коэффициента диссоциации  $\text{O}_2$  от скорости метеорного тела. Причём показано, что концентрация атомов кислорода в метеорных следах в начальной стадии их существования может быть в десятки и сотни раз больше, чем в окружающей среде;

д) показано, что в метеорных следах, порождённых метеорными телами массой  $10^{-2}$ - $10^2$  г, концентрация озона больше, чем в атмосфере в десятки раз. Так как коэффициент прилипания электронов к озону составляет  $5 \cdot 10^{-12}$  см<sup>3</sup>/с, то есть почти на 3 порядка больше, чем к атомарному кислороду, то при таких концентрациях он может играть решающую роль в образовании отрицательных ионов в метеорных следах;

е) рассмотрены процессы, приводящие к разрушению ионов, которыми являются столкновения с атомами и молекулами, двойные и тройные рекомбинации с положительными ионами, фотоотлипание. Причём, если первые два процесса имеют место в любое время суток, то фотоотлипание происходит только в следах, освещённых Солнцем. Так как фотоотлипание тормозит убыль свободных электронов вследствие их прилипания к нейтральным частицам, то в дневное время, при прочих равных условиях, должно наблюдаться больше длительных метеорных радиоэхо, чем в ночное время. Чтобы проверить это предположение, автором было построено

распределение радиоотражений от следов спорадических метеорных тел за время наблюдений 1965-1970 гг. Следует отметить, что за пять лет были зарегистрированы более 200000 метеорных радиоэхо с длительности 0.1-140 с. Распределение метеорных радиоэхо по длительности, построенное за время дневных наблюдений, отличается от ночного тем, что действительно в дневное время наблюдается больше длительных радиоэхо.

Автором получено исходное выражение, описывающее теоретическую зависимость длительности метеорного радиоэха от скорости прилипания и фотоотлипания с учётом диффузии. Получена зависимость скорости фотоотрыва электронов от сродства электрона с ионообразующими частицами по результатам лабораторных исследований. Эта зависимость позволяет по измеренной скорости фотоотлипания электронов определять энергию электронного сродства ионообразующих частиц. Тем самым можно определить, в некоторой степени, сорт нейтральных частиц, ответственных за образование отрицательных ионов в метеорных следах. Далее по результатам наблюдений около 200000 метеорных радиоэхо, определяется энергия электронного сродства, которая оказалась равной  $(2.5 \pm 0.4)$  эВ. Это ещё раз свидетельствует о том, что основными ионообразующими частицами в метеорных следах являются не атомы кислорода, а другие частицы, коэффициент прилипания электронов к которым составляет  $10^{-11} - 10^{-12}$  см<sup>3</sup>/с.

Автором введено понятие функции деионизации метеорной плазмы. Функция деионизации рассматривалась как некоторый множитель к видимой или наблюдаемой длительности радиоэха (к видимой концентрации электронов), который таким образом позволяет определить начальное (или истинное) значение электронной концентрации следа (или массы метеорного тела).

Р. Ш. Бибарсовым в целом решена система дифференциальных уравнений, учитывающих баланс ионизации метеорного следа. Уравнения учитывают также роль нейтральных частиц метеорного вещества. Причём система уравнений решалась на ЭВМ для метеорных тел различной массы и

скорости. Результаты моделирования на ЭВМ хорошо согласовались с наблюдениями.

Однако полученные результаты не были использованы для интерпретации наблюдательного материала особенно при получениях формы кривых ионизации метеоров. Учёт этих процессов при вычислении линейной электронной плотности (и определении массы метеорных тел) в случае промежуточных и насыщенных следов будем рассматривать в следующей главе.

## **ГЛАВА 2. ОПТИКО-РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ ВДОЛЬ СЛЕДОВ МЕТЕОРОВ РАЗНЫХ СКОРОСТЕЙ**

Всесторонние исследования метеорного вещества требуют использования самых различных методов, среди которых наиболее информативными являются комплексные оптические (широкоугольные камеры болидной сети, фотографические, электронно-оптические, видео- и телевизионные) и базисные радиолокационные методы наблюдения одних и тех же метеоров. При этом значительно повышается информативность получаемого материала о метеорных следах и процессах, сопровождающих полет метеоров в Земной атмосфере. Следовательно, комбинированные оптические и радиолокационные наблюдения метеоров позволяют исследовать не только процессы абляции метеороидов в Земной атмосфере и определять такие параметры атмосферы, как плотность, давление, температура и скорость по некоторым физическим процессам, протекающим при взаимодействии метеорного тела с Земной атмосферой, но и дают возможность исследовать физико-динамические и кинематические характеристики метеороидов.

Результаты комбинированных радиооптических наблюдений представляют огромный интерес не только в решении круга задач (проблем) метеорной астрономии (калибровка физических и кинематических характеристик метеоров), но и геофизических проблем (исследование процессов деионизации, мелкомасштабной и турбулентной диффузии и т.д.) и в области обеспечения полётов космических миссий, исследования космического пространства (определение плотности падающего потока метеорного вещества) и т.д.

Как известно, совокупность информации о физико-динамических и кинематических характеристиках метеороидов и процессов, происходящих при взаимодействии метеороида с Земной атмосферой, содержится в кривой свечения и ионизации метеора, являющейся продуктом взаимодействия метеороида и Земной атмосферы. Кривые свечения метеоров различных

диапазонов яркостей и масс, как правило, получают при базисных фотографических, телевизионных, электронно-оптических наблюдениях с использованием ПЗС-матрицы видеокамер болидной сети, развёрнутой в настоящее время для наблюдений в ряде стран мира [113-122].

Для получения кривых свечения и ионизации метеоров используются самые различные наземные комбинированные методы наблюдений, такие как базисные радиолокационные и оптические (визуальный, визуально-телескопический, фотографический, видео- и телевизионные способы). Каждый из этих методов по отдельности охватывает определённый диапазон звёздной величины метеоров. Визуальным и визуально-телескопическим методом наблюдений было доступно регистрировать метеоры до  $+5^m$  соответственно, фотографическим с камерами НАФА 3С/25 ( $D = 10$  см,  $F = 25$  см) до  $+1^m$ , фотографическим со светосильными камерами Супер-Шмидт до  $+3^m$ , болидными камерами до  $-18^m$ , современными видео- и телевизионными до  $+10^m$  и радиолокационными в зависимости от мощности, длины волны, и антенной системы до  $+14^m$  [123]. Однако ни один из вышеперечисленных методов не может полностью заменить другие. На базе наблюдательных данных, полученных оптическими и радиолокационными средствами наблюдений, получены данные о кривых блеска и ионизации метеоров в широком диапазоне звёздных величин. Однако общность и различия кривых блеска метеоров разных популяций в широком диапазоне звёздных величин не исследовались.

Кривые ионизации метеора, как правило, получают при базисных радиолокационных наблюдениях метеора с нескольких разнесённых приёмных пунктов, расположенных на различных расстояниях от центрального наблюдательного пункта. При этом производится регистрация дальности, амплитудно-временных характеристик, длительности радиоэха, фазы отражённого сигнала, скорости ветра, и этим способом исследуются вариации длительности радиоэха, величины линейной электронной плотности вдоль следа метеора, измеряются радианты, скорости и элементы орбиты каждого индивидуального метеора. Одновременные наблюдения одного и того же следа

метеора комбинированными радиооптическими методами позволяют одновременно получить данные об атмосферной траектории метеора, некоторые параметры атмосферы и процессов абляции метеороида и способствуют решению круга задач, относящихся не только к метеорной физике, но и к процессам, происходящим при взаимодействии метеора с Земной атмосферой. Следовательно, одним из эффективных методов изучения физико-кинематических и динамических характеристик метеороидов по результатам наземных методов наблюдений является одновременное базисное оптическое и радиолокационное наблюдение одних и тех же метеоров.

## **2.1. История, состояние и перспективы комбинированных методов исследования метеоров в Земной атмосфере**

Идея организации и проведения оптических и радиолокационных наблюдений метеоров сформировалась ещё на ранней стадии развития радиолокационных методов изучения метеоров. Причём в начале, с целью проверки отдельных положений физической теории радиометеоров в ряде обсерваторий мира были проведены параллельные визуальные и радиолокационные наблюдения одних и тех же метеоров [124-131]. В связи с этим, вначале будем рассматривать историю применения параллельных радиовизуальных наблюдений метеоров, проводимых во второй половине двадцатого века в некоторых обсерваториях мира.

**а) Комбинированные радиолокационные и визуальные наблюдения метеоров.** Исследование метеоров в настоящее время проводится самыми различными методами, в том числе визуальными, оптическими (фотографическими, электронно-оптическими, видео-, телевизионными) и радиолокационными. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. В частности, оптические методы применяются только в безоблачные, ясные и безлунные ночи, что приводит к потере ценной информации о дневных метеорных потоках и ассоциациях. Эти недостатки исключаются при использовании радиолокационного метода. Однако

радиометоды (за исключением метода измерения головного эха) не могут конкурировать по точности измерения как физических, так и кинематических характеристик метеоров с оптическими методами. Применение комбинированных оптических и радиолокационных методов наблюдений позволяет устранить недостатки имеющихся в том или ином методе.

В сороковых годах прошлого века наряду с визуальными и фотографическими методами получило широкое применение новое и весьма актуальное и перспективное направление наблюдения метеоров – радиолокационный метод. В связи с применением нового метода, появился ряд теоретических и наблюдательных работ, посвящённых образованию метеорной ионизации атмосферы, диффузии и рекомбинации ионов в ионной колонне, изучению отражения и рассеяния радиоволн от ионизированных метеорных следов и т.д. Проверки отдельных положений физической теории радиометеоров, достоверность и надёжность полученных материалов и правильная интерпретация результатов радиолокационных наблюдений нуждались в калибровке результатов радиолокационных наблюдений с данными оптических методов наблюдений. Исходя из этого, на начальном этапе развития радиолокационного метода исследования метеоров, в некоторых обсерваториях мира были организованы и проведены одновременные радиолокационные и визуальные наблюдения одних и тех же метеоров [124-126]. При этом по результатам визуальных наблюдений для каждого метеора оценивалась визуальная абсолютная звёздная величина на высоте максимума блеска, длина следа, принадлежность метеора к тому или иному потоку, а по результатам радиолокационных наблюдений измерялась дальность и длительность радиоэха метеора. В частности, для изучения корреляции между звёздной величиной и длительностью радиоотражения в период действия метеорных потоков Персеид, Геминид и спорадического фона были проведены параллельные радиолокационные и визуальные наблюдения одних и тех же метеоров. Методика наблюдений и обработки данных совместных наблюдений подробно изложена в [124-128].

Анализ данных двумерного распределения длительностей радиоэха и абсолютных визуальных звёздных величин 1404 метеоров, зарегистрированных в период действия метеорных потоков Персеид, Геминид и спорадического фона в Оттаве [130], показал, что для заданных значений логарифма длительности радиоэха ( $\lg \tau_D$ ) наблюдается очень большой разброс значений звёздной величины  $m$ , а при фиксированных значениях  $m$  разбросы  $\lg \tau_D$  превосходят более чем на три порядка. Поэтому для исследований корреляции между звёздной величиной и длительностью радиоэха исследователи использовали усреднённые значения этих параметров. На основании данных, полученных в Оттаве, для этих трёх групп метеоров была получена следующая зависимость между длительностью  $\tau$  и абсолютной визуальной звёздной величиной  $M_V$ :

$$\begin{aligned} \lg \tau &= 0.87 - 0.406 M_V && \text{(Персеиды);} \\ \lg \tau &= 1.10 - 0.378 M_V && \text{(Спорадические);} \\ \lg \tau &= 1.15 - 0.349 M_V && \text{(Геминиды).} \end{aligned} \tag{2.1}$$

Несколько позже по аналогичным результатам наблюдений Линдبلاد [125] получил близкие соотношения для Персеид:

$$\lg \tau = 1.08 - 0.5 M_V, \tag{2.2}$$

где в соотношениях (2.1) и (2.2)  $\tau$  выражено в секундах. Эти соотношения в основном справедливы для диапазона звёздных величин  $-3 < M < +4$ .

Однако анализ данных параллельных визуальных и радиолокационных наблюдений указывает на очень низкую точность измерения и целый ряд других недостатков, перечень которых приведён в [7]. К ним относятся: а) несовпадение точек зеркального отражения с точками максимума блеска метеоров, к которым относятся визуальные оценки звёздных величин; б) разброс высот точек зеркального отражения на метеорных следах; в) не учёт влияния процессов деионизации, турбулентной диффузии и влияния искривления следа ветром на длительность радиоэха, имеющей место в случае ярких метеоров; г) неоднородность химического состава, структуры и

механизмов абляции метеорных тел и т.д. Следовательно, использование результатов таких наблюдений для решения точных задач в метеорной физике нецелесообразно. При параллельных телескопических и радиолокационных наблюдениях слабых метеоров частично устраняются недостатки, имеющие место в случаях визуальных и радиолокационных наблюдений. Организация и осуществление одновременных фотографических и радиолокационных наблюдений одних и тех же метеоров значительно сокращают и устраняют имевшиеся недостатки.

**б) Результаты параллельных радиовизуальных телескопических наблюдений метеоров в Ондржеёв.** Поскольку результаты предыдущих совместных наблюдений охватывали в основном яркие метеоры, то в Ондржейовской обсерватории в 1972-1973 гг. с целью расширения диапазона звёздной величины в сторону слабых метеоров были организованы параллельные визуально-телескопические и радиолокационные наблюдения метеоров [128-130]. Для радиолокационных наблюдений метеоров был использован импульсный радиолокатор, работающей на волне  $\lambda = 8$  м с мощностью 25 кВт. Причём, по результатам радиолокационных наблюдений для каждого метеора регистрировалась дата, время (часы, минуты, секунды), дальность до точки зеркального радиоотражения, длительность радиоэха, а по результатам оптических наблюдений была определена угловая длина следа, видимая визуальная звёздная величина и принадлежность метеора к тем или иным метеорным потокам и спорадическому фону. В период организации совместных наблюдений метеоров по результатам радиолокационных наблюдений было зарегистрировано 869 метеоров, а по данным визуальных наблюдений зарегистрировано 1601, и в результате телескопических наблюдений 571 метеор. В результате фильтрации данных совместных наблюдений было выявлено 174 пары совместно зарегистрированных метеоров.

Напомним, что телескопические наблюдения в 1972 г. были организованы с двух пунктов, находящихся друг от друга на расстоянии 28.91 км. Второй пункт наблюдений от обсерватории в Ондржеёв в 1973 г. находился

на расстоянии 35.77 км. Результаты базисных телескопических наблюдений метеоров позволили авторам определить радианты и высоты 263 индивидуальных метеоров. По результатам базисных телескопических наблюдений были определены координаты радиантов и высоты как поточных, так и спорадических метеоров. Результаты определения усреднённых значений координат радиантов и высот поточных метеоров даны в [129].

По результатам оптических наблюдений в пункте Ондржеёв, где была расположена радиолокационная аппаратура, получено 174 параллельных метеоров, часть которых отнесена к Персеидам,  $\delta$ -Акваридам и спорадическому фону. Из данных оптических наблюдений определялась угловая длина, высоты начала и конца следа каждого метеора, абсолютная визуальная звёздная величина, а по результатам радионаблюдений определялась дальность и длительность отражённого сигнала. Для каждой группы поточных метеоров и метеоров спорадического происхождения вычислены усреднённые звёздные величины, высоты начала, конца следа для заданных диапазонов звёздных величин.

По аналогии с [124, 126] V. Znojil и др. также найдена связь между длительностью радиоотражения и абсолютной звёздной величиной для вышеуказанных источников в виде:

$$\begin{aligned}
 \lg \tau &= 1.096 - 0.45 M_V && \text{(Персеиды)} \\
 \lg \tau &= 1.704 - 0.42 M_V && \text{(Спорадические)} \\
 \lg \tau &= 1.790 - 0.435 M_V && \text{(\delta-Аквариды)}. \qquad (2.3)
 \end{aligned}$$

Первое выражение (2.3), полученное для Персеид, близко к выражению, полученному ранее Линдбладом, а два последующих выражения, полученные для спорадических метеоров и метеоров потока  $\delta$ -Акварид, несколько отличаются между собой, что, по-видимому, может быть обусловлено недостаточной статистикой в [129].

По результатам этих же наблюдений исследовалась связь между логарифмом длительности радиозаха, абсолютной звёздной величиной  $M$  и высотой метеоров  $H$  в виде:

$$\lg T = 0.45 \pm 0.5 - (0.23 \pm 0.03) (M-4.5) + (0.03 \pm 0.01) (H-90).$$

Это уравнение похоже на выражение, полученное ранее Р.М. Millman и D.W.R. McKinley для радиолокатора с длиной волны  $\lambda = 8$  м в виде:

$$\lg T_D = -0.28 - 0.4(M-4.5) - 0.067(H-90).$$

На основании данных параллельных радиовизуальных наблюдений в [130] исследовали зависимость абсолютной визуальной звёздной величины от логарифма линейной электронной плотности:

$$M = (40.9 \pm 0.3) - 2.5 \lg \alpha,$$

где  $\alpha$  дано в электрон на метр.

Таким образом, найденные соотношения между линейной электронной плотностью и абсолютной визуальной звёздной величиной метеора на основании данных параллельных визуальных телескопических и радиолокационных наблюдений метеоров в Ондражеёв близки к ранее полученным соотношениям в работе [130]. А вопрос скоростной зависимости отношения между линейной электронной плотностью и абсолютной визуальной звёздной величиной метеора остаётся открытым.

**в) Результаты параллельных фото- и радиолокационных наблюдений метеоров в Джодрелл-Бэнк (Англии) и Таджикистане.** В связи с тем, что точность результатов параллельных визуальных и радиолокационных наблюдений была низкой, ещё во второй половине 1950-х годов возникла необходимость организации и проведения параллельных фотографических и радиолокационных наблюдений. Подобные наблюдения за рубежом проводились впервые в Джодрелл-Бэнк (Англия) [9, 10]. В результате чего 14 декабря 1957 г. был зарегистрирован один яркий метеор потока Геминид ( $V = 36$  км/с). Для фотографического наблюдения была использована фотокамера Супер-Шмидт ( $d = 30$  см,  $f = 10$  см, диаметр поля зрения  $56^\circ$ ). Камера была снабжена 18-тью лопастным обтюратором и установлена к западу от Джодрелл-

Бэнк на расстоянии 160 км. Применение обтюлятора позволяло по мере поступления эха сигнала уверенно находить точку зеркального отражения по фотографии метеора. Для повышения продуктивности результатов параллельных фото-радиолокационных наблюдений было использовано два импульсных передатчика, работающих на разных частотах, близких к 36 МГц, и со следующими характеристиками: мощность в импульсе 10 кВт, длительность импульса 10 мксек, частота посылок 600 имп/с. Уже по одному метеору было обнаружено, что длительность радиоотражения на несколько порядков меньше, чем ожидалось из простейшей теории с учётом только диффузии. Это расхождение объяснялось следствием прилипания электронов к нейтральным молекулам кислорода. Этот эксперимент указал на целесообразность организации и проведения параллельных фото-радиолокационных наблюдений метеоров, и необходимость дальнейшего их развития.

**Таблица 2.1. - Результаты параллельных фото-радиолокационных наблюдений метеоров в Джодрелл-Бэнк**

№ метеора	$M_p$	$t_D$	V	H	Поток
1	-1.7	93	37	94.9	Геминиды
2	-1.8	11	40	110.3	Спорадический
3	+2.0	0.2	29	92.8	-«-
4	+2.7	1.8	27.5	81.5	-«-
5a	+3.3	0.1	33	101.9	-«-
5b	+1.6	4.5	33	96.5	-«-
6	+1.6	0.2	34	96.4	-«-
7	+0.9	1.5	26	89.0	-«-

Спустя четыре года там же, в обсерватории Джодрелл-Бэнк были организованы параллельные фото-радиолокационные наблюдения [10], где в результате редукции данных одновременных наблюдений получены кривые свечения и длительность радиоэха для зеркальных точек для ещё шести спорадических метеоров, скорости которых находились в пределах 26-40 км/с. Результаты параллельных фото-радиолокационных наблюдений метеоров приведены в таблице 2.1, где даны номер метеора,  $M_p$  - абсолютная звёздная

величина,  $t_D$  – длительность радиоэха,  $V$  – скорость,  $h$  – высота радиоотражения на следе метеора и в последнем столбце указана принадлежность метеора.

По этим наблюдениям J. G. Davies и J. C. Gill исследовали зависимость отношения интенсивности свечения к начальной линейной электронной плотности от яркости и скорости метеоров и определяли значение коэффициента вероятности ионизации от скорости. Однако небольшое количество метеоров и ограничение их по скоростям, недостаток полученных данных параллельных фото-радиолокационных наблюдений метеоров не позволили решить поставленную перед авторами задачу.

## **2.2. Обзор, нынешнее состояние исследования метеоров по результатам одновременных радиооптических наблюдений**

Для проверки достоверности результатов, полученных на разных поколениях радаров, и коррекции данных радионаблюдений относительно оптических, начиная со второй половины 1950-х годов начали организовываться и проводиться одновременные радиолокационные и визуальные наблюдения. Данные об аппаратуре, методиках редукции результатов параллельных наблюдений, обобщение и анализ полученных результатов приведены в опубликованных работах [9, 10, 73, 127, 128, 131, 132]. На низкую точность измерений исходных параметров и недостатки подобных наблюдений указывается в работах [7, 73]. Ввиду больших погрешностей измерения данных радиовизуальных наблюдений, С. Gill и J. G. Davie в Джодрелл-Бэнк (Англия) [9, 10] и П. Б. Бабаджанов в ГисАО (Таджикистан) [11, 12] проводили одновременные фотографические и радиолокационные наблюдения. В частности, по результатам одновременных фотографических и радиолокационных наблюдений метеоров в Институте астрофизики НАНТ, проводимых П. Б. Бабаджановым в конце 1960-х гг., было зарегистрировано 7 метеоров с абсолютной звездной величиной от  $-3^m$  до  $-7^m$ . Все эти яркие метеоры имели не зеркальные радиоотражения. Ниже приводится

обзор работ по материалам, полученным одновременно радиооптическим методом наблюдений метеоров в разных обсерваториях развитых стран мира.

В результате почти полугодовых совместных радиотелевизионных наблюдений (февраль 1969 - июнь 1970 гг.) в Гарварде штат Иллинойс (США) А. Ф. Cook с сотрудниками [29] изучили 29 метеоров. Для этих метеоров были вычислены: высоты, радианты, орбиты, фотометрические массы, кривые свечения и отрезки ионизационных кривых. Для исследования связи между процессами свечения и ионизации были использованы только 12 метеоров, которые не испытывали дробления на наблюдаемых участках следа. Скорость этих метеоров составляла 14.7-36.0 км/с, а их звёздные величины находились в пределах  $+7.4^m \div +4.5^m$ . Сопоставляя полученные результаты с данными параллельных визуальных-радиолокационных наблюдений (хотя полученные материалы относятся к различным интервалам звёздных величин и скоростей), авторы пришли к выводу, что яркие метеоры создают более высокую ионизацию, чем слабые.

В августе 1969 г. Р. М. Millman, А. Ф. Cook и С. L. Nemenway провели одновременные оптические, радиолокационные и визуальные наблюдения метеоров [133]. Для проведения наблюдений они применили телевизионную технику, радиолокационную аппаратуру, работающую на волне  $\lambda = 8$  метров, спектрограф и команду визуальных наблюдателей. Видимая звёздная величина метеоров составляла в пределах от -1 до +3. Анализ данных спектральных наблюдений метеоров показал наличие зелёной линии кислорода 5577 А. Показано, что появление этой линии имеет высотную зависимость. Максимум появления этой линии приходится на высоту 106 км.

У. Fujiwara и др. [20] в декабре 1991 и 1993 гг. с использованием радиолокатора MU (с частотой 46,5 МГц и максимальной мощностью 1 МВт) и усиленной видеокамерой Gen-II организовали одновременные наблюдения метеоров потока Геминид. В результате они обнаружили 19 одновременно зарегистрированных метеоров, где установили линейную связь между мощностью радиоотражения и оптической звёздной величиной метеоров

потока Геминид. Совместные метеоры имели звёздные величины, находящиеся в диапазоне от 0 до +5,5. Авторы по полученным материалам определяли предельные звёздные величины радара между +6,5 и +10,0<sup>m</sup> и исследовали связь между длительностью радиоэха  $T_D$  и звёздной величиной  $M$  в виде:

$$\lg T_D = 1.20 - 0.24 M.$$

В 1998 и 1999 годах в период действия метеорного потока Персеид Р. Pecina и соавт. [22, 23] проводили базисные видео- и радиолокационные наблюдения метеоров в Чехии, где в результате получены 18 метеоров со звёздной величиной от +0.4 до +6.0<sup>m</sup>. По полученным материалам они нашли зависимость между звёздной величиной и линейной электронной плотностью в виде:

$$M = 42.51 - 2.5 \log q,$$

где  $q$  дано в эл/м.

Благодаря разработке системы обнаружения цифровых видеокамер на основе датчика EMCCD Sensor, применения чувствительных видеокамер: CAMS, SonotaCo, EDMOND, и AMOS стало возможным регистрировать более слабые метеоры оптическим методом. Причём для исследования метеоров ярче +4 звёздных величин сконструированы камеры для наблюдения метеороидов, охватывающих всю область неба CAMS, Европейская база данных viDeo MeteOr Network EDMOND и сеть SonotaCo [134, 135, 135-137]. Использование высокочувствительных систем оптических камер в последние десятилетия наряду с мощными и чувствительными радиокомплексами позволили регистрировать метеоры слабее ~10 mag.

Начиная с 1990-х годов, во многих научно-исследовательских центрах на базе более мощных комплексов радиоаппаратуры начаты всесторонние исследования явлений метеоров, включая головное эхо. Более того, для получения коррекции результатов наблюдений на аппаратуре различной чувствительности в настоящее время практикуется организация одновременных радиооптических наблюдений [11-29].

В частности, Koji Nishimura с коллегами [13] использовали радиооптическую комбинированную систему обнаружения слабых метеоров, состоящую из мощного доплеровского радара VNP и видеокамеры ICCD. Схема сжатия доплеровских импульсов используется для улучшения отношения сигнал/шум радиолокационных эхосигналов с очень большими доплеровскими сдвигами, а также для определения их дальности с разрешением 200 м. Получена очень высокая чувствительность более 14 звёздных величин и 9 звёздных величин для радиолокационных и оптических датчиков соответственно. Мгновенное направление наблюдаемого радаром метеорного тела определяется методом интерферометрии. Авторы рассмотрели оптимальный способ расположения приёмных антенн, а также обработки сигнала. Его абсолютная точность была подтверждена оптическими наблюдениями с фоновыми звёздами в качестве эталона. Путём объединения скорости падения метеорных тел, полученной радаром, с абсолютной визуальной величиной, определённой одновременно видеокамерой, была оценена масса каждого метеорного тела. Разработанная система наблюдений будет использоваться для создания ценной базы данных о массе и скорости слабых метеоров, о которых до настоящего времени известно очень мало. Авторы предполагали, что база данных сыграет жизненно важную роль в нашем понимании космической среды, необходимой для проектирования крупных космических структур.

K. Nishimura и др. в течение двух ночей с помощью MU-радаров и усилителей изображения с ПЗС-видеокамеры зарегистрировали 35 одновременных метеоров. Они по результатам наблюдения спорадических метеоров также подтвердили линейную зависимость между принимаемой мощностью радиоэха и интенсивностью оптической величины. Кроме того, авторы сопоставили кривые ионизации, полученные на основе радиоотражения от головного эха, с их соответствующей кривой блеска, которые оказались похожими по форме друг с другом.

G. Pupillo с коллегами [24] в период активности метеорного потока Персеид организовали одновременные радиооптические наблюдения. Радиооптические наблюдения проводились с использованием бистатической радиолокационной системы VLM, а оптические - камерой LLTV. В результате одновременных наблюдений были обнаружены десятки совместных метеоров, где по предварительным результатам авторы обосновали преимущества одновременных радиолокационно-оптических наблюдений метеоров.

Изучение метеорных явлений с одновременным применением мощных метеорных многоканальных РЛС с большой апертурой (HPLA) и использованием одного ICCD, а также с двумя видеокамерами ЭОП внедряются в Японии [25]. Авторы для наблюдения использовали одну ICCD-видеокамеру, совмещённую с РЛС, а также две видеокамеры с ЭОП, расположенные на отдалённых расстояниях для наблюдения радиолокационных метеоров оптическим методом. Все оптическими камеры были оборудованы телескопическими объективами.

Комбинированные радиолокационные и оптические наблюдения также были проведены на комплексе EISCAT (Европейский радар некогерентного рассеяния) UHF РЛС, с усиленной видеокамерой в течение шести ночей в октябре 2007 года. РЛС EISCAT UHF способствовал измерению трёхмерного положения метеоров при наличии радиоэха на трёх приёмных станциях. Поле зрения видеокамеры составляло  $6^\circ$ . По результатам совместных наблюдений были получены шесть метеоров одновременно на обеих камерах и на всех трёх приёмниках. Остальные совместные метеоры наблюдались на двух приёмниках и обеих камерах или на одной камере и всех трёх приёмниках. Авторы сопоставляли данные атмосферной траектории и скоростей совместных метеоров, рассчитанные на комплекс РЛС с результатами видеонаблюдений. В работе сравниваются также ионизация и свечение метеоров для проверки согласованности фотометрических, ионизационных и динамических масс метеоров.

R. G. Michell и др. [16] в результате одновременных оптических и радионаблюдений головного эхо выявили семь метеоров в оптическом диапазоне. На основании изучения 338 метеоров, наблюдаемых с помощью PFISR, подтверждено, что существует аналогичная положительная корреляция между оптической яркостью и мощностью радара обратного рассеяния [64].

С целью проверки точности измерения радиантов, скоростей и физических характеристик метеоров, получаемых на радиокomплексе CMOR в Канаде, R.J. Weryk и др. [26, 140-142] организовали и провели одновременные радиолокационные и видеонаблюдения со светочувствительными камерами с использованием ПЗС-матриц. В результате анализа данных наблюдений выявлено, что от 3 до 7% метеоров зарегистрированы, как видеособытия, совпадающие с данными регистрируемых метеоров радиолокационной системой. Авторы выявляли 128 одновременно зарегистрированных метеоров в диапазоне звёздных величин 0–7. Обнаружено, что разность в измерениях координат радиантов радиометеоров относительно данных, полученных с видеокамер, составляет 3 и 4 градуса соответственно, а средние измеренные значения скоростей метеоров с видеокамеры в среднем выше, чем данные радиоизмерений скоростей метеоров. Месторасположение точки зеркального радиоотражения в большинстве случаев находится ближе к высоте конца следа, что может послужить причиной занижения измеренных значений скоростей радиометеоров. На базе полученных материалов Weryk и др. вывели соотношение между линейной плотностью электронов и мощностью излучения фотонов. Исследование зависимости коэффициента ионизации и свечения от скорости метеоров показало, что поток массы метеороида в диапазоне  $10^{-5}$ – $10^{-2}$  г может быть ниже, чем предполагалось ранее.

R.G. Michell и др. [18] провели оптические и двухчастотные радиолокационные наблюдения с помощью радара Arecibo и камеры EMCCD. Всего одновременно было зарегистрировано 19 метеорных событий на трёх метеорных аппаратах. Однако явной корреляции между оптической массой и отношением сигнал/шум радара не обнаружено. Поскольку немалая часть

метеоров была обнаружена в боковых лепестках, авторы пришли к заключению, что радиолокационные поперечные сечения могут быть недооценены, что приведёт к возможному искусственному искажению данных.

Используя комбинацию данных радара SAAMER и видеокамеры EMCCD, R.G. Michell и другие [19] получили 6 метеоров, одновременно зарегистрированных с помощью радара и видеонаблюдений, и показали, что массы метеороидов, независимо оцененные с помощью оптических и радиолокационных наблюдений, согласованы друг с другом.

P. Brown и др. [138] в течение двух лет провели наблюдения головного эхо со Среднеатмосферной радиолокационной системой Alomar MAARSY и двумя видеокамерами Watec с усилением изображения. Они зарегистрировали 105 одновременных метеоров, орбиты которых были определены как радаром, так и оптическим методом. Звёздная величина обнаруженных метеоров варьировалась в диапазоне от 0 до +7 mag. Авторами показано, что имеется чёткая тенденция, что более яркие метеоры имеют более высокие пиковые радиолокационные сечения. Результаты одновременных наблюдений позволили авторам оценить предельную регистрируемую массу MAARSY в  $10^{-6}$ - $10^{-7}$  г.

Используя несколько видеокамер, расположенных рядом с УКВ-радиолокационной станцией, G. Z. Li и коллеги [21] с ноября 2016 по февраль 2017 года провели одновременные радиооптические наблюдения, в результате которых получены 242 оптических метеоров с одновременной регистрацией не зеркальных радиоэхо, отражённых назад от плазменных неоднородностей, оставивших за собой след метеороида. В результате анализа данных звёздных величин метеоров, оцененных по оптическим данным, было выявлено, что не зеркальные эхо-сигналы радара относятся к более ярким метеорам, где они сохраняются в течение более длительного времени.

Для одновременных радиооптических обнаружений более слабых метеоров, R. Ohsawa и другие [25] проводили наблюдения метеоров (слабее  $\sim 10$ mag) с использованием мозаичной CMOS-камеры Tomo-e PM, установленной на 1,05-м телескопе Kiso Schmidt и радара средней и верхней

атмосферы (MU-radar) РЛС (MU). Целью наблюдений являлось выявление отношения между радиолокационным поперечным сечением при наблюдении головного эхо-сигнала от метеора и оптической величиной метеора. Одновременные радиолокационные и оптические наблюдения метеоров были проведены с помощью радара средней и верхней атмосферы (MU-radar) РЛС MU) и камеры с усилением изображения на ПЗС. Первый период наблюдений охватывал 2009-2010 гг. Второй период наблюдений проводился в 2018 году с помощью радара MU и мозаичной CMOS-камеры Томое Gozen, установленной на 1,05-м телескопе Кисо Шмидта. При этом был зарегистрирован 331 одновременный метеор. Связь между поперечными сечениями радара и величинами в оптическом V-диапазоне хорошо аппроксимировалась линейной функцией.

Т. J. Dijkema и др. [17] в Нидерландах в течение 2020 года в период максимума активности метеорных потоков Персеид, Геминид и Квадрантид проводили одновременные радиолокационные и оптические наблюдения на широкополосном радиотелескопе (LOFAR Low Frequency Array)/AARTFAAC12 с частотой 30-60 МГц, и видеонаблюдения с помощью CAMS. Из массива данных, зарегистрированных радиотелескопом LOFAR, 204 были обнаружены CAMS. Однако только 59 метеоров имели чёткий заметный след на радиоизображениях, а остальные оказались точечными. По результатам оптических наблюдений с помощью радиотелескопа LOFAR и видеонаблюдений на CAMS, авторы измеряли высоты начала и конца следа метеоров, результаты которых отличались между собой на 2 и 6 км соответственно. Причина такого расхождения авторами не объясняется.

Таким образом, из обзора данных одновременных радиооптических наблюдений следует различать три группы совместных метеоров в зависимости от свойства радиоотражения: 1) зеркальные отражения от ионизированных следов метеоров, 2) не зеркальные радиоотражения и 3) отражения от головного радиоэха. Ввиду того, что большое количество исследований по физико-кинематическим свойствам метеороидов и в настоящее время основаны на

редукции данных зеркальных отражений, диссертация посвящается редукции и интерпретации данных базисных зеркальных радиоотражений.

### **2.3. Комплекс аппаратуры Института астрофизики НАНТ для оптических и радиолокационных наблюдений метеорных явлений в Земной атмосфере**

**а) Лаборатория фотографических исследований метеоров.** Метеорный отдел Института астрофизики НАН Таджикистана являлся одним из крупнейших научных центров исследования метеорного вещества не только в СССР, но и в мире в целом. Обзор поэтапного внедрения наблюдательного оборудования разных поколений для исследования метеорных явлений в Земной атмосфере, и результаты исследования метеоров в сжатой форме изложены в работах М. Н. Максумова [143, 144].

Начиная ещё с 1930 гг., в Институте астрофизики исследование метеоров поэтапно поставлено на высокий уровень. Метеорный отдел отличался тем, что в нём сплочены не только высококвалифицированные кадры, но, начиная ещё с 1930 гг. при метеорном отделе поэтапно введены и внедрены в действие базисные телескопические наблюдения, а затем базисные фотографические наблюдения метеоров на базе камеры НАФА-3С. Начиная с 1970 гг., для расширения диапазона фотографических регистраций и исследования слабых метеоров начато внедрение телевизионной аппаратуры для наблюдений метеоров.

При метеорном отделе была организована лаборатория фотографических исследований метеоров (ЛФИМАН), радиолокационная лаборатория и лаборатория ионосферной станции. ЛФИМАН находился в авангарде развития новых методов исследования. В 1950-е годы на базе аэрофотокамер с фокусным расстоянием 25 см сконструирован новый метеорный патруль. Наряду с фотографированием метеоров осуществлялись спектральные наблюдения с использованием призмного спектрального агрегата, который позволял фотографировать спектр метеоров с дисперсией 200-300 Å°. Кроме того,

введена в действие установка для впечатывания фотометрического стандарта «Искусственный метеор».

В 1959 г. директором института был назначен Пулат Бабаджанович Бабаджанов, где в период его руководства создана новая наблюдательная база – Гиссарская астрономическая обсерватория. В 1960 г. в состав отдела метеорной астрономии были включены радиолокационная и ионосферная лаборатории и в 1962 г. - лаборатории фотометрии и спектрофотометрии метеоров. В 1971 году последняя была преобразована в лабораторию фотографических исследований метеоров (ЛФИМ), а в 1976 г. радиолокационная лаборатория преобразована в радиотелевизионную лабораторию.

Внедрение комплексных фотографических и спектрографических (в том числе и методом мгновенных экспозиций) телевизионных камер, камер болидной сети и метеорных импульсных радиолокаторов МИР-2 и МИР-3, радиокомплекса «Горизонт», радиопередатчика «Урал» [145] позволяли регистрировать метеоры от самых ярких болидов до метеоров с  $+13^m$  звездной величиной.

В ЛФИМАН под руководством академика П. Б. Бабаджанова разработаны и впервые в мире осуществлены массовые непрерывные наблюдения метеоров по методу мгновенной экспозиции [146]. В лаборатории налажены оптические наблюдения ярких метеоров и болидов, внедрена методика ручной и машинной редукации данных наблюдений, и велось интенсивное исследование вопросов физики метеорных явлений, астрономии и геофизики. ЛФИМАН располагал единственным в СССР действующим крупным многофункциональным комплексом для фотографических и спектрографических наблюдений метеоров и болидов.

Для получения данных атмосферной траектории, радиантов, скоростей и орбит метеоров наблюдения велись на двух пунктах наблюдения: ГисАО и станции Кипчак, расположенной относительно ГисАО на расстоянии 34 км. В состав аппаратуры фотографического метеорного патруля в ГисАО входило 7 камер НАФА 3С/25 ( $D = 10$  см,  $F = 25$  см). Фотографирование метеоров

проводилось на аэрофотоплёнке чувствительностью  $S_{0.85} = 1000-1300$  единиц ГОСТа.

Метеорный отдел активно принимал участие в ряде Международных программ, таких как МГГ, МГСС, МГАС, Международной Программе наблюдений кометы Галлея и т.д. Полученные в ЛФИМАН и радиотелевизионной лаборатории результаты были использованы для оценки притока метеорного вещества и решения ряда астрономических и геофизических задач. Результаты многолетних фотографических наблюдений метеоров обобщены и опубликованы в работах [63-65, 147-149, 150-155]. В Сводный каталог элементов орбит и кривых блеска метеоров, сфотографированных в Институте астрофизики НАН Таджикистана под редакцией академика П. Б. Бабаджанова [65] вошли данные наблюдений 570 метеоров, полученные только с двух пунктов. А результаты наблюдений, полученные с одного пункта, не были привлечены в обработку.

#### **б) Комплексы радиолокационной аппаратуры МИР-2, МИР-3 и Ионосферной станции для исследования слабых метеоров.**

Известны несколько поколений комплексов радиоаппаратуры для исследования метеорных явлений в Земной атмосфере. Первое поколение аппаратуры появились ещё в 1940-х годах. По результатам наблюдений на радиоаппаратуре первого поколения были изучены суточные и сезонные вариации метеорной активности, измерены скорости метеоров, открыты дневные метеорные потоки и т.д. Но эта аппаратура не была приспособлена для измерения радиантов, орбит, высот и дрейфа метеорных следов и т.д. Поэтому перед исследователями метеоров радиометодом ставилась задача конструирования второго комплекса радиоаппаратуры, приспособленной для решения ряда астрономических, геофизических задач и задач, связанных с метеорным распространением радиоволн и т.д.

Исследования метеоров радиолокационным методом в Институте начаты во второй половине пятидесятых годов. Первые наблюдения были организованы на радиолокационной аппаратуре МИР-1 (метеорная

исследовательская радиоаппаратура первого поколения), затем на МИР-2 (с 1964 г.), а в 1980 г. - на комплексе МИР-3. Для исследования слабых метеоров до  $+12^m$  и изучения свойств Земной ионосферы использовался комплекс радиолокационной аппаратуры ионосферной станции [6, 157].

Второй комплекс радиоаппаратуры МИР-2 [100, 104, 156-159] в радиолокационной лаборатории метеорного отдела Института астрофизики был сконструирован в 1964-1968 гг. При этом было предусмотрено осуществление различных экспериментов для исследования физико-динамических и кинематических характеристик метеороидов и, в частности, реализации комплексных радиооптических наблюдений метеоров. Комплекс аппаратуры МИР-2 состоял из двух частей: 1) основная и 2) дополнительная. Основными характеристики аппаратуры являлись:

- передатчик, работающий на длине волны  $\lambda = 8$  м,
- частота повторения 500 имп/сек,
- мощность в импульсе 60 кВт,
- длительность импульса – 6.5 мксек,
- полоса пропускания основного и выносного приёмников – 600 кГц,
- полоса пропускания приёмника угломера – 350 кГц,
- пороговая чувствительность приёмников -  $8 \cdot 10^{-14}$  Вт,
- пороговая чувствительность приёмника-угломера –  $5 \cdot 10^{-14}$  Вт,
- полоса пропускания трактов ретрансляции сигналов с вынесенных пунктов 2 МГц,
- время срабатывания помехозащиты – 6 мсек.

Приёмно-регистрационная система включала пять приёмных пунктов, один из которых находится рядом с передатчиком (рисунок 2.1), а остальные расположены относительно центрального пункта на расстояниях от 4 до 10.9 км. Наряду с передатчиком и приёмно-регистрационной аппаратурой, в состав комплекса МИР-2 входили антенные системы и два индикатора: а) индикатор покадровой регистрации [157] и б) индикатор с ждуще-непрерывной

регистрацией [156]. Комплекс МИР-2 имел 5 приёмных станций (таблица 2.2). Приёмник центрального пункта был расположен рядом с передатчиком, а остальные четыре приёмника были расположены на расстояниях от 4-х до 10.9 км относительно центрального пункта. Пятый пункт в составе комплекса МИР-2 был введён в 1975 г.

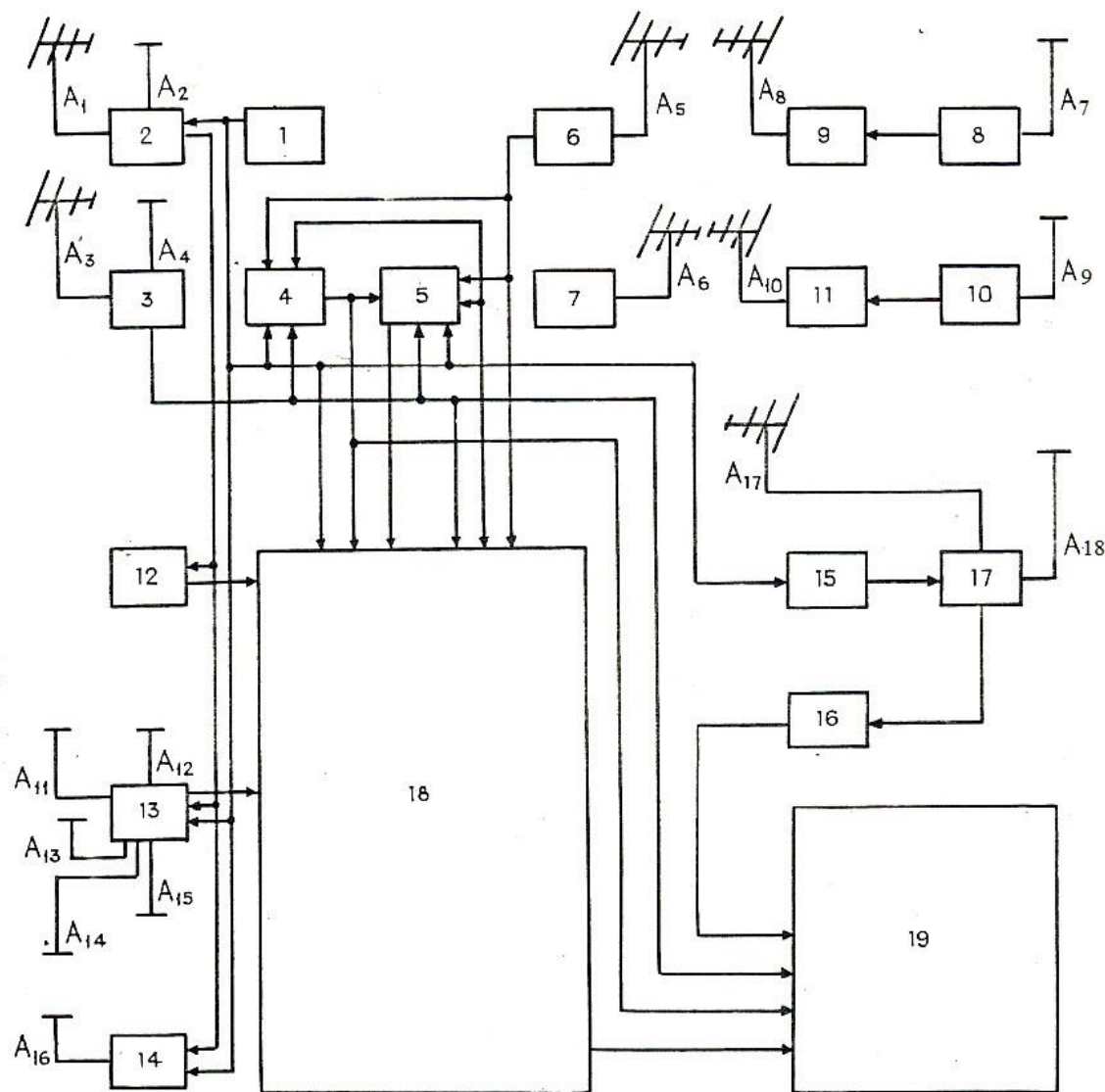


Рисунок 2.1. - Функциональная схема комплекса МИР-2 (1 - Синхроблок; 2 – передатчик 37.4 МГц; 3 – приёмник 37.4 МГц; 4 – блок защиты от помех; 5 – схема точной дальности; 6-7 – приёмники ретранслированных сигналов; 8-10 – приёмники выносных пунктов; 9, 11 - передатчики ретрансляторов; 12 – фазовый блок; 13 – угломер; 14 – имитатор метеоров; 15 – передатчик 73 МГц; 17 – антенный коммутатор; 18 - многолучевой индикатор покадровой съёмки; 19 - индикатор непрерывной записи; A1-A18 – антенны)

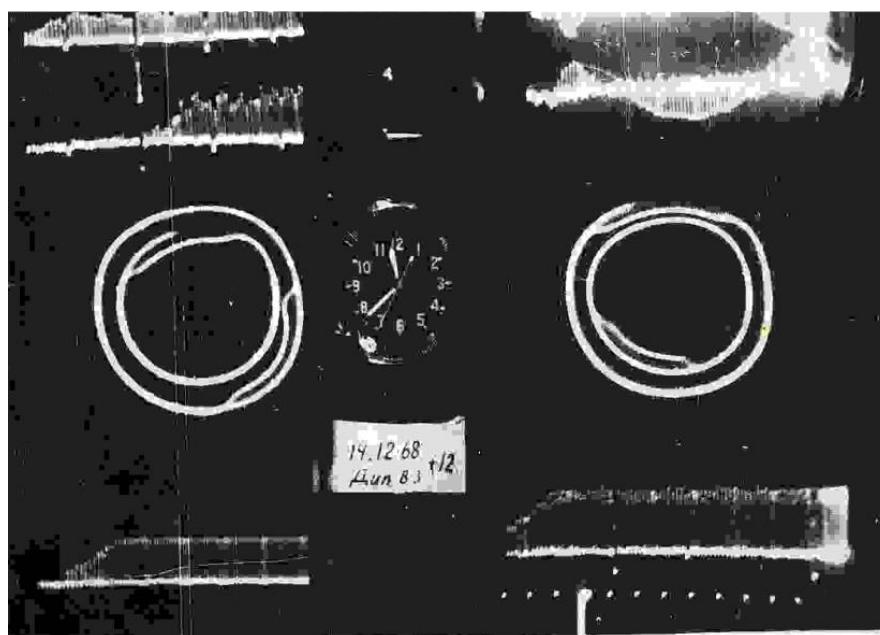
Основные характеристики дополнительной аппаратуры следующие: несущая частота – 73 МГц; мощность передатчика в импульсе 50-60 кВт; частота повторения – 100 импульсов в секунду (синхронная работа с основной частотой 500 Гц); длительность импульса – 10 мксек, полоса пропускания – 150 кГц; пороговая чувствительность приёмника  $6 \cdot 10^{-14}$  Вт; помехозащита от основной аппаратуры; регистрация непрерывно осуществлялась при существовании сигнала на частоте 37.4 МГц.

**Таблица 2.2.** - Расположение приёмных пунктов (II, III, IV, V) относительно центрального I

№ пунктов	II	III	IV	V
Ai	315°	93°	202°	135°
R (км)	4.1	3.8	3.9	10.9

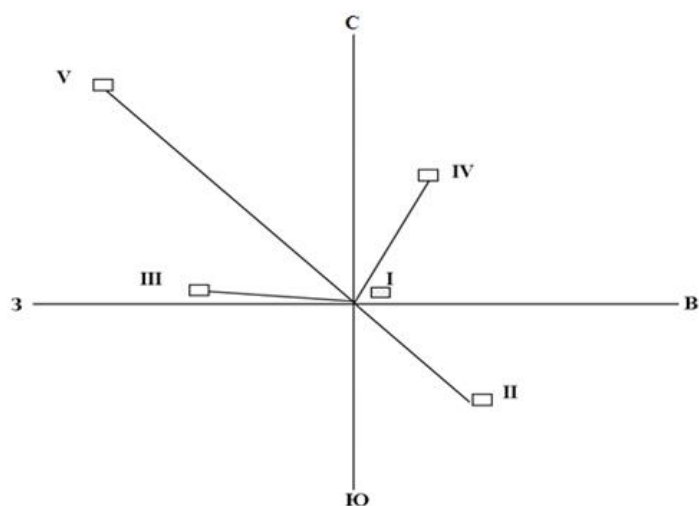
*Примечание:* № - номер приёмных пунктов, Ai - азимут i-го пункта и R – расстояние приёмных пунктов относительно центрального.

На рисунке 2.2 приводится образец записи метеора на покадровой развёртке комплекса МИР-2.



**Рисунок 2.2.** - Образец записи метеора на покадровой развёртке комплекса МИР-2

Расположение выносных пунктов относительно центрального (I) приводится графически на рисунке 2.3.



**Рисунок 2.3. - Расположение четырёх выносных пунктов относительно центрального (I)**

С 1975 по 1981 гг. велась работа по созданию радиолокатора третьего поколения МИР-3 с автоматизацией измерений наблюдений. Радиолокатор был подключён к ЭВМ М-6000, что позволяло производить обработку данных наблюдений и выводить на печать данные о каждом метеоре, распределении по дальностям, скоростям, длительностям радиоэха и средних значениях скорости дрейфа за любой заданный интервал времени. Из наблюдений измерялись и преобразовывались амплитуда, фаза и дальность радиоотражения в цифровую форму, что осуществлялось обработкой на ЭВМ М-6000. С помощью данного комплекса проводилось измерение наблюдений одновременно в северном и западном направлениях в период действия международных программ МАП, МАК, ГЛОБМЕТ в 1981 г.

С апреля 1988 г. измерения данных радионаблюдений велись одновременно с 4-х направлений на комплексе МИР-3, который очень хорошо зарекомендовал себя. В 1996 г. в период действия метеорного потока Персеид в радиотелевизионной лаборатории были организованы и проведены одновременные наблюдения метеоров, в результате которых зарегистрированы 103 совместных метеоров (результаты не опубликованы).

Комплекс МИР-3 имеет следующие характеристики:

- длина волны ( $\lambda$ ) = 8 м,
- средняя мощность (P) = 1.5 кВт,

- мощность в импульсе ( $P_{и}$ ) = 90 кВт,
- длительность импульса ( $\tau$ ) = 30 мс,
- частота посылок импульса ( $f_0$ ) = 500 Гц,
- промежуточная частота приёмника = 150 КГц,
- полоса пропускания = 50 кГц,
- реальная чувствительность = 2 мВ.

Комплекс МИР-3 был сопряжён с компьютером М-6000 со следующими узлами:

- процессор А – 131 - 7/2,
- ОЗУ А - 211 8 на 16 К,
- Мвчис А – 623/1,
- Мпис А - 622/4,
- АЦП - А - 611/8,
- таймер,
- consul – 260,
- FS - 1501.

#### **в) Основные параметры комплекса радиолокационной станции ГисАО для наблюдения слабых метеоров.**

С целью изучения свойств слабых метеоров и исследования их пространственной структуры (распределение метеорных тел по длительностям) в метеорных потоках, исследования взаимосвязи метеорных явлений с нижней частью ионосферы, изучение слоёв E, E<sub>s</sub> и ночного слоя E, на базе ионосферной лаборатории Института астрофизики НАН Таджикистана в 1963-1966 гг. [146] в ГисАО был создан комплекс радиотехнической аппаратуры, которая позволяла регистрировать численность метеорных радиоэхо, длительности и наклонные дальности от ионизированных метеорных радиоэхо. В состав комплекса входила установка по вертикальному зондированию нижней ионосферы, реконструированная на базе ионозонда SP-3. В состав комплекса аппаратуры входили:

а) передатчик с входным спектром частот 0.5-20 МГц для режима вертикального зондирования ионосферы и 15-25 МГц для режима радиолокации слабых метеоров, мощность в импульсе – 30 кВт, частота посылок импульса 30-50 Гц, длительность зондирующего импульса 100 микросекунд;

б) две идентичные узконаправленные горизонтально расположенные ромбические антенны, одна из которых предназначена для излучения, а другая для приёма радиоэха. Ширина диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях  $\pm 15^\circ$ , максимум излучения под углом  $25^\circ$  к горизонту;

в) приёмное устройство, где сигнал с выхода приёмника после преобразования поступает на электронно-лучевой индикатор, и одновременно приходят метки дальности через каждые 100 км в интервале от 100 до 600 км. Далее регистрация метеоров с экрана электронно-лучевой трубки осуществляется фоторегистрирующей камерой на перфорированную 35 мм киноплёнку. Пороговая мощность комплекса (при отношении сигнал-шум равном 3) составляла  $4.8 \cdot 10^{-14}$  Ватт, а пороговая регистрируемая звёздная величина  $+12.4^m$ . С помощью данного комплекса был проведён целый ряд циклов радиолокационных наблюдений, как в период действия главных метеорных потоков, так и спорадического фона.

#### **г) Телевизионная аппаратура метеорного отдела для наблюдения слабых метеоров.**

Телевизионная аппаратура, используемая для наблюдений метеоров в Институте астрофизики НАН Таджикистана, создана на базе промышленной телевизионной станции ПТС-3 [147, 152]. Она состоит из следующих узлов: а) телевизионный телескоп, б) усилители, в) видеоконтрольные устройства и г) фотокамера. Телевизионный телескоп выполняет функции передающей камеры и состоит из входной оптики ЭОП-типа УМ-92 в сочетании с суперортиконом ЛИ-214. В качестве входной оптики применён объектив «Юпитер-3» с фокусным расстоянием  $F = 50$  мм, относительным отверстием 1/1.5 и с полем зрения  $20^\circ \times 30^\circ$ .

Основные характеристики телевизионной аппаратуры, следующие:

- способ разложения – через строчный,
- стандарт разложения – 625 строк в кадре,
- частота смены полей – 50 Гц,
- полоса пропускания видеосигнала с неравномерностью до +0.5 дБ – 5 МГц,
- напряжение питания сети – 220 В,
- время непрерывной работы – 10 часов.

Телевизионный телескоп смонтирован на специальной установке, позволяющей регулировать его как по высоте, так и по азимуту. Основные параметры ЭОП УМ-92 и суперортикона ЛИ-214 даны в работе [160], а оценка эффективности телевизионных наблюдений при регистрации метеоров приведена в [153].

Принцип работы телевизионной системы заключается в следующем. С помощью входного объектива «Юпитер-3» световой поток от наблюдаемых объектов поступает на фотокатод трёхкаскадного ЭОПа УМ-92, где происходит увеличение яркости изображения объектов в  $10^4$ - $10^5$  раз. Усиленное по яркости изображение с экрана ЭОП проектируется на фотокатод суперортикона ЛИ-214, где сигнал преобразуется в видеосигнал. Этот сигнал поступает на вход предварительного усилителя, где происходит усиление, а затем по коаксиальному кабелю подаётся на вход промежуточных усилителей. В этом блоке размещены различные вспомогательные устройства, позволяющие регулировать такие характеристики, как яркость, контрастность и другие. С выхода промежуточного усилителя видеосигнал одновременно подаётся на 2 видеоконтрольных устройства (ВКУ). Одно ВКУ служило для визуального контроля, а другое снабжено фоторегистратором, где производится фотографирование часов и изображения звёздного неба с экрана ВКУ на 35 мм фотоплёнку с экспозицией 5 секунд.

#### **д) Некоторые результаты параллельных фото-радиолокационных наблюдений ярких метеоров в Таджикистане.**

Учитывая отсутствие одновременно зарегистрированных данных фото-радиолокационных наблюдений метеоров в 1960 гг., охватывающих область высоко скоростных метеоров, в метеорном отделе Института астрофизики НАН Таджикистана была поставлена цель организовать одновременные наблюдения в период действия главных метеорных потоков. В Советском Союзе первые параллельные фото-радиолокационные наблюдения метеоров были организованы в период действия метеорных потоков Персеид и Леонид в Таджикистане [9]. В результате были получены 7 метеоров, 5 из которых принадлежали потоку Персеид, а два – потоку Леонид. Соответственно, по результатам параллельных фото-радиолокационных наблюдений в Джодрелл-Бэнк получено 6 метеоров с абсолютной звёздной величиной  $+3^m$  -  $-1.8^m$ , а по результатам одновременных фото-радиолокационных наблюдений в Душанбе - 7 ярких метеоров ( $-2.4^m$  -  $-7^m$ ).

Используя ранее полученные результаты параллельных фото-радиолокационных наблюдений метеоров в [10] и данные, полученные в ГисАО, П. Б. Бабаджанов для двух групп метеоров по скоростям ( $V = 32$  и  $V = 62$  км/с) получил зависимость коэффициента вероятности ионизации от скорости, а также связь отношения абсолютной звёздной величины метеора от линейной электронной плотности в точке радиоотражения в виде:

$$M = 34 - 2.5 \lg q,$$

где  $q$  – величина линейной электронной плотности.

Эти результаты параллельных фото-радиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане были использованы и для решения геофизических задач и определения скорости некоторых процессов деионизации в атмосфере по данным, полученным для зеркальных точек следов метеоров. В частности, в работах [9] по результатам одновременных фотографических и радиолокационных наблюдений семи ярких метеоров определяли скорость прилипания электронов ( $k$ ) в метеорных следах. Получено, что на высотах 94-

100 км  $k$  изменяется в пределах 0,008-0,032 с<sup>-1</sup>. А по результатам комплексных наблюдений метеоров в эпоху действия Леонид и Персеид определён коэффициент прилипания ( $\beta_e$ ) электронов к нейтральным частицам метеорной плазмы. Получено, что  $\beta_e = 10^{-12}-10^{-11}$  см<sup>3</sup>/с, что соответствует энергии электронного сродства  $2.35 \pm 0.15$  эВ.

Остановимся на некоторых результатах, полученных в метеорном отделе Института астрофизики НАНТ на основе результатов параллельных радио-фотографических наблюдений. К ним относятся:

1. На базе данных 7 ярких метеоров, зарегистрированных в фото-радиолокационной лаборатории метеорного отдела Института астрофизики НАН Таджикистана, исследованы отношения логарифма интенсивности свечения к линейной электронной плотности 7 совместных метеоров со средним значением скорости  $v = 64$  км/с и определён коэффициент вероятности ионизации ( $\beta$ ), который составлял  $= 0.17$  [162].

2. Определена скорость прилипания электронов ( $k$ ) в метеорных следах. Получено, что на высотах 94-100 км величина  $k$  изменяется в пределах 0,008-0,032 с<sup>-1</sup> [162]. Эти результаты хорошо согласованы с аналогичными данными, полученными радиолокационным методом.

3. Исследована скорость прилипания электронов к пыли и нейтральным частицам метеорного вещества. Показано, что наблюдаемая скорость прилипания электронов в метеорных следах не может быть объяснена захватом свободных электронов только кислородом, как это считали раньше. Скорость прилипания ( $k$ ), обусловленная кислородом и пылью, в 50 раз меньше наблюдаемой. Показано, что наблюдаемая величина  $k$  может быть объяснена прилипанием электронов к нейтральным частицам самого метеорного вещества, концентрация которых в следе на несколько порядков превышает концентрацию свободных электронов.

4. По результатам комплексных наблюдений метеоров в эпоху Леонид и Персеид определён коэффициент прилипания ( $\beta_e$ ) электронов к нейтральным

частицам метеорной плазмы. Получено, что  $\beta_e=10^{-12}-10^{-11}$  см<sup>3</sup>/с, что соответствует энергии электронного сродства  $2,35\pm 0,15$  эВ. Таким качеством могут обладать оксиды кремния, которые входят в состав каменных метеорных тел. Эти результаты указывают на то, что метеорные тела потоков Леонид и Персеид в основном каменные. Независимые спектральные наблюдения метеоров свидетельствуют о том, что метеорные тела названных потоков на самом деле каменные. Таким образом, здесь имеется косвенное доказательство достоверности полученных результатов. Но, к сожалению, до настоящего времени нет ни экспериментальных, ни теоретических определений сродства к электрону оксидов кремния.

5. Предложен метеорный метод определения скорости прилипания электронов к кислороду, для чего необходимы одновременные спектрофотометрические и радиолокационные наблюдения одних и тех же метеоров [163].

6. Предложен метод определения скорости фотоотлипания электронов (I) в метеорных следах. По результатам радиолокационных наблюдений метеоров в Томске (174 тыс. радиоэхо) получено, что  $I=(0,053\pm 0,024)$  с<sup>-1</sup>.

7. Предложен метод определения некоторых характеристик мелкомасштабной турбулентности. По результатам комплексных наблюдений метеоров получено, что удельная энергия диссипации атмосферных вихрей на высотах 94-100 км составляет 23-2700 эрг/гс, постоянная времени  $t_2=1-19.5$  с, коэффициент турбулентной диффузии  $D_e=3\cdot 10^4-1,2\cdot 10^6$  см<sup>2</sup>/с.

Однако ввиду того, что эта корреляция была получена для ограниченного диапазона скоростей, применять её по всему диапазону метеорных скоростей не представлялось целесообразным. Следовательно, исследование взаимосвязи процессов свечения и ионизации, а также зависимости звёздной величины метеора от начальной линейной электронной плотности для одной зеркальной отражающей точки следа метеоров было рассмотрено в работах [17, 21, 23, 25-27].

В настоящее время особый интерес представляет расширение таких

наблюдений на область как ярких, так и слабых метеоров, охватывающую весь диапазон метеорных скоростей. Для успешного решения поставленных задач целесообразно применение такой оптической аппаратуры, чувствительность которой была близка или совпадает с чувствительностью радиолокационной аппаратуры. Современные электронно-оптические камеры, телевизионная, видео- и радиолокационная аппаратура имеют высокую чувствительность, и с этой точки зрения являются наиболее подходящими для организации одновременных наблюдений. В отличие от прямого фотографирования, преимущества телевизионной, электронно-оптических и видеокамер наблюдения состоят в уменьшении времени экспозиции, требующейся для получения изображения при низкой освещённости. Другое назначение – получение фотоотпечатков такого же качества, как и обычные снимки (сделанные при высокой освещённости).

Кроме того, телевизионная и видеотехника преобразует световые изображения в электрический сигнал. Его непосредственная обработка без промежуточных этапов, как воспроизведение оптического изображения и его фотографирование, открывает широкие перспективы автоматизации процесса измерений. В зависимости от программы работы, видеосигнал может быть закодирован по амплитуде и по времени, а последующая его обработка производится в вычислительной машине. Визуальный контроль над объектом наблюдения можно осуществлять с помощью монитора, расположенного внутри павильона, что позволяет оперативно вести процесс наблюдения и обработку.

Первые шаги в исследовании процессов свечения и ионизации в слабых метеорных следах были предприняты в работе А. Ф. Cook и др. [29], где в качестве оптической аппаратуры была использована телевизионная система с входной оптикой с фокусным расстоянием  $F = 105$  мм и апертурой 125 мм. Радиолокационные наблюдения проводились в Гарвардском радиокомплексе, который состоял из передатчика, работающего на длине волны  $\lambda = 7.33$  м и 8-

ми принимающих станций, расположенных по отношению к центральному пункту на расстояниях 11.4–47.29 км.

В результате почти полугодовых совместных наблюдений (февраль 1969 – июнь 1970 гг.) были зарегистрированы и исследованы 29 метеоров. Для этих метеоров были вычислены: массы, высоты, радианты, орбиты, кривые свечения и отрезки ионизационных кривых. Для исследования связи между процессами свечения и ионизации были использованы только 12 метеоров, которые не испытывали дробления на наблюдаемых участках следа. Скорость этих метеоров составляла 14.7–36.0 км/с, а их звёздные величины в пределах  $+7.4^M$  -  $+4.5^M$ . Сопоставляя полученные результаты с данными параллельных визуально-радиолокационных наблюдений (хотя полученные материалы относятся к различным интервалам звёздных величин и скоростей), авторы пришли к выводу, что яркие метеоры создают более высокую ионизацию, чем слабые.

В августе 1969 г. Р. М. Millman, А. F. Cook и С. F. Nemenway провели одновременные оптические, радиолокационные и визуальные наблюдения метеоров [133]. Для проведения наблюдений они применили телевизионную технику, радиолокационную аппаратуру, работающую на волне  $\lambda = 8$  м, спектрограф и команду визуальных наблюдателей. Видимая звёздная величина метеоров составляла в пределах от -1 до +3. Анализ данных спектральных наблюдений метеоров показал наличие зелёной линии кислорода  $5577 \text{ \AA}$ . Получено, что появление этой линии имеет высотную зависимость. Максимум появления этой линии приходится на высоту 106 км.

Таким образом, до конца 1970 гг. имеющиеся результаты, полученные как по результатам параллельных фото-радиолокационных [10], так и данных одновременных телевизионных и радиолокационных наблюдений метеоров [29], охватывают только отдельные интервалы скоростей и яркостей метеоров, что недостаточно для изучения взаимосвязи этих процессов на всём диапазоне метеорных скоростей по однородным наблюдательным материалам и решения целого ряда вопросов физико-кинематических и геофизических характеристик.

Исходя из вышеизложенного, в 1977-1980 гг. в Институте астрофизики НАН Таджикистана были организованы комплексные фотографические, спектральные радиолокационные и телевизионные наблюдения метеоров. Причём для расширения диапазона скоростей и яркостей совместных фото-радиолокационных метеоров перед докторантом ставилась задача провести поиск совместных метеоров на базе имеющегося наблюдательного материала в ЛФИМ и радиотелевизионной лаборатории метеорного отдела Института астрофизики.

#### **2.4. Поиск одновременно зарегистрированных радиотелевизионных метеоров. Определение азимута и зенитного расстояния зеркальных точек**

Чтобы выбрать оптимальные условия для радиолокационных и особенно одновременных радиотелевизионных наблюдений того или иного метеорного потока или ассоциации, необходимо знать азимут и зенитное расстояние отражающей точки в любой момент времени  $t$ , когда радиант находится над горизонтом. Хорошо известные формулы, позволяющие по известным экваториальным координатам радианта и моменту времени определить необходимые величины  $A$  и  $Z$ , имеют вид:

$$\cos x = -\cos \delta \cdot \sin t';$$

$$\cos y = \sin \delta \cdot \cos \varphi - \cos \delta \cdot \sin \varphi \cos t';$$

$$\cos Z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cos t';$$

$$\operatorname{tg} A = \cos y / \cos x.$$

Здесь  $\cos x$ ,  $\cos y$  и  $\cos Z$  - направляющие косинусы линий, соединяющих наблюдателя и радиант с осями прямоугольной системы координат, направленными на восток, север и в зенит, соответственно.  $\delta$  - склонение радианта,  $\varphi$  - широта места наблюдения,  $t'$  - двугранный угол между плоскостями небесного меридиана и меридиана, проходящего через радиант, отсчитываемый от точки верхней кульминации до радианта против часовой стрелки,  $Z$  - зенитное расстояние радианта,  $A$  - азимут радианта. Угол, измеряемый в плоскости математического горизонта и отчитываемый от оси  $x$

против часовой стрелки, выбран таким образом, чтобы выполнялись условия:  $AE = 0$ ,  $AN = 90^\circ$ ,  $Aw = 180^\circ$ ,  $As = 270^\circ$ .

Следует отметить, что если  $Z = 90^\circ$ , то есть радиант находится на горизонте в момент восхода или захода, то  $\cos Z = 0$ , что позволяет определить момент восхода и захода радианта в системе  $t'$ . Так как необходимо рассчитать положение радианта в любой момент дискретного времени ( $T_d$ ), необходимо перейти к  $T_d$  пункта наблюдения. Известно, что в день весеннего равноденствия Солнце находится в точке пересечения экватора с эклиптической  $\gamma$  и  $\alpha_c = 0^\circ$  (где  $\alpha_c$  прямое восхождение Солнца). В дальнейшем Солнце смещается к востоку от точки весеннего равноденствия и  $\alpha_c$  изменяется от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  за год. Таким образом, можно вычислить  $\alpha_c$  в любую дату, если известна координата  $\alpha_c$  в момент верхней кульминации на заданные сутки, что соответствует 12 часам местного среднесолнечного времени. Также зная прямое восхождение радианта, можно вычислить момент верхней кульминации радианта в то же время. При этом для момента верхней кульминации радианта  $t' = 0$ , что позволяет определить координаты радианта в любой момент среднесолнечного времени. Переход от местного среднесолнечного времени осуществляется по формуле, если известна  $\lambda$  – долгота места наблюдения ( $\lambda = 4h 35m$ ):

$$T = T_d - \lambda + N_h + 1h,$$

где  $T_d$  – декретное время,  $T$  – местное среднесолнечное время,  $N_h$  – номер часового пояса.

Таким образом задача определения  $A_r$  и  $Z_r$  радианта в любой момент  $T_d$  решена. Теперь для данного момента декретного времени необходимо от известных координат  $A_r$  и  $Z_r$  перейти к  $Z_{от}$  и  $A_{от}$  главной отражающей точки.

Из теории радиолокации известно, что отражение от метеорных следов происходит зеркально и отражающей точкой на метеорном следе является точка пересечения траектории метеора с лучом, проведённым из точки наблюдения к данной траектории нормально к ней. Главной зеркальной точкой

для данного положения радианта является точка пересечения с небесной сферой прямой, проведённой из пункта наблюдения в плоскости меридиана, проходящего через зенит и радиант, нормально к прямой, соединяющей радиант и наблюдателя. Пользуясь этим определением, можно легко найти связь  $A_r$  и  $Z_r$  радианта с  $A_{от}$  и  $Z_{от}$  его главной зеркальной точки:

$$Z_{гзт} = 90^\circ - Z_r, \quad A_r = A_{гзт} \pm 180^\circ.$$

Эти расчёты применимы и при TV-наблюдениях. Для этого необходимо определить моменты восхода и захода Солнца для Тд. Зенитное расстояние Солнца для любого момента местного среднесолнечного времени заданных точек на заданной широте можно определить, пользуясь Астрономическим календарём или по приближенной формуле:

$$\cos Z_c = \sqrt{1 - \sin 2 \alpha_c \cdot \sin 2 \psi \cdot \cos \varphi \cdot \sin (t - 6 / 12 \cdot \pi) + \sin \alpha_c \sin \varphi \sin \psi},$$

где  $Z_c$  – зенитное расстояние Солнца в данный момент Т,  $\alpha_c$  – прямое восхождение Солнца на данные сутки,  $\psi = 23^\circ 27'$  – угол между плоскостью небесного экватора и эклиптики. Приравнивая  $\cos Z_c$  к нулю, что соответствует моменту восхода и захода Солнца, находим время Т восхода и получаем соответствующие моменты в Тд.

Зеркальной точкой может быть любая точка большого круга на небесной сфере, плоскость которого нормальна к прямой, соединяющей наблюдателя и радиант. Направляющие косинусы любой зеркальной точки относительно соответствующих осей координат могут быть определены следующим образом:

$$\cos x = \sin \beta;$$

$$\cos y = \cos \beta \cos Z_r;$$

$$\cos Z = \cos \beta \sin Z_r;$$

$$\operatorname{tg} A_z = \cos x / \cos y;$$

$$A_{зт} = A_{гзт} \pm A_z,$$

где  $\beta$  – угол между направлением на главную зеркальную точку и на зеркальную точку, причём он изменяется от  $0^\circ$  до  $\pm 90^\circ$  в плоскости, нормальной к прямой, соединяющей наблюдателя и радиант.  $A_z$  – угол, на

который изменится  $A_{зт}$  по сравнению с  $A_{гзт}$ . Полученные формулы позволяют по заданному зенитному расстоянию главного луча диаграммы направленности антенны определить азимуты зеркальных точек для любого момента времени  $T_d$ . Если положение радианта удовлетворит условия зеркальности для данной антенны, метеоры потока будут регистрироваться в определённой области, пересекаемой плоскостью большого круга, расположенного нормально к прямой, соединяющей радиант и антенну. Главная зеркальная точка займёт на этой области положение с максимальным  $Z$ , но так как диаграммы направленности имеют определённую ширину, зеркальные точки расположатся на данном большом круге симметрично относительно главной зеркальной точки.

В зеркальной плоскости ширина диаграммы направленности составит приблизительно  $30^\circ$  в обе стороны от главного луча, в горизонтальной плоскости приблизительно  $50^\circ$  для антенны полуволновым вибратором. Главный луч диаграммы направленности приблизительно под углом  $\approx 45^\circ$  к горизонту.

Для решения поставленных задач нами в периоды действия некоторых главных метеорных потоков были организованы одновременные радиолокационные и телевизионные наблюдения. К таким потокам относятся Квадрантиды,  $\alpha$ -Каприкорниды,  $i$ -Аквариды,  $\delta$ -Аквариды, Персеиды, Ориониды и Геминиды, скорости метеоров которых составляют от 21 до 69 км/с. Исходя из средних значений координат радиантов, заранее вычислялись координаты зеркальных точек для каждого из указанных потоков в зависимости от времени для направления TV-телескопа в нужную область неба при совместных наблюдениях. Телевизионная и радиолокационная аппаратура была расположена в одном пункте, на ГисАО.

Параллельные наблюдения были проведены в августе 1978 г., январе, июле, октябре и декабре 1979 г. и августе 1980 г. Причём радиолокационные наблюдения проводились круглосуточно, за исключением периодов активности

$\alpha$ -Каприкорнид и  $\delta$ -Акварид, а телевизионные - только в ясные безоблачные ночи, либо до восхода, либо после захода Луны. Для определения момента пролёта метеора при совместных наблюдениях операторы по каждому шестому сигналу точного времени нажатием специальной кнопки производили подсветку часов, как у радиолокатора, так и у TV-установки.

## **2.5. Результаты комплексных радиотелевизионных (ТВ) наблюдений метеорных потоков в Таджикистане**

Исследование метеоров в настоящее время проводится самыми различными методами, в том числе оптическими (фотографическими, электронно-оптическими, видео-, телевизионными) и радиолокационными. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. В частности, оптические методы применяются только в безоблачные, ясные и безлунные ночи, что приводит к потере ценной информации о дневных метеорных потоках и ассоциациях. Эти недостатки исключаются при использовании радиолокационного метода. Однако данные, полученные радиометодом, не могут конкурировать по точности измерения как физических, так и кинематических характеристик метеоров с результатами оптических методов. Применение комбинированных оптических и радиолокационных методов позволяет устранить недостатки, имеющиеся в том или ином методе. При этом значительно повышается информативность получаемого материала о метеорных следах и процессах, сопровождающих полёт метеоров в земной атмосфере.

Уже в самом начале развития радиолокационных методов исследования метеоров с целью проверки отдельных положений физической теории метеоров, в ряде обсерваторий мира были проведены параллельные визуальные и радиолокационные наблюдения одних и тех же метеоров [125, 126]. По данным этих наблюдений, авторы исследовали связь между звёздной величиной и длительностью радиоэха от метеорных следов. Поскольку предыдущие параллельные наблюдения охватывали в основном яркие метеоры,

то в Ондражеевской обсерватории в 1978-1979 гг. с целью регистрации слабых метеоров были организованы параллельные визуально-телескопические и радиолокационные наблюдения метеоров [128-130].

Так как точность этих наблюдений была низкой, то ещё в 60-е годы двадцатого века возникла необходимость проведения параллельных фотографических и радиолокационных наблюдений. Подобные наблюдения за рубежом проводились сначала в Джодрелл-Бэнк (Англия) [9], а затем в Душанбе [11]. По параллельным наблюдениям в Джодрелл-Бэнк зарегистрировано 6 метеоров с абсолютной звёздной величиной  $+3^m - -1.8^m$ , а в Душанбе зарегистрировано 7 ярких метеоров ( $-2.4^m - -7^m$ ), принадлежащих к метеорным потокам Персеид и Леонид.

Первые шаги в исследовании процессов свечения и ионизации слабых метеоров были предприняты в [29], где в результате почти полугодовых параллельных радиотелевизионных наблюдений (февраль 1969 – июнь 1970 гг.) были зарегистрированы 29 метеоров. Скорости этих метеоров составляли в интервале от 14.7 до 36.0 км/с, а их звёздная величина в пределах от  $+7.4^m$  до  $+4.5^m$ . Таким образом, имеющиеся данные, полученные как из параллельных фото-радиолокационных [10, 11], так и телевизионных и радиолокационных наблюдений [29], охватывают только отдельные интервалы скоростей и яркостей метеоров, что недостаточно для изучения взаимосвязи процессов свечения и ионизации во всём диапазоне метеорных скоростей и звёздных величин. Исходя из вышеизложенного, в Институте астрофизики АН Республики Таджикистан в 1977-1980 годах в период действия главных ежегодных метеорных потоков и спорадического фона были организованы комплексные фотографические, спектральные телевизионные и радиолокационные наблюдения метеоров.

## **2.6. Отождествление одновременно зарегистрированных радиотелевизионных метеоров и методика нахождения отражающей точки на следе метеора**

Для решения вышеизложенных задач, наблюдения проводились в периоды максимума активности ряда известных ежегодных метеорных потоков, имеющих обычно большие часовые числа. При этом нами заранее для метеорных потоков Персеид, Квадрантид, Геминид,  $\delta$ -Акварид,  $\alpha$ -Каприкорнид и т.д. определялся момент верхней кульминации радианта области месторасположения, азимут и зенитное расстояние зеркальной точки, которые были необходимы для проведения совместных наблюдений.

Обработка наблюдений начиналась с просмотра плёнки, полученной при телевизионных наблюдениях. В начале просматривались контрольные часы и составлялся график, позволяющий внести поправку к показаниям времени для всего периода наблюдений. Затем плёнку за каждую дату внимательно просматривали на микрофоте, отмечали кадры с метеорами и наносили положение метеоров на звёздную карту. Последнее позволит установить принадлежность метеора к тому или иному потоку или спорадическому фону, так как траектории поточных метеоров при их продолжении назад пересекают друг друга в точке радианта. Далее составлялся перечень телевизионных метеоров, где указывался номер, дата и время пролёта, принадлежность метеора к потокам и его приближенная видимая звёздная величина в точке максимума яркости.

Поиск общих метеоров производился в два этапа: на первом этапе поиск общих метеоров проводился только по времени полёта. Для этого вначале просматривались показания контрольных часов на плёнке, полученной при радионаблюдениях, и составлялись графики зависимости  $\Delta t$  от времени в течение суток наблюдений (где  $\Delta t$  поправка времени за ход часов) для полного цикла наблюдений. Затем для соответствующей даты брали плёнки, полученные на покадровом индикаторе, и среди радиолокационных метеоров проводился поиск TV-метеора. Радиометеоры, совпадающие по времени с телевизионными, включались в список параллельных радиотелевизионных метеоров.

Однако совпадение времени ещё недостаточно для того, чтобы метеор считать совместным, так как во время максимума активности радиолокатор иногда за 1-5 секунд регистрирует несколько поточных метеоров. Следующий шаг в поиске общих метеоров проводился с использованием координат точек метеора. По положению метеоров на звёздной карте и по каталогу BD определялись экваториальные координаты начала  $\alpha_n, \delta_n$  и конца  $\alpha_k, \delta_k$  каждого следа. Зная точное время пролёта метеора, эти координаты переводились в горизонтальные  $A_n, Z_n$  и  $A_k$  и  $Z_k$  по известным формулам:

$$\cos Z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \quad (2.4)$$

$$\sin Z \sin A = \cos \delta \sin t, \quad (2.5)$$

$$\sin Z \cos A = -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t, \quad (2.6)$$

где  $\varphi$  – широта места наблюдения,  $\delta$  и  $t$  – соответственно склонение и часовой угол точки метеора.

Аналогичные данные только для точек зеркального отражения каждого метеора получались из данных радионаблюдений. При этом обрабатывались лишь наблюдения метеоров, совпадающих по времени с телевизионными данными.

Сведения об общем количестве метеоров, зарегистрированных на телевизионной установке в период совместных радионаблюдений наблюдений, представлены в таблице 2.3, где в первом столбце указывается порядковый номер, во втором - даты начала и окончания наблюдений (день, месяц, год), наблюдений, в третьем столбце приведено общее количество часов наблюдений за данный период, в четвёртом столбце дано общее количество кривых блеска метеоров, полученных по телевизионным наблюдениям (TV), в пятом столбце даны средние часовые числа метеоров, зарегистрированные по телевизионным наблюдениям, в шестом столбце даны предварительные числа совместных метеоров (количество радио-телевизионных метеоров, совпадающих только по времени), а в последнем столбце приведено общее количество метеоров,

которые по всем критериям отождествлены, как совместные радиотелевизионные метеоры.

Относительно наименьшее часовое число метеоров в период действия метеорных потоков Орионид и Геминид объясняется тем, что вовремя TV-наблюдений поле зрения телевизионного телескопа часто покрывалось облаками. Среднее часовое число метеоров, наблюдаемых телевизионным способом, в период действия потока Персеид в 1978 г. составляет 6 метеоров в час. Из 101 метеора, зарегистрированного за указанный период, 54 отнесены к Персеидам. Согласно результатам телевизионных наблюдений, в августе 1980 г. поток Персеид был активнее, чем в 1978 г., так как среднечасовое число составляет 16 метеоров в час. Причём 60% метеоров были зарегистрированы 12 августа (день максимума активности потока) [164-167]. Общее количество метеоров, зарегистрированных телевизионным способом за два года наблюдений, составляет 559.

**Таблица 2.3. - Результаты одновременных радиотелевизионных наблюдений метеорных потоков в Таджикистане**

№ 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

По результатам радиолокационных наблюдений определялись следующие характеристики совместного метеора: номер, время появления,

дальность для центрального пункта, разность дальностей по данным вынесенных пунктов и центрального пункта, положение начала, максимума и конца по АВХ каждого канала, разность времени пролёта по данным вынесенного и центрального пунктов и длительность радиоотражения по каждому из 5-ти пунктов.

Разность дальностей позволяла, определять координаты отражающих точек  $A_{от}$  и  $Z_{от}$  на следе метеора. Число метеоров, у которых по радиолокационным наблюдениям значения горизонтальных координат отражающей точки находились в пределах значений горизонтальных координат начал и концов их TV-изображений, оказалось равным 57.

Однозначный вывод о принадлежности метеора к совместным делался следующим образом. По измеренной разности времени пролёта каждого метеора в центральном и вынесенном пункте и по горизонтальным координатам зеркальной отражающей точки метеора  $A$  и  $Z$  определялся азимут радианта метеора  $A_r$ , скорость метеора  $V$  и его зенитное расстояние  $Z_r$  [264] пеленгационно-временным методом по формулам:

$$A_r = A_1 + \arctg (t_2 b_1 / t_1 b_2 \cdot \operatorname{cosec} A_{12} - \operatorname{ctg} A_{12}), \quad (2.7)$$

$$Z_r = \operatorname{arctg} [-\operatorname{ctg} z / \cos (A - A_r)], \quad (2.8)$$

$$V = b_i \cos \alpha_{ri} \sin Z_r / t_i, \quad (2.9)$$

где  $A_1$  – азимут первого пункта,  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_i$  – временные сдвиги между дифракционными картинками на центральном и на вынесенных (первого и центрального второго) и  $i$ -го пунктов,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_i$  – длина базы первого, второго и  $i$ -го пункта относительно центрального пункта,  $A_{12} = A_2 - A_1$  – разность азимутов соответствующих пунктов,  $\alpha_{ri}$  – углы между азимутом отражающей точки и азимутом соответствующих пунктов.

Кроме того, определялись высота зеркальной отражающей точки метеора в центральном пункте, скорость – дифракционным методом, и изучалась зависимость высот метеоров от скорости.

Далее горизонтальные координаты радианта  $A_r$ ,  $Z_r$  переводились в экваториальные  $\alpha_r$  и  $\delta_r$ , затем по известной методике вычислялись элементы

орбит параллельно регистрируемых метеоров. Результаты вычислений радиантов, скоростей и орбит совместных радиотелевизионных метеоров приводятся в четвертой главе.

Методика фотометрирования и определения абсолютной звёздной величины метеора приводится ниже.

## **2.7. Методика фотометрической редукиции данных радиотелевизионных (ТВ) наблюдений метеоров в Таджикистане**

В настоящее время для всестороннего исследования метеорного вещества используются самые различные методы, среди которых наиболее информативными являются комплексные оптические и базисные радиолокационные методы наблюдения метеоров. Исходя из этого, начиная с 50-х гг. прошлого столетия силами сотрудников метеорного отдела Института астрофизики и под руководством академика НАНТ П. Б. Бабаджанова был поэтапно организован и введён в эксплуатацию комплекс для оптических наблюдений (фотографических, телевизионных и электронно-оптических, а начиная со второй половины 1990-х гг. использовались камеры болидной сети типа «Рыбий глаз» и комплекс радиолокационной аппаратуры - радиолокационные комплексы МИР-1, МИР-2, а затем МИР-3 и радиотехническая система «Горизонт»), которые способствовали регистрации метеоров в широком диапазоне масс от  $10^{-5}$  до  $10^1$  г.

Оптические методы, как правило, регистрируют кривую блеска, а радиометодами измеряется дальность, длительность радиоэха, амплитудно-временная характеристика радиоэха (АВХ) и, следовательно, кривая ионизации и другие параметры метеорного следа и атмосферы в метеорной зоне.

Использование комплекса фотографической, спектральной, телевизионной и радиолокационной аппаратуры в метеорном отделе Института астрофизики, который расположен в ГисАО, позволяло получить ценнейшую информацию о метеорных следах ярче +5 звёздной величины одновременными радиооптическими методами. При этом в 1977-1980 гг. в период действия главных ежегодных метеорных потоков Персеид, Квадрантид,  $\delta$ -Акварид, t-

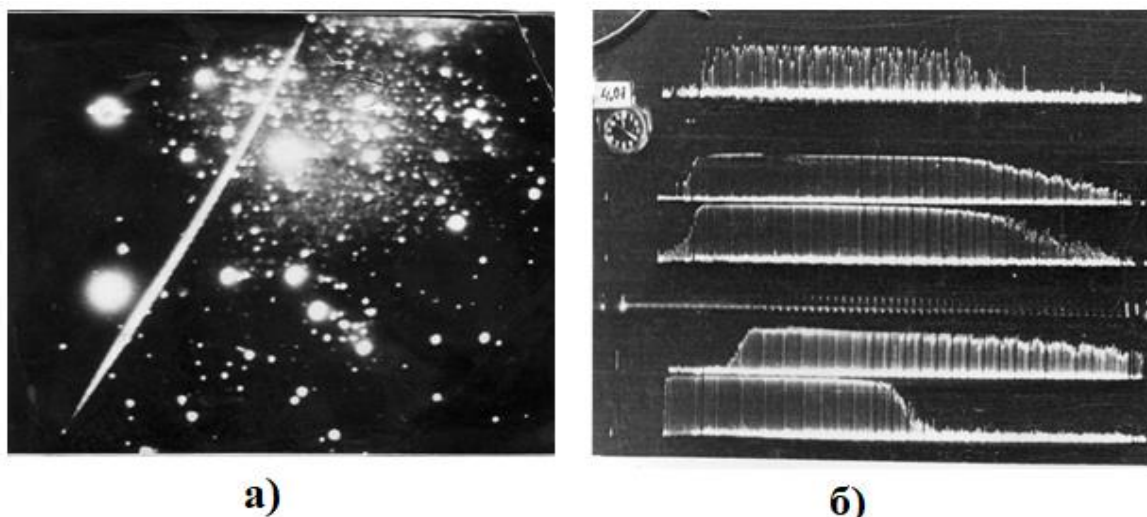
Акварид,  $\alpha$ -Каприкорнид, Орионид и Геминид на базе комплекса радиолокационной аппаратуры МИР-2, фотографических камер НАФА-3С, спектрографа и модернизированной промышленной телевизионной станции ПТС-3, расположенных в ГисАО, нами были организованы и проведены одновременные наблюдения. По результатам телевизионных наблюдений было получено свыше 550 метеорных снимков, а при базисных радиолокационных наблюдениях получены несколько тысяч метеорных радиоэхо.

В результате фильтраций этого большого наблюдательного массива данных параллельных радиооптических наблюдений в метеорном отделе Института астрофизики НАНТ выявлен один совместно зарегистрированный фототелевизионный метеор, по которому оценено преимущество телевизионных наблюдений, 8 совместно зарегистрированных фото-радиолокационных метеоров, один из которых имеет данные спектральных наблюдений, и 57 совместных радиотелевизионных метеоров ярче +4 звёздной величины [165, 166].

В настоящем параграфе приводится методика фотометрирования телевизионных снимков метеоров, полученных по результатам одновременных параллельных радиотелевизионных наблюдений в Таджикистане.

Методика организации одновременных радиотелевизионных наблюдений, способ поиска общих метеоров, критерии отбора совместных метеоров, наблюдаемых одновременно радиотелевизионными методами, и их принадлежность к метеорным потокам изложены в работе [166]. Настоящий параграф содержит результаты фотометрирования кривых блеска совместных метеоров, методы получения поправочных коэффициентов, необходимых для перехода от видимой звёздной величины к абсолютной, данные о высотах начала, максимума и конца следа метеора, основные характеристики точки зеркального отражения как высоты, длительности радиоэха, абсолютная фотографическая звёздная величина, а также данные о массах метеороидов, определяемых по кривым блеска метеоров. Ниже предлагается методика фотометрирования кривых блеска совместных метеоров.

Напоминаем, что при телевизионных наблюдениях регистрация метеора с видеоконтрольного устройства (ВКУ) осуществлялась с помощью фоторегистратора на 35 мм фотоплёнку типа КН-4. Ниже на рисунке 2.4 представлены образцы регистрации одного и того же метеора телевизионным и радиолокационным методом. Для определения блеска метеоров применялся как метод измерения диаметров ТВ-изображений метеоров и звёзд, так и метод измерения их почернений.



**Рисунок 2.4. - Фотография совместного радиотелевизионного метеора № 8 на ТВ-установке (а) и фотозаписи амплитудно-временных характеристик радиозэха с помощью ждуще-непрерывного индикатора МИР-2 по 5-ти наблюдательным пунктам (б)**

Вначале рассматриваем метод измерения диаметров. Для определения блеска метеоров, зарегистрированных ТВ-способом, вблизи следа каждого метеора выбирались 5-8 звёзд с различными звёздными величинами. Далее по каталогу ВД определялась их звёздная величина и спектральный класс. Затем измерялись диаметры звёзд и ширина метеорного изображения. По измеренным диаметрам звёзд и их звёздным величинам строилась характеристическая кривая. По измеренным значениям ширины метеорного следа из характеристической кривой находилась эффективная звёздная величина метеора в данной точке его следа. Видимая звёздная величина в точке максимума блеска метеора № 8, найденная этим методом, составляет  $+6.2^m$ . Используя точные значения дальности до следа метеора по результатам радионаблюдений и координаты начала и конца следа, определённые по ТВ-

наблюдениям, вычислялись высоты начала и конца ТВ-изображения каждого метеора.

Абсолютная звёздная величина для каждого метеора определялась по формуле:

$$M = m + \Delta m_R + \Delta m_z + \Delta m_v,$$

где  $\Delta m_R$  – поправка на приведение блеска метеора к стандартному расстоянию,  $\Delta m_z$  – поправка на ослабление блеска метеора за счёт атмосферного поглощения и  $\Delta m_v$  – поправка на различие скоростей передвижения изображений метеора  $U_m$  и звёзд  $U_z$  по фотослою. Величины этих поправок определяются по следующим известным формулам:

$$\Delta m_R = 10 - 5 \lg R, \quad (2.10)$$

$$\Delta m_z = -2.5 \Delta M_z \lg P, \quad (2.11)$$

$$\Delta m_v = -2.5 p \lg U_m / U_z, \quad (2.12)$$

где  $R$  – дальность до заданной точки метеорного следа,  $P$  – коэффициент прозрачности атмосферы,  $\Delta M_z$  – разность воздушных масс при  $Z = 0$  и при  $Z$  точек метеорного следа,  $p$  – показатель Шварцшильда,  $U_m$  и  $U_z$  – скорости передвижения изображений метеора и звёзд по фотослою. Значения  $M_z$  находятся по известной таблице Бемпорада. В случае близкого расположения звезды от следа метеора влиянием этого фактора можно пренебречь, так как влияние этой поправки практически одинаково как на метеорный след, так и на звезду. При использовании телевизионной техники точное значение поправки за различие скоростей передвижения метеора и звезды  $\Delta m_v$  найти очень трудно, поэтому для её учёта мы применили следующие методы.

*1-й метод.* Телевизионный телескоп направлялся в область зенита, после чего начинали его вращать по зенитному углу с угловой скоростью, равной средней угловой скорости метеоров, принадлежащих потокам на наблюдаемых зенитных углах. Оказалось, что при этом вращении на фотоплёнке регистрируются следы звёзд до  $+4.5^m$  звёздной величины (без вращения – до  $+9.5$ ). Эту величину мы приняли как опорную, при которой начинается и заканчивается метеорный след. Учитывая вышеупомянутые поправки, мы

определяли абсолютные звёздные величины начала и конца следа, а затем и всю кривую блеска метеора.

По этой методике нами были определены кривые блеска 13 метеоров, результаты приведены в [150].

*2-й метод.* Сущность второго метода определения поправки на различие скоростей передвижения изображений метеора  $U_m$  и звёзд  $U$  по фотослою заключалась в следующем. Перед объективом питающей оптики телевизионного телескопа установлен двухлопастный обтюратор, который позволяет точнее определить угловую скорость метеора. Телескоп направлялся на созвездие Ориона. Фотографирование звёзд с экрана ВКУ производилось неподвижным и движущимся телевизионным телескопом с различными скоростями. Полученные материалы проявлялись при одинаковых условиях. Фотометрические измерения проводились на микроденситометре МД-100. Затем строились характеристические кривые по негативам, полученным при неподвижном телескопе. Далее, используя измеренные значения почернений от следов звёзд и входя в характеристическую кривую, определяли звёздную величину следа звезды. Величина этой поправки принималась как разность между звёздной величиной в случае подвижности и неподвижности одной и той же звезды.

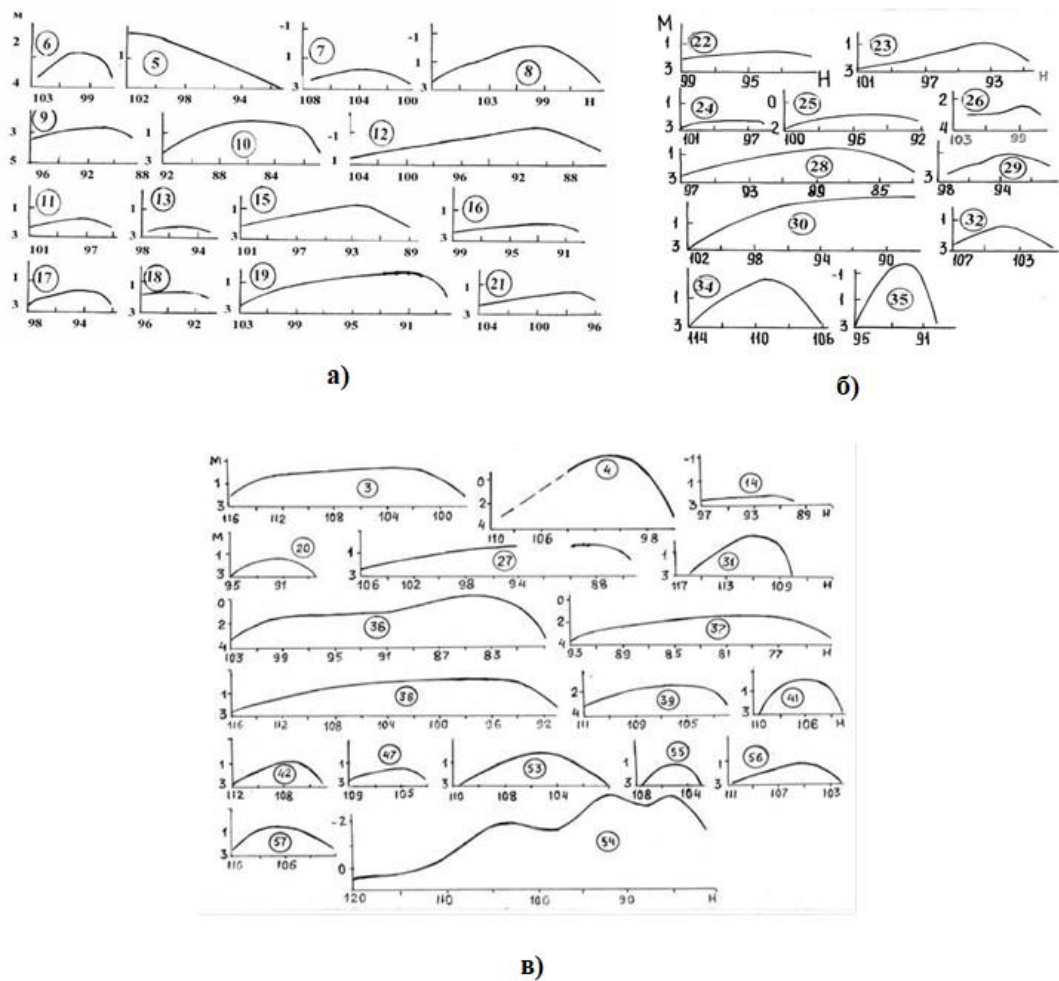
Согласно нашему эксперименту, величина этой поправки для угловых скоростей от 10 до 25 град/с меняется от  $3^m$  до  $4^m$ .

Помимо этого, по результатам последнего эксперимента мы изучили ошибки поля. При этом использовались следы звёзд, проходящих примерно через центр поля зрения как вертикально, так и горизонтально. Оказалось, что величина этой поправки наиболее существенна для следов, уходящих за пределы раstra, и составляет  $-1.2^m$ .

## **2.8. Результаты определения кривых блеска метеоров по данным комбинированных радиотелевизионных наблюдений**

Кривые блеска метеоров являются продуктами взаимодействия

метеорного тела с атмосферой планеты и содержат наиболее полную и ценнейшую информацию не только о физико-динамических и кинематических характеристиках метеоров, но и о процессах, сопровождающих полёт метеоров в земной атмосфере. Однако для получения кривых блеска метеоров в единицах абсолютной звёздной величины оптическим методом, наблюдения необходимо организовать как минимум с двух пунктов, что представляет определённые трудности, как в финансовом, так и в организационном плане. Абсолютную кривую блеска метеора можно получить ещё в том случае, если метеор наблюдается одновременно оптическими и радиолокационными методами.



**Рисунок 2.6. - Кривые свечения метеоров по результатам параллельных радиотелевизионных наблюдений: а) для метеорного потока Персеид, б) для метеорных потоков Квадрантид и Орионид, в) для метеорных потоков  $\delta$ -Акварид и Каприкорнид. На оси абсцисс даны высоты  $H$  в км и на оси ординат - звёздные величины  $M$ . Цифры в кружках обозначены номерами метеоров**

При этом оптическими методами регистрируется кривая блеска метеора, а

по результатам радиолокационных наблюдений измеряется дальность, АВХ и длительность радиоэха, а при базисных радиолокационных наблюдениях - кривые ионизации и другие параметры метеорного следа и атмосферы в метеорной зоне. В данном параграфе на основе вышеизложенной методики обработки телевизионных снимков обработаны кривые блеска совместных метеоров.

Результаты обработки кривых блеска совместных метеоров, полученных по результатам параллельных радиотелевизионных наблюдений метеоров в период действия различных метеорных потоков, представлены на рисунке 2.6.

Рисунок 2.6а представляет в основном кривые блеска для метеоров, принадлежащих метеорному потоку Персеид. На рисунках 2.6б и 2.6в приведены кривые блеска метеоров, наблюдаемых в период действия метеорных потоков Квадрантид, Орионид,  $\delta$ -Акварид и Каприкорнид. Из данных, представленных на рисунке 2.6, следует, что кривые блеска метеоров имеют самые разнообразные формы распределения блеска вдоль следа. У 42 метеоров наблюдается относительно плавное изменение блеска вдоль следа метеоров. Однако формы распределения блеска несколько отличаются друг от друга. В частности, максимум блеска у 3-х метеоров приходится на первую половину следа. Для 9-и метеоров характерна относительно симметричная форма распределения блеска вдоль следа метеора. А у остальных 28 метеоров кривые блеска и высоты максимума блеска расположены на второй половине следа.

Среди полученных нами кривых блеска метеоров имеются кривые со сложными формами распределения блеска вдоль следа и, в частности, вспышечные метеоры. Таких метеоров среди полученного массива оказалось 2. У метеора №50 наблюдается относительно быстрое почти линейное возрастание и относительно резкий спад блеска. У метеора №54 наблюдается даже три вспышки. Длина вспышки составляет от 3 до 8 км на высотном разрезе. У 4 кривых блеска метеоров наблюдается наличие «полочки» (кривые №3, 24, 37, 38). Согласно рисунку 2.6, блеск на подлёте кривой блеска метеора

к некоторой высоте заметно возрастает, а затем на протяжении от 2 до 5 км на высотном разрезе у этих метеоров становится фактически постоянным (полочка).

У метеорного следа № 36 эта полочка составляет 5 км. Начиная с высоты 91 км, наблюдается заметный рост блеска метеора вдоль следа.

Согласно результатам математического моделирования кривой блеска метеора, в [94], ответственность за такое поведение блеска несёт переменность величины коэффициента теплопередачи на данном участке следа метеора. У таких метеоров до некоторого момента коэффициент теплопередачи в «полочках» уменьшается из-за загораживающего действия отлетающих молекул воздуха. Метеоров со следами, уходящими за предел кадра, оказалось 3.

## **2.9. Вариации свечения и ионизации вдоль следа одних и тех же метеоров при разных скоростях**

Всесторонние исследования метеорного вещества требуют использования самых различных методов, среди которых наиболее информативными являются наземные комплексные оптические (фотографические, электронно-оптические, телевизионные) и базисные радиолокационные методы наблюдения одних и тех же метеоров. Оптические методы, как правило, регистрируют кривую блеска, а радиометод позволяет измерять дальность, длительность радиоэха, фазу и амплитудно-временные характеристики радиоэха (АВХ) и, следовательно, кривые ионизации и другие параметры метеорного следа и атмосферы в метеорной зоне. Наличие кривой блеска и ионизации одних и тех же метеоров позволяет сопоставить вариации интенсивности свечения и линейной электронной плотности вдоль следа одних и тех же метеоров и получить ценную информацию не только о физико-кинематических характеристиках метеоров, но и о процессах, сопровождающих полёт метеоров в земной атмосфере.

Напомним, что попытки получения кривой блеска и ионизации одних и тех же метеоров по результатам параллельных фотографических и

радиолокационных наблюдений были предприняты ещё в 60-х годах прошлого столетия [9, 11, 29]. При этом по результатам оптических наблюдений были получены кривые блеска, а по результатам радионаблюдений получена лишь информация для одной зеркально-отражающей точки следа метеора. И только лишь в 1970-1980 гг. в США [29, 150] и в Таджикистане по результатам параллельных радиотелевизионных наблюдений были получены данные о кривых блеска и ионизации одних и тех же метеоров. В частности, по результатам наблюдений в [29] были зарегистрированы 29 индивидуальных метеоров, скорость которых составляла в интервале 17-32 км/с, а звёздная величина - в диапазоне  $4.5^m$  -  $7.5^m$ . Опубликованные нами данные [150] о кривых блеска и ионизации 13 совместных метеоров принадлежали в основном метеорному потоку Персеид. Из вышеизложенного следует, что вариации интенсивности свечения и ионизации вдоль следа одних и тех же метеоров в диапазоне скоростей  $32 \leq V \leq 55$  км/с по результатам комбинированных оптических и радиолокационных наблюдений вообще не изучены.

Как уже было отмечено, с целью исследования взаимосвязи процессов свечения и ионизации в метеорных следах и изучения физико-кинематических характеристик метеороидов по результатам комбинированных наблюдений в 1978-1980 гг., в ГисАО были организованы и проведены одновременные телевизионные и базисные радиолокационные наблюдения в период действия ряда известных главных ежегодных метеорных потоков, таких как Квадрантиды,  $\alpha$ -Каприкорниды,  $i$ -Аквариды,  $\delta$ -Аквариды, Персеиды, Ориониды и Геминиды. В результате фильтрации данных двухгодичного цикла радиолокационных и телевизионных наблюдений были выявлены 57 совместных метеоров. Методика отождествления совместных метеоров, редукция данных атмосферной траектории и фотометрических измерений приведена в параграфе 2.8.

## 2.10. Метод определения кривой ионизации метеора

В настоящее время для получения кривой ионизации метеора, то есть получения распределения линейной электронной плотности вдоль метеорного следа, используются три метода: а) статистический; б) комплексный и в) многостанционный. При многостанционном методе получения кривой ионизации по величине амплитуды отражённого сигнала (в случае ненасыщенных следов) или по значению длительности радиоотражения, измеренной по амплитудно-временным характеристикам (АВХ) радиоэха (для следов промежуточного и насыщенного типа), получаемых в нескольких пунктах данного метеора, определяют величину линейной электронной плотности для отражающих точек каждого выносного пункта. Обычно линейную электронную плотность для метеорных следов переуплотнённого типа определяют по известной формуле:

$$q = [(\tau + r^2 / 4D) D] / A \lambda^2, \quad (2.13)$$

где:  $\tau$  – длительность отражения,  $A = e^2 / 4\pi^2 m c^2$ ,  $\lambda$  – длина волны;  $e$ ,  $m$  – заряд и масса электрона,  $c$  – скорость света,  $r$  – начальный радиус следа,  $D$  – коэффициент амбиполярной диффузии.

Уравнение (2.13) справедливо тогда, когда уменьшение электронной концентрации в следе происходит только вследствие амбиполярной диффузии. Согласно [107-112], наряду с амбиполярной диффузией длительность радиоэха укорачивается из-за следующих возможных типов деионизации: рекомбинации, прилипания электронов к нейтральным частицам, турбулентной диффузии и т.д. Изучение влияния этих процессов на уменьшение длительности радиоэха проводилось рядом исследователей, в частности, в Институте астрофизики НАН Таджикистана Р. Ш. Бибарсовым [107-112, 167]. Влияние процессов деионизации на длительность радиоэха, с учётом последних трёх типов деионизации, для метеоров, наблюдаемых в ночное время, определяется уравнением:

$$\tau_n = [3D / \omega \tau_n (\tau_n e^{k\tau_n} - t)^3 + r^2 / 4D) \cdot D], \quad (2.14)$$

где:  $t$  – постоянная времени мелкомасштабных вихрей;  $\omega$  – удельная энергия диссипации атмосферных вихрей;  $k$  – скорость прилипания электронов к нейтральным частицам.

Из (2.13) - (2.14) находим формулу для определения линейной электронной плотности в отражающей точке  $q_n$  метеоров, наблюдаемых в ночное время:

$$q_n = 1 / A \lambda^2 \{ [\omega / 3 D (\tau_n - t)^3 + t] e^{-k\tau_n} + r^2 / 4 D \} D. \quad (2.15)$$

Для метеоров, длительность которых меньше, чем постоянная времени мелкомасштабных вихрей (то есть метеоров, у которых  $\tau_n \leq t \leq 10$  с), выражение для вычисления величины линейной электронной плотности для ночных метеоров с учётом прилипания и амбиполярной диффузии можно получить из [177] в виде:

$$q = (\tau e^{-k\tau} + r^2 / 4 D) D / A \lambda^2, \quad (2.16)$$

где  $A = 7.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-1}$ .

Для применения формул (2.13), (2.15), (2.16) при вычислении величины линейной электронной плотности кроме измеренного значения длительности радиоотражения необходимо значение величины начального радиуса  $r$ , коэффициента амбиполярной диффузии  $D$  и скорости прилипания  $k$ . Для вычисления значений  $r$ ,  $D$  и  $k$  использованы известные формулы:

$$\begin{aligned} r &= 1.47 \cdot 10^{-10} V^{0.65} \rho^{-1}, \\ \lg D &= 0.079 H_i - 6.6, \\ \lg k &= 4.99 - 0.07 h_i, \end{aligned} \quad (2.17)$$

где  $\rho$  – плотность атмосферы на высоте  $h_i$ .

Высота точки зеркального отражения для центрального пункта наблюдения определяется по известной формуле:

$$h = R \cdot \cos Z + \Delta h, \quad (2.18)$$

здесь:  $R$  – дальность отражающей точки;  $Z$  – зенитное расстояние отражающей точки на центральном пункте;  $\Delta h$  – поправка по высоте, учитывающая кривизну Земли и превышение пункта наблюдения над уровнем моря.

Значения высот отражающих точек  $\Delta h_i$  на следе метеора относительно высоты точки центрального пункта для каждого метеора находятся из выражения

$$\Delta h_i = V \cdot \Delta t \cdot \cos Z_R, \quad (2.19)$$

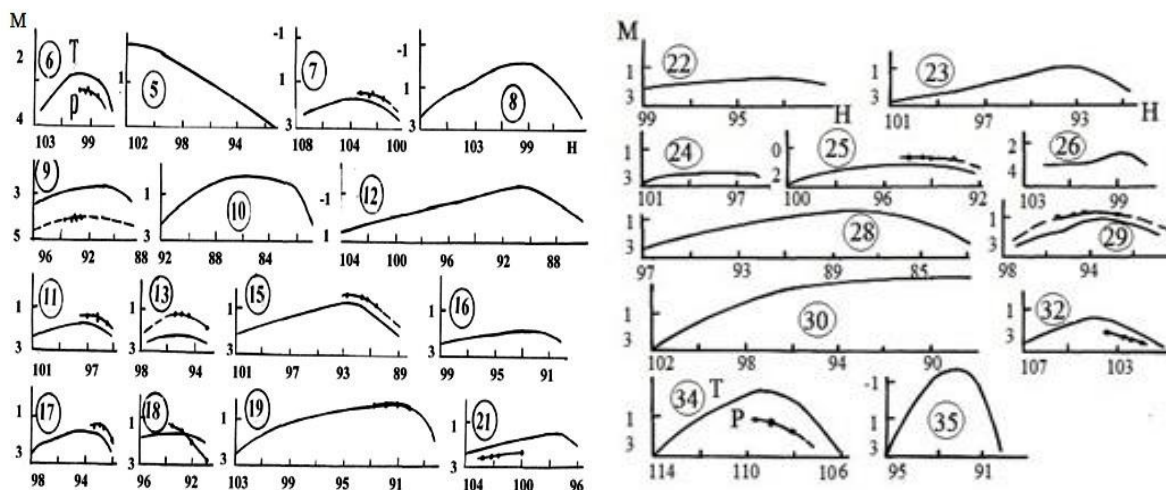
где  $V$  – скорость метеора и  $Z_R$  – зенитное расстояние радианта.

Наличие полной формы АВХ (длительность радиоэха) в 4-х, 5-ти точках следа метеоров и их соответствующие высоты позволяют по формулам (2.15) и (2.16) вычислить значение линейной электронной плотности в этих точках и сопоставить полученные ионизационные кривые с кривыми свечения соответствующих метеоров. Для сравнения полученных отрезков ионизационных кривых с соответствующими частями их кривых свечения по значениям линейной электронной плотности, вычисленных для каждой наблюдаемой точки следа метеора, были использованы зависимости звёздных величин  $M_r$  от  $\lg q$ , полученные нами на основе усреднённых значений  $\lg I/q$ , рассчитанных по объединённым данным радиооптических наблюдений, полученных в [12, 29, 140-142, 167]:

$$M_r = 35 - 2.5 \lg q. \quad (2.20)$$

Иными словами, мы получили «кривую блеска» по радиолокационным данным. На рисунке 2.7 для некоторых совместных метеоров представлены данные о кривых блеска и ионизации одних и тех же метеоров, где по оси ординат отложены звёздные величины, а по оси абсцисс отложены высоты.

Высоты начала и конца следа каждого метеора определялись на основании точно измеренного значения дальности до точки зеркального радиоотражения и горизонтальных координат начала и конца следа, определяемых по телевизионным снимкам следа метеора. Из наблюдавшихся 57 совместных метеоров, включая данные, опубликованные в [151], у 15 метеоров максимумы блеска по обоим наблюдениям совпадают по высоте, у 5 метеоров наблюдаемые отрезки радиолокационной «кривой блеска» совпадают с восходящей ветвью телевизионной кривой, а у 12 метеоров – с нисходящей.



**Рисунок 2.7. - Вариации радиовеличин  $M_r$  (P) звёздных величин (T) вдоль следа одних и тех же метеоров**

Для остальных метеоров (включая 6 поворотных радиометеоров) не удалось получить достаточно достоверные отрезки ионизационных кривых. Как видно из рисунка 2.7, ход кривых почти у всех радиотелевизионных метеоров согласуется. Однако разбросы по звёздным величинам между кривыми, полученными разными авторами, неоднозначны.

Для случая очень слабых низкоскоростных метеоров [29], где  $10 \leq V \leq 36$  км/с, это различие имеет вид:

$$M_r - M_{Ph} = + 2.85 - 3.85 (\lg V - 6.41), \quad (2.21)$$

где  $V$  выражено в см/с.

На наш взгляд, расхождение между кривыми обусловлено тем, что в формуле (2.20), определяющей зависимость между звёздной величиной и линейной электронной плотностью, не учтено влияние скорости. Следовательно, эта зависимость нуждается в уточнении.

## **2.11. Результаты совместных фото-радиолокационных наблюдений поиска метеоров в Таджикистане**

В настоящее время общепризнано, что одними из наиболее перспективных методов исследования явления метеора в Земной атмосфере являются одновременные оптические (фотографические, электронно-оптические, видео- и телевизионные) и базисные радиолокационные наблюдения одних и тех же метеоров. При комбинированном методе

наблюдений метеоров существенно расширяется объём полученной информации, необходимой не только для изучения вопросов физико-кинематических и динамических характеристик метеоров, но и появляется возможность исследовать физико-химические процессы, происходящие при взаимодействии метеорного тела с Земной атмосферой.

Исходя из ценности и важности результатов оптико-радиолокационных наблюдений метеоров в решении прикладных и теоретических задач метеорной физики, геофизики, области исследования космического пространства, в последние два десятилетия в ряде обсерваторий научно-исследовательских учреждений таких стран мира, как США, Канада, Япония, страны Европы и др. были организованы и проведены одновременные оптико-радиолокационные наблюдения метеоров [9-29]. Такие наблюдения впервые в СССР были проведены в Таджикистане [11], где в результате зарегистрировано 7 общих совместных метеоров со скоростями 60.1-71.6 км/с и звёздной величиной от  $-2.4^m$  до  $-7.0^m$ .

Что касается данных, полученных по результатам одновременных радиооптических наблюдений за последние десятилетия, то они в основном относятся к метеорам слабее  $+1$  абсолютной звёздной величины. Единственный яркий болид, завершившийся падением - метеорит Гринсби, который зарегистрирован комплексом радиооптической и сейсмической аппаратуры, имеет звёздную величину  $-14.8^m$  [178]. Следовательно, представляет интерес накопление наблюдательных материалов по результатам одновременных радиооптических наблюдений метеоров, охватывающих метеоры ярче  $+1$  абсолютной звёздной величины в широком диапазоне скоростей.

На базе фотографической и радиолокационной аппаратуры по ряду национальных и международных программ были организованы и проведены одновременные наблюдения за активностью метеорных потоков и спорадического фона. В результате базисных фотографических наблюдений метеорных потоков и спорадического фона было получено более 570

фотографических снимков, где результаты фотометрической и астрометрической редукиции опубликованы в [65].

В настоящей работе на основании опубликованных в Сводном каталоге данных элементов орбит и кривых блеска метеоров, сфотографированных в Институте астрофизики НАНТ, и данных первичных радиолокационных наблюдений метеоров, полученных на киноплёнке КН-4 на комплексе МИР-2 за 1977-1980 гг. в ГисАО, проведён поиск одних и тех же метеоров среди зарегистрированных одновременно фотографической и радиолокационной аппаратурой. При этом по данным, приведённым в каталоге, для каждого периода наблюдений проведён поиск наличия наблюдательного материала среди базы данных наблюдений, полученных на комплексе МИР-2. Далее для заданного периода радионаблюдений, совпадающих с периодом фотографических наблюдений, определены поправки на ход часов за каждые сутки, то есть построен график зависимости  $\Delta t$  за сутки. Далее с учётом поправок на время, проведён поиск фотографических метеоров среди радиолокационных записей по первичным данным наблюдений на киноплёнке. Метеоры, совпадающие по времени полёта за указанный период, занесены в специальный журнал первичной обработки. Фотографических метеоров, совпадающих по времени полёта среди радиолокационных данных, оказалось более 40 штук.

Следующий этап поиска общих фото-радиолокационных метеоров осуществлялся путём сопоставления радиолокационной дальности среди фотографических дальностей начала и конца следа. Для совместного метеора радиолокационная дальность должна находиться внутри или ближе к фотографическим дальностям начала и конца следа метеора, так как радиолокатор чувствительнее фотографических камер (он регистрирует метеоры ярче  $+7^m$  звёздной величины). При этом по данным обработки первичного наблюдательного материала каждого фото-радиолокационного метеора в отдельном журнале записывался его номер, азимут, зенитное расстояние начала и конца следа метеора, дальности начала и конца следа по

фотографиям, полученным на метеорном Патруле, расположенном рядом с радиолокационным комплексом МИР-2 в ГисАО.

**Таблица 2.4. - Некоторые данные совместных метеоров по результатам фотографических и радиолокационных наблюдений в Таджикистане**

N метеора	Дата (день, месяц и год)	Время (UT)	$D_n$ (км)	$D_k$ (км)	$D_{от}$ (км)
7709533	12.08.77	11.950	132.6	124.3	128
770954	13.08.77	11.942	133.0	92.9	108.5
770981	13.08.77	12.775	140.8	134.1	141.6
771033	13.08.77	12.968	141.1	135.1	141.9
781285с	13.08.78	12.964	114.3	94.2	108.0
790846а	30.07.79	29.863	117.5	106.5	125.0
800992в	12.08.80	11.882	125.0	111.5	115
801061в	13.08.80	12.915	129.1	117.0	120

Метеоров, соответствующих вышеупомянутым требованиям, оказалось 7 штук. Данные об этих метеорах приведены в таблице 2.4. Здесь в первой колонке дан N – номер метеора по каталогу, во втором столбце приведены дата, месяц и год наблюдений, в третьей колонке даны дата и время полёта в долях суток, в четвертой колонке приведены дальность начала ( $D_n$ ), конца ( $D_k$ ) и измеренная дальность радиоэха по результатам радиолокационных наблюдений ( $D_{от}$ ). Данные атмосферных траекторий совместных фото-радиолокационных метеоров, вычисленных по результатам фотографических наблюдений, приведены в таблице 2.5. Здесь буквой N – обозначен номер метеора по каталогу,  $\alpha_r$  и  $\delta_r$  – координаты радианта,  $V_\infty$  – 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 максимума блеска метеора и в последнем столбце указана принадлежность метеора к метеорным потокам. Таким образом докторантом в результате поиска

по опубликованным материалам и данным первичных радионаблюдений метеоров,

**Таблица 2.5. - Данные атмосферной траектории совместных фото-радиолокационных метеоров, вычисленные по результатам фотографических наблюдений**

№	$\alpha_r$	$\delta_r$	$V_\infty$	$\cos Z_r$	$h_b$	$h_m$	$h_e$	$M_m$	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

зарегистрированных на плёнках в 1977-1980 гг. на комплексе МИР-2, выявлены 8 совместных метеоров, один из которых принадлежит метеорному потоку Южных δ-Акварид, один к спорадическому фону и остальные 6 метеоров к метеорному потоку Персеид (таблица 2.5). Причём у болида номер 770954 зарегистрирован спектр, как по методу мгновенной экспозиции, так и по дифракционной решётке.

Согласно данным, приведённым в таблице 2.5, абсолютная звёздная величина совместных метеоров находится в диапазоне от  $0^m$  до  $-7.2^m$ . Для определения значения абсолютной звёздной величины на высоте точек радиоотражения на следе метеора нами по данным, представленным в каталоге, для каждого совместного метеора построен график кривой свечения (зависимость абсолютной звёздной величины  $M$  от дальности и высоты). Далее, по измеренным значениям дальности радиоэха  $D_{от}$ , находя на графике кривой свечения (зависимости  $D \approx f(M)$ ), определены значения абсолютных звёздных величин для высоты радиоотражения каждого метеора. Данные о высоте отражающей точки на следе совместных фото-радиолокационных метеоров,

определяемых по результатам комбинированных наблюдений, приведены в таблице 2.6, где  $N$  – номер метеора,  $V_{\infty}$  – внеатмосферная скорость,  $Z_r$  – зенитное расстояние радианта,  $h_{от}$  – высота отражающей точки,  $M_{от}$  и  $\tau_{от}$  соответственно – абсолютная звёздная величина и измеренная длительность радиоэха на радиолокаторе МИР-2.

Так как метеоры потока Персеид дали поворотные следы, то есть радиоотражение от следа начато не с момента полёта, а спустя некоторое время  $\Delta\tau$ , то измеренная длительность радиоэха с плёнки была исправлена поправкой  $\Delta\tau$ , определяемой по формуле:

$$\Delta\tau = 11.1 \sin \nu, \quad (2.22)$$

здесь  $\nu$  – угол между осью следа и плоскостью, нормальной к лучу зрения радиолокатора.

Согласно данным, представленным в таблице 2.6, высоты отражающей точки на следах метеоров расположены в широком диапазоне от 89.0 до 107.2 км. Следовательно, длительности радиоэха для узкого диапазона звёздной величины метеоров потока Персеид отличаются друг от друга более чем в пять раз.

Измеренная абсолютная звёздная величина для высоты точки радиоотражения метеоров находится в диапазоне от  $0^m$  до  $-7.3^m$ , а их соответствующая измеренная длительность радиоэха находится в интервале 0.68-170 с.

**Таблица 2.6. - Высоты точек радиоотражения, значения абсолютных звёздных величин и длительности радиоэха совместных метеоров**

№	$V_{\infty}$ , км/с	$\cos Z_r$	$h_{от}$ (км)	$M_{от}$	$\tau$ (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

Таким образом, в результате проведённого поиска среди зарегистрированных данных фотографических и радиолокационных наблюдений в Таджикистане выявлены 8 совместных метеоров. Следовательно, представляет интерес поиск совместных метеоров, охватывающий широкий диапазон скоростей среди базы данных, включая односторонние фотографические снимки метеоров, зарегистрированных в пункте ГисАО, где расположен комплекс МИР-2.

## **2.12. Исследование свечения и ионизации метеоров по результатам комбинированных радиооптических наблюдений и данных лабораторного моделирования**

Изучение взаимосвязи процессов свечения и ионизации и их зависимости от скорости метеоров относятся к актуальным задачам метеорной физики. Знание этих зависимостей необходимо для решения таких важных и вместе с тем нерешённых до конца вопросов, как уточнение шкалы радиовеличин, а также шкалы масс как фото-, так и радиолокационных метеоров. Попытки исследования взаимосвязи процессов свечения и ионизации метеоров, а также нахождения зависимости отношения коэффициента свечения к ионизации от скорости в интервале  $32 < V < 62$  км/с предпринимались ранее как на основании данных параллельных визуальных-радиолокационных [125, 126], так и фотографических и радиолокационных наблюдений [9, 12].

Однако из-за низкой точности измерений в первом способе, а также из-за статистической недостаточности и неоднородности данных наблюдений во втором, полученные результаты у разных авторов оказались значительно отличающимися. Зависимость же отношения интенсивности свечения к линейной электронной плотности от скорости в интервале 11-31 км/с и 36-55 км/с вообще не исследовалась.

В настоящем параграфе на основании результатов параллельных оптических (фотографических, видео- и телевизионных) и радиолокационных наблюдений, а также результатов лабораторного моделирования процессов

свечения и ионизации, исследуется зависимость корреляции между интенсивностью свечения  $I_{\phi}$  и линейной электронной плотностью  $q$  от скорости, яркости и химического состава метеоров.

Согласно физической теории метеоров, отношение интенсивности свечения  $I_{\phi}$  к линейной электронной плотности  $q$  связано с параметрами метеорного тела уравнением:

$$I_{\text{ph}} / q = \tau_{\text{ph}} \mu V^3 / 2 \beta. \quad (2.23)$$

Согласно уравнению (2.23), отношение  $I_{\phi}/q$  зависит не только от коэффициентов свечения и ионизации, но и от скорости и химического состава метеорного тела.

Для исследования зависимости  $I/q$  от скорости и других факторов, нами использовались результаты параллельных телевизионных и радиолокационных наблюдений, проведённых в периоды максимума активности метеорных потоков в 1978-1980 гг. в Душанбе [150], данные аналогичных наблюдений более слабых ( $4 < m < 8$ ) и низкоскоростных метеоров ( $10 < V < 36$  км/с) в Кембридже (штат Массачусетс) [29,], результаты параллельных фото-радиолокационных наблюдений в Душанбе [11] и Джодрелл-Бэнк [9,], а также результаты видео-радиолокационных наблюдений метеоров в Оттаве [140-142]. Основные параметры аппаратуры, применяемой для наблюдений, методика обработки наблюдательных данных и исходные данные об индивидуальных метеорах даны в упомянутых источниках. Причём интенсивность свечения  $I_{\phi}$ , вычисленная по известной формуле будет равна:

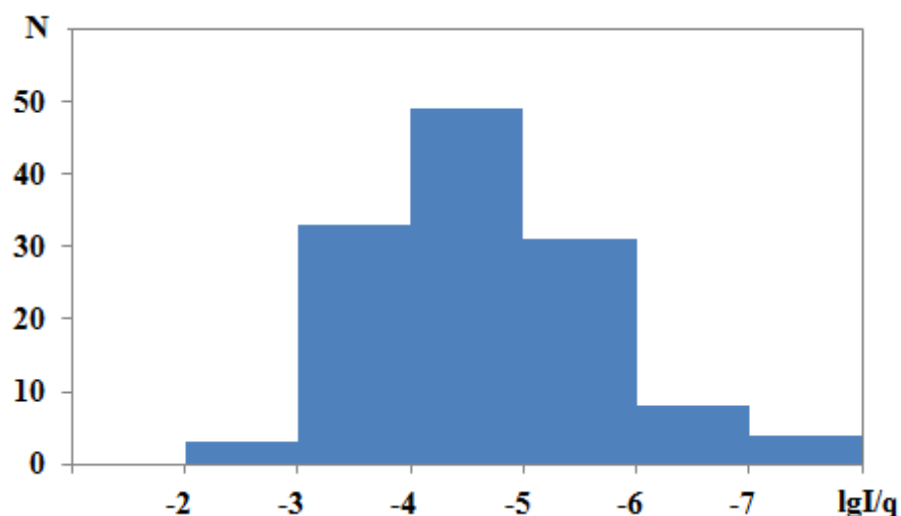
$$\lg I_{\phi} = 9.72 - 0.4 M_{\text{ph}}. \quad (2.24)$$

Линейная электронная плотность для наших совместных метеоров и совместных метеоров, приведённая в [9], определялась по измеренной длительности радиоотражений. Для метеоров, приведённых в [29], в таблице даны значения  $\lg I_{\phi}/q$ , вычисленных по  $n$  пунктам.

Отношения  $\lg I/q$  для метеоров с абсолютной звёздной величиной от  $+1.0^m$  до  $+8^m$  нами исследованы по результатам одновременных радио- и видеонаблюдений Канадского метеор-Орбитального радара (CMOR) и

нескольких ПЗС-камер с усилением изображения Gen-III, полученным в Оттаве учёными R. J. Weryk и P. G. Brown [140-142]. Метеорные данные были представлены в следующей последовательности: в первом столбце - дата и время наблюдений (Д), во втором - указан источник (принадлежность к потокам в соответствии с номенклатурой МАС, в третьем - дальности радиоотражения ( $R_0$ ), в четвёртом - высоты зеркальной точки (Н), в пятом - скорости (V), в шестом - величины линейной электронной плотности  $q$  (ел/м), в седьмом - мощности болометрического фотонного излучения  $I$  (Вт).

Используя исходные данные, нами вычислены величины абсолютных звёздных величин в зеркальных точках, логарифмы интенсивности свечения  $LgI$  и логарифмы отношения интенсивности свечения к величине линейной электронной плотности  $LgI/q$  (исходные данные выражены в системе СГС). Результаты расчёта в виде распределения приведены на рисунке 2.8 в виде гистограммы.



**Рисунок 2.8. - Распределение метеоров, как функция логарифма отношения интенсивности свечения к линейной электронной плотности**

Из гистограммы (рисунок 2.8) видно, что полученные значения  $lg I/q$  изменяются в довольно широком интервале от -7.5 до -2.5 с максимумом в интервале от -5 до -4.5. Большой разброс значений  $lg I/q$ , как уже отмечено, возможно, связан с зависимостью отношения  $lg I/q$  от скорости, яркости и различий в химическом составе метеороидов.

Вначале исследуем отношение интенсивности свечения к линейной плотности электронов от скорости по результатам одновременных визуальных телескопических и радиолокационных наблюдений в Ондржеёв [128-130] в 1972-1973 гг. При этом мы ограничили наши исследования отношением интенсивности светового излучения к линейной плотности электронов только для четырёх групп спорадических метеоров: апексных, тороидальных, антиапексных и отстающих. Для этого по работам [134-135] для каждой группы метеоров мы рассчитали среднюю высоту, абсолютную визуальную звёздную величину и продолжительность метеорного радиоэха. Результаты расчёта приведены в таблице 2.7, где  $H_{cp}$  – средняя высота,  $M$  – средняя абсолютная визуальная звёздная величина,  $T$  – средняя продолжительность радиоэха,  $n$  – количество метеоров, принадлежащих к каждой группе. Используя усреднённое значение высоты  $H$ , абсолютную визуальную звёздную величину  $M_{V_{aver}}$  и длительность эха, мы рассчитали отношение визуальной светимости к линейной электронной плотности, результаты представлены в пятом столбце таблицы 2.7.

Данные, приведённые в таблице 2.7, показывают, что при переходе от высокоскоростных групп метеоров, таких как апексные, к среднескоростным тороидальным и низкоскоростным антиапексным и отстающим метеорам, логарифм отношения  $I_v/q$  увеличивается от -4,95 до -4,3.

**Таблица 2.7. - Отношение визуальной интенсивности свечения к линейной электронной плотности для четырёх групп спорадических метеоров**

Источник	$H_{aver}$ (km)	$M_{V_{aver}}$	$T_{aver}$ (сек.)	$\log I_v/q$	$n$
Апексные	$97.75 \pm 1.25$	$4.45 \pm 1.25$	0.793	-4.95	30
Тороидальные	$93.08 \pm 1.34$	$5.38 \pm 1.72$	0.428	-4.76	72
Антиапексные	$93.0 \pm 2.66$	$4.44 \pm 1.43$	0.315	-4.26	40
Отстающие	$90.68 \pm 0.94$	$5.03 \pm 1.27$	0.293	-4.32	41

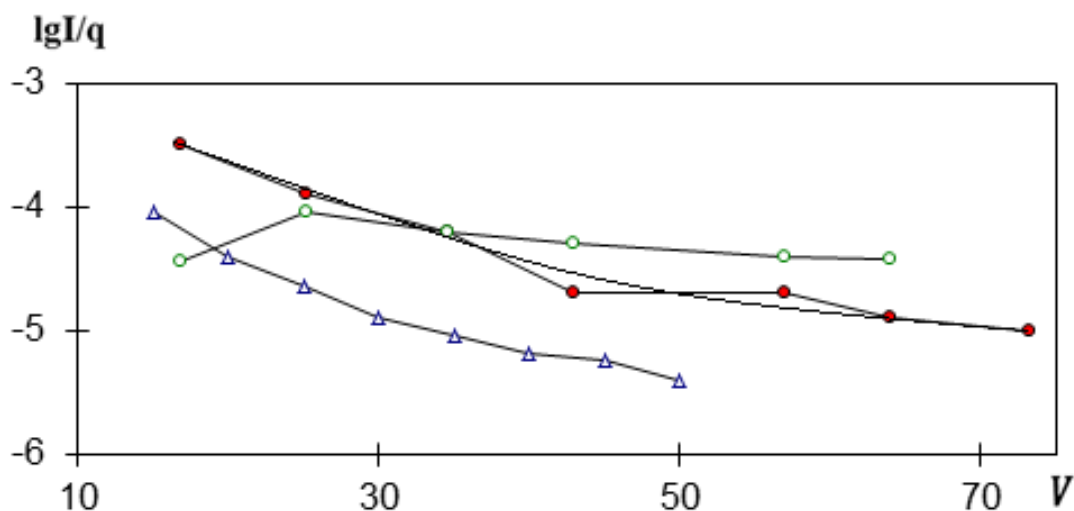
Далее зависимость  $\lg I/q$  от скорости исследована по наблюдениям 184 метеоров, зафиксированных в работах [9, 11, 29, 140-142], имеющих абсолютные звёздные величины, заключённые в интервале от  $0^m$  до  $+8^m$ .

Метеоры ярче  $0^m$  звёздной величины исключены по следующим причинам: а) в большинстве наблюдаемых случаев эти метеоры зарегистрированы по поворотным следам. Таких метеоров в нашем случае оказалось 7; б) кроме того, для ярких метеоров характерно многоцентровое радиоотражение и смещение точки зеркального отражения вдоль следа. Эти факторы, как правило, приводят к занижению значения длительности радиоотражения и величины линейной электронной плотности. Остальные метеоры были разбиты на группы по скоростям с интервалом в 10 км/с, и для каждой группы вычислено среднее значение скорости и  $\lg I/q$ . Результаты приведены на рисунке 2.9, где по оси ординат отложены значения  $\lg I/q$ , а по оси абсцисс – скорости метеоров.

Из данных, приведённых на рисунке 2.9, видно, что отношение  $\lg I/q$  в интервале 16-45 км/с увеличивается примерно на порядок, а при дальнейшем увеличении скорости до 72 км/с это отношение возрастает более умеренно и достигает -5. Ранее для исследования зависимости свечения и ионизации от скорости был осуществлён ряд лабораторных экспериментов [169-173]. Результаты моделирования явлений метеора в лабораторных условиях подтверждали ход зависимости  $\tau_\phi$  от  $V$  для модели В. Для случая железных частиц зависимость  $\beta$  от  $V$  получена в виде [170]:

$$\beta(\text{Fe}) = 1.5 \cdot 10^{-21} V^{3.12}. \quad (2.25)$$

Задавая химический состав пылинок и численные значения  $\tau_\phi$  и  $\beta$  по данным этих экспериментов, при помощи уравнения (2.23) можно вычислить отношение  $\lg I/q$  для различных значений скорости. Используя данные лабораторного моделирования процессов свечения и ионизаций, нами для образцов частиц, состоящих из Fe и Cu, и для диапазона скоростей 10-55 км/с вычислены значения  $\lg I/q$ . Численные значения  $\lg I/q$  варьируют в интервале от -5.5 до -4.3. Результаты вычислений также приведены на рисунке 2.9 для медных частиц.



**Рисунок 2.9.** - Зависимость логарифма отношения интенсивности свечения к линейной электронной плотности от скорости по результатам: а) • – объединённых параллельных радиооптических наблюдений; б) о – по результатам лабораторного моделирования процессов свечения и ионизации железных пылинок; в) Δ – тоже для медных пылинок, полученных, как в [169-173]

Таким образом, вычисленные результаты  $\lg I/q$  для метеоров с зеркальным радиоотражением (метеоры ярче  $0^m$ ), как по результатам объединённых одновременных радиооптических наблюдений, так и данным лабораторного моделирования процессов свечения и ионизации показывают, что в диапазоне метеорных скоростей значение  $\lg I/q$  уменьшается более чем на порядок.

Как из данных наблюдений, так и из результатов лабораторного моделирования следует, что изменение значения  $\lg I/q$  от скорости примерно описывается изменением  $\tau_f$  от  $V$  в модели В. Для скорости  $V = 35$  км/с и  $\lg I/q$  для железных метеоров, полученным по результатам лабораторного моделирования и результатам наблюдений, наблюдается хорошая согласованность. Небольшие различия между кривыми для других интервалов скоростей, по всей вероятности, обусловлены отличием химического состава, частично ошибками измерений, имеющим место, как в случае наблюдений, так и среди данных лабораторного моделирования, а также условиями проведения лабораторных экспериментов, которые соответствуют высотам 70 км.

Согласно уравнению (2.23), отношение  $\lg I/q$  можно определить, если известны величины  $\tau_\phi$  и  $\beta$  при заданном значении скорости и химического состава. Такие данные для интервала скоростей 11-53 км/с получены по результатам лабораторного моделирования процессов свечения и ионизации для частиц, состоящих из Fe, Ca, Si, Mg и т.д. [168-173]. Эти элементы входят в состав каменных метеоритов и часто наблюдаются в спектрах метеоров.

**Таблица 2.8. - Зависимости отношения  $\lg I/q$  от химического состава пылинок микронного размера для скорости  $V = 40$  км/с, рассчитанные по данным лабораторного моделирования процессов свечения и ионизации**

Элементы	$\lg \tau$	$\lg \beta$	$\lg I/q$
Mg	-3.40	-0.821	-5.46
Si	-2.97	-0.523	-5.27
Ca	-2.88	-0.208	-5.33
Fe	-2.03	-0.225	-4.33

Используя результаты лабораторного моделирования, можно оценить влияние химического состава метеороидов на разброс в значениях  $\lg I/q$ . Для этого из работ [180-183] нами были взяты численные значения  $\lg \tau$  и  $\lg \beta$  для скорости микрочастиц  $V = 40$  км/с. Данные о  $\lg \tau$  и  $\lg \beta$  и вычисленные значения  $\lg I/q$  для пылинок микронного размера, содержащих в своём составе Mg, Si, Ca и Fe, представлены в таблице 2.8.

Очевидно, что отношения интенсивности свечения к ионизации зависят от химического состава вещества, то есть, по мере увеличения атомного веса вещества от элемента Mg до Fe величина  $\lg I/q$  увеличиваются от - 5.46 до -4.33, то есть более чем на порядок (таблица 2.8).

Таким образом, на основании как результатов параллельных оптических и радиолокационных наблюдений, так и данных лабораторного моделирования процессов свечения и ионизации, следует, что отношение интенсивности свечения к линейной электронной плотности является функцией скорости и химического состава метеороидов.

**Таблица 2.9. - Вариации магнитуды, отношение интенсивности свечения к линейной электронной плотности вдоль следа одних и тех же радиотелевизионных метеоров**

№	V, км/с	M	H, км	Lg I/q	Поток
1	31,2	+6,2	85,4	-3,12	Виргиниды
		+6,8	83,1	-3,28	
		+6,8	82,7	-3,08	
2	14,7	+6,8	99,5	-3,23	Спорадический
		+6,8	98,8	-3,23	
		+5,8	96,1	-2,72	
		+5,7	94,6	-2,58	
7	17,9	+5,0	92,0	-3,24	Спорадический
		+4,85	91,8	-2,96	
9	28,8	+4,9	100	-3,12	Северные Писциды
		+5,0	98,5	-3,75	
12	16,2	+7,8	90,3	-2,93	Спорадический
		+7,7	89,9	-3,28	
14	36,0	+6,6	86,3	-3,98	Спорадический
		+6,0	84,0	-3,52	
		+5,8	81,7	-3,28	
15	30,1	+6,3	93,5	-3,44	Спорадический
		+6,3	92,3	-3,76	
19	30,4	+6,2	100,7	-3,28	Спорадический
21	32,0	+7,2	95,1	-3,05	Спорадический
		+7,0	94,4	-2,97	
		+6,8	93,2	-3,32	
		+6,6	91,4	-3,68	
		+6,6	91,4	-3,44	
23	35,7	+6,5	88,2	-3,28	Спорадический
		+7,1	84,9	-3,6	
		+7,2	83,7	-3,32	

Теперь исследуем вариации отношения интенсивности свечения к линейной электронной плотности вдоль следа метеоров. Для этого по величине магнитуды и значению линейной электронной плотности для зеркальной точки следа метеора, приведённым в работах [29], вычисляем значения отношения интенсивности свечения к величине линейной электронной плотности метеора. Результаты приведены в таблице 2.9. Очевидно, что отношение  $Lg I/q$  вдоль следа метеора также не постоянно, а варьируется незначительно. Это, по-

видимому, связано с неординарными вариациями (пульсациями) свечения и ионизации вдоль следа метеора.

### **2.13. Свечения и ионизация при различных значениях скоростей метеоров**

Связь между оптической яркостью и свойствами ионизированного следа по одновременным оптическим и радиолокационным наблюдениям изучалась в ряде исследовательских центров. Однако мнения исследователей по поводу зависимости от скорости отношения интенсивности свечения к линейной электронной концентрации или отношения коэффициента свечения к вероятности ионизации от скорости существенно различаются. Изучение взаимосвязи процессов интенсивности свечения к ионизации метеорных следов и, в частности, изучение отношения световой отдачи к коэффициенту ионизации от скорости метеоров имеют первостепенное значение в области метеорной физики. Эти данные важны не только для коррекции шкал масс фотографических и радиолокационных метеоров, но также очень необходимы для получения шкалы радиолокационных звёздных величин метеоров. Последнее необходимо для сопоставления данных оптических и радиолокационных наблюдений и интерпретации результатов радиолокационных наблюдений. Эта процедура важна также для проверки достоверности данных о физических характеристиках метеороидов (шкала масс), определяемых фото- и радиолокационными методами, и корректировки шкалы радиолокационных звёздных величин, что облегчает переход от результатов радиолокационных наблюдений к результатам оптических наблюдений. Практическая реализация этой цели основана на исследовании связи между оптической яркостью и свойствами ионизированного следа от скорости метеора и других характеристик. В [11, 29, 140-142] по результатам одновременных радиолокационных и оптических наблюдений изучена связь отношения интенсивности светового излучения к ионизации (или отношения коэффициентов светимости к ионизации) от скорости метеора, а также определена шкала радиолокационной звёздной величины. Однако результаты

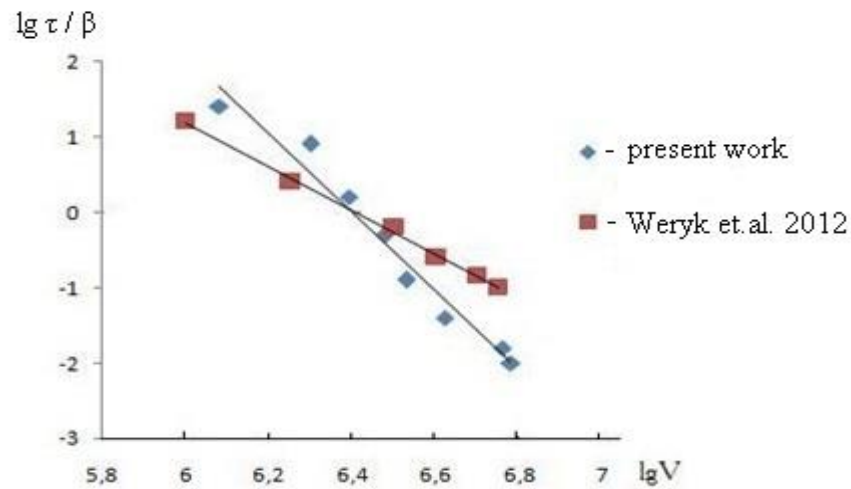
большинства предыдущих работ охватывали ограниченные диапазоны метеорных звёздных величин и скоростей, что было недостаточно для решения поставленных задач. В [140-142, 174-176] содержатся результаты наблюдений и резюме работ, одновременные оптические и радиолокационные наблюдения метеоров. Теоретическая формула, выражающая связь отношения интенсивности свечения к ионизации от отношения коэффициентов свечения к ионизации (уравнение (2.23) приведено в параграфе 2.11, согласно которому, отношение  $I/q$  является функцией не только коэффициентов светимости и ионизации, но также скорости и химического состава метеороида). Согласно уравнению (2.23), для исследования зависимости отношения светимости к коэффициентам ионизации и скорости необходимы наблюдательные данные об отношении интенсивности свечения к линейной электронной плотности. Для решения поставленного вопроса нами использованы объединённые данные одновременных оптико-радиолокационных наблюдений метеоров, опубликованных в работах [9, 11, 29, 140-142]. При этом авторы в [140-142] для каждого одновременного видео- и радиолокационного метеора рассчитывали отношение линейной электронной плотности к интенсивности свечения, а затем значение  $\log \beta/\tau$ . Они определили зависимость отношения коэффициентов ионизации к светимости от скорости, которая имеет вид:

$$\log \beta / \tau = (3,00 \pm 0,62) \log V - (4,27 \pm 1,37).$$

Используя уравнение (2.22), приняв средний атомный вес метеорного вещества равным  $\mu = 3,82 \cdot 10^{-23}$  г и представив отношение логарифмической интенсивности светового излучения к линейной электронной плотности по результатам одновременных наблюдений по [142], рассчитали отношение коэффициента светимости к ионизации. Результаты расчётов также представлены на рисунке 2.10. Видно, что результаты обоих циклов наблюдений при средних значения скорости  $V = 40$  км/с хорошо согласуются друг с другом.

Согласно рисунку 2.10, отношение коэффициента светимости к ионизации с увеличением скоростей метеоров в диапазоне 12-70 км/с

уменьшилось на три порядка. В целом, наши результаты удовлетворительно согласуются с данными, полученными Weryk [140-142].



**Рисунок 2.10. - Зависимость отношения коэффициента свечения к ионизации от скорости**

В результате одновременных оптических и радиолокационных наблюдений метеоров с помощью SMOR и нескольких видеокамер Gen-III учёными R. J. Weryk и P. G. Brown в Канаде в 2012 г. [140] были зафиксированы 128 совместно зарегистрированных метеоров, где их средняя абсолютная звёздная величина составила  $+2,8^m$ . Полученные данные позволили авторам исследовать зависимость между абсолютной звёздной величиной  $M$  и линейной электронной плотностью  $q$  в виде:

$$M = (38,7 \pm 1,2) - 2,5 \log q, \quad (2.26)$$

где  $q$  выражается в электрон/метр. Однако эти данные в основном относятся к метеорам слабее 0 метров.

В сентябре 2009 г. в Канаде в результате комплексных оптических, радиолокационных и инфразвуковых наблюдений был зарегистрирован ярчайший болид, кульминацией события которого стало падение метеорита Гримсби [177]. Абсолютная звёздная величина болида на высоте максимума свечения составила  $-14,8^M$ . Начальная скорость болида по данным четырёх оптических камер наблюдения составила  $20,91 \pm 0,19$  км. Данные опорных оптических, радиолокационных и инфразвуковых наблюдений болида Гримсби позволили оптическими и радиолокационными методами независимо друг от

друга определить траекторию движения атмосферных данных, таких как радиант, скорость, угол места, кривая блеска болида, и т.д.

**Таблица 2.10. - Избранные данные об атмосферной траектории комбинированных радиолокационных и оптических наблюдений ярких метеоров**

N	V, км/с	H <sub>от</sub> (км)	M <sub>от</sub>	log q <sub>от</sub>	log I <sub>ph</sub> /q	Источник
1	37.00	94.9	-1.7	14.99	-4.59	[10]
2	40.00	110.3	-1.80	14.88	-4.44	-«-
661345a	71.50	97.8	-6.30	15.93	-3.69	[11]
661345б	71.60	97.3	-4.40	15.19	-3.71	-«-
670805	60.10	98.2	-2.10	14.25	-3.87	-«-
670821	60.50	99.0	-2.90	15.28	-4.40	-«-
670866	61.70	107.5	-3.00	15.50	-4.58	-«-
670931	61.00	95.0	-5.80	16.73	-4.69	-«-
670954	63.70	93.6	-4.80	14.96	-3.32	-«-
770954	57.80	93.0	-7.20	15.32	-2.72	[173]
7709533	60.80	89.0	-1.90	13.56	-3.08	-«-
770981	38.80	96.5	-2.10	13.21	-2.65	-«-
771033	61.40	107.5	-1.50	14.85	-4.53	-«-
781285с	61.90	105.0	-2.00	14.66	-4.14	-«-
790846a	42.70	93.8	-0.50	13.82	-3.9	-«-
800992в	61.70	94.0	-3.40	14.32	-3.24	-«-
801061в	60.40	100.0	-1.00	14.78	-4.66	-«-
3	59.99	102.9	-0.30	13.96	-4.12	[174]
4	-	98.0	-0.90	14.73	-4.55	-«-
5	43.90	101.0	-1.50	14.60	-4.28	-«-
12	29.10	90.0	-1.60	15.08	-4.72	-«-
30	14.30	88.5	-1.00	14.21	-4.09	-«-
31	69.40	110.5	-0.15	14.59	-4.81	-«-
35	38.50	91.4	-1.00	14.75	-4.63	-«-
44	63.60	99.0	-1.75	14.77	-4.35	-«-
45	65.80	102.0	-1.20	14.84	-4.64	-«-
54	65.70	99.0	-3.20	15.71	-4.71	-«-

Однако отсутствие некоторых данных о высотах точек зеркального и не зеркального отражения (длительности радиоотражений и величине линейной электронной плотности для трёх частот 17, 29 и 38 МГц) не позволило использовать огненный шар для расчёта массы оптическим и радиолокационным методами.

Таким образом, по результатам одновременных фото-радиолокационных и телевизионно-радиолокационных метеорных наблюдений мы в настоящее время имеем 27 совместных метеоров, звёздная величина которых находится в диапазоне от  $-0,15^m$  до  $-7,2^m$ , а скорость - в диапазоне 14-72 км/с. Основные исходные данные по этим метеорам по соответствующим источникам приведены в таблице 2.10, где в первом столбце указан N – номер метеора, во втором – V – скорость, в третьем –  $H_{от}$  – высота точки отражения, четвертая и пятая колонки показывают и – абсолютную величину ( $M_{от}$ ) и линейную плотность ( $q_{от}$ ) электронов для высоты радиоотражения, шестая колонка показывает отношение  $\lg I_{ph}/q$  (где  $I_{ph}$  фотографическая сила света), а седьмая колонка содержит литературные источники метеорной информации.

Данные, представленные в таблице 2.10, позволяет изучить зависимость отношения  $\lg I_{ph}/q$  от скорости для случая метеоров ярче  $-0^m$ . При этом метеоры, указанные в таблице 2.10, сгруппированы в семь групп по скорости с интервалом 10 км/с, и для каждой группы приведено среднее арифметическое значение  $\lg I_{ph}/q$  и его среднеквадратичное отклонение. Результаты расчёта приведены в таблице 2.11. Здесь N – количество метеоров, входящих в каждую группу. Анализ данных, представленных в таблице 2.11, показывает, что в диапазоне скоростей метеоров от 10 до 30 км/с статистических данных ещё недостаточно.

**Таблица 2.11. - Зависимость  $\lg I_{ph}/q$  от скорости по результатам комбинированных радиооптических наблюдений метеоров ярче  $-0^m$**

V, km/s	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
( $\lg I_{ph}/q$ )	-4.09	-4.720	-3.957 $\pm 0.65$	-4.207 $\pm 0.16$	-3.42 $\pm 0.7$	-4.216 $\pm 0.16$	-3.7 $\pm 0.01$
N	1	1	3	3	2	14	2

Анализ средних значений зависимостей  $\log I_{ph}/q$  и их рассчитанного стандартного отклонения для оставшейся группы метеоров показывает, что в диапазоне скоростей  $\log I_{ph}/q$  оно меняется мало и остаётся практически постоянным.

Согласно таблице 2.11, среднее значение  $\log I_{ph}/q$  составляет  $-4,12 \pm 0,12$ . Полученное усреднённое значение  $\log I_{ph}/q$  для метеоров ярче  $-0^m$  по результатам совместных наблюдений, используя уравнение (2.23) и данные о коэффициенте светимости, используемые для расчёта фотографической массы метеороидов в [7, 60] по данным формулы (2.23), где  $\tau_{ph} = \tau_0 \cdot V$  (2.14), где  $\log \tau_0 = -9,3$ , позволило рассчитать коэффициенты ионизации при заданном значении скорости метеора. Расчётные значения  $\beta$  для различных значений скорости приведены в таблице 2.12. Данные, представленные в таблицах 2.10-2.12, позволяют рассчитать массу совместных метеороидов с использованием шкал фотографической  $M_{ph}$  и радиолокационной массы  $M_r$  по формулам, полученным в [176].

**Таблица 2.12. - Зависимость коэффициента ионизации  $\beta$  от скорости при использовании численных значений отношения  $\lg I/q = -4,12 \pm 0,12$  и  $\lg \tau_0 = -9,3$**

V, км/с	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	>70
$\beta$	0.00013	0.0020	0.010	0.032	0.0789	0.16	0.30

### **2.13.1. Зависимость шкалы радиовеличины от скорости метеоров**

Радиолокационные наблюдения метеоров в настоящее время являются единственным средством получения информации о комплексных физико-кинематических и динамических свойствах метеороидов, наблюдаемых в дневное время суток. Однако, для проверки достоверности данных радиолокационных наблюдений необходимо их калибровать относительно результатов оптических наблюдений. Под выражением радиовеличина подразумевается взаимосвязь между абсолютной фотографической (или визуальной) звездной величиной, определяемой по результатам оптических наблюдений, с количеством ионизации, создаваемой метеором на единицу длины его следа. Ранее шкалы радиовеличин по результатам одновременных радиовизуальных [124-132], а также данные одновременных радиооптических наблюдений метеоров для отдельных диапазонов скоростей метеоров исследовались в работах [9, 11, 29, 140, 167]. Однако, выявленное выражение

радиовеличины по результатам одновременных оптических и радиолокационных наблюдений разных источников не одинарные, а вопрос зависимости радиовеличины от скорости остаётся одной из нерешенных проблем метеорной астрономии. Зависимости радиовеличины от скорости исследовалось автором в два этапа: А) по данным визуально-телескопических и радиолокационных наблюдений метеоров, выполненных Знойлом и соавт. в 1972–1973 гг. [129]; Б) по материалам одновременных фото-радиолокационных наблюдений в Джодрелл-Бэнк, данным радиолокационных телевизионных наблюдений в Гарварде (Массачусетс), Таджикистане и одновременные радиолокационные и видео метеорные наблюдений в Оттаве [9, 29, 140, 167].

В первом случае нами на основе данных визуально-телескопических и радиолокационных наблюдений в Ондржеёв [129] исследовался логарифм отношения интенсивности свечения к линейной электронной плотности ( $\lg(Iv/q)$ ) для четырёх групп спорадических метеоров (таблица 2.7). Далее, используя известное уравнение зависимости абсолютной визуальной звёздной величины от интенсивности свечения и численные значения  $\lg Iv/q$ , полученные для каждой группы, определены радиовеличины метеоров, где результаты расчётов представлены ниже:

$$M = 36.7 - 2.5 \lg q \text{ (апексные, } V \approx 60 \text{ км/с),}$$

$$M = 36.2 - 2.5 \lg q \text{ (тороидальные, } V \approx 45 \text{ км/с),}$$

$$M = 35.0 - 2.5 \lg q \text{ (антиапексные, } V \approx 23 \text{ км/с),}$$

$$M = 35.1 - 2.5 \lg q \text{ (отстающие, } V \approx 23 \text{ км/с).}$$

Из приведённого обзора исследований очевидно, что при заданном значении линейной электронной плотности разность в радиовеличинах между апексными и антиапексными метеорами составляет  $1,7^m$ .

Для более подробного исследования зависимости  $\lg(I/q)$  от скорости автор, исходя из классификации метеоров по Эпику [81, 82], использованы две модели: 1) модель А и 2) модель Б, в которых использованы обобщенные результаты зависимости  $\lg(I/q)$  от скорости, полученные по результатам радиооптических наблюдений [9, 11, 29, 140] (рисунок 2.9). Причём метеоры

разделены на группы по скоростям с интервалом в 10 км/с, и для каждой группы были вычислены средние значения скорости и  $\lg(I/q)$ . Результаты расчёта радиовеличин для метеоров слабее  $0^m$  для заданного диапазона скоростей приведены в таблице 2.13, где данные представлены в следующей последовательности: в первой строке - диапазон скоростей  $\Delta V$ , во второй строке - средние скорости  $V_{ср}$ , в третьей строке - значение  $\lg I/q$ , в четвёртой строке - количество метеоров  $N$ , в пятой строке - значение радиовеличины  $Mr$ .

**Таблица 2.13. - Зависимость шкалы радиовеличин от скорости метеоров**

$\Delta V$	10 -20	20 -30	30 -40	40 -50	50 -60	60 -70	70-80
$V$	16.8±0.6	25.1±0.6	34.5±0.5	43.0±0.4	56.9±0.4	63.9±0.5	73.2±1.1
$\lg I/q$	-3.5±0.2	-3.9±0.2	-4.2±0.2	-4.7±0.2	-4.7±0.1	-4.9±0.1	-5.0±0.2
$N$	11	26	44	37	27	36	11
$Mr$	33.0	34.2	34.3	36.0	36.1	36.4	36.8

Таким образом, из полученных результатов следует, что шкала радиовеличин зависит от скорости метеоров. При этом разность в радиовеличинах для двух крайних значений скоростей составляет  $3.8^m$ . Пренебрежение зависимостью радиовеличины от скорости при редукции данных наблюдений может существенно исказить полученные результаты.

#### **2.14. Общность в форме распределения блеска и ионизации вдоль следа метеоров разных диапазонов интенсивностей**

Метеороиды, вторгающиеся в Земную атмосферу из межпланетного пространства, сталкиваются с молекулами воздуха и в результате нагреваются до 2000 К, раскаляются, испытывают кипение и различные формы абляции, такие как испарение, шелушение, дробление и т.д. Конечная фаза абляции фрагментов является испарением. Испарившиеся атомы и молекулы с поверхности тела и образовавшиеся фрагменты при дальнейшем столкновении с атомами и молекулами атмосферы взаимно возбуждаются, ионизируются и в результате оставляют за собой светящийся и ионизационный след, который регистрируется оптическими и радиолокационными средствами наблюдений.

Фотометрируя след метеора на фотопластинке или на площадке ПЗС-матрицы и редуцируя данные об амплитуде, дальности, длительности радиоэха и фазе отражённых радиоволн, мы получаем кривую свечения и ионизации метеора. Следовательно, кривые свечения и ионизации метеороидов являются основными носителями информации, как о физических процессах, сопровождающих полёт метеороидов в Земной атмосфере, так и о физико-кинематических и динамических характеристиках самих метеороидов. Поэтому они представляются важнейшими компонентами для исследования, как физико-кинематических, так и динамических свойств метеороидов. Ранее по результатам оптических и радиолокационных наблюдений были изучены некоторые статистические характеристики кривых свечения и ионизации метеоров, охватывающих узкий диапазон звёздных величин [179, 180]. Следовательно, немаловажное значение представляет исследование распределения свечения и ионизации вдоль следа метеоров в широком диапазоне звёздных величин.

К настоящему времени на основе результатов базисных наземных оптических наблюдений метеоров камерами болидной сети, камерами НАФА, светосильной камерой Супер-Шмидта, телевизионными и видеокамерами, комплексом радиолокационной аппаратуры различной чувствительности, а также по результатам комплексных наблюдений болидов, завершившихся падением метеоритов, накоплено определённое количество кривых блеска и ионизации, охватывающих широкий диапазон звёздных величин (от  $-20^m$  до  $+12^m$ ) метеоров [179-181]. Редукция данных базисных оптических и радиолокационных наблюдений болидов и типичных метеоров по вышеуказанным источникам позволили наряду с кривыми блеска и ионизации получить данные атмосферных траекторий и определить их физико-кинематические характеристики и т.д.

Анализ кривых свечения и ионизации метеороидов, проводимый разными исследователями, указывает на весьма разнообразные формы распределения свечения и ионизации вдоль следа метеора. На наш взгляд, кривые свечения и

ионизации метеоров в целом можно разделить на две группы [97]: А) кривые с гладкими формами распределения свечения и ионизации вдоль следа и Б) аномальные (вспышечные) кривые блеска и ионизации метеоров. В свою очередь гладкие кривые также имеют самые разнообразные формы. Такие кривые можно квалифицировать по трём группам: 1) кривые с относительно медленным возрастанием блеска и относительно резким спадом, 2) кривые с симметричной формой распределения блеска и ионизации вдоль следа и, наконец, 3) кривые с относительно резким возрастанием блеска и медленным спадом. Имеются и теоретические предпосылки к объяснению различия в формах сглаженных кривых блеска метеоров. Теоретическая форма кривых свечения метеоров для различных диапазонов масс, в предположении того, что основным механизмом абляции метеоров является квазинепрерывная фрагментация, рассматривалась в работе В. Н. Лебединца [7], согласно которой все три вида гладких кривых блеска и ионизации метеоров хорошо описываются в рамках теории квазинепрерывной фрагментации. Результаты моделирования кривых свечения метеоров с различными значениями массы в диапазоне от  $10^{-2}$  до 0.6 г, со средней скоростью  $V = 30$  км/с,  $\cos z = 0.6$  и с различными массами осколков (при использовании зависимости коэффициента свечения от скорости по Эпику) удовлетворительно описывают все три типа гладких кривых блеска метеоров.

Анализ распределения блеска или ионизации вдоль следа, проводимый отдельными исследователями, охватывал отдельные узкие диапазоны звёздной величины. Однако вопрос исследования специфических особенностей распределения блеска вдоль следа метеоров в широком диапазоне звёздной величины не изучался. Таким образом, вопрос о том - имеется ли общность в форме распределения блеска и ионизации вдоль следа метеоров, регистрируемых разными аппаратами, или нет - остаётся открытым.

Цель настоящей работы заключается в исследовании распределения блеска и ионизации вдоль следа метеоров, зарегистрированных оптической и радиолокационной аппаратурой в широком диапазоне скоростей, яркостей, и

изучении зависимости форм кривых свечения и ионизации метеоров от скорости и массы метеороидов.

Для решения поставленных задач нами использованы опубликованные данные атмосферных траекторий болидов Прерийной и Европейской сети [184-188, 191-193], результаты атмосферных траекторий 413 метеоров, полученных на светосильной камере Супер-Шмидта, результаты базисных телевизионных наблюдений 454 слабых метеоров Сарма и Джонса со звёздной величиной от +1 до +8.5<sup>m</sup> в Сперингхилле, результаты фотографических наблюдений метеоров в Таджикистане, данные атмосферных траекторий болидов, завершившихся падением метеоритов, кривые ионизации 670 радиометеоров ярче +5<sup>m</sup>, полученные автором по результатам базисных радионаблюдений метеоров с четырёх-пяти станций в ГисАО [61-72].

Данные атмосферных траекторий метеоров, в частности, наличие высоты начала, максимума и конца следа метеора дают приблизительную форму кривой свечения или ионизации.

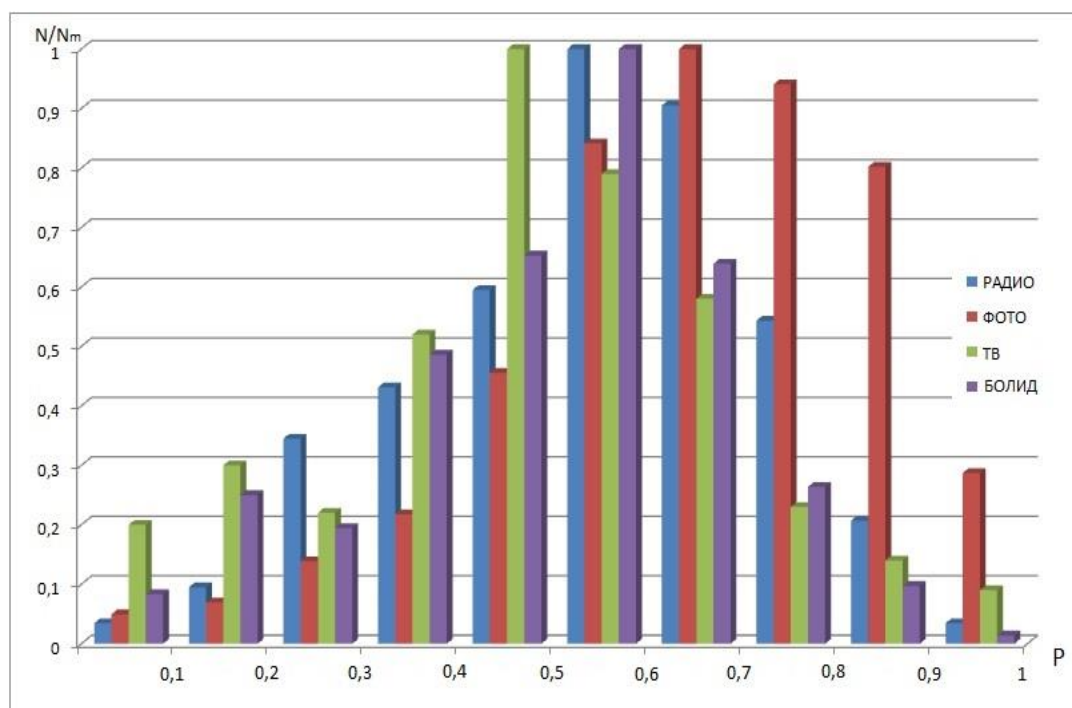


Рисунок 2.11. - Распределение метеоров по параметру P

Далее, используя данные о высотах начала  $H_b$ , максимума  $H_m$  и конца следа  $H_e$  каждого метеора заданного массива, по формуле:

$$P = (H_b - H_m) / (H_b - H_e) \quad (2.27)$$

нами вычислен параметр  $P$ . Результаты вычисления параметра  $P$  для кривых ионизации радиометеоров, полученных в ГисАО [71] и для болидов Прерийной и Европейской сети [61, 62]; ТВ метеоров Сарма и Джонса [68, 70], фотографических метеоров, зарегистрированных в Душанбе [65], в виде распределения приведены на рисунке 2.11. Согласно рисунку 2.11, максимум в гистограмме распределения по параметру  $P$  для болидов Прерийной сети и радиолокационных метеоров, зарегистрированных в ГисАО, расположен в области 0.5-0.6. У фотографических метеоров, зарегистрированных в Таджикистане, максимум в гистограмме распределения находится в интервале 0.6-0.7.

У слабых телевизионных метеоров в гистограмме распределения по параметру  $P$  наблюдаются два максимума, которые расположены в первой половине гистограммы. Причём первый максимум находится в диапазоне 0.1-0.2, а второй максимум - в диапазоне 0.4-0.5.

Независимо от того, что Супер-Шмидтовские метеоры относятся к относительно слабым фотографическим метеорам, форма распределения по параметру  $P$  у этих метеоров близка к распределению по параметру  $P$  болидов Прерийной сети.

Общий анализ распределения по параметру  $P$  в широком диапазоне звёздной величины указывает на то, что по мере перехода к слабым метеорам наблюдается смещение высоты максимума блеска к середине или к начальной части траектории метеоров. Данные параметра  $P$ , представленные на рисунке 2.11, свидетельствуют, что у всех рассматриваемых наблюдательных массивов форма распределения свечения и ионизации вдоль следа различается. Причём установлено, что формы распределения метеороидов по параметру  $P$ , как у оптических, так и у радиолокационных метеоров имеют несимметричный вид. Анализ гистограммы распределения метеоров по параметру  $P$  в широком диапазоне звёздной величины указывает на наличие общей тенденции в ходе распределения интенсивности свечения и линейной электронной плотности вдоль следа метеоров. В частности, выявлена общая тенденция, то есть

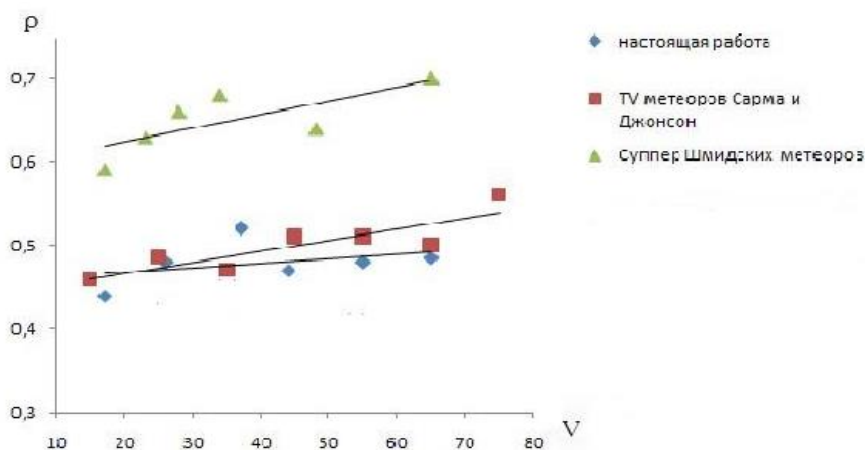
увеличение числа метеоров в первой половине всех гистограмм происходит примерно экспоненциально, а уменьшение числа метеоров во второй половине гистограмм происходит относительно медленно. Таким образом, наличие похожих элементов в форме распределения, как на первой половине (восходящий участок), так и на нисходящей части гистограммы распределения по параметру  $P$  свидетельствует об общности происхождения метеоров различной массы и звездной величины.

**Таблица 2.14.** - Данные атмосферных характеристик болидов, завершившихся падением метеоритов [72]

Название	Масса, кг	$\delta$ , г/см <sup>3</sup>	Тип метеорита	Восстанов- ленная масса	$V_{\infty}$ , (км/с)	$h_b$	$h_m$	$h_e$	$P$	$I_{max}$
Пиршбрам	1300	3.57	H5	5.8	20.89	98	44	13.3	0.64	-19
Лост Сити	160	3.4	H5	17.0	14.2	86	41	19.5	0.68	-12
Инисфри	40	3.35	L5	4.58	14.54	>62	55.6	19.9	-	-12
Пикскилл	5000	3.34	H6	12.4	14.72	60	38.6	34.0	0.80	-16
Тагиш Лаке	65000	1.64	C2	~10	15.8	-	37.0	29.0	-	-22
Моравка	1500	3.59	H5	0.63	22.5	80	32.5	21.0	0.81	-20
Неусчван- стейн	300	3.49	EL6	6.19	20.95	85	20,8	16.0	0.93	-17.2
Парк Форест	10000	3.35	L5	18	15.5	82	29	18.0	0.83	-21.7
Вилалвет- одела Пена	600	3.42	L6	3.5	16.9	-	28	22.0	-	-18
Банбурра рокчоле	22	2.86	Euc	0.32	13.4	62.8	54.8	29.6	0.24	-9.3
Алмахате Ситта	70000	2.3	Ure- Anom	3.95	12.4	65	44	32	0.6	-19.7
Буззард Коулле		-	H4	>50	18.0	-	-	-	-	-
Джесенисе	170	-	L6	3.6	15.8	88	46	18.0	0.60	-15
Гримсби	30	3.37	H4-6	3,37	20.91	100	39.4	19.6	0.75	-14.8
Челябинский	13000 т	3.5	LL5	~4-6 т	16.6	95.0	26.5	13.0	0.84	-27.5

В таблице 2.14 приведены данные оценки параметра  $P$  для болидов, завершающихся падением метеоритов [72]. В первом столбце дано название метеорита, во втором – масса, в третьем – значение минералогической плотности, в четвёртом – тип метеорита, в пятом – значение восстановленной массы, в шестом – значение внеатмосферной скорости, в седьмом, восьмом и девятом столбцах – высоты начала, максимума и конца следа, в десятом – значение параметра  $P$  и в последнем столбце приводится величина интенсивности свечения на высоте максимума блеска болида. Согласно таблице 2.14, численные значения параметра  $P$  (за исключением метеорита Ванбурра Рокчолле, где  $P = 0,24$ ) у остальных болидов, порождающих метеориты, находятся в интервале 0.6-0.9. Среднее значение  $P$  равно 0.74.

Данные о вычисленных значениях параметра  $P$  для каждого метеора заданного массива и результаты их атмосферной траектории позволяют исследовать зависимость параметра  $P$  от скорости и массы для разных массивов данных метеоров. При этом нами для каждого массива по отдельности объединены метеоры в семи группах по скоростям, и для каждой группы вычислены средние значения параметра  $P$  и средние значения скорости. Результаты вычислений приведены на рисунке 2.12.



**Рисунок 2.12. - Зависимость параметра  $P$  от скорости метеоров**

Теперь исследуем зависимость параметра  $P$  от массы метеороидов. Для этого по указанным массивам данных наблюдений нами проведены исследования зависимости параметра  $P$  от массы, результаты которых

приведены на рисунке 2.13. Из рисунка 2.13 следует, что в интервале масс  $10^{-3}$ - $10^0$  г параметр Р уменьшается незначительно. Далее с увеличением масс частиц параметр Р резко увеличивается. Такое поведение параметра Р в широком диапазоне масс, по-видимому, связано с происхождением частиц разных масс. То есть, массы частиц в диапазоне  $10^{-3}$ - $10^0$  г. имеют кометное происхождение, а в интервале масс 1 г и более имеют астероидное происхождение.

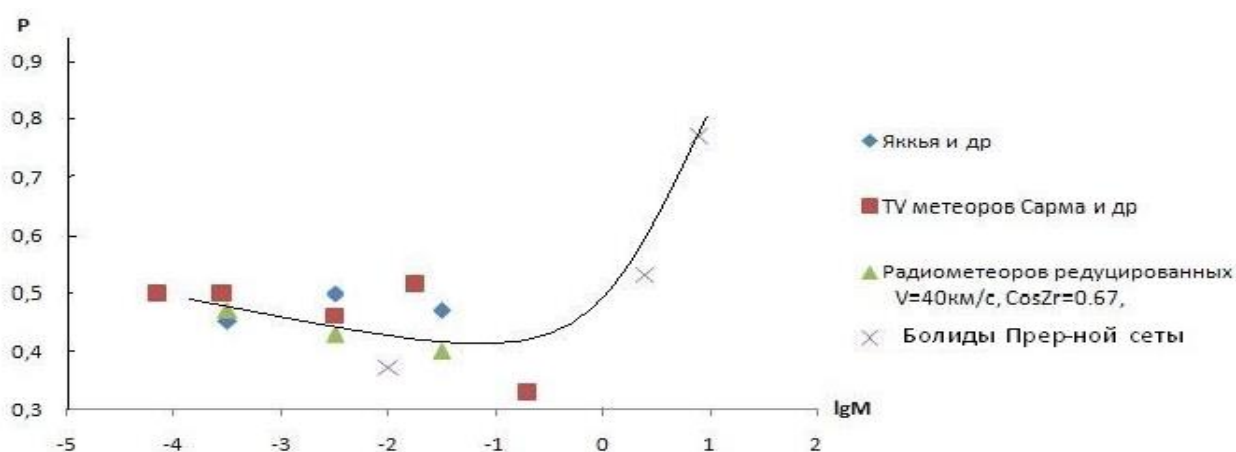


Рисунок 2.13. - Зависимость параметра Р от массы метеороидов

## 2.15. Распределение интенсивности свечения вдоль следа метеоров разных метеороидных популяций

Метеороиды, проникающие в Земную атмосферу из межпланетного космического пространства, сталкиваются с встречными атомами и молекулами воздуха, нагреваются, раскаляются и испытывают различные формы абляции, такие как шелушение, сдувание расплавленной плёнки и различные формы дробления с завершающим этапом испарения с поверхности метеороида и отдельных фрагментов метеорного происхождения. Последствия процессов взаимодействия метеороида с Земной атмосферой вызывают образование светящегося и ионизационного следа метеора. Образовавшиеся следы метеоров регистрируются самими различными оптическими (фотографическими, электронно-оптическими, видео- и телевизионными камерами и камерой «Рыбий глаз») и радиолокационными средствами наблюдений. В результате редукиции данных базисных оптических и радиолокационных наблюдений метеоров получают радианты, скорости, орбиты и данные атмосферной

траектории, включая кривые свечения и ионизации метеоров. Кривые свечения и ионизации представляют собой вариации интенсивности свечения и ионизации вдоль следа и содержат совокупность информации, как о физико-химических, так и кинематико-динамических (орбитальных) свойствах метеороидов. Особую значимость представляют данные о метеорной популяции, так как они относятся к важнейшей составляющей части метеорного вещества. Следовательно, представляет интерес изучение распределения интенсивности свечения вдоль следа метеороидов в широком диапазоне звёздных величин метеороидов разных популяций, поскольку первоисточником носителей информации о физико-кинематических и химических свойствах метеороидов являются их кривые свечения.

Оптический метод является одним из самых распространённых и точнейших методов получения информации о ходе вариации интенсивности свечения вдоль следа метеора. Полученная информация с помощью таких комплексных оптических средств наблюдений, как: камеры Супер-Шмидт, камеры НАФА-3, камеры болидной сети «Рыбий глаз», телевизионные и видеокамеры и т.д., которые не только взаимно дополняют, но и каждая из них способна зарегистрировать определённый диапазон яркостей или звёздных величин метеоров. Подробная информация о данных атмосферных траекторий и элементах орбит метеороидов, полученная с помощью этой аппаратуры, была опубликована ранее. Анализ данных кривых свечения метеороидов свидетельствует об их весьма разнообразных формах. Анализируя эти результаты, нами в [97] были выявлены две группы кривых свечения метеоров: а) кривые со сглаженной формой и б) аномальные (вспышечные) кривые свечения. Обе группы этих кривых имеют три типа распределения интенсивности свечения вдоль следов метеоров. К первому типу отнесены кривые с медленным нарастанием блеска и относительно быстрым спадом. Метеороиды с близкосимметричной формой распределения блеска вдоль следа были отнесены ко второму типу. К третьему типу отнесены кривые с резким возрастанием блеска до высоты максимума свечения и относительно

медленным спадом. Расположение высоты максимального свечения вдоль следа аномальных кривых свечения аналогично, как и в случае гладких кривых метеоров. Такое поведение свечения характерно и в аномальных формах кривых свечения метеоров. Форма кривой блеска метеора предварительно описывается их месторасположением вдоль следа метеора. Следовательно, для статистического исследования зависимости формы кривых свечения от типов их орбит достаточно использовать выражение для определения параметра  $P$ , который характеризуется месторасположением высоты максимума свечения относительно высоты начала  $h_b$  и конца  $h_e$  следа метеора. Параметр  $P$  определялся по известной формуле (2.27).

В работе [148] был вычислен параметр  $P$  для метеоров, зарегистрированных, а) камерой Супер-Шмидта, б) на малых камерах в) камерах болидной Прерийной и Европейской сети; ТВ-метеоров по каталогу Сарма и Джонса и кривых ионизации метеоров, полученных в Институте астрофизики НАН Таджикистана. Было установлено, что увеличение числа метеоров в первой половине гистограммы распределения параметра  $P$  происходит примерно экспоненциально, а уменьшение их числа после максимума происходит относительно медленно. Настоящая работа посвящается исследованию месторасположения высоты максимума свечения относительно высоты начала и конца следа (параметра  $P$ ) метеоров разных популяций.

В конце семидесятых годов двадцатого века немаловажную значимость представляло исследование структуры и орбитальных характеристик метеороидов. Этим вопросом наиболее плотно занимался Зд. Цеплеха в [61, 62], где он использовал большие массивы данных наблюдений, полученные такими оптическими средствами как малые камеры, камера Супер-Шмидта и камеры Прерийной болидной сети. При этом он пришёл к выводу, что метеороиды по составу, структуре и плотностям делятся на пять групп и для каждой группы исследовал орбитальные характеристики (использовал наблюдательные данные, полученные болидной Европейской сетью, метеоров с камеры Супер-Шмидт и метеоров, зарегистрированных с помощью маленькой камеры),

результаты исследования обобщены и систематизированы в вышеупомянутых работах. Результаты квалификации метеороидов по орбитальным и физическим характеристикам обобщены и приведены в работе В. А. Бронштэна [74], где в результате исследований были выявлены 5 типов метеорных популяций. К первому типу популяций отнесены метеороиды с орбитальными характеристиками аналогично астероидным (AI). Средние плотности метеороидов этой группы приняты равными  $3.7 \text{ г/см}^3$ . Орбитальные характеристики метеороидов популяции типа (AII) также ближе к астероидной группе, но их плотность несколько меньше и равна  $2.1 \text{ г/см}^3$ .

Однако ввиду того, что данные о структуре, составе и плотностях исследуются на базе кривых свечения метеороидов, представляет интерес изучение формы кривых свечения метеоров в разных метеорных популяциях. Плотности метеороидов, вычисленные несколько позже на основе теории [184-185], для метеороидов разных поколений оказались несколько больше. Однако плотность и структура метеороидов, вычисленных с учётом КНД, несколько отличаются от данных, представленных о плотностях в работах Зд. Цеплехи [186-188].

Для исследования месторасположения высоты максимального свечения относительно высоты начала и конца следа в разных метеорных популяциях в качестве наблюдательного материала использованы данные, зарегистрированные с помощью различных оптических камер, перечисленных выше. Результаты квалификации метеороидов по орбитальным характеристикам обобщены и приведены в таблице 2.15. При этом, по опубликованным материалам данных ТВ-наблюдений атмосферной траектории метеоров каталога Сарма и Джонса для каждого метеора заданной популяции вычислен параметр  $P$  и по результатам расчёта построены гистограммы распределения метеоров по параметру  $P$ . Среди ТВ-метеоров отсутствуют метеороиды с астероидными орбитами. Здесь для каждой группы популяций: астероидных (I), метеороидов групп A(II), B(-), C1(IIIa), C2(Ai), D(IIIb)

приведён диапазон таких элементов орбит, как большая полуось, эксцентриситет и наклон орбиты.

Таблица 2.15. - Структура и элементы орбиты в метеороидных популяциях

Группа	Группа	$a_i$	$e_i$	$I_i$	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>
Астероидальные	I	1.4-2.5	0.58-0.68	6°-15°	3.7
A	II	1.2-2.5	0.25-0.64	1°-5°	2.1
B	(-)	2.4-2.5	0.90-0.92	5°-6°	1.0
C1	IIIА	1.0-2.5	0.80-0.82	4°-6°	0.6
C2	IIIАi	$\approx \infty$	0.99	Различные	0.2
D	IIIВ	3.0-3.3	0.7-0.77	10°-25°	0.2

Согласно рисунку 2.14, у метеороидов группы А имеется три максимума. Первый максимум расположен в диапазоне 0.1-0.2. Второй максимум при сглаживании точки в ходе распределения параметра Р находится в интервале 0.3-0.4, а третий максимум находится в диапазоне 0.7-0.8. На этом же рисунке приведено распределение параметра Р для популяции С1 (синие линии). Очевидно, что увеличение числа метеоров на первой половине гистограммы происходит примерно экспоненциально, а спад более медленно.

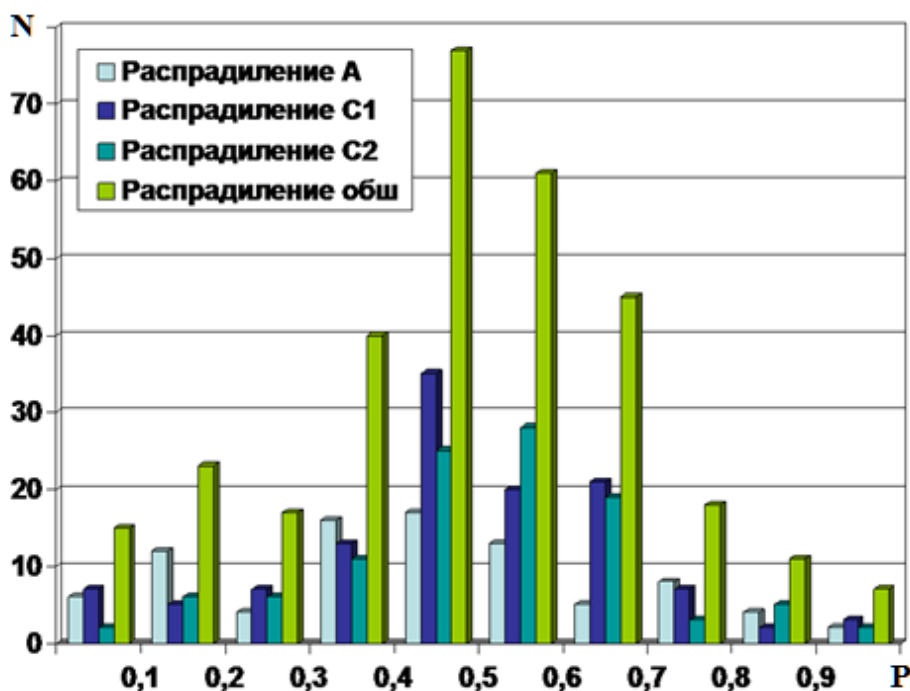
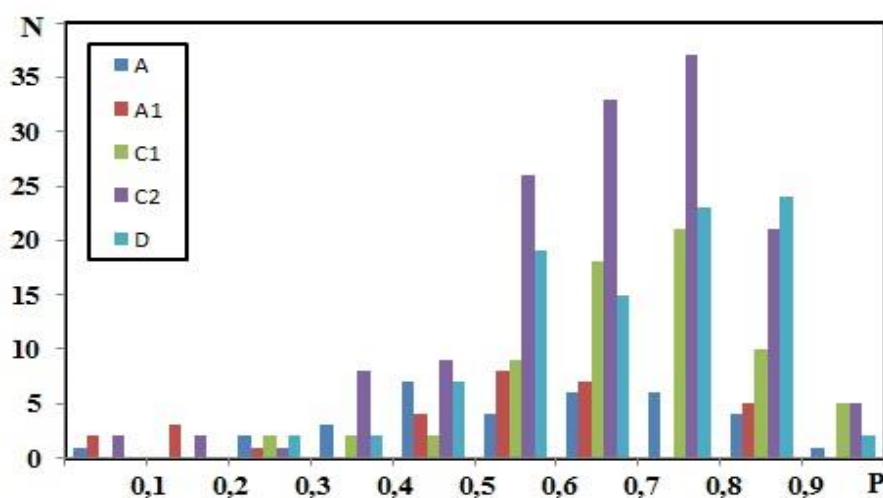


Рисунок 2.14. - Распределение параметра Р для разных популяций телевизионных метеоров

Максимум в ходе распределения параметра  $P$  расположен на первой половине траектории в интервале 0.4-0.5. Ход распределения параметра  $P$  в этой группе асимметричен. Более компактное распределение параметра  $P$  наблюдается у метеороидов группы  $C2$ . Ход распределения параметра  $P$  для метеороидов этой группы выглядит симметрично. Максимум распределения параметра  $P$  сосредоточен в интервале 0.5-0.6. Таким образом, максимум в распределении параметра  $P$  по мере перехода от популяции типа  $A$  к популяциям  $C1$  и  $C2$  смещается от диапазона 0.3-0.4 до 0.5-0.6.

Распределение параметра  $P$  для разных популяций метеоров, зарегистрированных камерой Супер-Шмидта, приведено на рисунке 2.15.



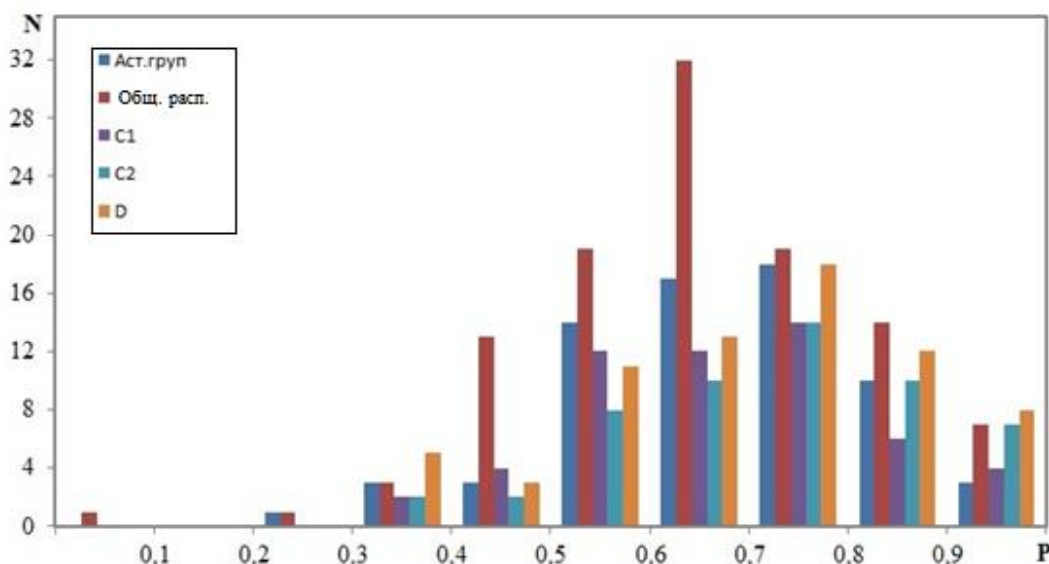
**Рисунок 2.15. - Распределение параметра  $P$  для разных популяций Супер-Шмидтовских метеоров**

Значение параметра  $P$ , как и в случае телевизионных метеоров, наблюдается почти во всех популяциях. Два максимальных значения параметра  $P$  наблюдаются для популяции астероидной группы  $A'$ , где первый максимум находится в интервале 0.4-0.5, а второй - в интервале 0.6-0.8.

Для метеоров популяции  $A$  максимум в распределении находится в диапазоне 0.5-0.6. Максимальное количество метеоров для группы  $C1$  и группы  $C2$  расположено в интервале 0.7-0.8. У  $D$  популяции максимум в распределении расположен в диапазоне 0.8-0.9. Таким образом, высота максимума свечения по мере перехода от астероидной группы к  $D$ -популяции меняется в диапазоне  $P$  от 0.4-0.5 до 0.8-0.9.

Для метеоров популяции А максимум в распределении находится в диапазоне 0.5-0.6. Максимальное количество метеоров для группы С1 и группы С2 расположено в интервале 0.7-0.8. У D-популяции максимум в распределении расположен в диапазоне 0.8-0.9. Таким образом, высота максимума свечения по мере перехода от астероидной группы к D-популяции меняется в диапазоне Р от 0.4-0.5 до 0.8-0.9.

Для исследования распределения параметра Р в разных популяциях болидов, нами использованы данные болидов Европейской и Прерийной сетей. При этом для каждой группы популяции метеоров вычислены параметры Р. Результаты расчёта параметра Р для каждой группы популяции метеороидов представлены в виде распределения на рисунке 2.16.



**Рисунок 2.16. - Распределение параметра Р для болидов разных популяций**

Если параметр Р в случае телевизионных метеоров расположен по всему диапазону гистограммы распределения значений Р, то параметр Р популяции болидов ограничен в основном в интервале 0.3-1.0. Максимальное число значений параметра Р для ТВ-метеоров находится в интервале 0.4-0.5, а у болидов максимум значения параметра Р смещён в правую сторону и расположен в диапазоне 0.7-0.8.

Из рисунка 2.16 следует, что распределение метеороидов по параметру Р для всех болидных популяций имеет несимметричную форму. Основное

количество значений параметра  $P$  в распределении астероидной группы (A') приходится на интервал 0.5-0.9. Диапазон значений параметра  $P$  в группе A (синие линии) относительно других групп находится в широком диапазоне 0.4-1.0.

Наибольшее максимальное число значений параметра  $P$  болидов в астероидной группе приходится на диапазон 0.6-0.8. Группа C1 имеет широкий максимум (почти как полочка), расположенный в интервале 0.5-0.8. Наиболее чёткий максимум в гистограмме распределения параметра  $P$  наблюдается у популяций групп C2 и D, где значение  $P$  сосредоточено в интервале 0.7-0.8.

## **2.16. Определение высот начала, максимума и конца следа метеороидов на основе данных комбинированных радиолокационных и телевизионных наблюдений**

Высота метеоров – одна из важнейших характеристик наблюдений каждого метеора. Данные о высоте метеоров важны для изучения механики абляции метеорных тел в атмосфере и необходимы для изучения природы и свойств метеорных тел. Высоты метеоров были рассчитаны по результатам базисных визуально-телескопических [129], фотографических [60, 64], с телевизионной камерой [68], болидной камерой Fireball Network [61-62] и многостанционных радиолокационных наблюдений [71]. Тем не менее, вопрос измерения высоты одновременно наблюдаемых метеороидов на основе результатов комбинированных радиолокационных и телевизионных наблюдений, остаётся открытым.

В метеорной астрономии известны нескольких методов измерения высоты отдельных метеоров. Для измерения высоты метеора с помощью оптического метода необходимо организовать и провести наблюдения, по крайней мере, с двух станций, расположенных в десятках километрах друг от друга. Зная расстояние между станциями, высоту каждой точки на метеорном следе рассчитывают по известной методике. В случае радиолокационных наблюдений метеоров известны следующие методы измерения сферических

координат и высот отражения метеора: амплитудный, фазовый, дальномерный и другие.

Комбинированный метод измерения высоты метеора основан на результатах одновременных радиолокационно-оптических наблюдений метеоров. Некоторые исследователи высоты метеоров определяли одновременно как оптическими, так и радиолокационными наблюдениями, независимыми друг от друга. Причём высоты метеоров оптическим методом определялись по результатам базисных наблюдений, а высоты метеоров - радиометодом по данным интерферометра.

В настоящей работе представлены результаты измерения высоты на основе данных комбинированных радиолокационных и телевизионных наблюдений метеоров в период действия главных ежегодных метеорных потоков, включая Квадрантиды, Каприкорниды,  $\delta$ -Аквариды, Персеиды, Геминиды и Ориониды, в ГисАО Института астрофизики НАНТ в 1978-1980 гг. [79, 151]. Для этого мы использовали фотографические изображения, записанные на плёнку телевизионными камерами, чтобы отождествить метеорный след на звёздной карте, а затем определить экваториальные координаты начала ( $\alpha_b$  и  $\delta_b$ ) и конца ( $\alpha_e$  и  $\delta_e$ ) каждого метеорного следа. Экваториальные координаты начала и конца метеорного следа были преобразованы в горизонтальные координаты  $A_b, Z_b$  и  $A_e, Z_e$ .

Используя сферические координаты, полученные из наблюдений телевизионной камерой, и точные значения расстояний, рассчитанные по данным радиолокационных наблюдений с использованием метода, описанного в [71], мы рассчитали высоты начала, максимума и конца каждого метеорного следа. Результаты определения высоты начала, максимума и конца следа каждого индивидуального метеора и принадлежность к метеорным потокам приведены в таблице 2.16, где  $N$  - номер метеора,  $H_b, H_m$  и  $H_e$  – высоты начала, максимума и конца следа.

**Таблица 2.16. - Высоты появления, максимума и конца следа метеоров по результатам комбинированных радиотелевизионных наблюдений**

N	Z <sub>R</sub>	V, км/с	H <sub>н</sub> , км	H <sub>м</sub> , км	H <sub>к</sub> , км
1	2	3	4	5	6
август 1978 г.					
1	54.05	56.7	108.0	101.5	96.0
2	57.02	36.46	101.3	92.5	89.3
3	34.31	59.99	115.7	103.0	98.0
4	-	-	-	101.0	96.0
январь 1979 г.					
5	69.3	43.89	-	102.0	92.0
6	67.0	40.84	102.7	99.3	97.5
7	55.3	57.9	107.5	103.0	100.5
8	61.95	46.18	107.0	99.5	95.0
9	54.91	40.1	96.0	91.0	88.5
10	59.35	21.94	92.0	85.0	80.7
11	44.11	41.40	101.0	96.8	95.0
12	27.09	29.06	104.0	90.0	86.0
июнь 1979 г.					
13	62.3	39.20	97.5	95.35	93.7
14	49.89	29.92	97.0	92.5	90.0
15	64.57	43.39	101.0	92.0	90.0
16	59.50	41.75	99.0	91.7	90.0
17	78.82	41.75	93.5	90.0	88.0
18	61.18	40.59	-	93.5	91.0
19	57.36	40.24	103.0	92.0	88.0
20	43.52	30.75	95.0	91.7	88.5
21	60.74	47.65	103.6	98.0	96.2
22	53.0	44.97	99.0	93.0	91.5
23	51.09	42.9	101.0	94.0	90.4
24	57.99	40.84	101.0	99.0	96.0
25	52.92	41.41	99.8	94.8	92.0
26	58.78	37.5	102.6	99.0	98.0
27	43.65	31.0	106.0	-	-

Продолжение таблицы 2.16.

1	2	3	4	5	6
28	46.52	22.64	97.3	87.0	83.0
29	53.28	43.94	97.8	94.25	91.0
30	48.18	14.26	102.0	-	-
октябрь 1979 г.					
31	62.63	69.36	116.6	111.0	108.2
32	47.3	60.9	107.0	104.0	101.5
33	64.82	60.85	114.3	109.0	106.0
34	43.01	62.24	114.0	109.5	106.0
декабрь 1979 г.					
35	52.46	38.46	95.0	92.3	90.0
36	37.99	38.02	103.0	85.0	79.0
37	31.95	40.90	93.0	80.0	73.0
август 1980 г.					
38	60.31	58.84	116.0	98.0	91.0
39	50.11	55.54	111.2	107.0	104.9
40	51.30	57.84	110.2	106.5	104.0
41	41.14	59.89	109.4	106.0	103.2
42	40.35	60.85	112.0	107.5	104.5
43	42.12	55.66	110.9	104.0	101.0
44	38.70	63.55	113.5	94.0	89.5
45	-	65.83	115.5	97.0	88.0
46	38.07	63.86	109.0	105.0	102.7
47	35.52	58.14	109.1	105.4	103.3
48	34.55	62.2	111.2	105.8	102.4
49	32.98	65.73	107.4	102.5	99.0
50	33.31	62.31	106.0	98.0	96.0
51	-	59.8	113.8	107.5	101.6
52	44.91	60.54	108.0	104.0	101.0
53	-	60.40	110.0	105.0	100.4
54	-	62.7	119.6	85.0	74.9
55	45.44	55.04	107.6	105.2	103.0
56	-	61.0	110.7	105.7	102.0
57	33.45	58.83	110.0	106.0	102.8

Согласно полученным нами данным, высота появления метеоров Персеид находится в диапазоне 107-119,6 км, для С.  $\delta$ -Акварид – 95-106 км, для Квадрантид – 96-107 км, для Орионид в диапазоне 107-116,6 км и для Геминид в диапазоне 95-103 км. Более того, увеличение яркости метеора значительно увеличивает высоту появления метеора.

Данные о средней высоте начала, максимума и конца метеорного следа для метеорных потоков приведены в таблице 2.17 и в приложении 1. Согласно данным таблицы 2.16, средняя наблюдаемая высота максимальной светимости метеоров у Персеид составляет  $102,53 \pm 1,15$  км, у Ю.  $\delta$ -Акварид –  $94,96 \pm 0,76$  км, у Квадрантид –  $97,27 \pm 2,35$  км, у Геминид –  $86,15 \pm 6,15$  км и у Орионид –  $110,25 \pm 0,75$  км. Также из таблицы 2.17 можно сделать заключение, что средние высоты метеорных потоков, полученные комбинированным радиотелевизионным методом, подтверждают общую тенденцию увеличения высоты метеора с увеличением скорости.

**Таблица 2.17. - Средние высоты метеорных потоков, полученные комбинированным радиотелевизионным методом**

№	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	$111,28 \pm 0,72$	$102,53 \pm 1,15$	$103,75 \pm 0,6$	$98,47 \pm 1,55$
2	С. $\delta$ -Аквариды	$100,23 \pm 0,57$	$94,96 \pm 0,76$	$95,12 \pm 0,97$	$92,71 \pm 0,82$
3	Квадрантиды	$99,9 \pm 1,74$	$97,27 \pm 2,35$	$97,08 \pm 1,95$	$93,25 \pm 1,94$
4	Геминиды	$94,0 \pm 1,0$	$86,15 \pm 6,15$	$89,2 \pm 2,2$	$81,5 \pm 8,5$
5	Ориониды	$115,3 \pm 1,3$	$110,25 \pm 0,75$	$109,0 \pm 1,5$	$107,1 \pm 1,1$

Таким образом, на основе результатов комбинированных радиолокационных и телевизионных наблюдений метеоров в ГисАО, мы рассчитали высоты начала, максимума и конца каждого метеорного следа, которые хорошо согласуются с результатами базисных телевизионных и видеонаблюдений метеоров.

## **2.17. Определение масс и плотностей метеорных тел по радиолокационным наблюдениям с одного пункта**

Для решения ряда вопросов метеорной физики, включая определение масс и плотностей метеороидов, определение индекса массы и плотности падающего потока метеороидов на Земле и т.д., необходимо знание месторасположения высоты зеркальной точки относительно высоты максимума ионизации. Однако радионаблюдения в основном проводятся с одного пункта. В связи с этим возникает вопрос - можно ли использовать радиоданные, полученные с одного пункта, для определения массы и плотности метеороидов?

Попытки определения масс и плотностей метеороидов по результатам радионаблюдений с одного пункта предпринимались в работах Р. Ш. Бибарсова и Р. П. Чеботарева [34, 35], Гартмана и Чеботарева [36]. При этом они считали, что высота отражающей точки совпадает с высотой точки максимальной ионизации, и использовали формулы простой физической теории метеоров, не учитывая влияние дробления. А разработанная теория дробления метеорных тел в атмосфере Земли [7, 43, 58, 204, 206] неприменима для редукции результатов радионаблюдений метеоров из одного пункта.

Для исследования месторасположения зеркальной точки на следе метеора относительно точки максимума ионизации использован наблюдательный материал, полученный с 4-х и 5-ти пунктов в ГисАО в период 1976-1979 гг. Были отобраны 1100 метеоров, длительность радиоэхо от которых находилась в интервале 0.1-10 с. По формуле (2.13) вычисляли линейную электронную плотность в 4-х и 5- точках и строили наблюдаемые отрезки кривой ионизации для каждого метеора.

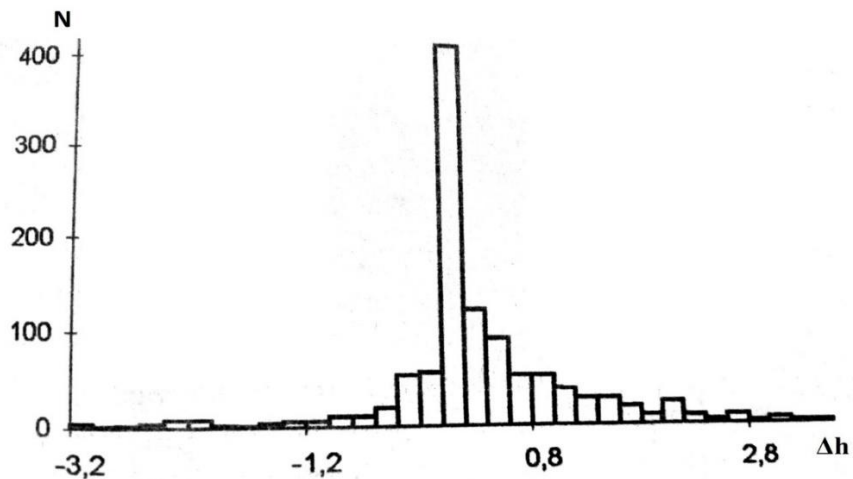
Зная высоты этих точек, строили наблюдаемые отрезки ионизационных кривых метеоров. По этим отрезкам определяли высоту точки максимальной ионизации и вычисляли разности высот  $\Delta h = h_m - h_1$ , где  $h_1$  высота зеркального отражения центрального пункта на следе метеора. Распределение разности высот показано на рисунке 2.21.

Как видим, из этого рисунка, точка зеркального отражения находится в среднем на 0.4 км ниже точки максимальной ионизации. Среднее значение  $\Delta h = 0.4 \pm 0.8$  км, а среднее значение отношения линейной электронной плотности в точке максимума и в зеркальной точке составляет  $q_m / q = 1.08$  км. Это позволяет в качестве исходных данных выражений для определения массы и плотности метеорных тел использовать формулы, полученные для точки максимальной ионизации:

$$M_m = 9/4 \cdot \mu_{m_n} \cdot H \cdot \alpha_m / \beta \cos z_R \cdot (Q - Q_H / Q - 3/2 Q_H), \quad (2.32')$$

$$\delta = (\lambda' A H V_o^2 \rho_m / 2(Q - 2/3 Q_H) \cdot M_m^{1/3} \cos z_R)^{3/2},$$

где  $\mu_{m_n}$  – средняя атомная масса метеорного вещества в г,  $H$  – высота однородной атмосферы,  $\beta$  - коэффициент ионизации,  $z_R$  – зенитное расстояние радианта,  $Q$  – энергия, необходимая для нагревания и испарения 1 г метеорного вещества,  $Q_H$  – энергия, необходимая для нагревания 1 г метеорного вещества до температуры испарения,  $\lambda'$  – коэффициент теплопередачи,  $\rho_m$  - плотность атмосферы на высоте  $H$  и  $\rho_m$  брались из таблиц стандартной атмосферы.



**Рисунок 2.21. - Распределение разности высот максимума ионизации и высот центрального пункта**

Эти формулы не учитывают факторы, влияющие на форму кривой ионизации. Но можно внести поправочный коэффициент, который бы учитывал влияние этих факторов. Такой коэффициент можно получить из наблюдаемых кривых ионизации, так как в них запечатлены влияния всех факторов. Поэтому

используя отрезки кривых ионизации, имеющих область максимума ионизации с восходящими и нисходящими частями и экстраполировав нисходящие и восходящие части отрезков до нулевого значения линейной электронной плотности и проинтегрировав вдоль кривой ионизации, можно получить истинную массу метеороида формуле (2.32).

Средние значения масс, вычисленных первым и вторым способами, составляют соответственно  $M_m = (76 \pm 3.5) \cdot 10^{-3}$  г,  $M_0 = (29 \pm 8) \cdot 10^{-3}$  г. Масса, вычисленная первым способом -  $M_0$  в  $1.5 \div 9$  раз меньше массы, вычисленной вторым способом  $M_m$ . Среднее значение отношения масс для всех метеоров составляет 3. Это отношение можно использовать как поправочный коэффициент, и если его ввести в формулу (2.32') мы тем самым будем учитывать приближённо влияние дробления и других факторов на форму кривой ионизации при определении массы метеороида по результатам наблюдений с одного пункта.

С учётом поправочного коэффициента, из уравнения (2.32') получаем следующую формулу для определения массы метеороидов по результатам наблюдений с одного пункта:

$$M_m = 3/4 \cdot \mu m_n \cdot H \cdot \alpha_m / \beta \cos z_R \cdot (Q - Q_n / Q - 3/2 Q_n). \quad (2.33)$$

Поскольку масса, вычисленная по формуле (2.33), учитывает дробление, то тем самым мы косвенным образом учитываем влияние дробления и при определении плотности метеорных тел, что приводит к увеличению плотности в среднем в 1.72 раза. Назовём это первым поправочным коэффициентом ( $f_1$ ). Другим параметром, учитываемым в формуле (2.33), является плотность атмосферы на высоте максимума ионизации. Поскольку высота максимума ионизации в среднем на 1.5 больше теоретической, а с другой стороны, наблюдаемые точки зеркального отражения лежат ниже точки максимума ионизации на 0.4 км. В результате точки зеркального отражения лежат ниже теоретического максимума кривой ионизации недробящегося метеорного тела в среднем на 1.1 км. На определение масс это не влияет, но плотность тела, если

наблюдаемую точку зеркального отражения принять за точку максимума теоретической ионизационной кривой, оказывается заниженной в 1.31 раза. С учетом возможных поправок, формула для определения плотности метеорного тела примет следующий вид:

$$\delta = f_1 f_2 [A H V \sigma^2 \lambda \rho_m / 2(Q - 2 / 3Q_H) M \sigma^{1/3} \cos Z r]^{3/2}. \quad (2.34)$$

Среднее значение произведения  $f_1 f_2$  равно 2.3.

### **ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТЕОРОИДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМБИНИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Изучение физических свойств метеороидов, то есть определений их масс, плотностей и структур, являются важными проблемами в физике метеорных явлений. Данные о физических характеристиках метеороидов имеют большое значение для изучения их свойств, происхождения и эволюции, а также предоставляют информацию о природе их родительских тел - комет и астероидов. В настоящее время один из самых информативных и относительно дешёвых способов получения информации о физических свойствах метеороидов основан на данных, полученных по результатам радиолокационных наблюдений. Без правильной интерпретации и точного определения значений физических характеристик метеороидов невозможно решить такие важные проблемы метеорной астрономии, как определение параметра распределения метеороидов по массам  $S$ , оценка притока вещества метеора и плотности падающего потока на Землю, исследование структуры, возраста и происхождения метеорных тел и т.д. Однако измерения радиолокационного эха в основном выполняются из одной точки, и полученные данные, как правило, принадлежат одной отражающей точке на следе метеора. Чтобы проверить достоверность результатов, повысить точность и надёжность радиолокационных наблюдений, они должны быть калиброваны с использованием оптических данных того же метеора, которые имеют относительно высокую точность. Оптические методы позволяют определить кривые блеска метеора, а базисные радиолокационные наблюдения метеоров позволяют измерить: расстояние, длительность радиоэха, амплитудно-временные характеристики, фазу отражённых сигналов и другие параметры метеорного следа и атмосферы. Наблюдаемые кривые блеска и ионизации одних и тех же метеоров являются основным источником для изучения физических характеристик метеороидов.

### 3.1. Определение масс метеорных тел по кривым блеска метеоров

Кривая блеска является носителем информации как о кинематических, так и физических свойствах метеора. В ней содержится информация не только о процессах, сопровождающих полёт метеороида в Земной атмосфере, но и наличие кривой блеска метеора позволяет определить истинную массу метеорного тела  $M_\phi$  путём интегрирования интенсивности свечения вдоль следа по формуле:

$$M = \int_{\rho_H}^{\rho_K} \frac{I_\phi}{\tau_\phi V \cos Z} dh, \quad (3.1)$$

где  $\rho_K$  – плотность атмосферы на высоте исчезновения метеора,  $\rho_H$  – плотность атмосферы на высоты появления метеора,  $I_\phi$  – фотографическая интенсивность силы света метеора в данной точке следа,  $\tau_\phi$  – коэффициент свечения,  $V$  – скорость метеора.

Массу метеороида также можно вычислить по величине интенсивности свечения на высоте максимальной яркости по формуле:

$$m_\phi = 9 H I_m / 2 \tau_\phi V^3 \cos Z,$$

где  $I_m$  – интенсивность силы света на высоте максимума свечения. Эта формула справедлива, когда основным механизмом абляции метеороида является испарение. Формула не учитывает влияния таких процессов, как дробление, вращение и т.д. на формирование кривой блеска метеора. Переход от абсолютной звёздной величины  $M$  к интенсивности свечения  $I_\phi$  осуществлялся по известной формуле:

$$M = 24.3 - 2.5 \lg I_\phi \quad (3.2)$$

Коэффициент свечения вычислялся по формулам [7]:

$$\begin{aligned} \tau_\phi &= 3.25 \cdot 10^{-19} V && \text{при } 10 \text{ км/с} \leq V \leq 17 \text{ км/с,} \\ \tau_\phi &= -9.6 \cdot 10^{-7} / V && \text{при } V > 17 \text{ км/с.} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Вычисленные массы метеороидов по кривым свечениям оказались в 3 раза меньше, чем массы, вычисленные по величине интенсивности свечения на высоте максимума свечения. По аналогии в [99, 101] нами введён

среднестатистический поправочный коэффициент, который учитывает влияние всех факторов на формирование формы кривых свечения метеора. С учётом этого, формула расчёта фотометрической массы метеороида примет вид:

$$m_{\phi} = 3H I_m / 2\tau_{\phi} V^3 \cos Z, \quad (3.4)$$

Результаты расчёта масс по  $m_m$  также приведены в таблице 3.1.

**Таблица 3.1. - Результаты параллельных радиолокационных и телевизионных наблюдений метеоров в Таджикистане**

N	Z <sub>R</sub>	V, км/с	H <sub>н</sub> , км	H <sub>м</sub> , км	H <sub>к</sub> , км	M <sub>м</sub>	m <sub>φ</sub> · 10 <sup>3</sup> , г	m <sub>м</sub> · 10 <sup>3</sup> , г
1	2	3	4	5	6	7	8	9
август 1978 г.								
1	54.05	56.7	108.0	101.5	96.0	0.7	27.4	26.6
2	57.02	36.46	101.3	92.5	89.3	1.1	57.4	46.9
3	34.31	59.99	115.7	103.0	98.0	-0.3	84.6	41.6
4	-	-	-	101.0	96.0	-0.9	-	-
январь 1979 г.								
5	69.3	43.89	-	102.0	92.0	-1.7	-	547.1
6	67.0	40.84	102.7	99.3	97.5	1.63	19.4	32.1
7	55.3	57.9	107.5	103.0	100.5	1.8	11.4	8.5
8	61.95	46.18	107.0	99.5	95.0	0.0	153.4	94.0
9	54.91	40.1	96.0	91.0	88.5	2.5	10.8	10.0
10	59.35	21.94	92.0	85.0	80.7	0.05	595.0	316.3
11	44.11	41.40	101.0	96.8	95.0	1.6	17.6	17.4
12	27.09	29.06	104.0	90.0	86.0	-1.6	1170.8	545.1
июнь 1979 г.								
13	62.3	39.20	97.5	95.35	93.7	2.2	17.2	17.2
14	49.89	29.92	97.0	92.5	90.0	2.16	21.6	22.9
15	64.57	43.39	101.0	92.0	90.0	0.5	154.2	70.8
16	59.50	41.75	99.0	91.7	90.0	1.9	9.6	18.3
17	78.82	41.75	93.5	90.0	88.0	1.6	62.4	62.7
18	61.18	40.59	-	93.5	91.0	1.6	-	27.0
1	2	3	4	5	6	7	8	9
19	57.36	40.24	103.0	92.0	88.0	0.2	161.4	88.5
20	43.52	30.75	95.0	91.7	88.5	1.7	28.4	28.4
21	60.74	47.65	103.6	98.0	96.2	1.8	22.0	15.9
22	53.0	44.97	99.0	93.0	91.5	1.5	25.8	17.7
23	51.09	42.9	101.0	94.0	90.4	1.03	18.4	30.7

Продолжение таблицы 3.1

24	57.99	40.84	101.0	99.0	96.0	2.5	11.6	10.5
25	52.92	41.41	99.8	94.8	92.0	1.0	51.8	36.0
26	58.78	37.5	102.6	99.0	98.0	2.5	10.2	12.8
27	43.65	31.0	106.0	-	-	-	-	22.2
28	46.52	22.64	97.3	87.0	83.0	0.0	287.2	265.4
29	53.28	43.94	97.8	94.25	91.0	1.26	27.8	22.2
30	48.18	14.26	102.0	-	-	> -1	-	>3067
октябрь 1979 г.								
31	62.63	69.36	116.6	111.0	108.2	-0.2	85.2	50.3
32	47.3	60.9	107.0	104.0	101.5	1.1	12.0	13.5
33	64.82	60.85	114.3	109.0	106.0	-	-	-
34	43.01	62.24	114.0	109.5	106.0	- 0.25	23.4	41.7
35	52.46	38.46	95.0	92.3	90.0	-1.7	223.2	498.5
36	37.99	38.02	103.0	85.0	79.0	-0.2	217.8	98.0
37	31.95	40.90	93.0	80.0	73.0	1.5	23.0	16.6
август 1980 г.								
38	60.31	58.84	116.0	98.0	91.0	-0.22	73.6	66.7
39	50.11	55.54	111.2	107.0	104.9	1.65	9.6	10.2
40	51.30	57.84	110.2	106.5	104.0	2.15	6.0	5.5
41	41.14	59.89	109.4	106.0	103.2	0.11	25.8	30.7
42	40.35	60.85	112.0	107.5	104.5	1.0	11.8	12.0
43	42.12	55.66	110.9	104.0	101.0	1.5	12.4	10.1
44	38.70	63.55	113.5	94.0	89.5	-2.15	555.0	213.7
45	-	65.83	115.5	97.0	88.0	-1.6	-	-
46	38.07	63.86	109.0	105.0	102.7	1.4	9.4	7.8
47	35.52	58.14	109.1	105.4	103.3	1.4	8.6	8.5
48	34.55	62.2	111.2	105.8	102.4	0.8	18.6	14.6
49	32.98	65.73	107.4	102.5	99.0	1.45	7.6	6.3
50	33.31	62.31	106.0	98.0	96.0	0.6	30.8	15.6
51	-	59.8	113.8	107.5	101.6	- 0.5	-	-
52	44.91	60.54	108.0	104.0	101.0	1.05	17.6	13.8
53	-	60.40	110.0	105.0	100.4	0.1	-	-
54	-	62.7	119.6	85.0	74.9	-3.2	-	-
55	45.44	55.04	107.6	105.2	103.0	1.24	10.2	12.1
56	-	61.0	110.7	105.7	102.0	1.23	-	-
57	33.45	58.83	110.0	106.0	102.8	0.40	24.0	22.3

Результаты расчёта массы по формулам (3.1) и (3.4) находятся в интервале  $5 \cdot 10^{-3}$  -  $5 \cdot 10^0$  г с максимумом в районе  $10^{-2}$  г.

### **3.2. О массе параллельных радиооптических слабых метеоров по величине интенсивности свечения и ионизации на высоте зеркальной точки**

Всем известно, какую важность представляют данные о массах метеороидов. Необходимо отметить, что без правильной и надёжной редукции значений масс метеороидов невозможно решение таких важных задач метеорной астрономии, как определение параметра распределения метеорных тел по массам  $S$ , оценка притока метеорного вещества и плотности падающего потока на Землю, изучение структуры, возраста и происхождения метеорных тел и т.д. Данные о массе метеороидов представляют также интерес в таких отраслях науки, как геофизика, радиофизика, космонавтика, космогония Солнечной системы, в решении ряда теоретических и прикладных задач и т.д. Для решения этих вопросов особую ценность представляют результаты радиолокационных наблюдений метеоров, получаемые круглосуточно и независимо от погодных условий. Однако для исследования параметра распределения метеорных тел по массам, изучения притока метеорного вещества на Землю и оценки плотности падающего потока в основном используют результаты круглосуточных радиолокационных наблюдений метеоров с одного пункта. Полученные при этом данные, как правило, относятся к одной зеркальной точке индивидуального метеора.

Обычно для решения вышеизложенных задач допускается, что высота зеркальной точки совпадает с высотой максимума ионизации и, исходя из этого, вычисляется масса метеороида по результатам радионаблюдений метеоров, полученных с одного пункта. Для убеждения в достоверности полученных результатов, повышения точности и надёжности измерения данных радионаблюдений, получаемых с одного пункта, необходимо их калибровать с оптическими результатами, которые имеют относительно высокую точность. Такая калибровка осуществляется путём определения шкалы масс (зависимость коэффициента ионизации от скорости) радиометеоров относительно шкалы масс (скоростная зависимость коэффициента свечения) фотографических метеоров. Вычисление фотометрической и радиолокационной массы по

интенсивности свечения и ионизации для зеркальной точки и сопоставление этих данных с массами, вычисленными путём интегрирования кривой свечения метеора, является целью данного параграфа.

Для этого вначале вкратце остановимся на результатах определения шкалы масс метеоров по результатам комбинированных наблюдений. Первая работа определения шкалы масс принадлежит J.G. Davies и др. [10], где авторы на основе данных 7 фото-радиолокационных метеоров, средняя скорость которых составляла 32 км/с, вычислили коэффициент ионизации. Несколько позже П. Б. Бабаджанов, используя данные параллельных фото- и радиолокационных наблюдений метеоров в ГисАО [11] и данные совместных фото- и радиолокационных наблюдений метеоров в Джодрелл-Бэнк, для двух групп метеоров по скоростям: 1)  $V = 32$  км/с; 2)  $V = 64$  км/с, вычислил коэффициент ионизации. Однако коэффициент ионизации для интервала скоростей 11-30 км/с на основе данных параллельных оптических и радиолокационных наблюдений не был исследован.

Учитывая это обстоятельство, несколько позже в [79] на базе данных комбинированных фото- и радиолокационных и радио- и телевизионных наблюдений для метеоров слабее  $0^m$  вычислен коэффициент ионизации для широкого диапазона метеорных скоростей. Полученные результаты удовлетворительно согласовались со второй моделью, рассчитанной В. С. Тохтасьевым [198].

Первая попытка определения масс одних и тех же метеоров по данным одновременных оптических и радиолокационных наблюдений впервые была выполнена докторантом в [177]. При этом для расчёта фотометрической и радиолокационной массы метеоров из данных, опубликованных в работах, использованы только те метеоры, у которых высоты максимума ионизации совпали или были расположены близко к высоте максимума блеска метеоров. Спустя несколько лет в работе [97] расчёт фотометрической и ионизационной масс метеороидов осуществлялся с использованием различных шкал масс. Причём фотометрическая масса  $m_{ph}$  определялась: а) путём интегрирования

кривой свечения и б) по величине интенсивности свечения на высоте максимальной яркости  $m_{ph}$ , а радиолокационная масса  $m_r$  - по величине максимальной линейной электронной плотности с использованием шкалы масс, полученной в [74], и принятой ранее на Обнинском совещании. Показано, что наилучшая согласованность между массами  $m_{ph}$  и  $m_r$  наблюдается при использовании шкалы масс  $\beta \sim f(v)$ , полученной автором в [79, 177]. При этом было обнаружено, что при переходе к метеорам ярче  $0^m$  различия между фотографическими и радиолокационными массами увеличиваются.

Спустя 9 лет М. D. Campbell-Brown и др. [138] на основе данных одновременных наблюдений метеоров с EISCAT UHF-системой с узким полем зрения и двух станций видеонаблюдений с гибридными камерами (снабжёнными усилителями яркости) зафиксированы четыре совместных метеора, зарегистрированных на всех трёх радиолокационных приёмниках и двух видеокамерах. Эти данные позволяли для каждого метеора вычислить их фотометрические и радиолокационные массы с использованием нескольких значений коэффициента свечения и ионизации. Показано, что у всех совместных метеоров фотометрическая и радиолокационная массы совпадают с точностью до предполагаемой ошибки в методах наблюдений и погрешности определения коэффициентов свечения и ионизации.

Таким образом, масса одного и того же метеора в области яркости от  $+0^m$  до  $+8^m$  по результатам одновременных оптических и радиолокационных измерений интенсивности свечения и величины линейной электронной плотности изучена недостаточно.

В работе [79] 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:

$$m_{\phi} = 3N I_m / 2\tau_{\phi} V^3 \cos Z, \quad (3.5)$$

$$m_r = 3H \mu m_H q_m / 4\beta \cos Z, \quad (3.6)$$

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  $\mu m_H = 3.82 \cdot 10^{-23}$  г. Таким образом, точность вычисления и степень согласия между фотографической и радиолокационной массами зависят от достоверности и надёжности определения коэффициентов свечения и ионизации и их зависимости от скорости. Подробный обзор методов исследования зависимости  $\tau_\phi$  от  $V$  и  $\beta$  от  $V$  приведён в монографиях [7, 79]. Следует отметить, что результаты лабораторного исследования зависимости коэффициента свечения от скорости [168-173] и данные, полученные по искусственным метеорам [Ауэр и др.], как по абсолютной величине, так и по форме, хорошо согласуются с моделью В (экстремальная зависимость  $\tau_\phi$  от  $V$ ), вычисленной теоретически Е. И. Орík [81, 82] для слабых метеоров. Однако зависимость коэффициента ионизации  $\beta$  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  $\beta$  при использовании данных параллельных наблюдений определяется выражением:

$$\beta = \tau_\phi q V^3 \mu m_H / 2 I_\phi. \quad (3.7)$$

Принимая среднюю массу атомов метеорного вещества равной  $\mu m_H = 3.82 \cdot 10^{-23}$  г, используя численные значения  $I_\phi/q$ , найденные на основании результатов параллельных радиооптических наблюдений, и вычисляя  $\tau_\phi$  согласно [7] по формулам (3.3) мы определили  $\beta$  при различных значениях скорости (таблица 3.2). Найденные нами численные значения  $\beta$  для скоростей от 20 до 60 км/с близки ко второй модели В. С. Тохтасьева [198], а для скорости  $V = 40$  км/с хорошо согласуются с результатами, полученными в работе [7].

**Таблица 3.2. - Зависимость коэффициента ионизации  $\beta$  от скорости  $V$  по данным параллельных радиооптических наблюдений**

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

Для вычисления масс одних и тех же метеороидов двумя способами мы использовали результаты параллельных радиотелевизионных наблюдений метеоров в Таджикистане (ГисАО) и США (Гарварде) [10, 29, 175].

Для вычисления фотометрической и радиолокационной масс одних и тех же метеоров по величинам интенсивности свечения и значениям линейной электронной плотности зеркально-отражающей точки следа метеоров и сопоставления полученных результатов между собой нами использованы результаты совместных теле- и радиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане и США. При этом, зная значение высоты зеркальной точки, измеренной радиометодом, на соответствующей кривой свечения того же оптического метеора снимали значение звёздной величины. Пересчёт от звёздной величины к интенсивности свечения осуществлялся по известной формуле (3.3).

Значение линейной электронной плотности для зеркальной точки того же метеора в работе [29] было вычислено по измеренной величине амплитуды радиоотражения, а в работе [79] - по измеренной длительности радиоэха.

Расчёт массы произведён по формулам (3.5), (3.6). Общее количество метеоров слабее  $+0^m$  по двум источникам радио- и телевизионных наблюдений оказалось 59. Исходные параметры, необходимые для расчёта масс по соответствующим источникам, приведены в таблице 3.3, где  $N$  – номер метеора.

Для расчёта коэффициента свечения использованы выражения (3.3).

Коэффициенты ионизации брались по результатам, приведённым в таблице 3.2. Коэффициенты были получены по данным радиооптических наблюдений.

При расчётах масс метеороида по формулам (3.2) и (3.3) в качестве среднего значения массы атомов метеорного вещества принимается величина  $\mu m_H = 3.82 \cdot 10^{-23}$  г. Таким образом, точность вычисления и степень согласия между фотометрической и радиолокационной массами зависит от достоверности и надёжности определения значений коэффициентов свечения и ионизации и их зависимости от скорости метеоров. Результаты расчета фотометрических и радиолокационных масс метеоров по значениям интенсивности свечения и линейной электронной плотности для высоты зеркальной точки приведены в таблице 3.3. Также в таблице 3.3 приведены данные о массах, вычисленных путём интегрирования по кривым свечения для соответствующих метеоров по работе [79].

**Таблица 3.3. - Фотометрические и радиолокационные массы метеороидов по результатам комбинированных оптико-радиолокационных наблюдений**

№	$\cos Z_r$	V, км/с	$H_{от}$ , км	$M_{от}$	$\lg q_{от}$	$m_{ph} \cdot 10^3$ , г	$m_r \cdot 10^3$ , г	$m_{ph1} \cdot 10^3$ , г	Источник
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.5871	56.70	104.4	1.50	13.70	12.48	10.48	27.4	[79]
2	0.5443	36.50	92.0	1.10	13.60	46.94	62.86	57.4	--"--
6	0.3907	40.80	99.0	1.63	13.16	32.12	15.90	19.4	--"--
7	0.5693	57.90	102.3	1.90	13.67	8.54	7.06	11.4	--"--
8	0.4702	46.20	105.0	1.10	13.98	33.91	53.71	153.4	--"--
9	0.5749	40.10	92.0	2.50	13.98	10.14	71.39	10.8	--"--
10	0.5098	21.90	86.0	0.20	13.07	318.93	495.22	595.0	--"--
11	0.7180	41.40	96.3	1.60	13.60	17.45	23.83	17.6	--"--
13	0.4648	39.20	95.1	2.20	13.56	17.30	33.57	17.2	--"--
14	0.6443	29.90	92.3	2.16	13.11	22.26	42.97	21.6	--"--
15	0.4294	43.40	92.0	0.50	13.77	73.13	39.29	154.2	--"--
16	0.5075	41.80	91.6	1.90	12.60	18.37	3.00	9.6	--"--
17	0.1939	41.80	93.0	1.70	13.44	57.82	54.26	62.4	--"--

**Продолжение таблицы 3.3.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18	0.4821	40.60	92.6	1.80	13.30	22.48	17.79	-	--”--
19	0.5394	40.20	92.0	0.20	13.97	89.46	74.36	161.4	--”--
20	0.7251	30.80	90.9	1.80	13.28	25.97	56.46	28.4	-- “--
21	0.4888	47.70	102.2	2.20	13.49	11.11	13.59	22.0	--”--
22	0.6018	44.97	93.5	1.60	13.50	17.65	13.90	25.8	--”--
23	0.6281	42.90	92.7	1.20	13.45	26.86	14.02	18.4	--”--
24	0.5301	40.80	98.9	2.50	12.88	10.63	6.15	11.6	--”--
25	0.6029	41.40	94.2	1.00	13.83	36.12	48.19	51.8	--”--
26	0.5183	37.50	98.5	2.50	12.84	12.86	7.65	10.2	--”--
27	0.7236	31.00	88.0	-	13.11	-	38.26	-	--”--
28	0.6881	22.60	86.5	0.0	13.73	266.75	1341.6	287.2	--”--
29	0.5979	43.90	95.0	1.40	13.70	22.41	24.02	27.8	--”--
32	0.6782	60.90	102.4	1.50	13.55	9.36	4.50	12.0	--”--
33	0.4255	60.90	106.4	-	14.36	-	46.28	-	--”--
34	0.7312	62.20	107.5	0.80	14.20	15.86	18.18	23.4	--”--
36	0.7881	38.00	84.2	0.0	13.34	82.38	12.56	217.8	--”--
37	0.8485	40.90	87.0	2.05	12.33	9.99	1.08	23.0	--”--
38	0.4953	52.90	106.6	0.22	14.50	55.23	91.46	73.6	--”--
39	0.6413	55.50	106.1	2.05	13.92	7.18	15.93	9.6	--”--
40	0.6252	57.80	105.8	2.28	13.88	5.50	11.59	6.0	--”--
41	0.7531	59.90	104.1	1.00	13.76	13.81	6.57	25.8	--”--
42	0.7621	60.90	106.7	1.10	14.04	12.04	12.37	11.8	--”--
43	0.7417	55.70	102.5	2.00	13.64	6.46	7.23	12.4	--”--
46	0.7873	63.90	102.7	1.82	13.62	5.46	4.14	9.4	--”--
47	0.8139	58.10	106.2	1.50	13.99	8.57	11.47	8.6	--”--
48	0.8236	62.20	106.0	0.80	14.20	14.08	15.75	18.6	--”--
49	0.8389	65.70	101.1	1.53	14.09	6.33	10.08	7.6	--”--
50	0.8357	62.30	103.5	1.05	13.63	10.988	3.99	30.8	--”--
51	-	59.80	105.5	0.20	14.29	-	-	-	--”--
52	0.7082	60.50	102.5	1.50	13.56	9.08	4.41	17.6	--”--
53	-	60.40	100.8	2.60	13.27	-	-	-	--”--
55	0.7017	55.00	105.2	1.40	13.85	12.17	12.39	10.2	--”--
56	-	61.00	108.0	1.70	14.27	-	-	-	--”--
57	0.8344	56.10	106.3	0.40	14.12	24.70	18.11	24.0	--”--

**Продолжение таблицы 3.3.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.6184	31.20	83.7	5.50	10.16	0.98	0.05	1.0	[29]
2	0.7455	14.70	97.3	6.87	10.12	1.42	3.04	4.9	--”--
7	0.7513	17.90	91.9	4.85	10.80	4.47	2.89	1.43	--”--
9	0.6587	28.80	99.3	4.95	11.10	1.80	0.47	-	--”--
12	0.7902	16.20	90.1	7.75	9.65	0.404	0.49	-	--”--
14	0.8191	36.00	84.0	6.13	10.77	0.31	0.06	-	--”--
15	0.7782	30.10	92.9	6.30	10.72	0.40	0.15	-	--”--
19	-	30.40	100.7	6.20	10.40	-	-	-	--”--
21	0.7313	32.00	92.3	6.78	10.22	0.24	0.04	0.6	--”--
23	-	35.70	84.3	7.15	10.24	-	-	-	--”--
24	0.8201	27.10	91.0	6.50	10.08	0.39	0.04	-	--”--
25	0.6730	20.20	88.9	5.53	10.13	2.10	0.43	7.2	--”--

Результаты сопоставления масс метеороидов, вычисленные фотометрическим ( $m_{ph}$ ) и радиолокационным ( $m_r$ ) методами, показывают, что у 18 совместных метеоров массы, вычисленные двумя методами, близки или хорошо согласованы между собой. У 18 совместных метеоров массы, вычисленные фотометрическим методом, больше чем радиолокационные, а у 13 метеоров фотометрическая масса оказалась меньше, чем радиолокационная. Наибольшее расхождение между массами наблюдается у метеоров ярче  $0^m$ .

Для сопоставления фотометрической и радиолокационной массы метеороидов между собой в широком диапазоне скоростей нами для каждой группы вычислены фотометрические и радиолокационные значения масс. При этом нами метеороиды разбиты по скоростям на шесть групп, и для каждой группы вычислены усреднённые значения масс фотометрическим и радиолокационным методами. Результаты вычисления приведены в таблице 3.4.

В таблице 3.4 представлены также усреднённые значения масс  $m_f$ , вычисленные путём интегрирования по кривые свечения метеора. В таблице 3.4, наряду с усреднёнными значениями фотометрической и ионизационной

масс приведены и среднеквадратические ошибки. В последней строке дано количество метеоров, входящих в каждую группу.

**Таблица 3.4. - Средние значения фотометрической ( $m_{\phi}$ ), радиолокационной ( $m_r$ ) и фотометрической масс ( $m_{\phi 1}$ ) для шести групп метеороидов по скоростям**

V, км/с	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
$m_{\phi}$ (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
$m_{\phi 1}$ (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 сопоставления усреднённых значений масс, вычисленных тремя методами, показывают удовлетворительную согласованность друг с другом. Следовательно, эти результаты дают основание полученную шкалу масс метеоров в [79] использовать для интерпретации результатов радиолокационных наблюдений метеоров, полученных с одной приёмной станции.

Таким образом, показано, что в диапазоне звездных величин от 0 до +8<sup>m</sup> фотометрические и ионизационные массы, вычисленные по интенсивности свечения и величине линейной электронной плотности на высоте зеркальной точки, хорошо согласуются между собой.

### **3.3. Фотометрические и ионизационные массы одних и тех же ярких оптических и радиолокационных метеоров**

Среди физических характеристик метеороидов особую ценность представляют данные об их массах. Следовательно, достоверная редукция данных наблюдений, повышение точности и надёжности результатов вычислений масс относятся к важнейшим задачам метеорной астрономии. Немаловажное значение представляют данные о массах ярких метеоров, зарегистрированных одновременно радиооптическим методом, так как они позволяют калибровать полученные результаты радиолокационных

наблюдений метеоров относительно результатов оптических, проверить точность и надёжность результатов наблюдений, полученных разными методами.

В работах [79, 199, 200] были изложены результаты вычисления фотометрических и радиолокационных масс одних и тех же совместных радиотелевизионных метеороидов, порождаемых метеорами слабее от  $0^m$  до  $+8^m$  абсолютной звёздной величины. Фотометрическая и радиолокационная массы были вычислены по результатам измерения таких исходных параметров, как скорости, зенитного расстояния радианта, абсолютной звёздной величины и линейной электронной плотности для высоты зеркальных радиоотражений и других параметров совместных метеоров. Однако масса одного и того же метеороида, порождаемого метеорами ярче  $-0^m$ , по результатам одновременных оптических и радиолокационных наблюдений вообще не изучена.

Следовательно, представляет интерес изучение масс метеоров ярче  $-0^m$ , зарегистрированных одновременно оптико-радиолокационными методами. Однако задача расчёта масс ярких метеоров совместными оптико-радиолокационными наблюдениями и сопоставление полученных результатов между собой является более сложной, чем аналогичные задачи в случае слабых метеоров. Прежде всего, это связано с использованием разных шкал масс для интерпретации данных фотографических метеоров: а) линейной зависимости коэффициента свечения  $\tau$  от скорости  $V$  (для ярких метеоров), и б) экстремальной зависимости  $\beta$  от  $(V)$ . Причём границы применения этих моделей обозначены некорректно. Для метеоров со скоростями в интервале 11-20 км/с обе модели дают примерно одинаковые результаты. Далее по мере увеличения скорости метеоров до 70 км/с разность отношения между массами увеличивается на порядок.

Такая непростая ситуация имеет место и в случае интерпретации данных радиолокационных наблюдений метеоров с продолжительной длительностью радиоэха. Как известно, в случае переуплотнённых метеорных следов на сокращение длительности радиоэха наряду с амбиполярной диффузией

оказывает влияние прилипание электронов к нейтральным частицам, радиативная и диссоциативная рекомбинации, турбулентная диффузия и другие факторы деионизации. В реальных условиях одновременный учёт влияния всех этих факторов на уменьшение концентрации электронов в метеорных следах оказывается довольно сложной задачей. Эти факты автоматически влияют на точность и надёжность результатов вычисления масс метеороидов радиометодом. Вместе с тем калибровка результатов радиолокационных наблюдений с данными, полученными оптическим методом, и выявление шкалы масс ярких метеоров позволяет учитывать влияние этих процессов в случае интерпретации данных радиолокационных наблюдений.

Ниже прилагаем перечень работ, посвящённых результатам одновременных оптико-радиолокационных наблюдений ярких метеоров, как в Таджикистане, так и в зарубежных странах. Необходимо отметить, что одновременные фото-радиолокационные наблюдения метеоров впервые проводилось в Великобритании в 1955 и 1960 гг. на базе светосильной камеры Супер-Шмидта ( $d = 30$  см,  $f = 10$  см, диаметр поля зрения  $56^\circ$ ) и радиолокационной станции Джодрелл-Бэнк. Камера Супер-Шмидт была снабжена 18-лопастным обтюратором и установлена к западу от Джодрелл-Бэнк на расстоянии 160 км. В результате одновременных фото-радиолокационных наблюдений были зарегистрированы семь совместных метеоров, два из которых имели абсолютную звёздную величину от  $-1.7^m$  до  $-1.8^m$ . Один из них принадлежал метеорному потоку Геминид, а второй – к спорадическому фону.

В метеорном отделе Института астрофизики НАНТ с целью исследования физико-кинематических и динамических характеристик метеороидов и изучения свойства атмосферы в метеорной зоне, начиная с 1960-х годов, в периоды действия ежегодных метеорных потоков и спорадического фона, как по национальной, так и международной программе были организованы и проведены комплексные фотографические и радиолокационные наблюдения метеоров. В СССР первые параллельные радио-фотографические наблюдения

были проведены в Таджикистане П. Б. Бабаджановым [11]. В результате параллельных фотографических и радиолокационных наблюдений метеоров в 1968-1969 гг. было получено 7 ярких совместных метеоров, 5 из которых относились к метеорному потоку Персеид и два к потоку Леонид. Данные атмосферной траектории этих метеоров по результатам фотографических наблюдений опубликованы в [11], а результаты изучения взаимосвязи процессов свечения и ионизации и некоторых характеристик атмосферы в метеорной зоне по результатам одновременных комбинированных наблюдений представлены в работах [79].

Начиная со второй половины 1970-х гг. в состав комплекса наблюдательной аппаратуры ГисАО была включена и телевизионная аппаратура, на базе которой в 1977-1980 гг. были организованы и проведены одновременные фотографические радиолокационные и телевизионные наблюдения метеоров. В результате комплексных наблюдений был зарегистрирован один совместный фотографический и телевизионный метеор (где полученный результат позволял оценивать чувствительность и преимущество телевизионных наблюдений относительно фотографических), а также 57 параллельно зарегистрированных телевизионных и радиолокационных метеоров [202].

Очередной поиск одновременно зарегистрированных фото-радиолокационных метеоров по наблюдательным материалам, полученным за 1977-1980 гг. в Таджикистане, был проведён нами, и результаты поиска опубликованы в [164, 165]. Следует отметить, что по результатам анализа опубликованных данных фотографических наблюдений метеоров в [65] и данных первичных радиолокационных наблюдений метеоров, полученных на радиокомплексе МИР-2 (на фотоплёнке), выявлены нами 8 общих зарегистрированных фото-радиолокационных метеоров [166].

Напомним, что 11 августа 1977 г. (в  $22^{\text{h}}32^{\text{m}}58^{\text{s}}$  местного времени) в период действия метеорного потока Персеид был зарегистрирован болид с яркостью на высоте максимума свечения  $-7.2^{\text{m}}$ . Этот болид фотографическим методом

регистрировался одновременно из ГисАО и Кибчак. Комплексные фотографирования и спектрографирование болида проводились обычным методом и методом мгновенной экспозиции. Данные об атмосферной траектории болида были опубликованы в [65]. Одновременная регистрация болида была проведена автором и Р. Ш. Бибарсовым при дежурстве на комплексе МИР-2 и О. Евграфовым на метеорном патруле.

В результате 11-часовых одновременных наблюдений радиокomплексом EISCAT UHF RCS (с тремя приёмными пунктами) и двумя усиленными видеокамерами за 5 ночей в октябре 2007 зафиксированы четыре совместных метеора. В результате редукции данных наблюдений головного эха и данных базисных видеонаблюдений, используя несколько значений коэффициента свечения и ионизации, вычислены фотометрические и ионизационные массы каждого совместного метеора, где в пределах точности методов измерения все эти массы находились в удовлетворительном согласии между собою.

Одновременные оптико-радиолокационные наблюдения метеоров с использованием РЛС SMOR и нескольких видеокамер Gen-III были организованы в 2012 в Канаде [140]. В результате обработки данных комбинированных наблюдений было зафиксировано порядка 100 совместных метеоров, средняя абсолютная звёздная величина которых составляла  $+2.8^m$ . Полученные данные позволяли авторам исследовать зависимость между абсолютной звёздной величиной и линейной электронной плотностью в виде:

$$M = (38.7 \pm 1.2) - 2.5 \lg q,$$

где  $q$  выражено в эл/метр. Однако эти данные в основном относились к метеорам слабее  $0^m$ .

В сентябре 2009 г. в Канаде в результате комплексных оптических, радиолокационных и инфразвуковых наблюдений был зарегистрирован ярчайший болид, завершившийся падением метеорита Гримсби [178]. Абсолютная звёздная величина болида на высоте максимума свечения составляла  $-14.8^m$ . Начальная скорость болида по данным четырёх оптических камер наблюдений составляла  $20.91 \pm 0.19$  км/с. Данные базисных оптических,

радиолокационных, инфразвуковых наблюдений болида Гримсби позволяли независимо друг от друга оптическими и радиолокационными методами определять такие данные атмосферной траектории, как радианты, скорости, высоты, кривую блеска болида и т.д. Однако отсутствие данных о величине линейной электронной плотности для трёх частот 17, 29 и 38 МГц не позволяло использовать болид для вычисления масс оптико-радиолокационным методом.

Таким образом, по результатам одновременных фото-радиолокационных и радио-телевизионных наблюдений метеоров мы имеем 27 совместных метеоров, звёздная величина которых находится в диапазоне от  $-0.15^m$  до  $-7.2^m$  и скорости в диапазоне 14-72 км/с. Основные исходные данные об этих метеорах по соответствующим источникам приведены в таблице 3.5, где в первом столбце дан N – номер метеора, во втором V – скорость, в третьем столбце приведена  $H_{от}$  – высота радиоотражения, в четвёртом и в пятом столбцах приведены  $M_{от}$  и  $q_{от}$  – абсолютная звёздная величина и линейная электронная плотность для высоты радиоотражения, в шестом столбце приведено отношение  $\lg I_{\phi}/q$ , и в седьмом столбце приведены литературные источники, из которых брали информацию об этих метеорах.

Данные, представленные в таблице 3.5, позволяют с использованием шкалы фотометрических и радиолокационных масс вычислить массы одних и тех же ярких метеоров по формулам (3.5), (3.6).

**Таблица 3.5. - Некоторые данные атмосферной траектории ярких совместных радиооптических метеоров**

N	V, км/с	$H_{от}$ , км	$M_{от}$	$\lg q_{от}$	$\lg I_{\phi}/q$	Источник
1	2	3	4	5	6	7
1	37.00	94.9	-1.7	14.99	-4.59	[9]
2	40.00	110.3	-1.80	14.88	-4.44	--”--
661345a	71.50	97.8	-6.30	15.93	-3.69	[11]
661345 б	71.60	97.3	-4.40	15.19	-3.71	--”--
670821	60.50	99.0	-2.90	15.28	-4.40	--”--
670866	61.70	107.5	-3.00	15.50	-4.58	--”--
670931	61.00	95.0	-5.80	16.73	-4.69	--”--

Продолжение таблицы 3.5.

1	2	3	4	5	6	7
670954	63.70	93.6	-4.80	14.96	-3.32	--"--
770954	57.80	93.0	-7.20	15.32	-2.72	[176]
7709533	60.80	89.0	-1.90	13.56	-3.08	----"
770981	38.80	96.5	-2.10	13.21	-2.65	--"--
771033	61.40	107.5	-1.50	14.85	-4.53	--"--
781285с	61.90	105.0	-2.00	14.66	-4.14	--"--
790846а	42.70	93.8	-0.50	13.82	-3.9	--"--
800992в	61.70	94.0	-3.40	14.32	-3.24	--"--
801061в	60.40	100.0	-1.00	14.78	-4.66	--"--
3	59.99	102.9	-0.30	13.96	-4.12	[172]
4	-	98.0	-0.90	14.73	-4.55	--"--
5	43.90	101.0	-1.50	14.60	-4.28	--"--
12	29.10	90.0	-1.60	15.08	-4.72	--"--
30	14.30	88.5	-1.00	14.21	-4.09	--"--
31	69.40	110.5	-0.15	14.59	-4.81	--"--
35	38.50	91.4	-1.00	14.75	-4.63	--"--
44	63.60	99.0	-1.75	14.77	-4.35	--"--
45	65.80	102.0	-1.20	14.84	-4.64	--"--
54	65.70	99.0	-3.20	15.71	-4.71	--"--

Для этого нам необходимо изучить зависимость отношения  $\lg I/q$  от скорости для случаев метеоров ярче  $-0^m$ .

При этом метеоры, приведённые в таблице 3.5, объединены в шесть групп по скоростям с интервалом 10 км/с и для каждой группы вычислены среднеарифметические значения  $\lg I/q$  и их среднеквадратическое отклонение. Результаты вычисления приведены в таблице 3.6. Здесь N – количество метеоров, входящих в каждую группу. Анализ данных, приведённых в таблице 3.6, показывает, что в диапазоне скоростей метеоров от 10 до 30 км·с<sup>-1</sup> данные статистически не обеспечены. Анализ средних значений отношений  $\lg I/q$  и вычисленных их стандартных отклонений для оставшейся группы метеоров свидетельствует о том, что они в диапазоне скоростей варьируются

незначительно и практически остаются постоянными. Средние значения отношения  $\lg I/q$ , вычисленные по всем массивам данных, составляют  $4.12 \pm 0.12$ .

**Таблица 3.6. - Зависимости  $\lg I/q$  от скорости по результатам комбинированных радиооптических наблюдений метеоров ярче  $-0^m$**

V, км/с	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80
$(\lg I_{\phi} / q)_{\text{ст.от}}$	-4.090	-4.720	-3.957 $\pm 0.65$	-4.207 $\pm 0.16$	-3.42 $\pm 0.7$	-4.216 $\pm 0.16$	-3.7 $\pm 0.01$
N	1	1	3	3	2	14	2

Из уравнения свечения и ионизации (3.9) следует, что отношение интенсивности свечения  $I_p$  к линейной электронной плотности  $q$  определяется следующим выражением:

$$I_p / q = \mu \tau_p V^3 / 8 \beta. \quad (3.10)$$

Согласно таблицы 3.6, усреднённое значение  $\lg I_{\phi}/q$  составляет  $-4.12 \pm 0.12$ . Полученное усреднённое значение  $\lg I_p/q$  для метеоров ярче  $-0^m$  по результатам комбинированных наблюдений позволяет с использованием уравнения (3.10) и данных о коэффициентах свечения, используемых для вычисления фотографической массы метеороидов в [65] по формуле:

$$\tau_p = \tau_o \cdot V,$$

где  $\log \tau_o = -9,3$ , вычислить коэффициент ионизации для заданного значения скорости метеора. Вычисленные значения  $\beta$  для различных значений скоростей приведены в таблице 3.7.

**Таблица 3.7. - Зависимость коэффициента ионизации  $\beta$  от скорости при использовании численных значений отношения  $\lg I / q = -4.12 \pm 0.12$  и  $\log \tau_o = -9,3$**

V, км/с	10	20	30	40	50	60	70
$\beta$	0.00013	0.0020	0.010	0.032	0.0789	0.16	0.30

Данные, представленные в таблицах 3.5 и 3.7, позволяют вычислить массу одних и тех же метеоров двумя методами. Расчёт фотографической и радиолокационной массы метеороидов осуществлялся по известным формулам

(3.5) и (3.6). Ввиду того, что в случае радиолокационных наблюдений ярких метеоров точки зеркальных радиоотражений весьма разбросаны относительно высоты максимального свечения, мы для расчёта фотометрической и радиолокационной массы метеороидов использовали данные абсолютной звёздной величины и линейной электронной плотности на высоте радиоотражения. При этом по кривым блеска для высоты радиоотражения каждого метеора снималось значение абсолютной звёздной величины метеора  $M_{ph}$ . Интенсивности свечения  $I_p$  вычислялись по известной формуле (3.2).

**Таблица 3.8. - Результаты вычисления фотографической и радиолокационной массы с использованием шкалы масс метеоров ярче  $-0^m$**

N	$\cos Z_R$	V km/c	$H_{от}$ km	$M_{от}$	lgI	lg q		$M_{\phi} * 10^3$	$m_r * 10^3$
3	0,826	59.99	102.9	-0,3	9,84	13,96	-4.12	11.61	11.61
4	-	-	98.0	-0,9		-		-	-
5	0,3535	43.90	101.0	-1,5	10,32	14,67	-4.32	285,77	489,28
12	0,8903	29.10	90.0	-1,6	10,36	14,43	-4.07	644,36	572,95
30	0,6668	14.30	88.5	-1	10,12	14,36	-4.24	8489,78	11176,03
31	0,4597	69.40	110.5	-0,15	9,78	14,59	-4.81	10,15	49,69
35	0,6093	38.50	91.4	-1	10,12	14,04	-3.92	176,83	111,66
44	0,7804	63.60	99.0	-1,75	10,42	14,65	-4.23	36,99	47,88
45	0,7070	65.80	102.0	-1,2	10,2	14,77	-4.57	21,47	60,23
54	0,707	65.70	99.0	-3,2	11	14,95	-3.95	136,32	93,06
*1	0,707	37.00	94.9	-1,7	10,4	14,15	-3.75	340,41	145,83
*2	0,707	40.00	110.3	-1,8	10,44	14,88	-4.44	273,26	570,92
661345a	0.486	71.50	97.8	-6,3	12,24	16,42	-3.88	2456,81	2816,69
661345b	0.884	71.60	97.3	-4,4	11,48	15,45	-3.97	233,41	165,22
670805	0.908	60.10	98.2	-2,1	10,56	14,64	-4.08	55,04	49,92
670821	0.844	60.50	99.0	-2,9	10,88	15,19	-4.31	120,47	184,55
670866	0.573	61.70	107.5	-3	10,92	15,39	-4.47	179,86	405,06
670931	0.756	61.00	95.0	-5,8	12,04	15,89	-3.85	1881,01	1005,00
670954	0.806	63.70	93.6	-4,8	11,64	15,61	-3.97	590,66	419,45
770954	0.857	57.80	93.0	-7,2	12,6	16,65	-4.05	6884,03	5865,11
7709533	0.510	60.80	89.0	-1,9	10,48	14,39	-3.91	77,81	47,51
770981	0.581	38.80	96.5	-2,1	10,56	14,57	-4.01	495,14	387,03
771033	0.386	61.40	107.5	-1,5	10,32	14,85	-4.53	68,39	175,54
781285c	0.672	61.90	105.0	-2	10,52	15,00	-4.48	60,27	138,66
790846a	0.588	42.70	93.8	-0,5	9,92	14,08	-4.16	76,41	82,82
800992b	0.807	61.70	94.0	-3,4	11,08	15,30	-4.22	184,59	234,25
801061b	0.687	60.40	100.0	-1	10,12	14,75	-4.63	25,89	84,12

Наличие длительности радиоэха на высоте радиоотражения позволяло вычислить значение линейной электронной плотности и, следовательно, массы метеороида. Данные о  $M_p$  и  $q$  наряду с другими данными атмосферной траектории метеоров (скорости и зенитное расстояние  $Z$ ) позволяли по формулам (3.5) и (3.6) вычислить фотометрическую и радиолокационную массы одних и тех же метеороидов.

Результаты сопоставления фотографических и радиолокационных масс одних и тех же ярких метеоров (таблица 3.8) показывают, что в 6 случаях массы, вычисленные двумя способами, в пределах точности измерения хорошо согласуются между собой. У 8 метеороидов фотографическая масса больше чем радиолокационная, а у 12 метеороидов фотографическая масса меньше чем радиолокационная. Средние вычисленные значения масс метеороидов фотографическим методом составляют  $0,92 \pm 0,41$ , а средние значения радиолокационной массы равны  $0,98 \pm 0,47$ , что в пределах ошибки обеих масс хорошо согласуется между собой.

### **3.5. Определение плотности метеороидов. Применение критерия конечных высот для определения плотности параллельных радиооптических метеороидов**

Ранее теория «единого тела» была использована для интерпретации данных фотографических наблюдений метеоров, зарегистрированных маленькой камерой, камерой Супер-Шмидта (для метеоров ярче  $+2^m$ ) [74], а также радиометеоров со звёздной величиной от  $+7^m$  до  $+9^m$  [30-32]. Однако эта теория не практиковалась для интерпретации данных комбинированных радиооптических наблюдений метеоров в широком диапазоне звёздных величин (особенно не изучен интервал звёздных величин от  $+2^m$  до  $+7^m$ ) и для определения объёмной плотности метеороидов. Выявление механизма разрушения метеороидов в Земной атмосфере и изучение их физической природы (плотность, прочность и т.д.) относятся к важнейшим задачам метеорной астрономии. К настоящему времени известны несколько механизмов

разрушения метеороидов в Земной атмосфере. Одним из возможных механизмов абляции метеороидов и особенно их фрагментов, образовавшихся в результате дробления и вспышки вдоль траектории следа метеоров, является процесс испарения. Теоретические разработки физической теории метеоров с учётом процесса испарения начаты ещё в двадцатые годы прошлого века. Позже это было принято называть теорией «единого тела», которая постепенно и поэтапно совершенствовалась рядом исследователей.

Результаты этих работ достаточно подробно проанализированы и обобщены в трудах по метеорной физике [60, 73, 74, 75, 78, 204, 206, 207]. Первые экспериментальные проверки теории «единого тела» для интерпретации данных фотографических наблюдений метеоров проводились в 1950-х годах. В частности, F. L. Whipple [204] для моделирования кривых блеска метеоров в рамках теории «единого тела» использовал 147 метеоров в диапазоне от  $0^m$  до  $-2^m$ , которые были получены маленькими камерами. При этом все метеоры были разбиты на 7 групп по скоростям и для каждой группы вычислены средние значения высоты максимального свечения. Результаты сопоставления наблюдаемой высоты максимального свечения с высотой, ожидаемой из теории «единого тела», удовлетворительно согласовывались между собой.

Несколько позже L. G. Jaschia и др. в работе [66] использовали эту теорию для интерпретации данных фотографических метеоров ярче  $+2^m$ , которые были зарегистрированы камерами Супер-Шмидта. При этом авторами обнаружено, что по мере уменьшения абсолютной звёздной величины метеоров увеличивается разность между наблюдаемой и теоретической высотами максимума свечения. Более существенные различия между наблюдаемой и теоретической высотами максимума ионизации оказались у радиометеоров слабее  $+7^m \div +9^m$  согласно авторам [30]. Причём разность между наблюдаемой и теоретической высотой получена с отрицательным знаком. Однако теория «единого тела» не была использована для интерпретации данных более слабых оптических и особенно данных одновременно зарегистрированных оптико-

радиолокационных наблюдений метеоров с абсолютной звёздной величиной от  $+2^m$  до  $+7^m$ .

В настоящей работе на основе данных о кривых блеска и ионизации, полученных по результатам комбинированных оптико-радиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане [79] и США [29], сопоставляются наблюдаемые высоты максимума и конца следа метеоров с соответствующими высотами, ожидаемыми из теории «единого тела» и по критерию PE определяются значения объёмной плотности метеороидов.

Для моделирования кривых блеска и ионизации совместных метеоров в рамках теории «единого тела», для которой механизмом абляции является испарение вещества с поверхности метеороида, использовались известные уравнения для вычисления стандартной кривой блеска:

$$I = (9 / 4) I_{\max} (\rho / \rho_{\max}) [1 - 1 / 3(\rho / \rho_{\max})]^2,$$

$$\alpha = (9 / 4) \alpha_{\max} (\rho / \rho_{\max}) [1 - 1 / 3(\rho / \rho_{\max})]^2,$$

где  $I$ ,  $\alpha$  и  $\rho$  - текущая интенсивность свечения, линейная электронная плотность и плотность атмосферы, соответственно,  $I_{\max}$ ,  $\alpha_{\max}$  и  $\rho_{\max}$  - интенсивность свечения, линейная электронная плотность и плотность атмосферы на высоте максимума яркости и ионизации метеора, соответственно. Причём интенсивность свечения  $I_{\max}$ , линейная электронная плотность  $\alpha_{\max}$  и плотность атмосферы на высоте максимального свечения и ионизации  $\rho_{\max}$  связаны с параметрами метеороида следующими известными выражениями:

$$I_{\max} = 2 / 9 (\tau_{\phi} M_0 \cdot V_3 \cdot \cos Z_R) / H,$$

$$\alpha_{\max} = 4 / 9 \beta M_0 \cdot \cos Z_R / \mu m_H,$$

$$\rho_{\max} = 2 (Q - 2 / 3 Q \cdot b) \cdot M_0^{1/3} \cdot \delta_0^{2/3} \cdot \cos Z_R / (\Lambda \cdot A \cdot H \cdot V^2),$$

где:  $V$  - скорость,  $Z_R$  - зенитный угол радианта метеора,  $M$  и  $\delta_0$  - масса и плотность метеороида,  $H$  - высота однородной атмосферы,  $A$  - коэффициент формы метеороида,  $Q$  - энергия, необходимая для нагревания и испарения 1 г метеорного вещества,  $\tau_{\phi}$  - коэффициент светимости,  $\beta$  - коэффициент ионизации,  $\Lambda$  - коэффициент теплопередачи,  $\mu$  - средняя атомная масса метеорного вещества,  $m_H$  - масса атома водорода. Напомним, что плотность

атмосферы на высоте исчезновения метеора связана с параметрами метеороида и атмосферы известной формулой [7]:

$$\rho_b = 3 \rho_m = 3 [2 (Q - 2/3 \cdot Q \cdot b) \cdot M_0^{1/3} \cdot \delta_0^{2/3} \cdot \cos Z_R / (\Lambda \cdot A \cdot H \cdot V^2)]. \quad (3.10)$$

Так как для вычисления теоретической кривой свечения метеора, кроме следующих исходных данных метеороида, как  $M_0$ ,  $\cos Z_R$ ,  $H$  и  $V$ , которые непосредственно измеряются по результатам наблюдений, необходимы и данные о плотности метеороида  $\delta_0$ .

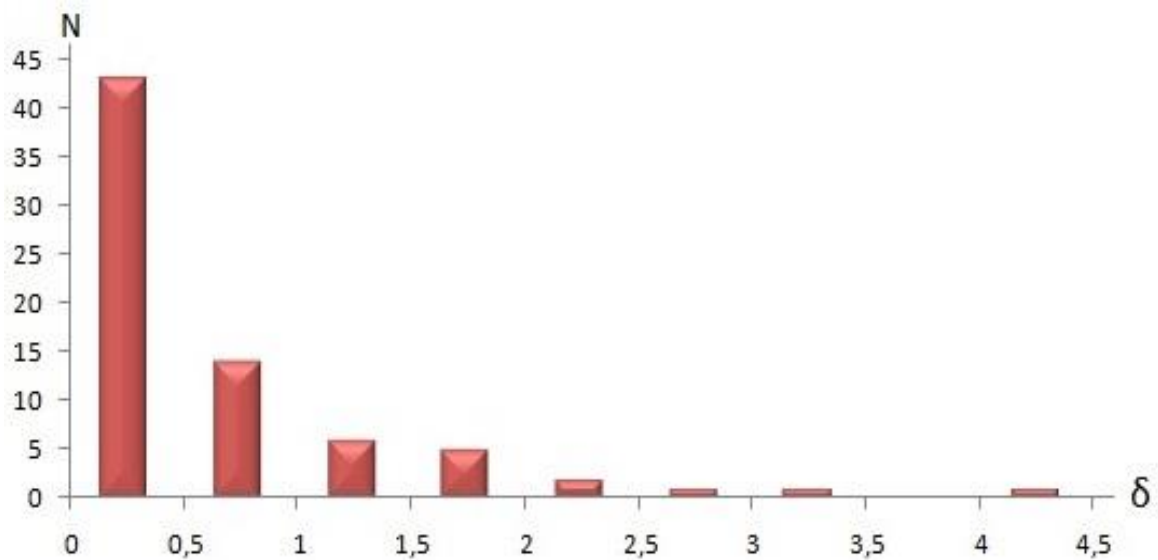
В настоящей работе мы для определения плотности метеороидов использовали критерий PE (критерий конечных высот) [68], который обоснован по болидам Прерийной сети и экспериментально подтверждён по метеориту Лоси Сити. Расчёт параметра PE производился по формуле, приведённой в [74]:

$$PE = \lg \rho E + 0.42 \lg m_\infty - 1.49 \lg v_\infty + 1.29 \lg \cos Z_R.$$

Вычисленные значения параметра PE для совместных метеоров, зарегистрированных радиооптическим методом, находятся в интервале от  $-3.0$  до  $-6.0$  с максимумом в интервале от  $-4.5$  до  $-5.0$ . Согласно [74], метеоры в зависимости от своей природы и значения параметра PE квалифицируются в четырёх группах. К первой группе относятся метеоры со значением  $PE > -4.60$ . Среднее значение плотности метеоров этой группы составляют  $3.7 \text{ г/см}^3$ . Для второй группы метеоров значения PE находятся в диапазоне  $-5.25 < PE \leq -4.60$ , а их среднее значение плотности составляет  $2.1 \text{ г/см}^3$ . К третьей группе метеоров (категории IIIA) отнесены метеоры с параметром PE в интервале  $-5.70 < PE \leq -5.25$ . Среднее значение плотности метеороидов этой группы составляет  $0.6 \text{ г/см}^3$ . К четвертой группе относятся метеороиды, принадлежащие к категории IIIB, у которых  $PE \leq -5.70$ . Плотность метеороидов этой группы составляет  $0.2 \text{ г/см}^3$ . Так как каждый метеор имеет своё значение параметра PE, то для него необходимо определить плотность по соответствующим величинам PE. Для определения плотности индивидуального метеора по вычисленному параметру PE нами по данным, перечисленным выше для четырёх групп метеоров, построен график зависимости плотности от параметра PE. Далее по

вычисленным значениям параметра PE для заданного метеора находим на графике зависимости плотности от параметра PE его значение плотности.

Данные о значениях плотностей метеороидов в виде гистограммы представлены на рисунке 3.1. Вычисленные значения плотностей метеороидов расположены в широком диапазоне 0.10-4.4 г/см<sup>3</sup>.

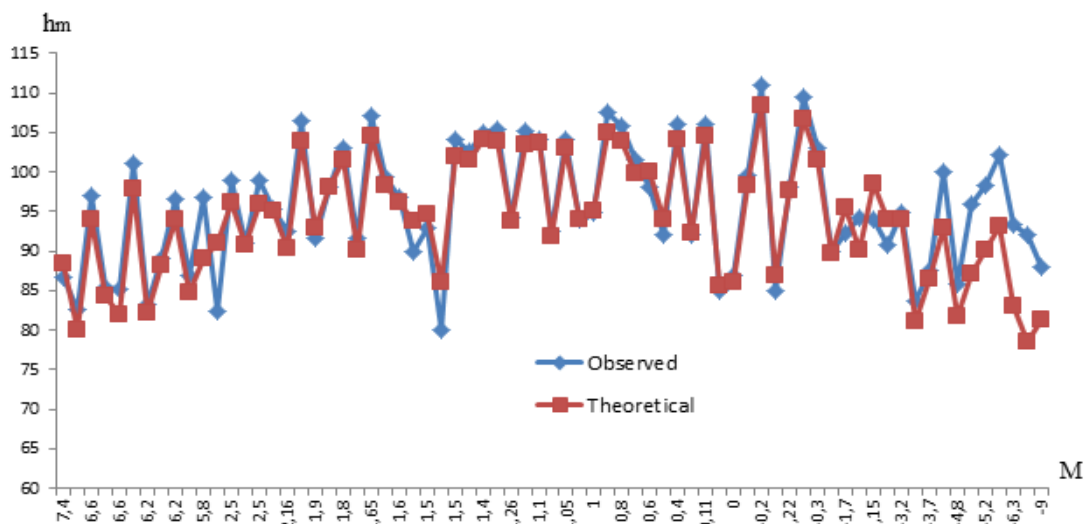


**Рисунок 3.1. - Распределение метеорных тел по плотностям**

Используя данные о плотности, массе, скорости и зенитном расстоянии радианта, по формуле (3.10) вычислены величины плотности атмосферы на высоте максимума свечения метеора. Переход от плотности атмосферы на высоте осуществлялся с помощью таблицы стандартной атмосферы [205].

Результаты сопоставления наблюдаемой и теоретической высоты максимального свечения метеоров в широком диапазоне звёздной величины для наглядной иллюстрации (в виде графика) представлены на рисунке 3.2.

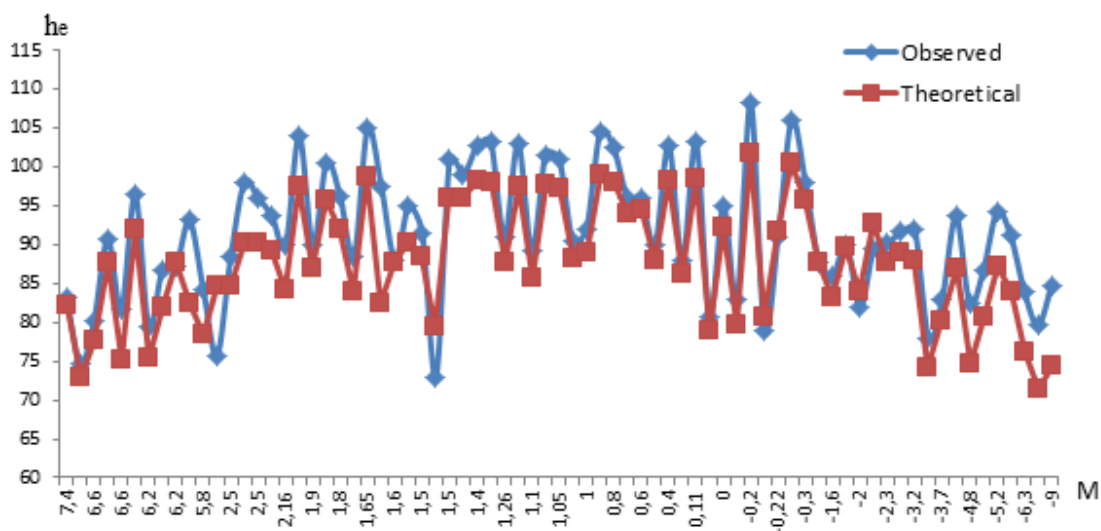
Здесь по оси абсцисс представлены данные о наблюдаемой и теоретической высоте максимального свечения, а на оси ординат представлены соответствующие им значения звёздных величин. Согласно рисунку 3.2, вариации вычисленных теоретических значений высот максимума свечения в интервале звёздных величин от +7.0 до +2.5 находятся в удовлетворительном согласии с их соответствующими наблюдаемыми значениями. Несколько отличаются разности между наблюдаемой и теоретической высотами максимума свечения более ярких метеоров.



**Рисунок 3.2. - Вариации наблюдаемой и теоретической высотой максимума свечения метеоров в широком диапазоне звёздных величин**

Средние значения разности наблюдаемых и теоретических высот максимума свечения у метеоров со звёздной величиной в диапазоне от  $+5.0^m$  до  $+7.5^m$  составляют  $\Delta h_m = h_{mo} - h_{mt} = 3$  км. По мере перехода к метеорам ярче  $-2.5^m$  разности между наблюдаемой и теоретической высотой максимума свечения достигают наибольших значений и составляют в среднем  $5 \pm 0.6$  км.

Пользуясь первичными исходными данными каждого метеора, нами вычислена теоретическая высота исчезновения. Для наглядной иллюстрации результаты сопоставления наблюдаемой и теоретической высот исчезновения метеоров как функции абсолютной звёздной величины представлены на рисунке 3.3. Из данных, приведённых в таблице 3.9, и из результатов, представленных на рисунке 3.3, следует, что наблюдаемые высоты конца следа метеоров практически выше их теоретического значения во всем диапазоне звёздных величин. Причём наибольшие различия наблюдаются у метеоров с абсолютной звёздной величиной от  $-2^m$  до  $-6.5^m$ , где величина  $\Delta h = 3.5$  км. Причём средние вычисленные значения разности наблюдаемой и теоретической высоты конца следа метеоров с абсолютной звёздной величиной до  $+2^m$  составляют 1.7 км. Среди 70 совместных метеоров только у 6-и высоты максимума свечения и высоты исчезновения находятся в удовлетворительном согласии между собой.



**Рисунок 3.3. - Вариации наблюдаемой и теоретической высоты конца свечения метеоров в широком диапазоне звёздных величин**

В результате проведённых расчётов выявлено, что из числа всех анализируемых в данной работе совместных метеоров только у трёх метеоров (таблица 3.9) наблюдаемые кривые блеска описываются моделью единого не дробящегося тела.

**Таблица 3.9. - Значения объёмной плотности ( $\delta$ ) метеороидов, вычисленной по теории «единого тела»**

№	$V$ , км/с	$\cos Z_r$	$H_b$ , км	$H_e$ , км	$M_m$	$M_0 \cdot 10^3$ , г	$\delta$ , г/см <sup>3</sup>	Поток	Источник
36	38.0	0.788	103.0	79.0	-0.2	217.8	1.0	Спорадический	[79]
670805	60.4	0.386	102.0	90.1	-2.3	360	1.5	Персеиды	[11]
1	29.4	0.618	94.7	75.7	5.5	1.0	5.0	С. Виргиниды	[29]

Таким образом, в результате сопоставления наблюдаемых кривых свечения с кривыми, ожидаемыми в рамках теории «единого тела», выяснено, что лишь 3.6% наблюдаемых совместных радиооптических метеоров удовлетворяют теории «единого тела».

### **3.6. О дроблении и плотностях метеорных тел по данным комбинированных радиооптических наблюдений**

Движение метеорного тела в атмосфере Земли сопровождается его нагревом, плавлением, испарением и различными механизмами разрушения.

Возбуждённые атомы и ионы метеорного вещества излучают, и это излучение регистрируется различными приёмниками, на основе данных которых получают кривые блеска и ионизации метеоров. Наиболее ценную информацию о физико-динамических характеристиках и механизмах разрушения метеороида содержат кривые блеска и ионизации индивидуальных метеоров, которые получают в результате базисных оптических (фотографических, электронно-оптических, телевизионных) или многостанционных радиолокационных наблюдений. Ввиду того, что при одновременных комплексных оптических и радиолокационных наблюдениях одних и тех же метеоров существенно расширяется объём полученной информации, представляет особый интерес изучение механизма разрушения метеороидов и их физических характеристик по данным комплексных радиооптических наблюдений.

**Наблюдательные данные.** К настоящему времени на основе комплексных радиооптических наблюдений зарегистрировано свыше ста метеоров различных скоростей и яркостей. В частности, в результате фото-радиолокационных наблюдений в 1960-х гг. в Джодрелл-Бэнк (Англия) и в ГисАО (Таджикистан) были зарегистрированы, соответственно, 7 метеоров от +3 до -1.8 абсолютной звёздной величины и 8 ярких метеоров от -2.1 до -7.2 абсолютной звёздной величины [9-11]. Так как по радионаблюдениям получали информацию лишь об одной точке на следе метеоров, то позже, в 1970-х и начале 1980-х годов в США и Таджикистане с целью получения информации о свечении и ионизации вдоль следов совместных радио- и TV-метеоров были организованы параллельные телевизионные и базисные радиолокационные наблюдения метеоров [29, 165]. В результате двухгодичных параллельных наблюдений в США было зарегистрировано 29 совместных метеоров, а за двухгодичный цикл наблюдений в период действия главных ежегодных метеорных потоков в Таджикистане было зарегистрировано 57 совместных метеоров. Методика редукции наблюдательных данных и данные о траекториях этих метеоров изложены в [165].

Анализ кривых блеска и ионизации, а также форма амплитудно-временных характеристик (АВХ) метеоров и данные об АВХ совместных метеоров, полученных в Душанбе, свидетельствуют о том, что в большинстве случаев в формировании АВХ как ярких, так и слабых совместных метеоров особое место занимает дробление метеорного тела. Влияние дробления на формирование АВХ метеоров проявляется в виде замывания дифракционных картинок, в виде вспышек или флуктуаций на дифракционных картинках при подлёте и т.д. Радиолокационные наблюдения метеоров в обсерватории Аресибо (США) также показывают значительную, вплоть до 15% от всех зарегистрированных событий, долю метеоров с концевыми вспышками даже среди метеороидов с минимальными массами, что свидетельствует о дроблении метеороидов. Радиолокационные отражения от метеорных следов часто отличаются от того, что даёт простая модель, и эти различия являются результатом дробления метеороидов. В [96] показано, что только около 10% радиолокационных метеоров могут быть проанализированы классическим методом, а для 80% метеороидов дробление является доминирующим процессом.

**Методика анализа кривых блеска метеоров и результаты.** Целью настоящей работы являлось выявление механизма разрушения исследуемых метеорных тел и определение их плотностей на основе моделирования кривых блеска как в рамках теории «единого тела», в которой механизмом абляции является испарение поверхностного слоя, так и теории квазинепрерывного дробления метеороида на мельчайшие фрагменты. Выявление механизма разрушения исследуемых метеороидов имеет очень важное значение для решения вопроса об их составе и структуре.

В качестве наблюдательного материала для анализа использовались опубликованные данные о 8 ярких метеорах, полученные в результате совместных фото-радиолокационных наблюдений в Душанбе, а также данные о слабых метеорах, полученные в результате совместных радиотелевизионных наблюдений в Душанбе [165] и США [29]. Из массива данных, пригодных к

обработке, оказалось около 60% метеоров, для которых имелась полная кривая блеска, сведения о высоте начала  $H_n$  и конца следа  $H_k$ , абсолютной звёздной величине  $M_m$  на высоте максимума блеска, массе  $M_0$ , скорости  $V$ , зенитном расстоянии радианта  $Z_R$  и принадлежности метеора к потоку. Указанные данные для исследуемых совместных фото-радиолокационных и радиотелевизионных метеоров приведены в таблице 3.10.

**Таблица 3.10. - Физические характеристики метеороидов по данным комплексных радиооптических наблюдений**

№	$V, \text{км/с}$	$\cos Z_r$	$H_n, \text{км}$	$H_k, \text{км}$	$M_m$	$M_0 \cdot 10^3, \text{г}$	$m_f, \text{г}$	$\delta, \text{г/см}^3$	Поток
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Данные комбинированных радиотелевизионных наблюдений в Таджикистане [165]									
2	36.5	0.545	101.3	89.3	1.1	57.4	$10^{-5}$	2.1	Спорад.
3	59.9	0.826	115.7	98.0	-0.3	84.6	$10^{-7}$	1.0	Персеиды
6	40.8	0.391	102.7	97.5	1.63	19.4	$10^{-5}$	1.4	Квадрантиды
7	57.9	0.569	107.5	101	1.8	11.4	$10^{-5}$	1.0	Спорад.
8	46.2	0.469	107.0	95.0	0.0	153.4	$5 \cdot 10^{-6}$	1.4	Квадрантиды
9	40.1	0.575	96.0	88.5	2.5	10.8	$5 \cdot 10^{-5}$	3.9	Квадрантиды
10	21.9	0.509	92.0	80.7	0.0	595.0	$10^{-5}$	1.8	Спорад.
11	41.4	0.719	101.0	95.0	1.6	17.6	$10^{-6}$	1.8	Квадрантиды
12	29.1	0.891	104.0	86.0	-1.6	1171	$5 \cdot 10^{-7}$	0.7	Спорад.
13	39.2	0.465	97.5	93.7	2.2	17.2	$5 \cdot 10^{-6}$	2.5	$\delta$ -Аквариды
15	43.4	0.431	101.0	90.0	0.5	154.2	$10^{-5}$	4.2	$\delta$ -Аквариды
19	40.2	0.539	103.0	88.0	0.2	161.4	$5 \cdot 10^{-6}$	3.4	$\delta$ -Аквариды
20	30.8	0.725	95.0	88.5	1.7	28.4	$10^{-6}$	2.1	Спорад.
21	47.7	0.489	103.6	96.2	1.8	22.0	$5 \cdot 10^{-6}$	3.4	$\delta$ -Аквариды
22	45.0	0.602	99.0	91.5	1.5	25.8	$5 \cdot 10^{-6}$	4.6	$\delta$ -Аквариды
23	42.9	0.629	101.0	90.4	1.0	18.4	$5 \cdot 10^{-5}$	4.4	$\delta$ -Аквариды
24	40.8	0.530	101.0	96.0	2.5	11.6	$10^{-6}$	2.1	$\delta$ -Аквариды
25	41.4	0.603	99.8	92.0	1.0	51.8	$5 \cdot 10^{-6}$	3.4	$\delta$ -Аквариды
28	22.6	0.520	97.3	83.0	0.0	287.2	$5 \cdot 10^{-6}$	1.4	$\alpha$ -Капри-корниды
29	43.9	0.598	97.8	91.0	1.3	27.8	$10^{-5}$	3.6	$\delta$ -Аквариды

**Продолжение таблицы 3.10.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
31	69.4	0.460	116.6	108	-0.2	85.2	$10^{-6}$	0.5	Ориониды
32	60.9	0.678	107.0	102	1.1	12.0	$10^{-6}$	1.2	Спорад.
34	62.2	0.731	114.0	106	-0.3	23.4	$3 \cdot 10^{-7}$	0.5	Ориониды
35	38.5	0.609	95.0	90.0	-1.7	223.2	$10^{-7}$	3.6	Геминиды
36	38.0	0.788	103.0	79.0	-0.2	217.8	Исп.е	1.0	Спорад.
38	58.8	0.494	116.0	91.0	-0.2	226.4	$10^{-6}$	2.5	Персеиды
40	57.8	0.625	110.2	104	2.15	6.0	$10^{-6}$	0.6	Персеиды
41	59.9	0.754	109.4	103	0.11	25.8	$10^{-6}$	0.4	Персеиды
42	60.9	0.762	112.0	105	1.0	11.8	$5 \cdot 10^{-7}$	0.5	Персеиды
43	55.7	0.742	110.9	101	1.5	12.4	$5 \cdot 10^{-7}$	1.1	Персеиды
44	63.4	0.779	113.5	89.5	-2.2	555.0	$10^{-6}$	2.5	Персеиды
47	58.1	0.814	109.1	103	1.4	8.6	$10^{-6}$	0.6	Персеиды
48	62.2	0.823	111.2	102	0.8	18.6	$10^{-6}$	0.7	Персеиды
49	65.7	0.839	107.4	99.0	1.5	7.6	$10^{-6}$	2.5	Персеиды
52	60.5	0.707	108.0	101	1.1	17.6	$10^{-6}$	1.4	Спорад.
55	55.0	0.702	107.6	105	1.2	10.2	$10^{-6}$	0.8	Персеиды
57	58.8	0.835	110.0	103	0.4	24.0	$10^{-6}$	0.5	Персеиды
Данные комплексных фоторадиолокационных наблюдений в Таджикистане [11]									
66135	71.5	0.510	119.6	84.8	-9.0	15750	$10^{-6}$	0.4	Леониды
66136	71.6	0.581	117.9	94.2	-5.2	1680	$10^{-6}$	0.8	Леониды
670805	60.4	0.386	102.0	90.1	-2.3	360	Исп.е	1.5	Персеиды
670821	60.2	0.672	114.1	83.0	-3.7	1170	$5 \cdot 10^{-6}$	1.4	Персеиды
670866	61.7	0.588	107.8	93.6	-4.3	1130	$5 \cdot 10^{-6}$	1.1	Персеиды
670931	61.0	0.807	112.0	84.0	-6.3	13800	$5 \cdot 10^{-6}$	0.4	Персеиды
670954	60.8	0.697	113.1	86.6	-5.0	2840	$10^{-5}$	1.0	Персеиды
770954	57.8	0.857	114.0	79.6	-7.2	19800	$5 \cdot 10^{-8}$	0.4	Персеиды
Результаты комбинированных радиотелевизионных наблюдений в США [29]									
1	29.4	0.618	94.7	75.7	5.5	1.0	Исп.	5.0	С. Виргиниды
2	10.0	0.745	98.8	93.1	5.8	4.9	$5 \cdot 10^{-8}$	0.1	Спорад.
3	13.3	0.612	89.0	79.5	6.2	8.3	$10^{-6}$	4.0	Спорад.
6	17.2	0.613	96.2	86.7	6.2	5.3	$10^{-6}$	1.8	Спорад.
7	14.4	0.751	97.1	74.6	6.7	14	$5 \cdot 10^{-6}$	0.2	Спорад.

**Продолжение таблицы 3.10.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	28.4	0.738	102.3	90.7	6.6	1.9	$5 \cdot 10^{-6}$	1.8	Ю. Тауриды
19	28.6	0.652	112.2	96.4	6.4	1.8	$5 \cdot 10^{-8}$	0.1	Спорад.
№	$V_{км/с}$	$\cos Z_r$	$H_n км$	$H_k км$	$M_m$	$M_0 \cdot 10^3 г$	$m_{г}$	$\delta г/см^3$	Поток
22	20.9	0.734	99.8	83.3	7.4	1.7	$10^{-6}$	1.0	Спорад.
25	17.2	0.673	92.7	80.1	6.6	7.2	$10^{-6}$	3.2	Спорад.
26	34.0	0.744	106.6	87.2	6.2	1.4	$5 \cdot 10^{-6}$	2.8	Спорад.
28	13.8	0.764	93.3	84.1	5.8	7.0	$5 \cdot 10^{-7}$	0.2	Спорад.
29	9.9	0.640	92.1	81.7	6.6	11.0	$5 \cdot 10^{-7}$	0.1	Спорад.

Для моделирования кривых блеска совместных метеоров в рамках теории «единого тела», для которой механизмом абляции является испарение вещества с поверхности метеороида, использовались известные уравнения, полученные для вычисления стандартной кривой блеска:

$$I = (9 / 4) I_{\max} (\rho / \rho_{\max}) [1 - 1/3 (\rho / \rho_{\max})]^2, \text{ где:}$$

$$I_{\max} = 2 / 9 (\tau M_0 V^3 \cos Z_r) / H,$$

$$\rho_{\max} = 2Q M_0^{1/3} \delta_0^{2/3c} \cos Z_r / \Lambda A H V^2,$$

здесь  $I$ ,  $I_{\max}$ ,  $\rho$ ,  $\rho_{\max}$  – интенсивность свечения и плотность атмосферы в текущей точке и точке максимума яркости на метеорной траектории, соответственно;  $V$ ,  $Z_R$  – скорость и зенитный угол радианта метеора,  $M$  и  $\delta_0$  – масса и плотность метеороида,  $H = 6$  км – высота однородной атмосферы,  $A = 1.5$  – коэффициент формы метеороида,  $Q = 8 \cdot 10^{10}$  эрг/г – энергия, необходимая для нагревания и испарения 1 г метеорного вещества,  $\tau = \tau_0 V$  – коэффициент светимости, где  $\lg \tau_0 = -9.3$ ,  $\Lambda$  – коэффициент теплопередачи, вычислялся по формуле:

$$\Lambda = \Lambda_0 + (1 - \Lambda_0)e^{-kM},$$

где  $\Lambda_0 = 0.03$ ,  $k = 0.25 \text{ г}^{-1}$ . В результате проведённых расчётов выявлено, что из числа всех анализируемых в данной работе слабых метеоров только у трёх метеоров наблюдаемые кривые блеска описываются моделью единого недробящегося тела.

Фотографические изображения ярких метеоров, полученные с помощью обтюраторов, как на малых камерах, так и длиннофокусных по методу мгновенных экспозиций, свидетельствуют о наличии метеорных хвостов (wake), образование которых связано с квазинепрерывным отделением от родительского тела мельчайших фрагментов с массами  $10^{-7}$ - $10^{-5}$  г [7]. Такие хвосты обнаружены и на снимках слабых метеоров, полученных с помощью телевизионной техники, оснащённой ПЗС-матрицами [57], что позволяет утверждать, что и мелкие метеороиды с массами менее  $10^{-2}$  г также подвержены дроблению в атмосфере. Это, а также вышеперечисленные факты дали основание провести анализ наблюдаемых кривых блеска слабых метеоров в рамках модели квазинепрерывного дробления.

Теоретическая кривая блеска метеора с учётом квазинепрерывного дробления рассчитывалась по следующему уравнению [42]:

$$I = -\frac{\tau V^2}{2} \frac{dM_u}{dt}.$$

Выражение для скорости испарения метеорного вещества  $dM_u / dt$  имеет вид:

$$\frac{dM_u}{dt} = -\rho \frac{\theta(\rho_k - \rho)}{m_o} \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{dM}{d\rho'} \frac{dm_k}{d\rho} \theta(b - \rho') d\rho'.$$

Уравнения расхода массы метеороида  $dM / d\rho'$  и фрагмента  $dm_k / d\rho$  имеют вид:

$$\frac{dM}{d\rho'} = -\frac{\Lambda A H V^2 M^{1/3}}{2 Q_f \delta_o^{2/3} \text{Cos} Z_r}; \quad \frac{dm_k}{d\rho} = -\frac{\Lambda A' H' V^2 m_k^{1/3}}{2(Q - Q_f) \delta_f^{2/3} \text{Cos} Z_r}.$$

В уравнения входят следующие величины:  $\rho$  – плотность атмосферы на участке метеорной траектории, изменяющаяся по экспоненциальному закону:  $\rho = 3 \cdot 10^{-9} \exp(-h/H)$ ;  $\rho_n$ ,  $\rho_k$  – плотность атмосферы на высоте начала дробления и прекращения явления метеора соответственно;  $a = \rho_n + R_1$  – плотность атмосферы на высоте исчезновения фрагментов, которые отделились на высоте начала дробления;  $b = \rho_n + R_0$  – плотность атмосферы на высоте прекращения

дробления;  $\rho'$  – плотность атмосферы на произвольной высоте;  $M_0, m_0$  – начальная масса метеороида и фрагментов;  $M, m_k$  – массы метеороида и фрагментов на произвольной высоте;  $\delta_0, \delta_f$  – плотность метеороида и фрагментов. Для фрагментов коэффициент теплопередачи  $\Lambda=1$ , коэффициент формы  $A=1.21$ ;  $Q_f = 2 \cdot 10^{10}$  эрг/г – удельная энергия дробления метеороида,  $\theta(x)$  – функция Хевисайда:  $\theta(x) = 1$  при  $x > 0$ ,  $\theta(x) = 0$  при  $x < 0$ .

Выражения для параметров  $R_0$  и  $R_1$ , определяющих квазинепрерывное дробление, имеют вид:

$$R_0 = \frac{6Q_f (M_0 \delta_0^2)^{1/3} \text{Cos}Z_r}{\Lambda A H V^2}, \quad R_1 = \frac{6(Q - Q_f)(m_0 \delta_f^2)^{1/3} \text{Cos}Z_r}{\Lambda A' H V^2}.$$

По приведённым выше уравнениям были рассчитаны модельные кривые блеска исследуемых метеоров, и из условия наилучшего совпадения модельных и наблюдаемых кривых блеска определены объёмные плотности  $\delta_0$  индивидуальных метеороидов и массы отделяющихся фрагментов  $m_0$ , данные о которых представлены в таблице 3.11. В таблице 3.11 также для поточных и спорадических метеоров определены средние объёмные плотности  $\delta_0$  метеороидов и массы фрагментов  $m_0$ . Киквая и др. [206] по измеренным замедлениям 10 метеороидов потока Персеид получили среднюю объёмную плотность, равную  $0.6 \text{ г/см}^3$ , что находится близко к нашим результатам. Полученное распределение по плотностям среди слабых метеоров с яркостью от +1 до +7 абсолютной звёздной величины подобно тому, что получено для ярких фотографических метеоров. Наиболее плотными среди исследованных слабых метеоров являются Геминиды и  $\delta$ -Аквариды, вещество которых соответствует прочному и плотному кометному веществу, а наименьшая объёмная плотность, соответствующая кометному веществу типа ША, получена для Орионид и Леонид.

Из полученных результатов следует, что по сравнению с плотностями метеороидов из тех же потоков, но фотографического диапазона масс ( $M > 1 \text{ г}$ ) мелкие метеороиды более плотные и однородные по структуре. В работах [9,

209] по результатам спектроскопического анализа 79 видео-спектров и 2 фото-спектров метеоров Геминид установлено, что отношение Mg/Fe в 1,5-3 раза превышает хондритовое значение, а содержание Na в Геминидах обычно невелико.

**Таблица 3.11. - Плотность поточных метеороидов по результатам параллельных радиотелевизионных и фото-радиолокационных наблюдений**

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

В таблице 3.12 приведены результаты сравнения объёмных плотностей с данными других исследователей. Согласно результатам, в большинстве случаев значения объёмных плотностей, полученных нами для слабых метеоров, больше, чем плотности, полученные в [11] для ярких фотографических метеоров. Это различие между среднеквадратичными измерениями погрешности метеоритов Персеид, метеоритного дождя Орионид и Южных Таурид пренебрежимо мало.

Однако данные о средних значениях объёмной плотности метеороидов в потоках Южных  $\delta$ -Акварид, Геминид, Южных Таурид, Квадрантид, полученные нами для слабых метеоров, имеют несколько более высокие значения плотностей, чем метеорные потоки, генерируемые этими же яркими фотографическими метеорами. Такое различие может быть связано со структурой метеоритов разной массы, где на основе радиолокационных наблюдений метеоров было обнаружено, что увеличение среднего веса

метеороидов и ассоциаций приводит к снижению их средних значений объёмной плотности [218].

**Таблица 3.12. - Плотность и пористость поточных и спорадических метеороидов по результатам фотографических и комбинированных радиооптических наблюдений**

Поток	$\delta_0 \pm \Delta\delta$ , г/см <sup>3</sup> , настоящая работа	$\delta_0 \pm \Delta\delta_0$ , г/см <sup>3</sup> [155]	$\delta_0$ [93]	$\delta_m$ , г/см <sup>3</sup> [240]	$\delta_m$ , г/см <sup>3</sup> [155]	К, настоящая работа	К [155]
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

Данные, представленные в таблице 3.12 для слабых минералогических значений плотности, имеют яркий встроенный оптический метеор и показывают, что среднеквадратическая ошибка в пределах измерения у них имеет почти одинаковое значение.

Близкие значения минералогических плотностей, полученные из двух источников для различных потоков, позволяют предположить, что минералогическое значение плотности не зависит от яркости или массы метеороидов.

Используя значения данных плотностей объёма метеороидов,

генерируемых яркими и слабыми метеорами, соответственно значения минералогических плотностей метеороидов могут использоваться для оценки некоторых структурных характеристик (в частности, их оценки пористости -  $K$ ) потоков данных метеороидов. Известно, что объёмная  $\delta_0$  и минералогическая плотность  $\delta_m$  связаны следующим образом:

$$\delta_0 = \delta_m (1 - m), \quad (3.11)$$

где  $K = VP / V$ ,  $VP$  – объём пор,  $V$  – общий объём тела.

Пористость  $K$  рассчитывается согласно (3.11), как показано в таблице 3.12. Согласно таблице 3.12, пористость метеорита, генерируемого слабым метеором, меньше по сравнению с пористостью от яркого фотографического метеора. Значения  $K$ , полученные для слабых потоков метеорных тел кометного происхождения, составляют от 7 до 78%. Таким образом, из этих результатов, по сравнению с плотностями того же метеорного потока, но в диапазоне фотографических масс ( $m > 1$  г) имеют небольшие метеориты плотной и однородной структуры.

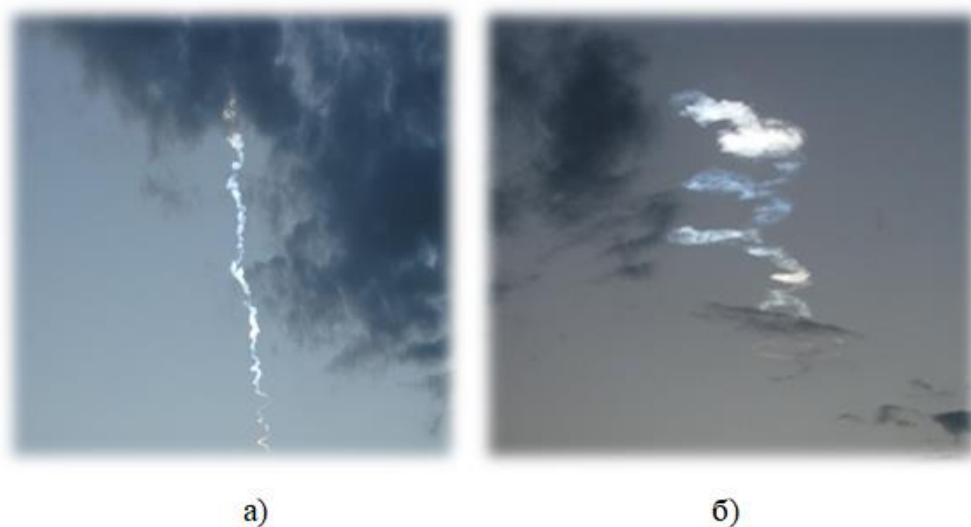
Наиболее плотным среди изученных слабых метеоров является вещество Геминид и Южных  $\delta$ -Акварид, что соответствует прочному и плотному кометному материалу, а наименьшая объёмная плотность, соответствующая материалу комет типа ША, получена для Орионид и Леонид.

### **3.7. Оценка физических характеристик суперболида Таджикистан по результатам комбинированных спутниковых и наземных наблюдений**

Малые тела Солнечной системы, такие как метеороиды, астероиды и кометы при пресечении Земной орбиты могут представлять огромную опасность и наносить колоссальный ущерб не только народному хозяйству, но и в целом нести угрозу жизнедеятельности живого существа. Особую тревогу и беспокойство вызывают столкновения декаметровых и километровых космических объектов с плотинами ГЭС и атомными электростанциями, где последствия взаимодействия нанесут катастрофический ущерб не только экономике того или иного государства или континента, но и создадут огромную

опасность для существования самой Земли. Разрушительные последствия, вызываемые столкновением вышеупомянутых объектов, в первую очередь, зависят от кинетической энергии и физико-химических свойства (химический состав, прочность, пористость и т.д.) малых тел. Следовательно, исследование физических параметров малых тел и, в частности, тел, порождающих суперболиды, которые часто завершаются падением метеорита, представляет не только большое научное значение, но и очень важно для расширения знаний о природе небесных тел.

Напомним, что 23 июля 2008 года многие жители центральных и юго-западных районов Республики Таджикистан стали очевидцами события полёта ярчайшего болида, который сопровождался сильным звуковым взрывом. На рисунке 3.4 приведены: а) начальная стадия следа болида и б) пылевой след суперболида, изогнутого турбулентными движениями в атмосфере через 30 минут полёта.



**Рисунок 3.4. - а) Первоначальный следболида  $19^{\text{h}}46^{\text{m}}20^{\text{s}}$  после 30 минут полёта;  
б) пылевой след болида**

В момент появления суперболида погода в Душанбе было малооблачной. Несмотря на это, ряду граждан (в том числе и некоторым сотрудникам Института астрофизики: О. Алимову, М. Гулямову, У. Хамроеву и др.) удалось с помощью видеокамер и телефонных аппаратов зарегистрировать динамику развития формы следа суперболида, результаты были частично представлены в

интернете. Пылевой след по нашим наблюдениям продолжал существовать до полного заката Солнца (более 1 час 25 минут). Полёт суперболида сопровождался мощным взрывом, звук которого слышали жители на огромной территории, начиная от востока г. Душанбе до долины Рамит, посёлка Зидды Варзобского района, г. Вахдат, в Рудакинском, Гиссарском и Шахриванском районах, городе Турсунзаде и некоторых приграничных районах Сурхандарьинской области Республики Узбекистан и юго-западных районах территории Хатлонской области, то есть от города Куляб и района Мир Саид Али Хамадони до Шаартузского и Бешкентского районов.

Во время этого события первый из авторов находился в парке герба Таджикистана, где он слышал и чётко зафиксировал направление распространения волны взрыва, произведённого суперболидом. Причём автор чётко зафиксировал направление распространения фронта звука относительно рельефа местности. Азимут направления взрыва был расположен на линии от точки севера в юго-западном направлении (гора Бобомалик Гиссарского района) и от точки юга к западу составлял  $67^{\circ} \pm 5^{\circ}$ . Сила звука взрыва напоминала мощную артиллерийскую канонаду и звук грома, что совпало с тремя вспышками кривых блеска, полученных со спутника. То есть каждая вспышка производилась взрывом. Интенсивность звука взрыва находилась примерно в диапазоне 120-130 дБ, а в системе СИ в пределах  $5 \cdot 10^{-1} \div 1$  Ватт/м<sup>2</sup>.

Суперболид Таджикистан в реальном масштабе времени был зарегистрирован с помощью оптических сенсоров военных спутников NASA системы Satellite Network в 14:45 мирового времени. Причём первые научные сообщения о суперболиде и его некоторые физические характеристики в СМИ представлены Р. G. Brown в [210]. Согласно данным, опубликованным в сети Интернет, суперболид имел звёздную величину  $-20.7^m$ , высоту основного максимума взрыва (свечения) 35 км, а его скорость составляла 16 км/с. Энергия излучения суперболида, согласно этому источнику, была равна  $2,1 \cdot 10^{11}$  Дж, масса болида оценивалась в 15-20 тонн (таблица 3.13).

Несколько отличается мнение другого исследователя О. Р. Поповой [211]

относительно данных кинетической энергии и начальной массы суперболида. По её мнению, начальная кинетическая энергия болида равна  $2,1 \cdot 10^{12}$  Дж, а его масса оценивается в 20-25 тонн, что эквивалентно 0.53 кТ. Такие большие разбросы в оценке масс суперболида требуют привлечения дополнительных методов их оценки. А плотность суперболида оказалась вообще не изученной.

**Таблица 3.13. - Данные атмосферной траектории суперболида по результатам комбинированных спутниковых и наземных базисных наблюдений**

$\alpha_r$	$\delta_r$	$\vartheta_0$ (км)	$Z_r$	$h_b$ (км)	$h_m$ (км)	$h_c$ (км)	$M_m$	$m$ (т)	Источник
221.3 $\pm 2.1$	32.4 $\pm 2.1$	14.3 $\pm$ 0.5	10 <sup>0</sup>	38.2 $\pm$ 0.5	35.0 $\pm$ 0.5	19.6 $\pm$ 0.5	-	-	[214]
-	-	16.0	-	-	35.0	-	-20	15 $\div$ 20	[210]
-	-	14.5	-	-	31.5	-	-20.3	20 $\div$ 25	[213]
234.8	34.0	-	5.1	43.39	37.5	14.25	-21.0	-	[212]
228.1	33.2	14.9	7.6	41.05	34.9	16.9	-20.4	20.0	Усреднённые данные

В таблице 3.13 приведены результаты интерпретации данных атмосферной траектории болида по результатам наземных и спутниковых наблюдений [212-214]. Здесь в таблице:  $\alpha_r$ ,  $\delta_r$  – координаты радианта,  $\vartheta_0$  – скорость,  $Z_r$  – зенитное расстояние радианта,  $h_n$ ,  $h_m$ ,  $h_c$  – высота начала, максимума и конца следа болида,  $M_m$  – видимая звёздная величина, определяемая по кривым блеска, полученным на спутнике и  $m$  – масса болида. Данные о радианте, скорости, высоте начала, максимума и конца следа, а также значение торможения, приведённые в работе [214], получены по результатам интерпретации спутниковых и наземных фотографий, полученных примерно одновременно с ГисАО и Душанбе.

Для определения данных атмосферной траектории и прогнозирования области выпадения фрагментов суперболида в [214] использованы фотографии следа, полученные в ГисАО и Хульбук, что расположены на расстоянии 100 км друг от друга. Точность измерения параметров траектории болида при использовании длинной базы существенно улучшается, однако использование

фотографии следа, полученного с разностью по времени регистрации в 15 минут, несколько искажает полученные конечные результаты. Соответственно, для расчёта физических характеристик суперболида нами использованы усреднённые значения параметров атмосферы (в том числе высоты начала, максимума и конца следа), которые приведены в последней строке. Эти данные будут использованы для оценки физических характеристик суперболида.

Данные о параметрах атмосферной траектории суперболида, которые проведены в таблице 3.13 по различным источникам, позволяют нам оценивать физические характеристики суперболида.

**Оценка фотометрической массы суперболида.** Оценка массы суперболида произведена тремя способами: а) фотометрическим по величине интенсивности свечения на высоте максимума свечения; б) графическим (по графику зависимости звёздной величины от массы, опубликованным по болидным данным) и в) по кинетической энергии, производимой суперболидом. При первом методе по опубликованным данным о массе и звёздной величине болидов, приведёнными в работе [65], построен график зависимости между этими параметрами и, зная звёздную величину болида ( $m = -20.7^m$ ), на основании графика найдено значение массы болида, которая оказалось равной 17 тоннам.

Обычно для определения предварительной фотометрической массы метеороида используется следующая известная формула:

$$M_{\phi} = \frac{9}{2} \frac{H^* I_{\phi}}{\tau_{\phi} \vartheta_0^3 \cos Z_r}, \quad (3.12)$$

где  $H^*$  – высота однородной атмосферы,  $\tau_{\phi}$  – коэффициент свечения,  $I_{\phi}$  – интенсивность свечения на высоте максимума свечения (взрыва),  $\vartheta_0$  – скорость и  $Z_r$  – зенитное расстояние радианта. Формула (3.12) основана на теории испарения, и она не учитывает дробление метеора. Для учёта влияния дробления на результат определения нами массы по методике, изложенной в [270], и по данным болидов Прерийной сети получен поправочный коэффициент, который учитывает приближённо влияние дробления на

результат определения массы. Полуэмпирическая формула имеет вид:

$$M_{\phi} = \frac{2 N^* I_{\phi}}{\tau_{\phi} \vartheta_0^3 \cos Zr}. \quad (3.13)$$

Для определения фотометрической массы суперболида нами использованы данные об абсолютной звёздной величине на высоте максимума излучения (взрыва). При расчёте фотометрической массы использованы данные, приведённые в таблице 3.13, где дана видимая звёздная величина, равная -20.4. Для определения фотометрической массы необходимо перейти от видимой звёздной величины к абсолютной. Абсолютная звёздная величина болида, приведённая к дальности 100 км, составляет -18.9<sup>m</sup>. Переход от звёздной величины  $m$  к интенсивности свечения  $I$  осуществлялся по формуле:

$$M = 24.3 - 2.5 \lg I. \quad (3.14)$$

Согласно расчётам, фотометрическая масса составляла 19.5 тонн. При расчёте масс использованы средние значения скорости  $\vartheta_0 = 15.2 \cdot 10^5$  см/с, высоты однородной атмосферы  $N^* = 7 \cdot 10^5$  см,  $z_r = 10^0$  и  $I_m = 6.92 \cdot 10^{17}$  эрг/с. Результаты расчёта массы, проводимые по формуле (3.12), составляют 15.5 т. Масса, которую мы оценивали графическим методом, составляет 19.9 т, а масса, вычисленная из уравнения кинетической энергии, составляет 20.5 тонн. Таким образом, среднее значение массы, которая нами (оценена) рассчитана тремя методами, составляет  $17,8 \pm 2,4$  т. Это значение близко к граничным значениям масс, полученных в [212-214].

**Определение (оценка) плотности суперболида.** По результатам данных комбинированных спутниковых и наземных наблюдений, которые приведены в таблице 3.13, определены высоты начала, максимума и конца следа, которые составляют, соответственно 38.2, 35.0 и 19.6 км. Несколько отличаются данные о высотах, приведённые в работе Кохировой и др. Как известно, Н. А. Коновалова для определения данных атмосферной траектории и, в частности, координат радианта и высоты болида использовала снимки, полученные в ГисАО, и снимок, полученный в городе Душанбе, разность между временем регистрации фотографий из этих двух пунктов менее 1.0 минут. Это

расхождение пренебрежимо мало и не будет сильно искажать полученные автором конечные результаты. Однако Кохирова и др. при расчёте данных координат радианта и высоты использовали снимки ГисАО и Хульбука, которые по времени регистрации отстоят (различаются) на 15 минут. Н. А. Коновалова и О. А. Алимов по данным базисных наблюдений и нескольким снимкам, полученным в ГисАО, определяли скорость ветра, составившую 18 км/с. Такая скорость ветра за 15 минут, существенно смещает след болида и по этой причине данные, полученные в работе Г. И. Кохировой, существенно отличаются от работы Н. А. Коноваловой. Следовательно, для расчёта (оценки) объёмной плотности нами использованы данные, полученные по результатам комбинированных спутниковых и наземных наблюдений, собранных Н. А. Коноваловой [223].

Напомним, что в работе [214] по результатам комбинированных спутниковых (кривых блеска) и данных базисных фотографических наблюдений суперболида были измерены координаты радианта, скорость, орбита, а также высоты начала максимума и конца следа суперболида, значение торможения до третьей высоты вспышки ( $H = 27.7$  км), которое составило  $-2$  км/с, а также среднее значение торможения для высоты конца следа метеора, полученное методом экстраполяции, равное  $8,5 \pm 0,5$  км/с. Эти параметры, определённые по результатам комбинированных спутниковых и наземных базисных наблюдений болида, позволили оценивать плотность суперболида тремя общеизвестными методами: а) по значению плотности атмосферы на высоте максимума блеска, б) по измеренным величинам торможения и с) с использованием критерия РЕ.

Для определения плотности суперболида первым методом нами использовалась формула, связывающая зависимость плотности от исходных параметров болида и атмосферы (разность плотностей атмосферы на высоте максимума и начала следа) и исправленная на дробление, согласно [103]. Формула имеет вид:

$$\delta = \gamma_1 \gamma_2 \left[ \frac{3A\lambda H \vartheta_0^2 (\rho_m - \rho_n)}{6QM_0^{1/3} \cos z_r} \right]^{2/3}, \quad (3.15)$$

здесь:  $A$  – коэффициент формы,  $\lambda$  – коэффициент теплопередачи,  $\gamma_1, \gamma_2$  – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние дробления на определение плотности. При расчёте были приняты:  $A = 1,21$ ,  $\lambda = 0,08$ ,  $Q = 8 \cdot 10^{10}$  эрг/г,  $\rho_m$  – плотность атмосферы на высоте максимума блеска (взрыва),  $\rho_n$  – плотность атмосферы на высоте начала,  $M_0$  – средняя масса суперболида. В результате расчёта для болида получена плотность  $\delta = 0,32$  г/см<sup>3</sup>.

Формула, которая позволяет определить плотность метеороида по измеренной величине торможения, имеет следующий вид:

$$\delta = \left[ \frac{A\Gamma\rho\vartheta^2}{M_0^{1/3} \left(-\frac{d\vartheta}{dt}\right)} \right]^{2/3}, \quad (3.16)$$

здесь:  $\Gamma$  – коэффициент сопротивления,  $\left(-\frac{d\vartheta}{dt}\right)$  – торможение болида. Значение плотности суперболида в случае  $\left(-\frac{d\vartheta}{dt}\right) = -2$  км/с,  $\Gamma = 0,5$  и с использованием высоты третьей вспышки ( $h = 27,7$  км) составляет  $0,69$  г/см<sup>3</sup>. При использовании высоты конца болида  $h = 19$  км и величины торможения  $\left(-\frac{d\vartheta}{dt}\right) = -8$  км/с, плотность болида составляет  $0,78$  г/см<sup>3</sup>, что незначительно отличается от предыдущего значения плотности и очень близко к нему.

Для определения плотности по критерию PE мы использовали следующую известную формулу, которая связана с параметрами суперболида следующим выражением [74]:

$$PE = \lg \rho_E + 0,42 \lg M_0 - 1,49 \lg \vartheta_0 + 1,29 \lg \cos z_r, \quad (3.17)$$

где  $\rho_E$  – плотность атмосферы на высоте конца  $h_E$  траектории болида. PE-критерий характеризует прочность или способность к разрушению метеороидов. Болиды согласно классификации, разделяются на четыре группы: к I группе относятся тела, похожие по составу на обыкновенные хондриты с плотностью  $3,7$  г/см<sup>3</sup>; метеороиды группы II имеют плотность  $2,1$  г/см<sup>3</sup> и являются углистыми хондритами; метеороиды группы IIIA со средней

плотностью  $0.6 \text{ г/см}^3$  состоят из кометного материала; метеороиды группы ШВ имеют плотность  $0.2 \text{ г/см}^3$  и представляют собой рыхлое кометное вещество (типа Драконид).

В зависимости от типов болидов значения PE-критерия изменяются в следующих пределах: для I типа  $PE > -4.60$ ; для II типа  $-5.25 < PE \leq -4.60$ ; для типа ША  $-5.70 < PE \leq -5.25$ , для типа ШВ  $PE \leq -5.70$ .

Из уравнения (3.17) следует, что в случае использования исходных параметров болида, значению параметра  $PE = -5.33$ , который принадлежит к группе ША, соответствует плотность  $0.6 \text{ г/см}^3$ .

Среднее вычисленное значение плотности суперболида тремя методами составляет  $1.2 \pm 0.1 \text{ г/см}^3$ . Такая объёмная плотность характерна, как для астероидов, так и для обыкновенного кометного вещества. Согласно данным об орбите, полученным в [214], болид, очевидно, имел астероидное происхождение. Анализ полученных орбитальных характеристик суперболида позволил авторам предположить его астероидное происхождение. С другой стороны, внутри пояса астероидов и внутри орбиты Юпитера имеются немалочисленные кометы, орбиты которых расположены между поясом астероидов и орбитой Юпитера.

Данные об атмосферной траектории суперболида, полученные как по данным наземных наблюдений, так и по кривым блеска со спутниковых данных, свидетельствуют о том, что высота максимума блеска (взрыва) близка к высоте начала траектории.

Соответственно, суперболид взорвался и в виде многочисленных мелких фрагментов упал на поверхность Земли. Полученные данные о форме кривой блеска и свойствах суперболида близки к аналогичным данным болида Ванбурра рокчале (типа Aten-орбиты, это первый ахондрит с известной орбитой), завершившимся падением метеорита.

**Таблица 3.14. - Хронологические данные болидов завершившихся падением метеоритов, у которых инструментально измерены орбиты**

Название метеорита	Дата падения	Тип метеорита	$V_{\infty}$ , км/с	A	E	I	$\omega$	$\Omega$	P	Porosity	$\Delta$
Пиршбрам	4. 07.1959	H5	20.89	2.4	0.67	10.5	241.8	17.8	0.64	0°	3.57°
Лост Сити	1.04.1970	H5	14.2	1.66	0.42	12.0	161.1	283.8	0.68	6.0±4.5	3.4±0.18
Инисфри	2.06.1977	L5	14.54	1.87	0.47	12.2	177.9	317.5	-	5.8±4.7	3.35±0.16
Пикскилл	10.9.1992	H6	14.72	1.49	0.41	4.9	307.6	17.0	0.8	6,0±4,5	3.4±0.18
Тагиш Лаке	1.08.2000	C2	15.8	1.98	0.55	2.0	224.4	297.9		40±1	1,64
Моравка	5.06.2000	H5	22.5	1.85	0.47	32.2	203.5	46.3	0.8	<1	3,59
Неусчван-стейн	4.06.2002	EL6	20.95	2.4	0.67	11.4	241.2	16.8	0.93	9,3±3,9	3,49
Парк Форест	3.27.2003	L5	15.5	2.53	0.68	3.2	237.5	6.1	0.83	5,8±4,7	3,35
Вилалвето де ла Пена	1.04.2004	L6	16.9	2.3	0.63	0.0	132.3	283.7		4,7±0,1	3,42
Ванбурра рокчолле	7.02.2007	Euc	13.4	0.85	0.25	9.1	209.9	297.6	0.24	7,8±6,8	2,86
Алмахате Ситта	10.07.2008	Ure-Anm	12.42	1.31	0.31	2.5	234.5	194.1	0.60	15-20	2,3 2,5
Буззард Коулле	11.21.2008	H4	18.0	1.23	0.22	25.5	212.0	238.9		-	-
Джесенисе	04.9.20009	L6	15.8	1.75	0.43	9.6	190.5	19.2	0.60	-	-
Гринсби	25.09.2009	H4-6	20.91	2.04	0.52	28.07	159.9	182.9	0.75	6,7	3,37
Челябинский	15.02.2013								0.84		

Таблица 3.15. - Физические характеристики и высоты болидов, завершившихся падением метеоритов

Название	Масса, кг	$\delta$ , г/см <sup>3</sup>	Тип метеорита	Вост. масса	$V_{\infty}$ , км/с	$h_B$ , км	$h_m$ , км	$h_e$ , км	P	$I_{max}$
Пиршбрам	1300	3.57	H5	5.8	20.89	98	44	13.3	0.64	-19
Лост Сити	160	3.4	H5	17.0	14.2	86	41	19.5	0.68	-12
Инисфри	40	3.35	L5	4.58	14.54	>62	55.6	19.9	-	-12
Пикскилл	5000	3.34	H6	12.4	14.72	60	38.6	34	0.77	-16
Тагиш Лаке	65000	1.64	C2	~10	15.8	48??-	37.0	29	0.58	-22
Моравка	1500	3.59	H5	0.63	22.5	80	36-29	21	0.8	-20
Неусчван-стейн	300	3.49	EL6	6.19	20.95	85	20,8	16	0.93	-17
Парк Форест	10000	3.35	L5	18	15.5	82	29	18	0.83	-22
Вилалвето де ла Пена	600	3.42	L6	3.5	16.9	-	28	22	-	-18
Банбурра рокчолле	22	2.86	Euc	0.32	13.4	62.8	54.8	29.6	0.24	-9
Алмахате Ситта	70000	2.3	Ure-Anom	3.95	12.42	65?	44	32	0.64	-20
Буззард Коулле	-	-	H4	>50	18.0	-	-		-	
Джесенисе	170	-	L6	3.6	15.8	88	46	18	0.60	-15
Гринсби	30	3.37	H4-6		20.91	100	39.4	19.6	0.75	-15
Челябинский	5000 кг				16.6	95.0	26.5	13.0	0.84	-28

Таким образом, в соответствии с полученными результатами об объёмной плотности болида на базе комбинирования спутниковых и наземных результатов наблюдений следует сделать вывод о том, что суперболид представлял собой кусок ядра кометы. Полученные данные о природе суперболида свидетельствуют о том, что он имеет кометное происхождение.

Очевидно, рыхлая структура суперболида стала причиной его взрыва на высоте 35 км, которая близка к высоте начала под аэродинамическим давлением 1.6 МПа.

В таблицах 3.14 и 3.15 нами в хронологическом порядке обобщены данные, включая физические характеристики и высоты болидов, завершившихся падением метеоритов, у которых инструментально измерены орбиты. Орбиты приведены к эпохе J2000.

### **3.8. Распределение метеорных тел по массам в некоторых метеорных потоках**

Исследование структуры метеорных потоков и особенно распределения метеорных тел по массам (параметр  $S$ ) относится к важнейшим пространственно-временным характеристикам, как метеорных потоков, так и спорадического фона. Данные о распределении метеорных тел по массам представляют большие научные и практические значимости и, в том числе, для определения притока метеорного вещества и знания метеорной обстановки в околоземном пространстве. Параметр  $S$  в случае оптических наблюдений определяется по интегральным распределениям, по массам, вычисленным по кривым блеска метеоров. А в случаях радиолокационных наблюдений параметр  $S$  для спорадического фона и некоторых из известных главных ночных метеорных потоков определялся по интегральным распределениям метеоров по амплитудам или длительностям радиоэха [215-223]. При этом, параметр  $S$  определялся по общему количеству измеренных длительностей метеоров потока плюс фон, считая, что количество метеоров спорадического фона в дате максимума активности существенно меньше, чем количество метеоров потока, и не оказывает существенного влияния на определение конечных результатов.

Однако при определении параметра  $S$  по результатам радиолокационных наблюдений метеоров с одного пункта не учитывалось влияние дробления и других фактов на формирование кривой ионизации метеора и предполагалось, что: а) отражение радиоволн от метеорных следов происходит от области максимальной ионизации; б) масса метеорных тел пропорциональна их измеренным значениям длительностей или величины амплитуды отражённых сигналов; и в) распределение метеорных тел по массам тождественно распределениям метеорных тел по длительностям или амплитудам отражённых радиозёх. Но приемлемость подобных допущений нуждается в экспериментальных подтверждениях.

Для убеждения в надёжности и достоверности полученных данных о распределении метеорных тел по массам, необходимо определить параметр  $S$  по одним и тем же массивам наблюдений, позволяющим одновременно определить параметр  $S$  как по интегральным распределениям метеоров по длительностям радиозёха, так и по вычисленным значениям масс по кривым ионизации метеоров, отделяемых от спорадического фона по координатам радиантов, скоростям и элементам орбит. В целом, параметр  $S$  для метеорных потоков по вычисленным значениям масс метеорных тел по кривым ионизации вообще не был изучен.

Для исследования параметра  $S$  в метеорных потоках и проверки обоснованности вышеперечисленных допущений при определении параметра  $S$  использованы результаты базисных радиолокационных наблюдений ряда известных главных ежегодных метеорных потоков с 4-5 пунктов в ГисАО Института астрофизики НАНТ на радиокомплексе МИР-2 [156-159].

Сначала ограничимся рассмотрением вышеупомянутых предположений. При этом использованы около 700 ионизационных кривых метеоров, полученных по результатам базисных радиолокационных наблюдений метеоров в ГисАО в 1976-1980 гг. Результаты анализа месторасположения зеркальной точки на ионизационные кривые метеоры показали, что высоты зеркального радиоотражения в среднем расположены на  $0,4 \pm 0,8$  км ниже, чем

высоты максимальной ионизации, а среднее значение отношения линейной электронной плотности в точке максимума  $q_m$  и в зеркальной точке  $q$  составляет  $q_m/q = 1,08$ . Эти результаты позволяют в качестве исходного выражения для определения значения линейной электронной плотности в отражающей точке (следовательно, и массы метеороида) использовать формулы, полученные для определения массы метеороида по величине линейной электронной плотности на высоте максимальной ионизации.

Исходные выражения для определения линейной электронной плотности для метеорных следов переуплотнённого типа и массы метеороида без учёта влияния дробления и других факторов на формирование кривой ионизации имеют вид [71, 221-223]:

$$q = [(\tau + r^2 / 4D) D] / A \lambda^2, \quad (3.18)$$

$$q_m = 4 \beta M_0 \cos Z_r / 9\mu H^* [(Q - 2/3 Q_n) / (Q - Q_n)]^3, \quad (3.19)$$

где:  $\tau$  – длительность отражения,  $\lambda$  – длина волны,  $e$ ,  $m$  – заряд и масса электрона,  $c$  – скорость света,  $r$  – начальный радиус следа и  $D$  – коэффициент амбиполярной диффузии,  $m_0$  – начальная масса метеорного тела,  $\beta$  – коэффициент ионизации,  $Z_r$  – зенитное расстояние радианта,  $\mu$  – масса атома метеорного вещества,  $H^*$  – высота однородной атмосферы,  $Q_n$  – энергия, необходимая для нагревания 1 г метеорного вещества до температуры испарения,  $Q$  – энергия, необходимая для нагревания и испарения 1 г метеорного вещества. Уравнение (3.18) справедливо тогда, когда уменьшение электронной концентрации в следе происходит только вследствие амбиполярной диффузии. Согласно [183], длительность радиоэха с учётом прилипания электронов к нейтральным частицам, турбулентной диффузии и фотоотлипания для метеоров, наблюдаемых в ночное  $\tau_n$  и дневное время  $\tau_d$  определяется выражениями:

$$\tau_D = q \lambda^2 e^2 / 4 \pi^2 D m c^2 - r^2 / 4 D, \quad (3.20)$$

$$\tau_n = [3 D / \tau \omega H (\tau_n^{\text{ектн}} - t)^3 + t], \quad (3.21)$$

где:  $t$  – постоянная времени мелкомасштабных вихрей,  $\omega$  – удельная энергия

диссипации атмосферных вихрей,  $k$  – скорость прилипания.

Учитывая уравнения (3.20) и (3.21) и поправочный коэффициент  $K = 3 \pm 2$ , полученные в [97, 99, 101], с учётом дробления и других факторов, влияющих на формирование кривой ионизации, исходные формулы для вычисления масс метеорных тел по измеренным значениям длительности в ночное  $\tau_n$  и дневное время суток  $\tau_d$ , получим:

$$M_n = 3\mu N^* / 4A\lambda^2\beta (Q - Q_n / Q - 2/3Q_n)^3 \cdot \{[\omega/3D (\tau_n - t)^3 + t] e^{-k\tau_n} + r^2/4D\} D, \quad (3.22)$$

$$M_d = 3\mu N^* / 4A\lambda^2\beta (Q - Q_n / Q - 2/3Q_n)^3 \{[\omega/3D (\tau_d - t)^3 + t] J + k / J + r^2/4D\} D. \quad (3.23)$$

Формулы (3.22) и (3.23) позволяют на основе измеренных значений длительности радиоэха с учётом дробления и процессов деионизации вычислить массу метеоров, наблюдаемых в дневное и ночное время суток. Для определения масс поточных метеороидов из отдельных циклов радиолокационных наблюдений метеорных потоков использованы результаты базисных радиолокационных наблюдений метеоров, наблюдаемых в период действия ночных потоков, таких как Геминиды, Квадрантиды,  $\delta$ -Аквариды и  $i$ -Аквариды в 1976-1980 гг., данные радиолокационных наблюдений метеоров, полученных в период действия потока Геминид в 1968 г. и наблюдательный материал с 6 по 12 мая с 4-х пунктов в 1969 г. в ГисАО. При этом на основании первичных наблюдательных данных для каждого метеора измерялись  $\tau$  – длительность радиоэха,  $R$  – дальность до метеорного следа,  $\Delta d$  – разность дальностей между центральным и выносным пунктами,  $\Delta t_i$  – разность времени полёта между центральным и выносным пунктами. По результатам измерения первичных данных и их обработки для каждого метеора определены  $h$  – высоты зеркальной отражающей точки центрального пункта,  $A, Z$  – координаты отражающей точки,  $\alpha_r, \delta_r$  – координаты радианта,  $V$  – скорости импульсно-дифракционным и пеленгационно-временным методами. Отбор метеоров, принадлежащих потокам, проводился по координатам радиантов и скоростям, а для потоков с северными и южными ветвями - по их элементам орбит.

Общее количество метеоров, принадлежащих известным потокам, составляет: 220 – Геминиды, 23 – Квадрантиды, 41 – Северные  $\delta$ -Аквариды, 103

– Южные  $\delta$ -Аквариды, 89 –  $i$ -Аквариды, 100 –  $\eta$ -Аквариды, 27 –  $\gamma$ -Пегасиды, 106 –  $\nu$ -Писциды, 91 –  $o$ -Цетиды, 49 – С.М.Ариетиды, 36 – Ю.М. Ариетиды. Для вычисления значений  $r$ ,  $D$  и  $k$  нами использованы формулы, приведённые в [79].

Определяя из наблюдений  $q_m$ ,  $H^*$ ,  $\cos Z_r$ , скорость  $V$  и принимая  $\mu$ ,  $Q$ ,  $Q_n$  постоянными (причём  $\mu = 3,82 \cdot 10^{-23}$  г,  $Q = 8 \cdot 10^{10}$  эрг/г,  $Q_n = 2 \cdot 10^{10}$  эрг/г), по формулам (3.22), (3.23), нами вычислены начальные массы метеорных тел для каждого метеорного потока. Анализ вычисленных значений масс метеороидов показывает, что их значения для метеорного потока  $\eta$ -Акварид заключаются в диапазоне от  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$  г,  $o$ -Цетид - в интервале  $10^{-4} \div 10^{-1}$  г,  $\nu$ -Писцид в диапазоне  $5 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-1}$  г,  $\gamma$ -Пегасид в интервале  $10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-1}$  г, майских Ариетид  $5 \cdot 10^{-4} \div 10^{-1}$  г. Максимум распределения метеорных тел по массам для  $\eta$ -Акварид находится в диапазоне  $10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-2}$  г, для  $\nu$ -Писцид  $10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-2}$  г, для  $o$ -Цетид  $10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-3}$  г,  $\gamma$ -Пегасид  $10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-3}$  г, майских Ариетид  $5 \cdot 10^{-3} \div 10^{-2}$  г. Максимум распределения для ночных метеорных потоков Северных и Южных  $\delta$ -Акварид находится в интервале  $5 \cdot 10^{-3} \div 10^{-2}$  г, у метеорных потоков Северных  $i$ -Акварид  $10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-2}$  г и Южных  $i$ -Акварид  $5 \cdot 10^{-3} \div 10^{-2}$  г.

На основе вычисленных значений масс метеоров нами для каждого метеорного потока построена гистограмма интегрального распределения метеоров по массам. Графики интегрального распределения метеорных тел по массам в некоторых ночных и дневных метеорных потоках приведены на рисунках 3.5 и 3.6.

Однако из данных, приведённых как для ночных, так и дневных метеорных потоков наблюдаются кривые с изломом. Из данных, представленных для метеорных потоков, следует, что графики зависимости  $\lg N$  от  $\lg m$  имеют в целом три вида. Для первого вида распределения в зависимости  $\lg N$  от  $\lg m$  характерно линейное уменьшение масс частиц. К этим группам относятся метеорные потоки Геминид,  $i$ -Акварид, Пегасид и Северных майских Ариетид. Ко второй группе распределения относятся кривые с одним резко выраженным изломом. К этим группам кривых относятся метеорные

потоки Северных и Южных  $\delta$ -Акварид, Писцид,  $\nu$ -Писцид и Южных майских Ариетид. К третьему виду кривых распределения по массам относятся кривые с двумя изломами. К этой группе распределений относится дневной метеорный поток  $\eta$ -Акварид и о-Цетид. Излом в области меньших масс может обуславливаться чувствительностью аппаратуры. Поэтому, нами для определения параметра  $S$  использовалась область наиболее статистической обеспеченности масс метеороидов от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  г.

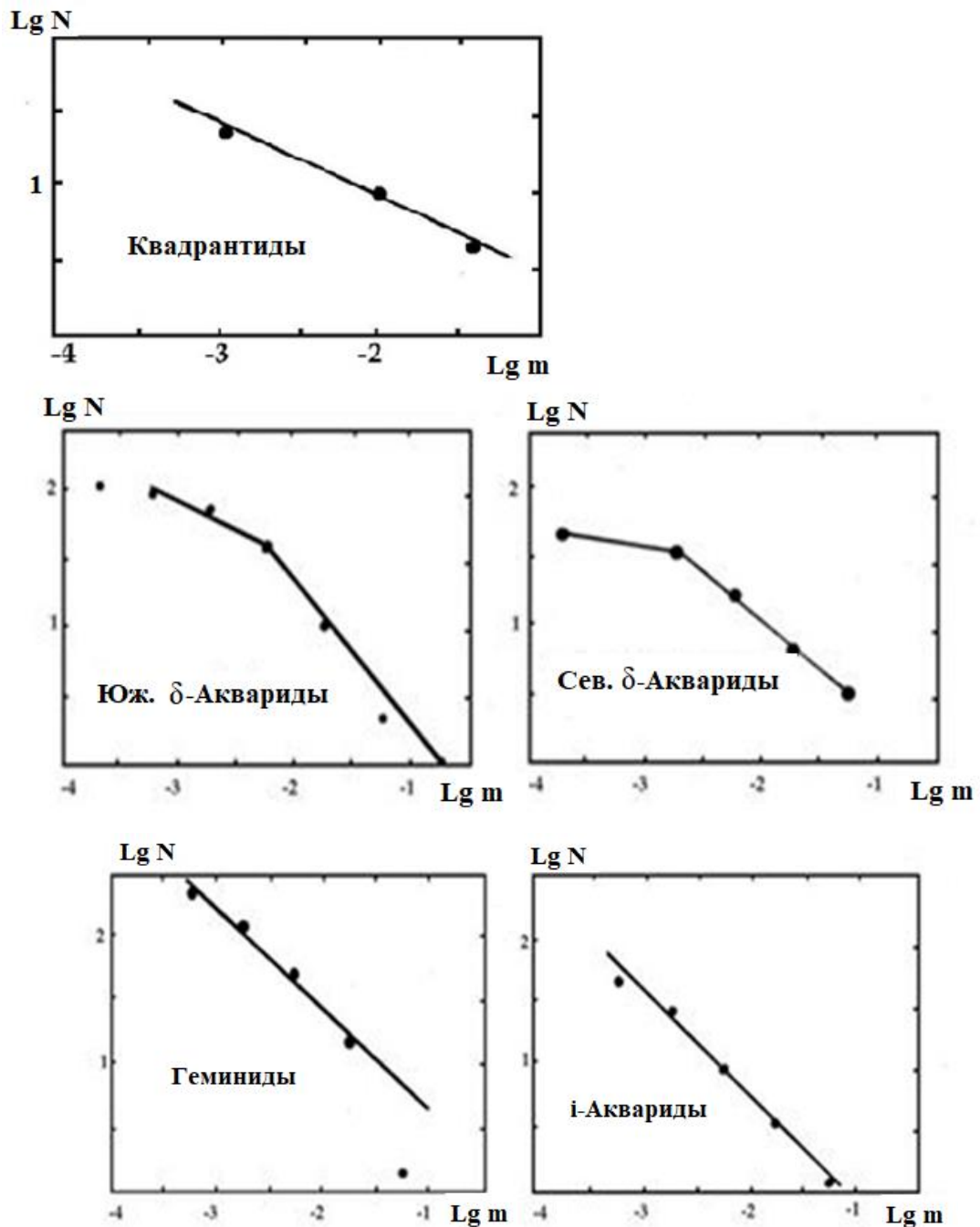


Рисунок 3.5. - Интегральное распределение метеорных тел по массам в некоторых ночных метеорных потоках

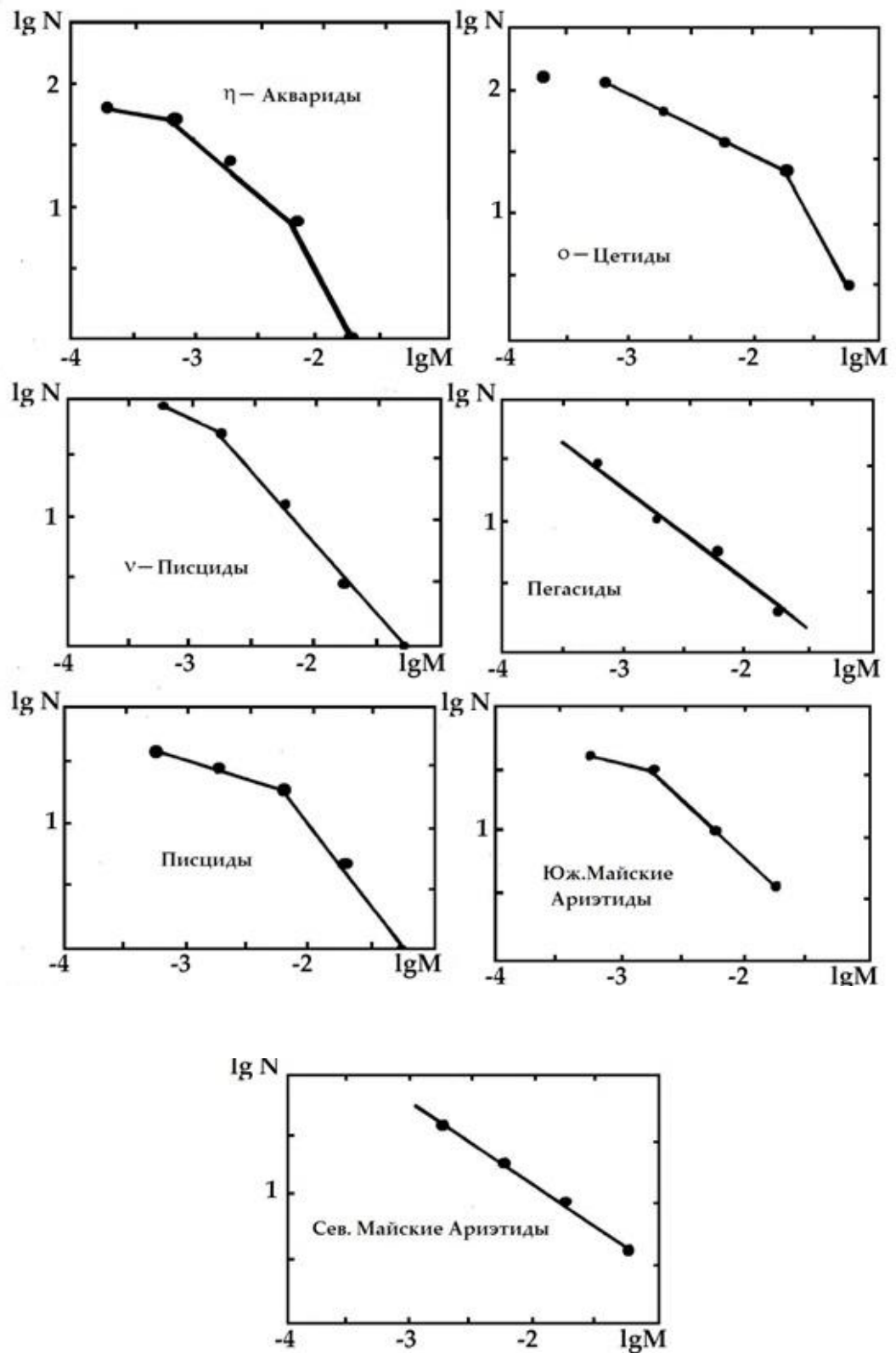


Рисунок 3.6. - Интегральное распределение метеорных тел по массам в некоторых майских дневных метеорных потоках

Далее зависимость  $\lg N$  от  $\lg m$  для каждого линейного участка кривых

можно представить в виде:

$$\text{Lg } N = a - b \text{ lg } m,$$

где  $a = \text{const}$ ,  $b$  – показатель интегрального закона распределения по массам.

Далее методом наименьших квадратов найдены величины,  $a$  и  $b$  для каждого потока.

Результаты определения параметра  $S$  отдельно для ночных и дневных метеорных потоков представлены в таблицах 3.16 и 3.17.

**Таблица 3.16. - Параметр  $S$  для ряда ночных метеорных потоков по различным источникам**

Источник	Метеорные потоки				
	С. $\delta$ -Аквириды	Ю. $\delta$ -Аквириды	Геминиды	Квадрантиды	i-Аквириды
Настоящая работа	1,76	1.7	1.8	1.6	1.86
[103]	-	-	1.7	1.6-1.8	1.8
[217]	-	-	1.6-1.9	-	-
[215]	-	-	1.69	1.94	-
[55]	-	-	1.64	1.56	-
[113]		1.80	1.68	1.55	-
[222, 223]	-	-	1.64÷1.75	-	-
[252]	-	-	1.5÷2.0	-	-
[28]	-	-	-	1.64	-
[113]	-	1.9÷2.0	-	-	-
[219]	-	-	1.7	1.8	-

В [103, 104] структуры метеорных потоков Квадрантид, Геминид и Персеид были исследованы по результатам систематических радиолокационных наблюдений метеоров в ГисАО за 1965-1973 гг. Среднее значение параметра  $S$ , найденное автором за указанный период для метеорного потока Геминид, составляет 1,68. Близкое значение параметра  $S$  для Геминид получено нами по интегральным распределениям метеоров по массам для этого же периода наблюдений за 1968 г. [103, 104].

R. S. Vlaauw в работах [220, 221] по результатам наблюдений метеорного потока Геминид в 2015 г. с использованием канадского метеорного

орбитального радара (CMOR) Западной группы метеорной физики, восьми широкоугольных оптических камер Центра космических полётов Маршалла (MSFC) и телескопов программы MSFC по мониторингу лунных столкновений определял параметр индекса масс для Геминид.

Результаты этих наблюдений позволили для диапазона масс от  $1,8 \cdot 10^{-4}$  г до 30 г рассчитать параметр - индекс массы  $S$  для потока Геминид, который составлял  $1,68 \pm 0,04$ .

C. Schult, P. Brown и др. [55] по результатам двухгодичного цикла наблюдений головного эха на радаре с большой апертурой MAARSY, расположенного в северной Норвегии ( $69,30^\circ$  с.ш.,  $16,04^\circ$  в.д.) идентифицировали 33 метеорных потока, которые находятся в каталоге метеорных данных MAC. Ими для потоков Персеид (PER), Геминид (GEM) и Квадрантид (QUA), Орионид (ORI) определены дифференциальные индексы массы  $S$ , которые расположены в диапазоне ( $s$ ) 1,5-2.0. Эти результаты для метеорных потоков Геминид (GEM) и Квадрантид (QUA) приведены в таблице 3.16.

В работах [222, 223] по распределению метеорных сигналов по длительностям отражённых от радара обратного рассеяния Гаданки (Индия) для трёх групп длительности радиоэха:  $T < 0,4$ ,  $T = 0,4-1$  и  $T > 1$  с, в 2008 г. были определены параметры индекса массы  $S$  для метеорного потока Геминид. Обнаружено, что индекс массы в период максимума активности имеет U-образную форму с минимальным значением пиковой активности, которая составляет 1.64 и 1.65 для 2003 и 2005 гг., соответственно. Индекс массы имеет U-образную форму с минимальным значением вблизи времени пиковой активности потока и хорошо описывается в рамках математического моделирования метеороидного потока Геминид Г. О. Рябовой [218]. Эти результаты свидетельствуют о надёжности определения параметра  $S$  по интегральным распределениям метеорных тел по длительностям радиоэха, вычисленным с учётом процессов деионизации и дробления метеороидов.

**Таблица 3.17. - Параметр S в некоторых дневных метеорных потоках**

Источник	$\eta$ -Аквариды	о-Цетиды	$\nu$ -Писциды	$\gamma$ -Пегасиды	Писциды	С.М. Ариетиды	Ю.М. Ариетиды
Настоящая работа	1,8	1,4	1,8	1,6	1,4	1,7	1,9
[307]	1,85	-	-	-	-	1.68	1.85

Согласно данным, приведённым в таблице 3.17, значения параметра S для ночных метеорных потоков неоднозначно и находится в интервале 1,5-1,8. Данные, полученные для метеорных потоков Геминид и Квадрантид, по всем источникам показывают минимальное значение параметра S, которое равно 1.55. Причём, почти одинаковые значения параметра S имеют метеорные потоки Северных и Южных  $\delta$ -Акварид, которые принадлежат одному метеороидному рою. Одинаковые значения параметра S характерны дневным метеорным потокам о-Цетид и Писцид, представляющих Северную и Южную ветви метеорного потока одного рою. Согласно данным, представленным в таблице 3.17, параметр S для дневных метеорных потоков находится также в широком диапазоне от 1,4 до 1,9. Причём потоки о-Цетид и Писцид, которые относятся к одному метеорному рою, имеют одинаковое значение параметра S. Несмотря на то, что параметр S для метеорного потока  $\eta$ -Акварид определялся по разным массивам данных наблюдений, полученные данные хорошо согласованы.

## **ГЛАВА 4. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАНТОВ, СКОРОСТЕЙ, ОРБИТ И ДАННЫХ АТМОСФЕРНЫХ ТРАЕКТОРИЙ МЕТЕОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИООПТИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

### **4.1. Измерение радиантов и скоростей метеоров по результатам радиолокационных наблюдений**

Одной из важнейших проблем метеорной астрономии и области освоения космического пространства является получение данных о распределении метеорного вещества в околоземном и межпланетном пространстве. Особенно изучение таких кинематических и физических характеристик метеоров как радианты, скорости, элементы орбит и данные атмосферных траекторий метеороидов имеют первостепенное научное и прикладное значение. Совокупность физико-кинематических характеристик метеороидов представляет большой интерес не только в области метеорной астрономии, геофизики и области распространения радиоволн, но и представляет большую ценность в области космонавтики и космогонии Солнечной системы. В частности, данные о физических свойствах метеороидов необходимы для исследования параметра распределения метеорных тел по массам, оценки плотности падающего потока и притока метеорного вещества в околоземном и межпланетном пространстве и т.д.

Один из наиболее достоверных и надёжных способов получения информации о распределении метеоров по кинематическим и физическим свойствам в околоземном и межпланетном космическом пространстве основан на результатах наземных круглосуточных базисных радиолокационных наблюдений, так как визуальные [203, 226-230], фотографические [61-63, 65, 66, 84, 86, 186-188], камеры болидные сетки [28, 62, 114-122] телевизионные [68, 69, 231] и видео наблюдения на камерах CAMS, EDMOND and SonotaCo [113-122]) проводятся только лишь в ночное и безоблачное время суток. Следовательно, начиная со второй половины прошлого века в связи с повседневно возрастающим интересом к исследованию космического пространства,

исследователи в области метеорной астрономии уделяли особое внимание развитию и внедрению радиолокационных методов, которые позволяют получать информацию о метеороидах круглосуточно, независимо от времени суток и погодных условий.

Для изучения совокупности физико-кинематических и динамических характеристик метеоров и свойств Земной атмосферы ещё в прошлом веке были созданы специальные комплексы радиоаппаратуры различной чувствительности. В частности, такие комплексы радиоаппаратуры были созданы за рубежом в Англии (Джодрелл-Бэнк), Канаде (Оттава), США (Гарвард), Японии (Сигараки), Чехии (Ондржеёв), Словении, Новой Зеландии, Австралии (Аделаида) и т.д., а в СССР – на Украине (Харьков), РСФСР (Казань, Обнинск, Томск) и в Таджикистане (ГисАО) и т.д. С помощью этих комплексов радиоаппаратуры по некоторым международным и национальным программам был организован и проведён ряд циклов годовых базисных радиолокационных наблюдений метеоров, результаты которых обобщены и отражены в десятках научных статей и частично опубликованы в виде каталогов [7, 26, 29, 30, 31, 38, 41, 44 - 49, 50-60, 71, 73, 78, 100, 106, 113, 134-137, 190, 224, 225, 232, 237, 242, 247-249, 251, 253, 256-260, 263, 275, 277, 296, 297].

Значительные успехи были достигнуты и в развитии методов измерения радиантов, скоростей и элементов орбит индивидуальных метеоров, таких как импульсно-дифракционный, дальномерно-дифракционный, дальномерный, пеленгационно-временной, метод наклонного отражения радиоволн от следа и методы наблюдений головного эха, сущность, преимущества и недостатки каждого изложены в [7]. Однако высокоточный метод измерения радиантов и скоростей метеоров, основанный на наблюдениях головного эха, разработанный ещё в 1950 гг., не нашёл широкого применения фактически до 1990 гг. Только после 1990-х годов в некоторых странах Европы, Японии, Канаде и т.д. возобновили метод измерения скоростей и радиантов метеоров по отражённым сигналам от головного эха. Но головное эхо производит

небольшая часть метеоров (в основном яркие) при реализации наблюдений на мощные радары. Следовательно, исследование метеоров и в настоящее время базируется на радиоотражении от ионизированных следов метеоров.

Необходимо отметить, что измерения радиантов, скоростей метеоров по результатам радиолокационных наблюдений в большинстве вышеперечисленных станций основаны на импульсно-дифракционном методе. Результаты, полученные на этих станциях таким методом, позволяли проследить за метеорной активностью, исследовать радианты скоростей и орбит метеорных потоков и ассоциаций, расположенных в северной части небесной полусферы. Единственная метеорная станция, которая проследила за активностью метеорной обстановки в южном полушарии и по методам непрерывной радиолокации проводила измерения радиантов и скоростей индивидуальных метеоров до +6 звёздной величины, была расположена в Австралии. Исходя из этого, в конце 1960-х и начале 1970-х годов особый интерес представляло изучение метеорной обстановки в районе экватора и южной части земного полушария.

В 1968-1970 гг. для исследования метеорной обстановки на экваторе в Африке в районе города Могадишо (Сомали) была организована Советская экваториальная метеорная экспедиция. В период действия этой программы одновременно и в Гиссарской астрономической обсерватории (ГисАО) Института астрофизики НАНТ были организованы и проведены радиолокационные наблюдения метеоров с четырёх пунктов. Результаты измерения радиантов, скоростей и элементов орбит индивидуальных метеоров на экваторе на основе импульсно-дифракционного метода опубликованы в виде каталога [50]. Но каталог содержит результаты радиолокационных наблюдений метеоров только в ночное время суток.

При измерениях методом Дэвиса в Душанбе ( $\varphi = 38^\circ$  с.ш.) доступны радианты со склонениями до  $-32^\circ$ , в Оттаве ( $\varphi = 45^\circ 3'$  с.ш.) до  $-24^\circ$ , в Харькове ( $\varphi = 48^\circ$  с.ш.) до  $-22^\circ$ ; в Обнинске ( $\varphi = 52^\circ$  с.ш.) до  $-18^\circ$ , то есть круглогодичные

наблюдения в Харькове и Оттаве могут охватывать радианты только в северном полушарии.

Соответственно, в Институте астрофизики НАНТ был предложен пеленгационно-временной радиометод измерения радиантов и скоростей индивидуальных метеоров [296], у которого погрешность  $\sigma_z$  практически не зависит от величины зенитного угла, что позволяет в Душанбе измерять радианты со склонениями до  $-45^\circ$ , то есть охватывать круглогодичными наблюдениями эклиптические широты до  $-23^\circ$ . Иными словами, применение пеленгационно-временного радиометода позволяет при наблюдениях в Душанбе охватывать круглогодичными измерениями область неба с эклиптическими широтами от  $+90^\circ$  до  $-23^\circ$ , где расположена основная масса метеорных радиантов.

В монографии [60] было отмечено: «До настоящего времени этот метод ещё не проверен экспериментально. Для того, чтобы метод по точности мог конкурировать с импульсно-дифракционным, необходимо все дальности измерять с ошибками не более  $\pm 50$  м». Сконструированный комплекс МИР-2 в ГисАО позволял измерять дальности с четырёх приёмных станций с ошибками  $\pm 20$  м.

Одновременно с радиантами и скоростями в [192, 193] впервые приводятся и высоты метеоров, где, измеряя значение длительности радиоэха для центрального пункта, можно определять значения линейной электронной плотности и, следовательно, радиовеличины (магнитуды) и массы метеорных тел.

Исходя из этих соображений, измерение скоростей и радиантов метеорных тел в радиолокационной лаборатории Института астрофизики АН Таджикистана в 1968-1970 гг. проводилось ежемесячно пеленгационно-временным радиометодом, а точнее – его дальномерным вариантом.

Суть метода заключается в следующем. Если имеется 3-4 разнесённых на несколько километров приёмных пунктов, в одном из которых обычно расположен импульсный передатчик радиолокатора, то, измеряя в каждом

пункте точную дальность до метеорного следа и время пролёта метеором зеркальной точки данного пункта, по разности дальностей и времени пролёта триангуляционными методами можно вычислить координаты зеркальных отражающих точек, направление полёта (радиант) и скорость метеора. На практике обычно в качестве времени пролёта зеркальных точек берут время образования экстремумов на амплитудно-временной картине в каждом приёмном пункте. Разность времени пролёта между разными пунктами при этом остаётся практически такой же, как и разность времени пролёта зеркальных точек. При расстояниях между центральным и тремя вынесенными пунктами приёма порядка 4 км, со среднеквадратичной ошибкой измерения дальностей порядка  $\pm 20$  м, со среднеквадратичной ошибкой в измерении времени порядка  $\pm 1$  мс, дальномерный вариант пеленгационно-временного метода обеспечивает среднеквадратичные погрешности измерений азимута радианта  $\sigma A_R = 1^\circ,8 / \sin Z_R$ , зенитного угла радианта  $\sigma Z_R = 1^\circ,2$ , скорости метеора  $\sigma V = \pm 5\%$ , относительной погрешности азимута зеркальной точки  $\sigma A = 0.9 / \sin Z$ , зенитного угла зеркальной точки  $\sigma Z = 0.9 / \cos Z$ , среднеквадратичная погрешность определения высоты отражающей точки основного вынесенного пункта  $h = 2$  км.

Следует отметить, что при этом методе могут использоваться амплитудно-временные картины худшего качества с 1-2 экстремумами вместо 3-4, какие необходимы при импульсно-дифракционном методе. Это примерно вдвое увеличивает чувствительность метода (по числу измеренных радиантов и скоростей). Скорость метеора при пеленгационно-временном методе определяются как по времени пролёта метеором отдельных участков пути, так и по дифракционной картине. По сходимости этих скоростей оценивается точность измерений. За окончательную измеренную скорость принимается либо средняя из двух, либо та, по которой меньше ошибки измерений.

## 4.2. Аппаратура для измерений радиантов и скоростей метеоров пеленгационно-временным радиометодом

Для измерений радиантов и скоростей метеоров пеленгационно-временным радиометодом в 1964-1968 гг. был создан специальной комплекс радиолокационной аппаратуры МИР-2 (метеорный импульсный радиолокатор второго поколения) [104, 159]. Его устройство, принцип действия и подробные характеристики приведены во второй главе.

Антенны в режиме измерения радиантов и скоростей – полуволновые вибраторы, расположенные на высоте  $\lambda/3$  над землёй, имеющие максимальный коэффициент усиления по мощности  $\sim 5.3$  под углом места около  $45^\circ$  в направлениях на восток и запад.

Предельная звёздная величина метеоров при измерении радиантов и скоростей от  $+5.7^m$  до  $+5.0^m$ , что при скорости  $40 \text{ км/с}^{-1}$  соответствует минимальной массе регистрируемых метеорных тел  $(0.5-1) 10^{-3} \text{ г}$ .

Регистрация радиолокационных данных метеоров проводилась на 35-мм киноплёнку с экранов 12-лучевого фотоиндикатора, а также с экранов 7-лучевого индикатора с ждущее-непрерывной протяжкой плёнки.

МИР-2 позволял измерять следующие параметры сигналов, отражённых от метеорных следов: время появления метеора с точностью  $\pm(0.2-0.5 \text{ с})$ ; грубую дальность от центрального пункта до следа с ошибкой  $\pm 1.5 \text{ км}$ ; точные дальности от каждого из 4-х приёмных пунктов с ошибкой  $\pm 20 \text{ м}$ ; амплитуду каждого отдельного импульса по 4 каналам.

Покадровый многолучевой индикатор позволял одновременно регистрировать такие данные метеора, как: наклонная дальность до метеора с ошибкой  $\pm 100 \text{ м}$ , четыре амплитудно-временных картины на медленной развёртке, четыре дальности до выносных пунктов с точностью  $\pm 20 \text{ м}$  (от центрального и трёх выносных пунктов), скорость дрейфа метеорных следов от 0 до  $500 \text{ м/сек}$ , радианты метеоров с точностью до  $2^\circ$ , скорости метеорных тел двумя методами (дифракционным и пеленгационно-временным), угловые координаты отражающих точек с точностью до  $1^\circ$ .

### **4.3. Измерение скоростей метеоров по результатам совместных радиотелевизионных наблюдений**

Важнейшим компонентом для решения вопроса распределения метеорного вещества в Солнечной системе представляются результаты измерения скоростей как поточных, так и спорадических метеоров. Без правильного и точного определения значения скоростей не представляется возможным решение ряда задач физики метеорных явлений, вопросов движения метеороидов в межпланетном и космическом пространстве и решение вопроса эволюции метеороидов и их связи с другими малыми телами Солнечной системы. Данные о скоростях метеоров также необходимы для определения их кинематических характеристик и исследования физических свойств вещества самих метеороидов. Результаты измерения скорости метеоров одновременно оптическими и радиолокационными методами позволяют проверять точность и достоверность данных радиолокационных измерений скоростей, так как результаты оптических наблюдений являются наиболее точными.

Скорость метеоров для различных массивов данных, полученных по результатам фотографических, телевизионных, камер болидной сети, радиолокационных (включая наблюдений головные эхо) и видеонаблюдений ранее определялась многократно. Однако скорость одного и того же метеора одновременно оптическим и радиолокационным методом изучена недостаточно, так как опубликованные материалы одновременно оптическим и радиолокационным методом оказались противоречивыми [21].

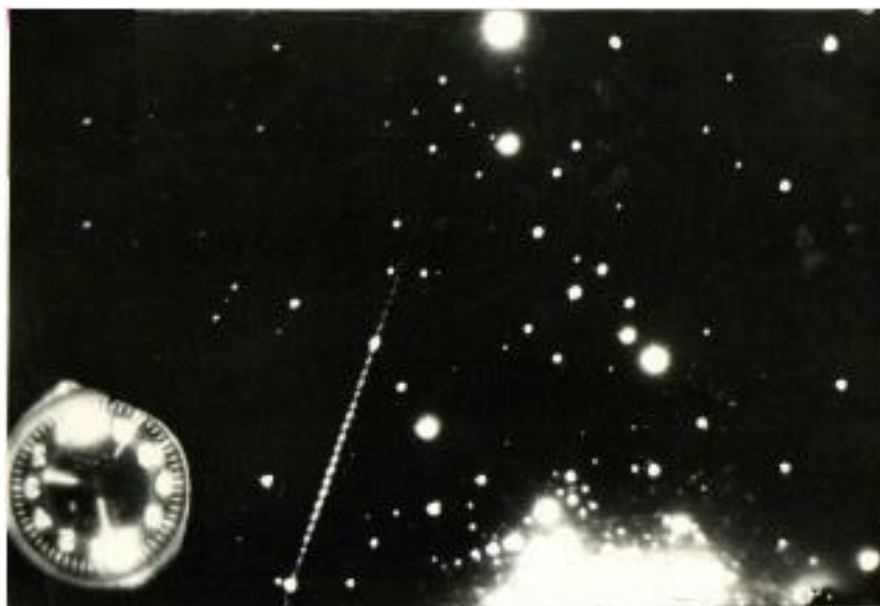
Для решения поставленной задачи и проверки достоверности результатов радиолокационных измерений скоростей необходимо организовать и проводить одновременные базисные оптические и радиолокационные наблюдения одних и тех же метеоров. Весьма эффективным способом в решении поставленной задачи и получении информации о физико-кинематических характеристиках одних и тех же метеоров представляют данные одновременных телевизионных, видео- и базисных радиолокационных наблюдений метеоров, так как

чувствительность современной телевизионной и видеоаппаратуры близка к радиолокационным. Подобные наблюдения с использованием оптической и радиолокационной аппаратуры были проведены неоднократно.

Однако цель большинства из научных программ одновременных радиооптических наблюдений, проводимых до второй половины 1970-х годов, заключалась в: а) исследовании взаимосвязи оптической яркости и свойств ионизированного следа метеоров; б) установлении предельной регистрируемой звёздной величины радиолокационных станций; и в) решении ряда геофизических задач.

Для изучения физико-кинематических характеристик метеороидов в Институте астрофизики НАН Таджикистана в периоды действия ежегодных главных метеорных потоков, таких как Квадрантиды,  $\delta$ -Аквариды,  $\alpha$ -Каприкорниды, Персеиды, Ориониды и Геминиды в 1978-1980 гг. были проведены одновременные базисные радио- и оптические (фотографические, спектральные, телевизионные) наблюдения одних и тех же метеоров.

Анализ телевизионных снимков показал, что след некоторых метеоров имеет прерывистое изображение (рисунок 4.1). Перерывы в изображении следа метеора в случае телевизионных наблюдений образовались вследствие запираания усилителей во время обратного хода электронного луча. Когда метеор имел большое время послесвечения (рекомбинационный след), прерывистое изображение сливается в сплошную полосу. Такие прерывистые изображения совместных метеоров позволяли с использованием измеренной радиолокационной дальности, длины следа и промежутка времени между перерывами по телевизионным снимкам по известной методике определить их скорости комбинированным методом. При этом с помощью микрофотометра MD-100 измерена длина следа и промежуток между отдельными перерывами. Из общего числа полученных совместных метеоров в период действия потока  $\delta$ -Акварид было отобрано 10 телевизионных негативов, имеющих прерывистые следы. Среди одновременных Персеид количество метеоров с прерывистыми изображениями оказалось всего 7.



**Рисунок 4.1. - Образец прерывистых изображений метеоров, полученных ТВ-методом**

Результаты измерения скорости метеоров по данным комбинированных радиотелевизионных наблюдений приведены в таблице 4.1. Здесь в первом столбце приведён № – номер метеора, во втором - дата, месяц и год наблюдений, в третьем - время наблюдений в часах, минутах и секундах (местное) (Т), в четвёртом - D – дальность до метеорного следа по результатам радиолокационных наблюдений и в пятом -  $V_{R-TV}$  – скорость метеора, измеренная по радиолокационной дальности и телевизионным снимкам метеоров.

Согласно таблице 4.1, измеренные значения скоростей метеоров потока  $\delta$ -Акварид находятся в диапазоне 36.2-45.3 км/с, а у метеоров потока Персеид в интервале 57-62.4 км/с. Средние значения скорости, вычисленные для метеоров потоков  $\delta$ -Акварид, и Персеид, составляют  $41.2 \pm 1.16$  км/с и  $60 \pm 0.60$  км/с, соответственно. Кроме того, скорость этих же метеоров по результатам радиолокационных наблюдений измерялась как дифракционным, так и пеленгационно-временным методами. При измерениях скорости метеоров дифракционным методом по всем максимумам дифракционных картин для каждого из 4-5 каналов находилось среднее время полёта между одноимёнными максимумами (и пересчитывалось на время между 2 и 3 максимумами) дифракционных картин, которое затем использовалось для нахождения

скорости метеора по специальной дифракционной номограмме.

**Таблица 4.1. - Скорости метеоров по данным комбинированных радиотелевизионных наблюдений**

№	Поток								
	δ-Аквариды				Персеиды				
	Дата	T (h, m, s)	D (км)	V <sub>R-TV</sub>	№	Дата	T (h, m, s)	D (км)	V <sub>R-TV</sub>
13	21.07.79	1.35.24	111.7	36.2	39	12.08.80	1.56.34	148.8	62.4
16	27.07.79	1.31.56	117.7	45.2	40	12.08.80	2.03.40	141.7	60.0
17	27.07.79	2.10.27	104.7	37.2	44	12.08.80	3.46.02	180.0	62.1
18	29.07.79	2.23.36	107.3	36.7	47	12.08.80	4.01.34	182.8	58.6
21	31.07.79	1.41.34	122.0	45.3	50	12.08.80	4.27.13	192.0	60.0
22	31.07.79	2.58.44	113.1	41.9	55	14.08.80	2.50.21	159.4	59.1
23	31.07.79	3.17.50	118.8	43.3	56	14.08.80	3.57.20	170.5	57.8
24	31.07.79	3.23.57	116.3	38.7					
25	31.07.79	3.38.50	117.0	39.3					
26	31.07.79	4.04.47	113.1	44.3					
29	01.08.79	2.57.32	117.2	45.5					

Скорость метеора определялась пеленгационно-временным методом по формуле [192]:

$$V_{сд} = - V_i \cos (A_r - A_i) \operatorname{sn} Z / t_i,$$

где  $A_i$  – азимут  $i$ -го пункта,  $t_i$  – измеренный сдвиг  $i$ -го пункта относительно центрального,  $V_i$  – расстояние между выносным и центральным пунктами, по которым бралось  $t_i$ .

При обработке первичных данных радиолокационных наблюдений для измерения скоростей и координат радианта с плёнки снимались и записывались в журнале: дата, время появления, номер метеора, дальность до метеорного следа от основной центральной станции, дальность до каждого из 4-5 приёмных пунктов  $D_1, D_2, D_3, D_4$  и  $D_5$  и по АВХ каждого канала положение начала и

первых четырёх максимумов дифракционных картин  $N_{i1}$ ,  $N_{i2}$ ,  $N_{i3}$ ,  $N_{i4}$  и  $N_{i5}$ . На основании этих первичных данных определялись угловые координаты ( $A$  – азимут,  $Z$  – зенитное расстояние зеркальной точки и  $\Delta r$  – ошибка) дальномерным радиометодом, азимут радианта метеора  $A_r$  и ошибка  $\Delta r$ . За окончательный результат измерения радиолокационной скорости метеора бралось либо среднее значение, либо то значение скорости, которое определялось наиболее достоверно. Результаты измерения скорости метеоров потоков  $\delta$ -Акварид и Персеид по результатам комбинированных радиотелевизионных и данных радиолокационных измерений приведены в таблице 4.2.

**Таблица 4.2. - Скорости метеоров по результатам комбинированных радиотелевизионных  $V_{R+TV}$  и радиолокационных  $V_R$  наблюдений**

№	D (км)	$V_{R+TV}$ (км/с)	$V_R$ (км/с)	№	D (км)	$V_{R+TV}$ (км/с)	$V_R$ (км/с)
$\delta$ -Аквариды				Персеиды			
13	111.7	36.2	37.1	39	148.8	62.4	60.0
16	117.7	45.2	39.6	40	141.7	60.0	55.1
17	104.7	37.2	39.6	44	180.0	62.1	60.6
18	107.3	36.7	39.4	47	182.8	58.6	55.9
21	122.0	45.3	45.2	50	192.0	60.0	59.4
22	113.1	41.9	42.7	55	159.4	59.1	52.4
23	118.8	43.3	40.7	56	170.5	57.8	56.05
24	116.3	38.7	38.7				
25	117.0	39.3	39.3				
26	113.1	44.3	35.3				
29	117.2	45.5	41.7				

Здесь в первом столбце дан № – номер совместного метеора, во втором - D – дальность до метеорного следа, в третьем приведена  $V_{R+TV}$  – скорость, измеренная комбинированным методом и в четвёртом столбце даны значения скорости метеора, измеренные радиометодом  $V_R$ . Из данных, приведённых в таблице 4.2, следует, что скорости, измеренные комбинированным методом, являются более компактными, чем значения скоростей, измеренных радиометодом.

Сопоставление результатов измерения скоростей индивидуальных метеоров по результатам комбинированных радиотелевизионных наблюдений и данным радиолокационных измерений скоростей этих же метеоров, определяемым радио-методами (дифракционным и пеленгационно-временным), показывает, что у 6-ти метеоров потока  $\delta$ -Акварид и 3-х метеоров потока Персеид результаты измерения скоростей равны или находятся близко друг к другу. Для остальных метеоров скорость, измеренная по результатам комбинированных радиотелевизионных наблюдений больше, чем скорость, определяемая только по данным радиолокационных измерений. Измеренные средние значения скорости, вычисленные по данным комбинированных радиотелевизионных наблюдений метеоров потока  $\delta$ -Акварид, составляют  $41.2 \pm 1.16$  км/с, что больше, чем средние значения скоростей этих же метеоров, измеренных по результатам радиолокационных измерений, где  $V = 39.9 \pm 0.8$  км/с. Средняя скорость, измеренная комбинированным методом для метеоров потока Персеид, составляет  $60 \pm 0.60$  км/с, что на 3.0 км/с больше, чем средняя скорость этих же метеоров, измеренная по результатам радиолокационных наблюдений, где  $V = 57.06 \pm 1.1$  км/с.

Различия между скоростями, измеренными комбинированным способом и по результатам радиолокационных наблюдений, по нашему мнению, обусловлены тем, что у подавляющего большинства радиометеоров высоты точки зеркального радиоотражения находятся на нисходящих участках их ионизационных кривых, где метеоры испытывают наибольшее торможение. Об этом свидетельствуют результаты исследования месторасположения зеркальной точки относительно высоты максимума ионизации по отрезкам ионизационных кривых метеоров, полученных нами в ГисАО [100]. Позже R. J. Weryk и P. G. Brown [140-142] на основе результатов одновременно зарегистрированных радио- и видеонаблюдений метеоров исследовали месторасположение высоты зеркальной точки относительно высоты максимума свечения и пришли к аналогичному заключению. Таким образом, полученные результаты показывают, что скорость метеоров, измеренная комбинированным

радиотелевизионным методом больше, чем скорость, измеренная радиолокационным методом. Следовательно, этот факт необходимо учесть при вычислении кинематических характеристик радиометеоров, полученных на радиокомплексе МИР-2.

#### **4.4. Радианты, скорости и орбиты метеоров по результатам радиотелевизионных наблюдений**

Ранее радианты и орбиты метеоров для различных массивов данных, полученных по результатам фотографических, камер болидной сети, телевизионных, электронно-оптических, видео- и радиолокационных наблюдений измерялись неоднократно. Однако радианты и орбиты метеоров по результатам одновременных радиооптических наблюдений изучены недостаточно. Ниже приводится методика измерения радиантов и орбит совместных радиотелевизионных наблюдений метеоров за 1978-1980 гг.

Методики обработка наблюдательного материала для определения скорости, горизонтальных координат зеркально-отражающей точки, горизонтальные координаты радианта и высоты метеоров приведены в [263, 264]. Одним из центральных моментов применения того или иного метода измерения физико-кинематических характеристик метеоров является точность измеренных исходных параметров. Вопрос точности измерения радиантов и скоростей метеоров дифракционно-временным методом обсуждался в работах Кащеева и др. [60]. Хотя основные источники погрешности измерения наиболее подробно обсуждались в работе Кащеева и др., однако, авторы не предлагали методы уменьшения ошибки измерений. Основные источники погрешности измерения радиантов и скоростей метеоров, способ учета поправок при использовании пеленгационно-временного метода даны в работе Чеботарева [264], согласно которой:

1. Ошибка в измерении скорости примерно одинакова для измерения скорости как импульсно-дифракционным, так и пеленгационно-временным

методом и составляет от 3 до 4%. Совместные измерения скорости обоими методами позволяют уменьшить ошибки до 2÷3% и избегать грубых ошибок.

2. Ошибки измерения азимута радианта одинаковы для обоих методов и составляют  $\sim 1^\circ 5$ . Учёт поправки на временные сдвиги по методике, предложенной автором, позволяет уменьшить ошибки до  $0\ 3^\circ \div 0^\circ 5$ .

3. Ошибки измерения зенитного угла пеленгационно-временным методом равны  $0,9 \div 1^\circ, 2$ , но легко могут быть уменьшены до  $0^\circ, 1 \div 0^\circ, 2$ , что сравнимо с точностью фотографических методов ярких метеоров. ( $0^\circ, 05$ ). Зенитный угол радианта при пеленгационно-временном методе измеряется в 25÷50 раз точнее по сравнению дифракционно-временным методом.

4. Столь точное измерение одной из горизонтальных координат позволит с такой же точностью вычислить обе экваториальные координаты.

5. Пеленгационно-временный метод дает выигрыш по числу измерений в три раза, т.е. он чувствительнее дифракционно-временного метода на 1.5 звездные величины.

Вычисление радиантов, скоростей и элементов орбит метеоров осуществлялось на базе программы, составленной на основе компьютерного языка Fortran. При этом по каждому метеору ЭВМ вычисляла: время появления метеора в долях суток, долготу Солнца, высоту отражающей точки, зенитный угол радианта, скорость метеора по сдвигу. Результаты расчёта радиантов, скоростей и элементов орбит представлены в таблице 4.3 в следующем порядке: № – номер метеора, день (время полёта выражено в долях суток),  $\alpha_r$  и  $\delta_r$  – экваториальные координаты радианта,  $V_\infty$  – внеатмосферная скорость,  $\cos Z_r$  – косинус зенитного расстояния радианта,  $q$  – перигелийное расстояние в а.е.,  $e$  – эксцентриситет,  $a$  – большая полуось в а.е.,  $i$  – наклон орбиты к эклиптике,  $\omega$  – аргумент перигелия,  $\Omega$  – долгота восходящего узла,  $\pi = \Omega + \omega$  – долгота перигелия, и в последнем столбце обозначена принадлежность метеора к потокам.

Таблица 4.3. - Радианты, скорости и орбиты индивидуальных метеоров, полученные по данным параллельных радиотелевизионных наблюдений

N	Дата и время	$\alpha_R$	$\delta_R$	$Z_R$	$V_m$ (км/с)	A (а.с)	e	q	$\omega$	$\Omega$	i	$\pi$	Поток
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
август 1978 г.													
1	12.8196	46.1	57.6	54.1	56.7	2.93	0.68	0.93	143.6	138.9	110.9	282,5	Персеиды
2	13.8389	224.2	72.1	57.0	36.5	-2.9	1.34	0.97	158.7	139.9	48.7	298.7	Спорадический
3	13.9137	44.0	56.4	34.3	60.0	68.5	0.86	0.97	156.1	139.9	114.6	296.0	Персеиды
4	13.9157	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Персеиды
январь 1979 г.													
5	3.8570	222.3	46.5	69.3	43.9	2.03	0.52	0.98	174.6	282.0	77.68	96.6	Квадрантиды
Б	3.8666	228.3	52.3	67.0	40.8	2.62	0.62	0.98	177.4	282.0	68.92	99.4	Квадрантиды
7	3.8901	116.0	0.5	55.3	57.9	0.90	0.54	0.41	130.3	101.9	177.4	232.1	Спорадический
8	3.9126	234.0	52.1	62.0	46.2	-10.49	1.09	0.98	172.8	282.0	72.4	94.8	Квадрантиды
9	3.9142	222.5	52.7	54.9	40.1	1.96	0.50	0.98	186.4	282.0	69.28	108.4	Квадрантиды
10	3.9221	259.3	67.1	59.4	21.9	1.47	0.33	0.98	183.8	282.0	33.1	105.8	Спорадический
11	3.9986	231.3	44.2	44.1	41.4	1.85	0.49	0.95	153.5	281.1	72.44	75.5	Квадрантиды
12	4.0291	217.0	37.3	27.1	29.1	0.71	0.39	0.43	618	282.2	57.50	288.3	Спорадический
июнь 1979 г.													
13	305.9	-13.5	49.9	29.9	3.93	0.88	0.48	277.6	121.4	5.62	99.0	127.02	Спорадический
14	342.9	-20.7	64.6	43.4	1.76	0.96	0.07	154.3	301.4	55.7	94.7	357.1	$\delta$ -Аквариды
15	333.5	-16.1	59.5	41.8	2.53	0.97	0.08	150.9	302.3	16.9	93.2	319.2	$\delta$ -Аквариды
16	30.2	-2.5	78.8	41.8	0.53	0.79	0.12	175.9	302.4	134.7	118.3	437.1	Спорадический
17	348.9	-16.6	61.2	40.6	1.14	0.96	0.05	161.2	304.3	53.6	105.5	357.9	$\delta$ -Аквариды

18	28.8420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	δ-Аквариды
----	---------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	------------

Продолжение таблицы 4.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
июнь 1979 г.													
19	29.7669	335.4	-3.5	57.4	40.2	1.63	0.96	0.07	335.0	125.2	23.0	100.2	δ-Аквариды
20	29.1841	311.1	-4.8	43.5	30.8	3.25	0.86	0.45	282.2	125.2	13.6	47.4	Спорадический
21	30.8205	346.8	-13.7	60.1	47.7	2.60	0.99	0.02	164.3	306.2	69.0	110.5	δ-Аквариды
22	30.8741	345.06	-16.1	53.0	45.0	2.23	0.98	0.05	158.7	306.2	50.2	104.9	δ-Аквариды
23	30.8874	337.6	-13.7	51.1	43.0	2.81	0.98	0.06	153.5	306.2	15.8	99.7	δ-Аквариды
24	30.8916	332.1	-20.7	58.0	40.8	6.05	0.91	0.17	133.8	306.2	20.2	80.0	δ-Аквариды
25	30.9020	337.8	-16.5	52.9	41.4	2.35	0.96	0.08	150.5	306.2	20.2	96.7	δ-Аквариды
26	30.9200	339.4	-21.5	58.8	37.5	1.68	0.91	0.15	142.3	306.3	27.9	88.6	δ-Аквариды
27	31.1940	321.8	-3.0	43.7	31.0	-	-	-	-	-	-	-	i-Аквариды
28	31.8153	303.5	-11.3	46.5	22.6	2.07	0.68	0.65	262.9	127.2	5.27	30.1	Каприкорниды
29	31.8733	341.2	15.1	53.3	44.0	2.83	0.98	0.06	155.1	307.2	29.5	103.3	δ-Аквариды
30	31.8831	307.5	-17.1	48.2	14.3	1.11	0.29	0.79	269.5	127.5	0.52	37.0	Спорадический
октябрь 1979 г.													
31	22.8141	103.4	20.9	62.6	69.4	6.31	0.88	0.71	58.8	27.9	176.3	86.7	Ориониды
32	22.8963	91.8	4.1	41.3	60.9	1.81	0.66	0.61	88.1	28.0	139.7	116.1	Спорадический
33	23.8186	92.6	0.2	64.8	60.9	3.47	0.84	0.56	87.6	28.9	129.4	116.5	Спорадический
34	23.8724	97.2	17.3	43.0	62.2	1.73	0.73	0.47	104.3	29.0	166.4	133.3	Ориониды
декабрь 1979 г.													
35	12.7156	110.6	28.1	52.5	38.5	1.48	0.93	0.10	330.0	259.2	16.96	229.2	Геминиды
36	12.7232	91.2	33.8	38.0	38.0	4.63	0.95	0.25	302.7	259.2	18.3	201.9	Спорадический
37	12.7771	107.4	31.4	32.0	40.9	2.47	0.95	0.12	323.0	259.2	24.0	222.2	Геминиды
август 1980 г.													
38	11.7991	52.9	59.1	60.3	58.8	11.69	0.92	0.89	138.7	138.4	110.5	277.1	Персеиды

Продолжение таблицы 4.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
август 1980													
39	11.8306	41.9	56.3	50.1	55.5	2.13	0.55	0.96	148.0	138.4	110.9	286.4	Персеиды
40	11.8356	49.0	63.1	51.3	57.8	-33.79	1.03	0.93	145.1	138.4	103.7	284.1	Персеиды
41	11.8843	44.5	55.2	41.1	59.9	5.31	0.82	0.96	151.4	138.4	115.9	289.8	Персеиды
42	11.8952	41.6	68.7	40.4	60.9	-1.83	1.53	0.97	157.8	138.5	99.9	296.3	Персеиды
43	11.8958	50.0	62.0	42.1	55.7	4.38	0.79	0.91	139.4	138.5	104.4	277.9	Персеиды
44	11.9068	48.0	57.0	38.7	63.6	-4.83	1.20	0.95	151.3	138.5	116.1	289.8	Персеиды
45	11.9105	-	-		65.8	-			-		-	-	Персеиды
46	11.9175	51.0	49.1	38.1	63.9	12.86	0.93	0.92	143.4	138.5	127.2	281.9	Персеиды
47	11.9175	45.7	57.8	35.5	58.1	4.49	0.79	0.94	147.4	138.5	111.4	285.9	Персеиды
48	11.9259	48.1	50.2	34.6	62.2	4.95	0.81	0.93	145..5	138.5	124.9	284.0	Персеиды
49	11.9328	47.0	55.3	33.0	65.1	-3.0	1.32	0.96	154.2	138.5	119..2	292.7	Персеиды
50	11.9354	48.1	55.1	33.3	62.3	-32.6	1.03	0.94	148.1	138.5	117.3	286.6	Персеиды
51	12.8470	-	-		59.8	-		-	-		-	-	Персеиды
52	12.8764	47.0	33.3	44.9	60.5	1.26	0.19	1.01	182.4	139.4	148.1	321.8	Спорадический
53	12.8771	-	-		60.4	-		-	-		-	-	Персеиды
54	12.9346	-	-		62.7	-			-		-	-	Персеиды
55	13.8702	50.1	61.4	45.4	55.0	3.06	0.70	0.92	140..9	140.4	105.2	281.3	Персеиды
56	13.9310	-	-		61.0	-		-	-		-	-	Персеиды
57	13.9311	49.5	55.7	33.5	58.8	3.57	0.74	0.93	144.9	140.4	115.4	285.3	Персеиды

**Таблица 4.4. - Радианты, скорости и орбиты поточных метеоров по результатам одновременных радиотелевизионных наблюдений**

№	Название Потока	$\alpha_R$	$\delta_R$	$V_\infty$ (км/с)	1/a	E	q	$\omega$	$\Omega$	i
1	Персеиды	47,3±	57,8±	59,8±	0,07±	0,94±	0,94±	147,7±	139,05±	112,6±
		0,8	1,11	0,8	0,07	0,07	0,007	2,15	0,2	1,66
2	$\delta$ -Аквариды	341,9±	-15,6±	42,2±	0,52±	0,97±	0,07±	154,9±	305,8±	34,06±
		1,5	1,04	1,0	0,08	0,005	0,01	2,4	0,87	5,94
3	Квадрантиды	227,7	49,6±	42,5±	0,36±	0,64±	0,97±	172,9±	281,8±	72,14±
		±2,4	1,77	1,14	0,12	0,11	0,005	5,43	0,18	1,58
4	Ориониды	100,3±	19,1±	65,8±	0,37±	0,8±	0,62±	81,6±	28,45±	171,35±
		3,11	1,81	3,61	0,21	0,075	0,15	22,84	0,55	5,0
5	Геминиды	109±	29,5±	39,7±	0,54±	0,94±	0,11±	326,5±	259,2±	20,48±
		16,0	1,65	1,21	0,14	0,007	0,007	3,51	0,0	3,53

Орбиты для совместных метеоров с прерывистыми ТВ-изображениями рассчитаны по значениям скоростей, найденным комбинированным радио-ТВ-методом. Таким образом, из 57 совместных метеоров: 21 – принадлежит Персеидам, 5 – Квадрантидам, 2 – Геминидам, 2 – Орионидам, 1 – Каприкорнидам, 12 –  $\delta$ -Акваридам и 1 –  $i$ -Акваридам. Измеренные результаты радиантов скоростей и элементов орбит индивидуальных метеоров позволили нам вычислить их средние значения для поточных метеоров (таблица 4.4). Сопоставление данных радиантов, скоростей и орбит метеоров, полученных комбинированным радиотелевизионным методом наблюдений с данными, полученными другими авторами, свидетельствует о хорошей сходимости наших данных с результатами фотографических, видео- и результатами измерения данных параметров по наблюдениям головного эха.

#### 4.5. Результаты наблюдений и методика измерений радиантов и скоростей метеоров пеленгационно-временным радиометодом

Для измерений радиантов и скоростей метеоров пеленгационно-временным радиометодом в 1964-1968 гг. в ГисАО был создан специальной комплекс радиолокационной аппаратуры МИР-2 (метеорный импульсный радиолокатор второго поколения). Его устройство, принцип действия и подробные характеристики приведены в работе [264].

В состав комплекса МИР-2 входило четыре приёмных станции. При расстояниях между центральным и тремя вынесенными пунктами приёма порядка 4 км среднеквадратичная ошибка измерения дальностей составляет  $\pm 20$  м, среднеквадратичная ошибка в измерении времени порядка  $\pm 1$  мс. Дальномерный вариант пеленгационно-временного метода обеспечивает среднеквадратичные погрешности измерений азимута радианта  $\sigma A = 1^\circ,8 / \sin Z_R$ , зенитного угла радианта  $\sigma Z_R = 1^\circ,2$ , скорости метеора  $\sigma V = \pm 3\%$ , относительная погрешность, азимута зеркальной точки  $\sigma A = 0,9 / \sin Z$ , зенитного угла зеркальной точки  $\sigma Z = 0,9 / \cos Z$ , среднеквадратичная погрешность определения высоты отражающей точки основного пункта  $h = 2,0$  км.

Антенны в режиме измерения радиантов и скоростей – полуволновые вибраторы, расположенные на высоте  $\lambda/3$  над землёй, имеющие максимальный коэффициент усиления по мощности  $\sim 5,3$  под углом места около  $45^\circ$  в направлениях на восток и запад.

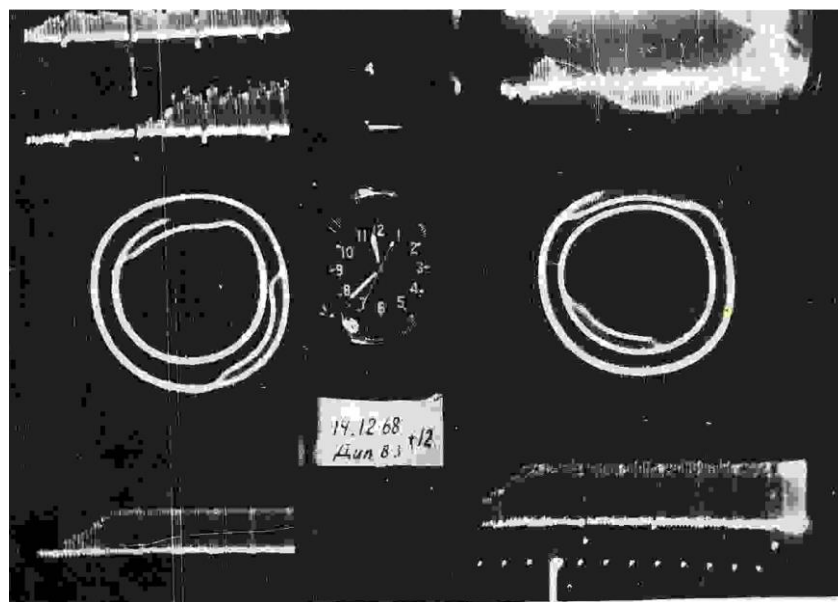
Для составления каталога орбит и атмосферных траекторий радиометеоров ярче  $+5^m$  мы из отдельных циклов наблюдений с декабря 1968 и по декабрь 1969 гг. использовали результаты круглосуточных ежемесячных годовичных базисных радиолокационных наблюдений с 4-х пунктов.

Наблюдательный материал охватывал следующие периоды: с 12 по 15 и с 21 по 27 декабря 1968 г. В 1969 г. наблюдения проводились: в январе с 3 по 4 и с 10 по 12; в феврале два периода: с 1 по 3 и с 17 по 19; в марте с 12 по 16; в апреле с 15 по 18; в мае с 6 по 13; в июне с 20 по 30; в июле два периода: с 1 по

7 и с 14 по 26; в августе с 3 по 14; в сентябре с 12 по 27; в октябре с 1 по 17; в ноябре 15-17 (даты местные) и в декабре в двух периодах с 7 по 15 и с 19 по 24. Из этого наблюдательного массива использованы для обработки только те метеоры, которые были зарегистрированы в 4-х пунктах и имели хотя бы один чёткий первый максимум в амплитудно-временных характеристиках в каждом из 4-х пунктов и сильно не искажены помехами. Таких метеоров, пригодных к обработке, в декабре 1968 г. оказалось 900, в январе 1969 г. – 104, феврале – 800, марте – 170, апреле – 300, мае – 2000, июне – 200, июле – 700, августе – 260, сентябре – 350, октябре – 430, ноябре – 52 и декабре – 2800. Из этого массива пригодных для расчёта орбит и вычислений данных атмосферных траекторий оказались 8916 радиометеоров.

Отражённые сигналы РЛС от метеорных следов регистрировались на двух электронно-лучевых индикаторах: а) ждущее-непрерывной и б) покадровой съёмки.

Образец фоторегистрации метеора в ждущее-непрерывном и на покадровом индикаторах приведён на рисунке 4.2.



**Рисунок 4.2. - Образец регистрограммы метеора на индикаторе покадровой съёмки**

На индикаторе покадровой съёмки приведены:

- 1 - Табло с указанием даты и вида антенны наблюдений.
- 2 - Часы с показателем времени полёта метеора.

3-6 - Амплитудно-временные характеристики отражённых сигналов с четырёх каналов.

7, 8 и 9, 10 - Шкалы точной дальности по четырём каналам (расстояние между метками 1 км).

12 - Грубая шкала дальности с метками через 20 км.

13 - Фазовые картинки для измерения скорости ветра.

На образце фоторегистрации метеора на индикаторе ждущее-непрерывной съёмки приведены:

1. Табло с указанием даты наблюдений.
2. Часы с показателем времени полёта метеора.
- 3-7. Амплитудно-временные характеристики для пяти пунктов.
8. Дальность до следа метеора.

#### **4.6. Обработка наблюдательного материала для определения горизонтальных координат зеркально-отражающей точки и высоты метеора**

Обработка наблюдательного материала для определения горизонтальных координат (азимут и зенитное расстояние) зеркально-отражающей точки на следе метеора и высоты центральной точки следа метеора осуществлялась следующим способом.

Для определения азимута и зенитного расстояния зеркально-отражающей точки на следе метеора необходимо:

1. Для каждого метеора с плёнки снимать: № метеора, дату и время полёта (часы, минуты и секунды); грубую дальность до следа для центрального пункта  $D_r$ , точную дальность для каждого пункта  $D_1, D_2, D_3, D_4$  и  $D_5$ .

2. Вычислить разность значений дальностей  $d_2=D_2-D_1$ ;  $d_3=D_3-D_1$ ;  $d_4=D_4-D_1$ .

3. Вычислить точные значения  $d_i$ .

$d_2' = d_2 - 0.02 - \Delta d_2$  - контрольный метеор, где  $d_2$  - контрольный метеор прибавляется с обратного знака.

$d_3' = d_3 - 0.02 - \Delta d_3$  - контрольный метеор.

$d_4' = d_4 - 0.02 - \Delta d_4$  - контрольный метеор.

4. По значениям  $d_2'$ ,  $d_3'$ ,  $d_4'$  по круговой номограмме, описанной в работах [305-307], находится  $A$  (азимут), синус зенитного расстояния зеркальной точки ( $\sin Z$ ) и ошибки  $\pm \Delta$ .

5. По  $\sin Z$  и точному значению дальности  $D_T$  по графику находится высота для центрального пункта на следе метеора  $H_1$ .

#### **4.7. Обработка наблюдательного материала для определения скорости и горизонтальных координат радианта метеора**

Горизонтальные координаты радианта (азимут  $A_r$  и зенитное расстояние радианта  $Z_r$ ) и скорость  $V$  метеора при пеленгационно-временном методе вычисляются по формулам, полученным в [308]:

$$A_r = A_1 + \operatorname{arctg} (t_2 b_1 / t_1 b_2 \cdot \operatorname{cosec} A_{21} \cdot \operatorname{ctg} A_{12}),$$

$$Z_r = \operatorname{arctg} [-\operatorname{ctg} Z / \cos (A - A_r)],$$

$$V_{\text{сд}} = -b_i \cos \alpha_{ri} \cdot \sin Z_r / t_{i \max},$$

где  $A_1$  – азимут первого пункта,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_i$  – длина баз второго, третьего и  $i$ -го пункта относительно центрального пункта,  $A_{12} = A_2 - A_1$  – разность азимутов соответствующих пунктов,  $\alpha_{ri}$  – углы между азимутом отражающей точки и азимутом соответствующих пунктов.

Для измерения скорости метеора в настоящей работе использованы как импульсно-дифракционный, так и пеленгационно-временной методы. А радиант метеора измерялся пеленгационно-временным методом. Для реализации вышеупомянутых методов нами с плёнки, полученной на ждущем непрерывном индикаторе по АВХ каждого канала метеора, снимали следующие данные:

1. Номер кадра, год, месяц, дата и время регистрации метеора с плёнки.
2. Положение начала, положение максимумов для каждого  $i$ -го канала,  $N_i$ , положение полочки  $n_i$ , и значение длительности радиоотражения  $T_i$  в импульсах.

3. Для каждого канала вычислялась разность между положениями максимумов  $n_2 = N_2 - N_1$ ;  $n_3 = N_3 - N_2$ ;  $n_4 = N_4 - N_3$ .

4. Для всех каналов вычислялось среднее значение между указанными максимумами  $n_2$ ,  $n_3$  и  $n_4$ .

5. Полученные средние значения  $n$  приводились к  $n_3$  по формулам:

$n_3' = n_2 / 1.5$ ;  $n_3'' = n_4 / 1.8$  и находилось среднее:

$n_{3cp} = n_3 + n_3' + n_3'' / 3$ .

6. По точному значению дальности  $D_T$  и  $n_{3cp}$  по номограмме находили дифракционную скорость метеора  $V_d$ .

По измеренным значениям дифракционной скорости  $V_d$  и скорости, определяемой по сдвигам  $V_{cd}$ , определяли среднее значение скорости  $V_{cp}$  и вычисляли  $\Delta V$  по формулам:

$$V_{cp} = V_d + V_{cd} \quad \text{и} \quad \Delta V = (V_d + V_{cd}) \cdot 2 / V_d + V_{cd}.$$

**Определение азимута  $A_r$  и зенитного расстояния радианта  $Z_r$ .**

Измерение азимута радианта метеора определяется по временным сдвигам между вынесенным  $i$ -м и центральным пунктом. Временные сдвиги  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  находят как разность времени полёта метеора между одноимёнными максимумами дифракционных картин, вынесенных и центрального пункта в виде:

$$t_2 = (A_0 - A_A) + (B_0 - B_A) + \dots + (D_0 - D_A) / n_{0A}, \quad (4.1)$$

здесь  $n_{0A}$  – число пар одноимённых максимумов (или экстремумов), положение которых измерено. Величины  $t_3$  и  $t_4$  определяются по аналогии из формулы (4.1).

По круговой номограмме с центром  $o$  и базами  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  находят азимут радианта  $A_r$  и  $\Delta r$ . При необходимости пользуются умножением и делением, и делается временной сдвиг в  $n = 2, 3, 4$  раза.

Зенитное расстояние радианта  $Z_r$  вычисляется по формуле:

$$Z_r = \arctg [-\text{ctg } Z / \cos (A - A_r)],$$

где  $\alpha_{ri} = (A_k - A_i)$ ,  $A_i$  – азимут  $i$ -го пункта.

Скорость метеора пеленгационно-временным методом определяется по формуле:

$$V_{\text{сд}} = - b_i \cos \alpha_{ri} \cdot \sin Z_r \cdot 500 / t_{i \text{ max}}.$$

Находится разность времени полёта метеора между  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_5$  и центрального пункта в виде:

$$t_2 = (N_2)_i - (N_2)_1;$$

$$t_3 = (N_3)_i - (N_3)_1;$$

$$t_4 = (N_4)_i - (N_4)_1;$$

$$t_5 = (N_5)_i - (N_5)_1.$$

Определяется средний сдвиг между  $i$ -м и  $1$ -м пунктами в виде:

$$t_i = t_{1i} - t_{2i} - t_{ni} / n,$$

где  $n$  – число слагаемых.

$t_5$  приводится к  $t_2$  по формуле:

$$t_2 = - t_5 / 2.64.$$

По круговой номограмме с центром  $o$  и базами  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  находят азимут радианта  $A_r$  и  $\Delta_r$ . При необходимости пользуются умножением и делением и делается сдвиг расстояний в  $n = 2, 3, 4$  раза.

#### 4.8. Вычисление элементов орбит

В настоящее время известны следующие методы измерения радиантов, скоростей и элементов орбит индивидуальных метеорных тел, такие как импульсно-дифракционный, непрерывно-волновой, метод наклонного отражения, метод головного радиоэхо, дальномерно-дифракционный и пеленгационно-временной радиометоды. В данной работе использованы дальномерно-дифракционный и пеленгационно-временной радиометоды. Расчёт элементов орбит осуществлялся вычислением координат исправленного радианта метеора с использованием несколько видоизменённой схемы И. А. Клейбера [60].

Вычисление радиантов, скоростей и элементов орбит метеоров осуществлялось по программе, составленной на основе Дживи Бэйсик. При

вычислении экваториальных координат исправленного радианта, скоростей и элементов орбит индивидуальных метеоров в радиолокационной лаборатории метеорного отдела Института астрофизики НАНТ было использовано сочетание импульсно-дифракционного и пеленгационно-временного радиометода. Автором последнего метода являлся один из основоположников радиолокационного метода исследования метеоров в Таджикистане Р. П. Чеботарев [192]. В качестве исходных данных для вычисления радиантов скоростей и элементов орбит метеоров были введены данные в следующей последовательности: год и месяц наблюдения; номер метеора; номер вынесенного пункта, по которому вычислен временной сдвиг относительно центрального пункта для вычисления скорости метеора по сдвигу; дата и время наблюдения в часах, минутах и секундах; номер варианта; точные значения дальности; горизонтальные координаты отражающей точки на следе метеора  $A_{от}$ ;  $Z_{от}$  относительно центрального пункта; значение дифракционной скорости метеора; азимут радианта, определяемый по круговой номограмме; значение временного сдвига, вычисленного как разность между максимумами дифракционных картин (по АВХ) выносного и центрального пунктов, необходимая для измерения скорости и зенитного расстояния радианта метеора пеленгационно-временным методом.

Кроме того, в программу вычисления заведомо введены расстояние и азимут каждого выносного пункта относительно центрального пункта. Остальные такие необходимые данные, как расстояние от Земли до Солнца, орбитальная скорость Земли, долгота Солнца и звёздное время, которые обычно берутся для вычисления орбиты по «Астрономическому ежегоднику», представлены в виде аналитических функций времени [265].

Вычисление координат исправленного радианта метеора, скорости и элементов орбиты метеорного тела, осуществлялось в следующем порядке:

1. измерение импульсно-дифракционной и пеленгационно-временной скорости;
2. расчёт внеатмосферной скорости;

3. измерение горизонтальных координат зеркально-отражающей точки на следе метеора;
4. определение азимута и зенитного расстояния радианта;
5. определение горизонтальных координат видимого радианта;
6. вычисление экваториальных координат радианта;
7. определение геоцентрической скорости метеора;
8. вычисление эклиптических координат исправленного радианта;
9. вычисление гелиоцентрической скорости метеора;
10. вычисление координат истинного радианта и его элонгация от апекса;
11. вычисление элементов орбит метеороида;
12. вычисление эклиптических координат перигелия.

По каждому метеору ЭВМ вычисляла: время появления метеора в долях суток, долготу Солнца, высоту отражающей точки, зенитный угол радианта, скорость метеора по сдвигу.

Результаты вычисления элементов орбит радиометеоров представлены в следующем порядке: IC – номер метеора, Year – год, Month – месяц, Day – день (время полёта выражено в долях суток), RA и DEC – экваториальные координаты радианта,  $q$  – перигелийное расстояние,  $e$  – эксцентриситет,  $a$  – большая полуось в а.е,  $i$  – наклон орбиты к эклиптике,  $\omega$  – аргумент перигелия,  $\Omega_{\text{nod}}$  – долгота восходящего узла,  $V_g$ ,  $V_h$  и  $V_{\text{nat}}$  – геоцентрическая, гелиоцентрическая и внеатмосферная скорость,  $H$  – высота центрального пункта на следе метеора,  $\cos Z_R$  – косинус зенитного расстояния радианта,  $Q_a$  – афелийное расстояние,  $M$  – радиовеличина метеора,  $\lg N_e$  – логарифм линейной электронной плотности и в последнем столбце  $\lg m$  – логарифм массы метеора. Ниже в таблице 4.5 приведён образец представления данных в Каталоге радиантов, скоростей, орбит и атмосферных траекторий радиометеоров, наблюдаемых в Таджикистане [263].

**Таблица 4.5. - Результаты вычисления элементов орбит и данных атмосферных траекторий 8916 радиометеоров**

IC	Year	Month	Day	$\lambda \square$	RA	DEC	Q	e	a	i	$\varnothing_{arg}$	nod	Vg	Vh	Vnat	H	$\cos Z_R$	Qa	M	lgq <sub>a</sub>	lg m
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
00001	1968	12	12,7353	260,34	109,23	33,79	0,15	0,91	1,76	26,3	320,7	260,8	36,3	36,0	38,1	100,0	0,7307	3,4	2,6	13,0	-2,22
00002	1968	12	12,7358	260,34	105,03	30,10	0,16	0,92	2,15	15,9	317,7	260,8	36,2	37,3	38,1	97,8	0,7522	4,1	1,3	13,5	-1,73
00003	1968	12	12,7367	260,34	110,37	33,58	0,16	0,88	1,32	23,0	321,8	260,8	33,2	33,6	35,2	88,8	0,7258	2,5	3,0	12,8	-2,29
00004	1968	12	12,7370	260,34	112,64	27,21	0,08	0,94	1,44	16,3	332,3	260,8	37,1	34,4	38,9	94,1	0,6697	2,8	2,1	13,2	-2,04
00005	1968	12	12,7377	260,34	113,29	33,27	0,13	0,91	1,34	28,1	326,5	260,8	35,4	33,8	37,3	90,5	0,6998	2,6	3,7	12,5	-2,65
00006	1968	12	12,7383	259,96	106,63	31,03	0,19	0,86	1,31	14,9	318,8	260,4	31,4	33,6	33,5	84,8	0,7502	2,4	5,1	11,9	-3,03
00007	1968	12	12,7385	260,34	110,13	34,41	0,15	0,90	1,60	27,4	321,1	260,8	35,7	35,3	37,6	94,1	0,7358	3,1	4,1	12,4	-2,84
00008	1968	12	12,7396	260,34	108,47	32,88	0,17	0,89	1,49	21,3	320,0	260,8	34,0	34,8	36,0	90,4	0,7480	2,8	4,7	12,1	-2,99
00009	1968	12	12,7404	260,34	153,18	70,67	0,74	0,71	2,56	61,8	245,8	260,8	37,3	38,2	38,9	89,0	0,5725	4,4	4,9	12,1	-3,13
00010	1968	12	12,7405	260,34	111,16	32,01	0,12	0,93	1,65	26,0	325,6	260,8	37,1	35,6	38,9	93,4	0,7217	3,2	2,2	13,2	-2,13
00011	1968	12	12,7429	260,34	107,97	35,72	0,20	0,86	1,46	24,1	316,2	260,8	32,9	34,6	34,9	87,9	0,7742	2,7	5,6	11,7	-3,36
00012	1968	12	12,7433	260,34	111,89	32,97	0,17	0,84	1,08	19,7	323,6	260,8	30,3	31,4	32,4	86,5	0,7326	2,0	3,3	12,6	-2,28
00013	1968	12	12,7442	260,35	109,77	32,93	0,14	0,91	1,66	25,1	322,4	260,8	36,2	35,6	38,0	94,7	0,7502	3,2	3,6	12,6	-2,68
00014	1968	12	12,7459	259,97	128,20	46,05	0,22	0,82	1,24	62,9	316,3	260,4	38,3	33,0	40,0	88,9	0,6434	2,3	5,1	12,0	-3,29
00015	1968	12	12,7464	259,97	113,28	32,81	0,13	0,89	1,19	25,1	327,1	260,4	33,7	32,5	35,6	88,2	0,7240	2,3	4,8	12,1	-3,02
00016	1968	12	12,7465	259,97	100,76	24,91	0,25	0,83	1,41	2,6	311,1	260,5	29,2	34,2	31,5	83,8	0,7947	2,6	3,8	12,4	-2,43
00017	1968	12	12,7470	259,97	108,89	33,69	0,16	0,90	1,57	24,6	320,7	260,4	35,1	35,2	37,0	94,9	0,7670	3,0	3,9	12,4	-2,75
00018	1968	12	12,7478	259,97	219,45	58,89	0,98	0,43	1,72	62,9	175,0	260,4	34,9	35,9	36,4	91,3	0,1889	2,5	4,8	12,1	-2,48
00019	1968	12	12,7490	260,35	111,31	31,08	0,16	0,85	1,10	16,7	324,4	260,8	30,6	31,5	32,7	83,6	0,7470	2,0	3,9	12,4	-2,50

При этом для каждого метеора вводились: время появления метеора (год, месяц, дата, часы, минуты, секунды), точная дальность, зенитный угол и азимут отражающей точки, азимут радианта, дифракционная скорость  $V_g$ , вариант расчёта скоростей рассматривался в зависимости от качества их измерений и наличия наибольшего из трёх временных сдвигов.

Постоянно в ЭВМ были заложены данные о координатах (расположении) вынесенных и центрального пунктов, элементы орбиты и скорость Земли, а также зависимость поправки к наблюдаемой скорости на торможение метеора. Программой учитывались поправка на вращение и притяжение Земли и приведение к эпохе J2000.

#### **4.9. Методика вычисления данных атмосферной траектории метеора**

В настоящей работе для обработки физико-кинематических характеристик метеороидов были использованы метеоры, имеющие формы амплитудно-временных характеристик (АВХ), похожие на промежуточные или переуплотнённые типы следов метеоров. Основными исходными параметрами, которые необходимы для вычисления физических характеристик метеоров, являются высоты и измеренные величины длительности радиоэха. Для вычисления значения линейной электронной плотности  $q$  следов промежуточного и переуплотнённого типа с учётом прилипания и амбиполярной диффузии из [193, 204] нами получены:

$$q = (\tau e^{-k\tau} + r^2 / 4 D) D / A\lambda^2, \quad (4.2)$$

здесь:  $\tau$  – длительность радиоэха,  $A = e^2 / 4\pi^2 mc^2 = 7.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-1}$ ,  $\lambda$  – длина волны;  $e$ ,  $m$  – заряд и масса электрона,  $c$  – скорость света,  $r$  – начальный радиус следа и  $D$  – коэффициент амбиполярной диффузии. Для вычисления значений  $r$ ,  $D$  и  $k$  использованы известные формулы [73].

Соответственно, в таблице 4.5 приводится отрывок из каталога радиантов, скоростей, орбит и данных атмосферной траектории метеоров, наблюдаемых в Таджикистане.

Высота точки зеркального отражения для центрального пункта наблюдения определяется по известной формуле:

$$h = R \cos Z + \Delta h, \quad (4.3)$$

здесь:  $R$  – дальность отражающей точки,  $Z$  – зенитное расстояние отражающей точки на центральном пункте,  $\Delta h$  – поправка по высоте, учитывающая кривизну Земли и превышение пункта наблюдения над уровнем моря.

Данные о величине линейной электронной плотности позволяют вычислить радиовеличину метеора по формуле, полученной по работам [142, 150] в виде:

$$M = 35 - 2.5 \lg q, \quad (4.4)$$

где  $q$  - значение линейной электронной плотности в эл/см.

Расчётная формула для вычисления массы метеорных тел с учётом дробления имеет вид [199-201]:

$$m_r = 3 N^* \mu q_m / 4 \beta \cos Z, \quad (4.5)$$

где:  $m_0$  – начальная масса метеорного тела,  $\beta$  – коэффициент ионизации,  $Z_r$  – зенитное расстояние радианта,  $\mu$  – масса атома метеорного вещества,  $N^*$  – высота однородной атмосферы.

При расчётах высоты однородной атмосферы  $N^*$  в точке зеркального радиоотражения использованы следующие полиномиальные ряды:

- 1)  $N^* = 0.0015 h^2 - 0.2978 h + 19.76$  - при диапазоне высот  $60 < h < 89$  км;
- 2)  $N^* = 0.007 h^2 - 1.381 h + 69.12$  - при диапазоне высот  $90 < h < 125$  км.

Для вычисления массы радиометеора использованы данные о коэффициенте ионизации, рассчитанные по результатам комбинированных радиооптических наблюдений для широкого диапазона скоростей [98, 265]. Зависимость коэффициента ионизации от скорости была получена в виде:

$$\beta = 10^{-7.7} \cdot V^{3.9}, \quad (4.6)$$

где  $V$  выражено в км/с.

Формулы (4.3) и (4.6), применяемые для редукции физических характеристик радиометеоров, получены на основе результатов одновременных

радиооптических наблюдений. Эти формулы были использованы для калибровки данных радионаблюдений с результатами, полученными оптическим методом.

Образцы результатов вычисления элементов орбит и данных атмосферных траекторий 8916 радиометеоров представлены в таблице 4.5 на основании [263, 294, 299].

Таким образом, на основании результатов базисных радиолокационных наблюдений метеоров с четырёх пунктов в Таджикистане составлен каталог орбит и атмосферных траекторий 8916 метеоров [263]. Ниже приводится анализ распределения радиантов, скоростей и данные атмосферных траекторий 8916 метеоров.

#### **4.10. Распределение радиантов, скоростей, элементов орбит и данные атмосферных траекторий 8916 радиометеоров**

Наши знания о структуре метеорных потоков, а также обилие радиантов спорадических метеороидов были получены, главным образом, из наблюдений за явлением метеоров в атмосфере Земли. Несколько исследовательских групп систематически или во время наблюдательной кампании регистрировали метеоры с использованием различных методов наблюдений: традиционных и цифровых фотографий, радаров, видео- и ТВ-оборудования. Полученные результаты были опубликованы в печатной форме или в виде локальной базы данных. С восьмидесятых годов прошлого века [290-298] Центр метеорных данных ЦМД МАС собирает орбитальные и геофизические данные параметров отдельных метеороидов. Эти данные находятся в свободном доступе, на выделенном сайте, размещённом на сервере, поддерживаемом Астрономическим институтом Словацкой академии науки в Татранской Ломнице. Последняя версия базы данных ЦМД МАС (MDC IAU) выпущена в 2016 г. и содержит коллекцию из 4873 фотографических записей [269] и новый каталог на основе видеоматериалов 110521 наблюдаемых метеоров Камерами для системы наблюдения за всем небом (CAMS) [272-276], в каталоге для

метеоров учитывались следующие параметры: начальная масса метеорного тела ( $m_0$ ), коэффициент ионизации ( $\beta$ ), зенитное расстояние радианта ( $Z_r$ ), масса атома метеорного вещества ( $\mu$ ), высота однородной атмосферы ( $H^*$ ), энергия, необходимая для нагревания 1 г метеорного вещества до температуры испарения ( $Q_n$ ), энергия, необходимая для нагревания и испарения 1 г метеорного вещества ( $Q$ ).

Фотографические, телевизионные и видеонаблюдения дают нам только информацию о метеорах, наблюдаемых в ночное время суток: потоки, ассоциации и спорадические. По общему признанию, некоторые видеобазы данных содержат небольшую часть дневных метеоров, но дневные потоки в основном изучались на основе радиометеорных данных. Как известно, радиометеорные наблюдения не зависят от каких-либо конкретных атмосферных или дневных и ночных условий. Поэтому считалось полезным присоединить к Базе метеорных данных ЦМД МАС выборку из 8916 радиометеорных данных, полученных на Гиссарской астрономической обсерватории в Таджикистане [263].

Даты наблюдений 8916 радиометеоров охватывают интервал синоптических лет с декабря 1968 г. по декабрь 1969 г. Такая выборка позволяет изучать метеорные потоки и ассоциации, и может служить для различных сравнений между радарными, видео- и фотографическими. В диссертации мы представляем радиометеорные данные Гиссарской астрономической обсерватории, которые доступны на веб-сайте MDU IAU (<https://www.astro.sk/~ne/IAUMDC/PhVR2020/>).

Материал наблюдений был получен с помощью радиолокационной системы МИР-2. Краткое описание обработки наблюдательного материала для определения горизонтальных координат (азимута и зенитного расстояния зеркально-отражающей точки на следе метеора), высоты, скорости и горизонтальных координат радианта (азимута и зенитного расстояния) можно найти в [185].

Гиссарская радиометеорная выборка данных составляет 8916 метеоров, наблюдавшихся в период с 7 декабря 1968 г. до 24 декабря 1969 г. Следует отметить, что эти данные были представлены в опубликованном каталоге Нарзиевым и Чеботаревым [185]. Данные ГисАО, включённые в ЦМД МАС, содержат:

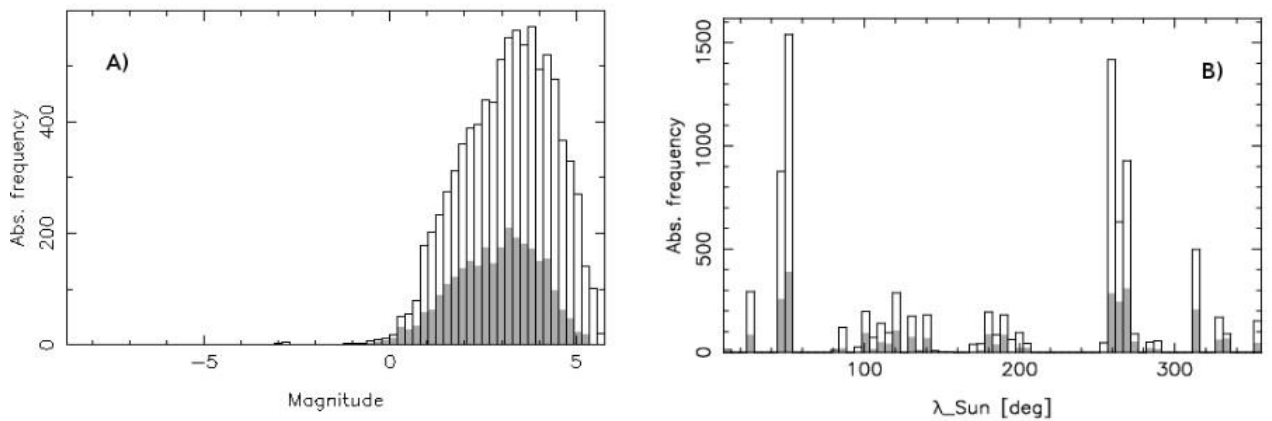
- а) геоцентрические параметры (геоцентрические экваториальные координаты радиантов и скорость),
- б) гелиоцентрические Кеплеровы оскулирующие элементы орбит,
- в) некоторые физические величины: внеатмосферные массы, звёздные величины радиометеора и линейные плотности электронов для высоты центральной точки метеорного следа.

Координаты радианта и угловые орбитальные элементы соответствуют эпохе J2000. Для расчёта орбитальных элементов, получения геоцентрических координат Земли во время наблюдения за метеорами нами использованы эфемериды планеты JPL 431 [265], а также данные представленные в 2020 <https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd414>.

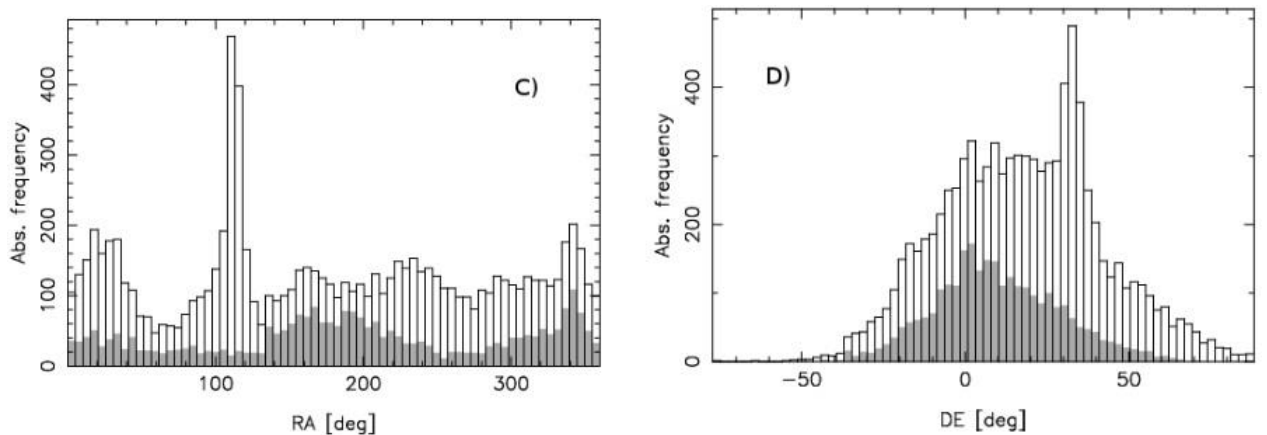
Для 8916 радиометеоров, наблюдаемых в Гиссарский обсерватории, были построены гистограммы (рисунки 4.3-4.5), где выбранными параметрами были следующие. Для рисунка 4.3 - А) распределение радара метеоров по значениям звёздной величины, которая сосредоточена в основном в диапазоне 0–5,5<sup>m</sup> с максимумом на 3,3<sup>m</sup>; В) эклиптическая долгота Солнца при появлении метеора. Основная масса метеоров в пике наблюдалась во время декабрьской активности метеорного потока Геминид. Затемнённые участки относятся к ретроградным орбитам. Большинство значений радиомagnitude попадает в интервал 0–5,5<sup>M</sup> (рисунок 4.3А) с максимумом на 3,3<sup>M</sup>. Однако был зарегистрирован случай одного яркого болида (-8,6<sup>M</sup>) и нескольких других ярких метеоров. Валовые массы метеороидов лежат в интервале от 10<sup>-4</sup> до 1 г.

Рисунок 4.4 представляет собой гистограмму, на которой отмечается прямое восхождение (С) и склонение геоцентрических метеорных радиантов (D). Выделяющиеся пики соответствуют Геминидам.

Распределение эклиптических долгот Солнца при появлении метеора, как показано на рисунке 4.3В, не является равномерным. Видны несколько пробелов и два отчётливых пика. Декабрьский пик соответствует потоку Геминид (4/GEM). Второй пик, наблюдаемый в мае, имеет отношение к сильному метеорному потоку  $\eta$ -Акварид. Вместо него в этом месяце в большинстве случаев наблюдались малые метеорные потоки и ассоциации. Это хорошо видно на рисунках 4.4С и 4.4D, где только один пик соответствует геоцентрическим радиантам Геминид.



**Рисунок 4.3. - Гистограммы выбранных параметров 8916 радиометеоров, наблюдаемых в Гиссарской обсерватории: А) распределение радара метеоров по значениям звёздной величины, В) эклиптическая долгота Солнца при появлении метеора**

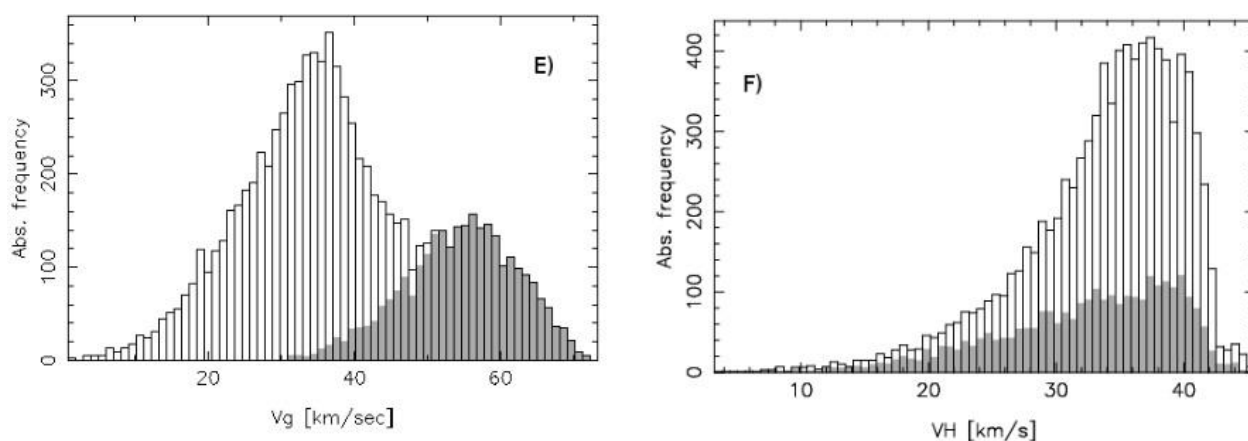


**Рисунок 4.4. - Распределение метеоров по прямому восхождению С) и склонению D) в геоцентрической системе координат**

Используя итерационный метод отделения метеорного потока, по аналогичному методу точки излома [190], но с фиксированным порогом орбитального подобия  $Dl = 0.1$  (орбитальное подобие оценивается с помощью

D-критерия [277]), мы обнаружили, что в выборке ГисАО относительно хорошо определённый поток Геминид состоит из 223 метеороидов.

На рисунке 4.5 в виде гистограммы показано распределение геоцентрических (E) и гелиоцентрических (F) скоростей метеороидов Геминид. Как видно из рисунка 4.5, распределения имеют различные свойства: первое имеет два максимума, последнее – только один.



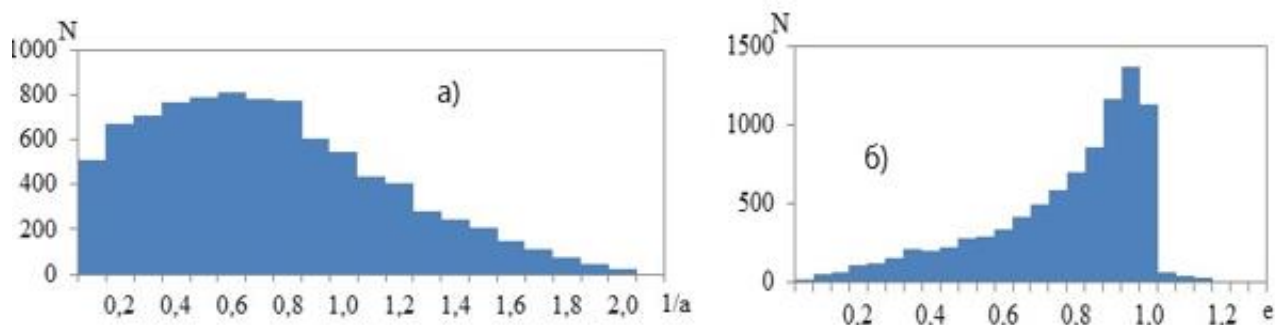
**Рисунок 4.5. - Распределение геоцентрических E) и гелиоцентрических F) скоростей метеороидов**

Среднее значение  $VG = 35,1 \pm 2,1$  км/с. Для менее ограничительного поиска, используя  $D1 = 0,20$ , мы нашли 555 Геминид, для которых  $VG = 34,6 \pm 3,1$  км/с<sup>-1</sup>. Эти результаты согласуются со скоростью Геминид  $35 \pm 2,8$  км/с, приведённой в [38]. Гистограмма геоцентрической скорости всей выборки Гиссара представлена на рисунке 4.5E, и её характерное бимодальное распределение очевидно.

Бимодальный характер этого распределения возникает из-за того, что значения геоцентрических скоростей представляют собой суперпозицию двух компонентов, гелиоцентрических орбитальных скоростей метеороида и скорости Земли. Что касается ретроградных орбит, то наименьшая геоцентрическая скорость  $\sim 30$  км/с. На рисунке 4.5F показано распределение гелиоцентрической скорости метеороида. В правом хвосте этого распределения мы отметили, что 148 метеороидов двигались по гиперболическим гелиоцентрическим орбитам. Некоторые из них на самом деле не являются гиперболическими. Гиперболическая орбита могла быть следствием

неопределённостей измерений, особенно из-за неопределённости геоцентрической скорости. Однако учитывая недавнее открытие 11 Оумуамуа, 21/Борисов и 31/ATLAS (2025) умеренно активные кометы и первые межзвёздные малые тела, зарегистрированные внутри Солнечной системы, мы не должны пренебрегать существованием межзвёздных метеороидов. По мнению С. К. Всехсвятского [238], минимальные пределы для уверенных гиперболических орбит могут иметь величину эксцентриситета  $e = 1,35$ , а меньшие значения эксцентриситета могут быть обусловлены ошибками измерений.

Результаты анализа распределения больших полуосей орбит метеоров ярче +5 звёздной величины приводятся на рисунке 4.6а.



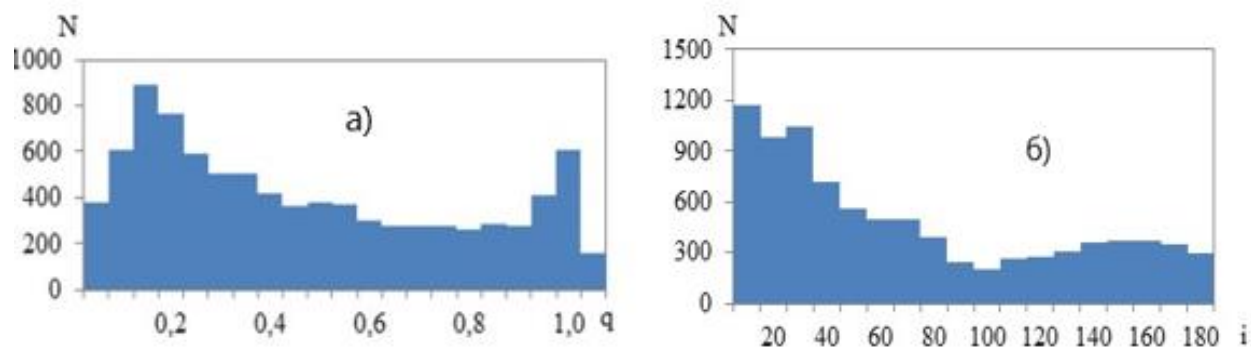
**Рисунок 4.6. - Распределение метеоров по большим полуосям (а) и по эксцентриситетам (б)**

Анализ гистограммы распределения больших полуосей, полученной автором относительно аналогичных данных, полученных в Гарварде и Харькове для метеоров +10 ÷ +12, показал, что они оказались несколько сдвинутыми в сторону меньших  $1/a$ .

Распределение по эксцентриситетам имеет чёткий максимум в интервале 0.90-0.95, когда по материалам, полученным в [60], максимум в распределении по эксцентриситетам среди слабых радиометеоров наблюдается в интервале 0.7-0.8 (рисунок 4.6б).

Распределение по перигелийным расстояниям приведено на рисунке 4.7а. Очевидно, что ход распределения характеризуется двумя максимумами. Первый максимум находится в интервале 0.1-0.2, а второй в интервале 0.95-1.0.

Распределение метеоров по наклонам орбит представлено на рисунке 4.7б. Из гистограммы распределения следует, что подавляющему большинству метеоров свойственно прямое движение. Доля метеоров с наклоном больше 90 градусов составляет 31.4%.



**Рисунок 4.7. - Гистограммы распределения: а) перигелийных расстояний, б) наклонов орбит к плоскости эклиптики**

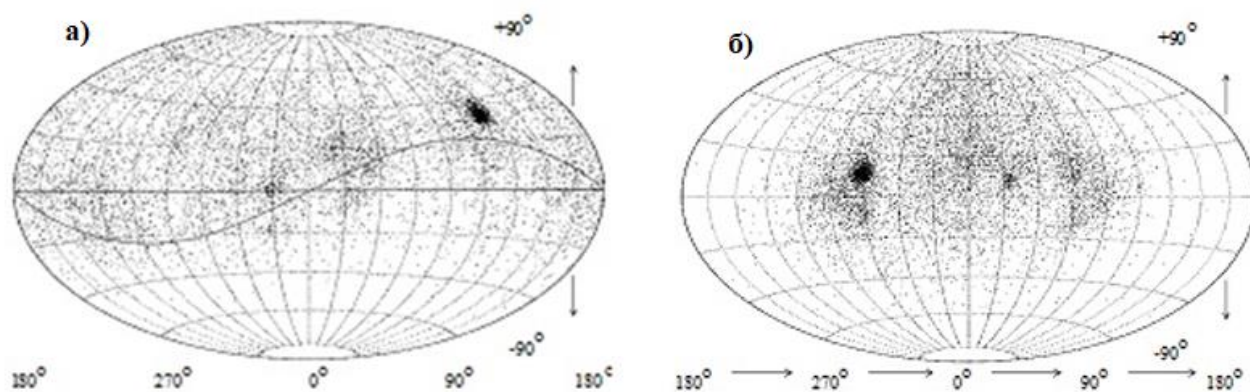
Проекция Хаммера геоцентрических радиантов 8916 радиометров показана на рисунке 4.8. Как видно из рисунка 4.8а, здесь приведено двухмерное распределение по экваториальным координатам. Синусоидальная пунктирная кривая представляет эклиптику. Концентрация радиантов Геминид является очень компактной.

На рисунке 4.8б те же радианты изображены в координатах эклиптики, которые с долготой эклиптики сместились таким образом, что вершина движения Земли вокруг Солнца находится в начале координатной системы.

Очевидно, что большинство радиантов расположено в северном полушарии. Помимо Геминид и  $\eta$ -Акварид видны и широкие скопления (яркие точки) радиантов малых метеорных потоков и ассоциаций. Благодаря географическому местонахождению комплекса МИР-2 в ГисАО, много потоков и ассоциаций наряду со спорадическими метеорами были замечены (наблюдены) в южной небесной полусфере. Очевидно, что расположенные выше целестиального экватора радианты распределены почти равномерно.

На рисунке 4.8б использовалась система отсчёта, центрированная по эклиптике по вершине Земли. В этом кадре общая эклиптическая долгота  $\lambda_s$

изменена на долготу  $\lambda_2$ , связанную с последней, как  $\lambda_2 = \lambda_c - (\lambda_{\odot} + 270^\circ)$ , где  $\lambda_{\odot}$  – солнечная долгота метеора. Справа отчетливо видна концентрация антигелия.



**Рисунок 4.8. - Диаграмма распределения Хаммера-Айто для геоцентрических радиантов 8916 метеоров, наблюдаемых в ГисАО: а) двумерное распределение по экваториальным координатам; б) система отсчёта, центрированная по эклиптике по вершине Земли**

## **ГЛАВА 5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ И АССОЦИАЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ТАДЖИКИСТАНЕ**

### **5.1. О формировании метеорных роёв, потоков и ассоциаций метеороидов**

Как известно, Солнечная система наряду с большими планетами и их спутниками, астероидами и кометами, объектами пояса Койпера и облака Оорта состоит из огромного количества межпланетных частиц самых различных размеров: от частиц сопоставимых с размером атомом и молекулой до тел декаметрового и метрового размера. Совокупности этих частиц в науке принято называть метеорным веществом. В настоящее время общепризнано два наиболее вероятных источника образования и формирования метеорных роёв: первый - кометные и второй - астероидные. Общепризнано, что кометы являются остатками выброшенного вещества зарождающихся планет на ранних стадиях формирования Солнечной системы. Эти тела сконцентрированы в поясе Койпера, а также в облаке Оорта, которое расположено на расстоянии в 100000 а.е. от Солнца. Их количество предположительно насчитывается от нескольких десятков миллионов до миллиардов штук. Орбиты некоторых из них под воздействием возмущений от ближайших звёзд, переходят на вытянутые орбиты и, приближаясь к Солнцу, становятся членами Солнечной системы. Кометы обычно имеют вид туманных объектов. Они по мере сближения с Солнцем на расстояние менее 4-5 а.е. прогреваются и с их поверхности начинают испаряться газы и высвобождаться пылевые частицы различных размеров.

Наибольшее количество пылевыведения или выброс вещества кометы происходит при прохождении кометы через перигелий. Наиболее яркую центральную часть кометы составляет ядро, окружённое пылевой комой и хвостом. Метеорный рой образуется в результате выброса метеорных тел из поверхности ядра кометы, представляющих собой конгломерат замёрзших газов и твёрдых частиц. Поэтому они характеризуют эволюционное состояние

вещества (по времени) кометы-родоначальницы или астероидов, которые остались после дезинтеграции кометных ядер при прохождении через ближайшее расстояние от Солнца.

Астероидное происхождение метеорных роёв связано с фрагментацией при дроблении их тела при взаимных столкновениях с другими астероидами, болидообразующими или метеоритообразующими телами. Ныне немаловажную значимость представляют результаты исследования взаимосвязи между малыми телами Солнечной системы по результатам фотометрических, поляриметрических и спектроскопических наблюдений [Rosenbush, N. Kiselev].

В пользу подобного механизма формирования метеорных роёв свидетельствует сходство данных о радиантах, скоростях и элементах орбит некоторых комет и метеорных потоков, отмеченное разными исследователями. Вопросы формирования и эволюции метеорных роёв и связь между метеорными потоками с кометами и астероидами были исследованы в ряде работ [266, 273, 278-281, 283-287, 290, 293, 295, 301, 306].

Образовавшийся ансамбль частиц за период десятков тысяч лет, ввиду наличия дисперсии по скоростям, распространяется вдоль объекта-родоначальника и образует метеорный рой, форма которого похожа на булочку. На пространственное формирование структуры метеорного роя оказывает влияние ряд факторов, в том числе эффект Пойтинга-Робертсона. Под воздействием этого эффекта метеороиды постепенно сортируются в рое в зависимости от своих масс: крупные частицы остаются на первоначальной орбите, близкой к орбите кометы или астероида-родоначальника, а мелкие частицы под действием солнечных фотонов, то есть радиации, замедляют движение в метеорном рое, вследствие чего они медленно двигаются по спирали в направлении к Солнцу.

Частицы метеорного вещества наряду с другими телами Солнечной системы двигаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам и их скорости заключаются в диапазоне 11.2-72.8 км/с. Они постоянно подвергают бомбардировке планеты Солнечной системы и, в частности, планету Земля,

кометы и астероиды. Частицы метеорного вещества (межпланетные пылевые облака) в метеорной астрономии принято называть метеорными телами или метеороидами.

Метеорное вещество, которое содержит частицы с самыми различными массами, начиная от массы атома до массы тела дециметрового и метрового размера, и его составляющие компоненты, такие как метеороидные рои, метеорные потоки и ассоциации, метеороиды спорадического фона наряду с астероидами и кометами составляют важную популяцию малых тел Солнечной системы. Являясь продуктом разрушения ядер комет и астероидов, метеороидные рои движутся по близким гелиоцентрическим орбитам своих родительских тел и вследствие различия в скоростях выбрасываемых частиц, воздействия гравитационных и негравитационных сил, включая притяжение больших планет и т.д., образуют замкнутые эллиптические кольца вдоль их орбит. При пересечении метеороидного роя с Землёй наблюдается метеорный поток – явление в земной атмосфере, регистрируемое наземными визуальными, оптическими (фотографическими, электронно-оптическими, телевизионными, болидными и видеокамерами), инфразвуковыми и радиолокационными средствами наблюдений. В периоды активности потоков длительностью от нескольких часов для одних, до нескольких недель для других потоков большое количество метеоров появляется из определённой точки неба – радианта.

В дальнейшем под действием гравитационных и негравитационных сил и дальнейшим «вычерпываем» метеорного вещества при многочисленных встречах с Землёй, плотность потока метеорных роёв очень сильно уменьшается и порождающий роём метеорный поток становится спорадическим фоном.

Метеорные потоки и в том числе малые потоки и ассоциации относятся к важнейшим составным компонентам метеорного вещества. Следовательно, изучение комплексных характеристик метеороидов и особенно кинематических и физических представляет большой интерес не только для метеорной астрономии, но и имеет практическое и прикладное значение в области

распространения радиоволн, геофизики, космонавтики и космогонии Солнечной системы.

Ввиду того, что метеорные потоки и ассоциации наряду с мелкими частицами содержат и декаметровые тела (об этом свидетельствует распад ряда кометных ядер Шумейкер-Леви [288] на крупные фрагменты и наличие больших метровых тел в метеорном комплексе Таурид [1], связь поточных метеороидов с астероидоподобными телами и результаты математического моделирования эволюции малых тел Солнечной системы [283-287, 290, 293, 295, 301, 306] то их исследование представляет большой интерес для прогноза космической угрозы.

## **5.2. Вклад визуальных, фотографических, видео-, телевизионных и радионаблюдений в изучение метеорных потоков**

Как известно, исследование радиантов, скоростей и элементов орбит метеорных потоков и ассоциаций первоначально проводилось на основании данных визуальных, визуально-телескопических, а затем оптических: фотографических и с конца 1960-х годов - телевизионных и видеонаблюдений. Начиная с 90-х годов двадцатого века и особенно в последних двух десятилетиях XXI столетия очень широко внедрялись видеонаблюдения метеоров в широком диапазоне звёздной величины во многих западных странах Европы, США, Канаде, Японии, Южной Корее и Китае, о чем свидетельствует развёртывание ряда видео- и болидных сетей [114-122]. В результате видеонаблюдений накоплены богатейшие наблюдательные материалы, которые представлены в ЦМД МАС [283-287, 290, 293, 295, 301, 303].

Известно также исследование малых метеорных потоков в сочетании с комбинированием визуальных и фотографических наблюдений [227, 230]. Однако визуальные и все оптические методы наблюдений применяются только в безоблачное ночное время суток, и они позволяют исследовать кинематические характеристики исключительно ночных метеорных потоков и ассоциаций.

Применение радиолокационного метода для исследований метеорного вещества открыло широкие возможности для изучения не только ночных, но и дневных метеорных потоков и ассоциаций, независимо от погодных условий, времени года, суток и т.д. Учитывая преимущество этого метода, исследователи, начиная со второй половины прошлого века, уделяли особое внимание развитию и внедрению радиолокационного метода исследования радиантов, скоростей и элементов орбит метеоров. В методическом плане было разработано несколько методов определения радиантов, скоростей и элементов орбит индивидуальных метеоров, таких как статистический, импульсно-дифракционный, непрерывно волновой, метод наклонного отражения радиоволн, дальномерно-дифракционный и пеленгационно-временный, сущность, преимущество и недостатки каждого из которых подробно изложены в работах [7, 60].

Однако подавляющее большинство опубликованных статей и радиокаталогов метеорных потоков и ассоциаций базировались на измерении радиантов и скоростей метеоров слабее  $+6 \div +12^m$  на основе импульсно-дифракционного метода. Единственный каталог метеорных потоков и ассоциаций, который был составлен по результатам радионаблюдений метеоров ярче  $+6$  звёздной величины методом непрерывной радиолокации (в Аделанде), содержал лишь данные о радиантах, расположенных в южной области небесной полусферы [109]. А данные о 78 метеорных потоках и ассоциациях, выявленные по результатам предварительного анализа 4242 радиантов, скоростей и элементов орбит метеоров, полученных по материалам Советской экваториальной метеорной экспедиция (СЭМЭ) в Могадишо (Сомали) в 1968-1970 гг. [176], не были опубликованы.

Как уже было отмечено, импульсно-дифракционный метод неприемлем для измерения радиантов и скоростей более 70% метеоров (включая метеоры с замытыми дифракционными картинками), что занижает общее количество обрабатываемых метеоров. Это искусственно искажает картину распределения радиантов метеоров по небесной сфере.

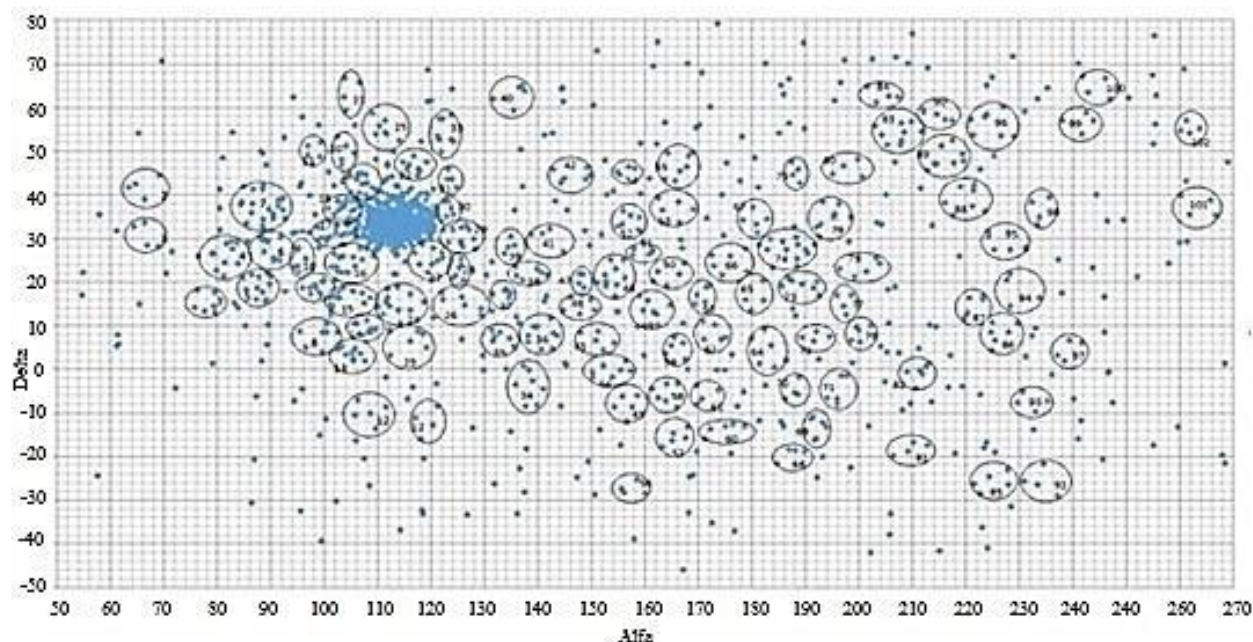
Используемый в Институте астрофизики НАНТ пеленгационно-временной радиометод измерения радиантов и скоростей индивидуальных метеоров [296], как по своей чувствительности, так и по точности измерений превосходит импульсно-дифракционный метод. Следовательно, представляет особый интерес изучение радиантов, скоростей и элементов орбит метеоров потоков и ассоциаций, порождаемых метеорами ярче +5 звёздной величины с использованием пеленгационно-временного радиометода, который раньше не был использован для интерпретации данных радиолокационных наблюдений.

### **5.3. Идентификация метеорных потоков и ассоциаций по результатам радиолокационных наблюдений в Таджикистане**

Для исследования метеорных потоков и ассоциаций нами использованы результаты базисных радиолокационных измерений радиантов, скоростей и орбит 8916 метеоров, наблюдаемых с четырёх пунктов в ГисАО Института астрофизики НАНТ в период работы метеорной экспедиции в Сомали с декабря 1968 по январь 1970 гг. Результаты обработки полученного материала, методика измерения радиантов и скоростей индивидуальных метеоров, способ отождествления метеорных потоков и ассоциаций, поиск выявленных метеорных потоков и ассоциаций в Таджикистане среди других каталогов и данные о физических характеристиках метеороидов изложены в [177, 185].

Необходимо отметить, что идентификация потоков и ассоциаций осуществлялась на основе данных радиантов, скоростей и элементов орбит свыше 10683 индивидуальных метеоров в два этапа: а) графическим по двумерному распределению по координатам радиантов и скоростей и б) с применением критерия Саутворта-Хокинса и критерия Йопека [292]. Результаты двумерного распределения метеоров по прямому восхождению и склонению приведены на рисунке 5.1. В гистограмме чётко выделяется концентрация радиантов метеороидов, принадлежащих метеорному потоку Геминид. Общая картина распределения метеороидов по координатам радианта для потока Геминид похожа на эллипсоид. Это, по-видимому, связано с

суточным смещением радианта. Для подтверждения этого обстоятельства мы для каждого значения долготы Солнца вычисляли средние значения прямого восхождения и склонения и затем по парным соседним значениям долготы Солнца вычисляли разность значений  $\Delta\alpha_R$  и  $\Delta\delta_R$  от среднего значения.



**Рисунок 5.1. - Двухмерное распределение метеоров по прямому восхождению и склонению для периода наблюдений с 7 по 15 декабря 1969 г.**

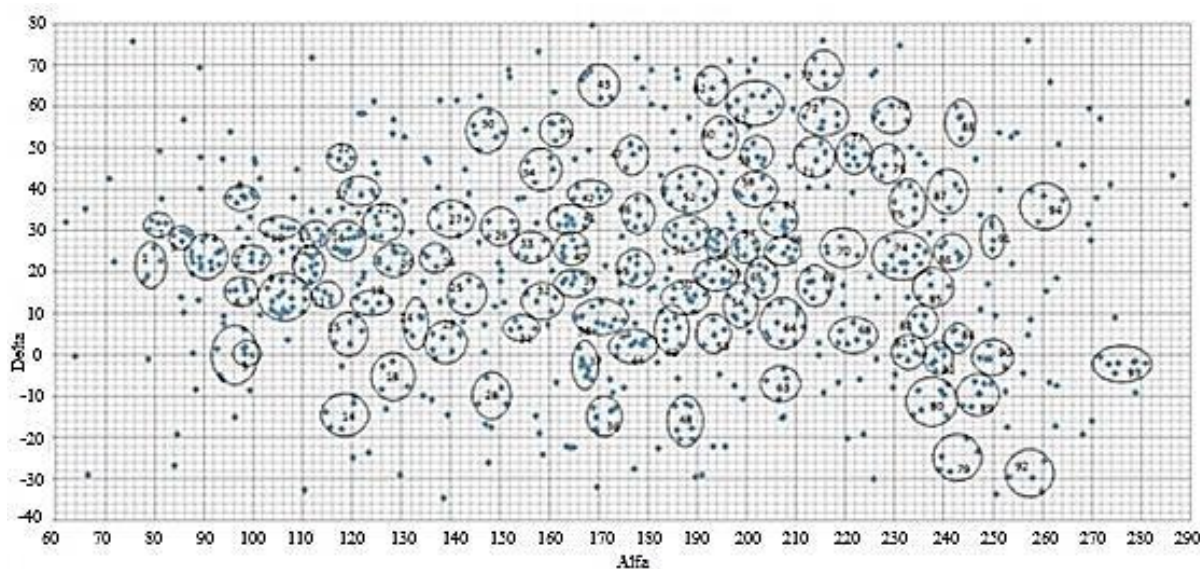
Дата максимума активности потока приходится на ночь 12-13 декабря. В результате расчёта для метеорного потока Геминид величина суточного смещения координат радианта получена:  $\Delta\alpha_R = +0.78^\circ$  и  $\Delta\delta_R = +0.26^\circ$ .

Был построен график двухмерного распределения метеоров по прямому восхождению  $\alpha_r$  и склонению  $\delta_r$ . В результате этого было выявлено свыше 300 скоплений радиантов метеоров, отличавшихся от спорадического фона повышенной концентрацией радиантов.

На рисунке 5.1, наряду с областью радиантов метеороидов потока Геминид, наблюдается ещё большое количество скоплений радиантов, то есть область превышения концентрации радиантов метеоров относительно спорадического фона. При этом каждой группе скопления радиантов метеороидов, выделяемой относительно спорадического фона, присвоен номер. Нумерация скопления радиантов произведена по мере увеличения прямого восхождения и склонения. Формы большинства скоплений радиантов метеоров

похожи на эллипс, что связано с суточным движением радиантов метеоров потоков и ассоциаций. Общее количество скоплений радиантов для периода действия потока Геминид составляет 96 групп.

На рисунке 5.2 приведена гистограмма двумерного распределения метеоров по экваториальным координатам радиантов ( $\alpha_R, \delta_R$ ) для периода наблюдений с 19 по 24 декабря 1969 г. И здесь отмечены группы скопления радиантов, отличающиеся от спорадического фона. Как и в первом случае, группам, отделяющимся от спорадического фона, присвоены номера. Распределения радиантов метеоров в каждом скоплении обозначены кружками и эллипсами, которые отличаются друг от друга по форме и диаметрам. Диаметры отделяемых групп потоков и ассоциаций метеороидов находятся в диапазоне от  $3^\circ \times 3^\circ$  до  $10^\circ \times 10^\circ$ .



**Рисунок 5.2. - Двухмерное распределение метеоров по прямому восхождению и склонению для периода наблюдений с 19 по 24 декабря 1969 г.**

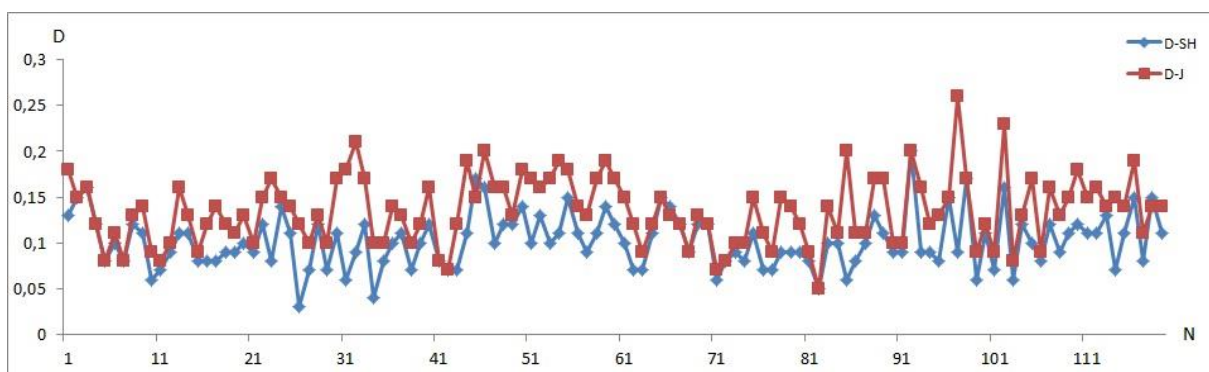
Второй этап фильтрации метеороидов по потокам и ассоциациям проводился по скоростям. При этом те метеороиды, у которых скорость резко отличалась относительно метеороидов с близкими значениями скоростей в группе, исключены из дальнейшей обработки. Далее для каждого потока и ассоциации вычислялись средние значения координат радиантов, скоростей и элементов орбит. Окончательный отбор метеороидов, принадлежащих к заданному потоку или ассоциации, осуществлялся с применением критериев

Саутворта-Хокинса и Йопека [291, 292]:

$$D_{SH}^2 = (e_1 - e_2)^2 + (q_1 - q_2)^2 + \left(2 \sin \frac{I_{21}}{2}\right)^2 + \left(\frac{e_1 + e_2}{2}\right)^2 \left(2 \sin \frac{\Pi_{21}}{2}\right)^2.$$

$$D_J^2 = (e_1 - e_2)^2 + \left(\frac{q_1 - q_2}{q_1 + q_2}\right)^2 + \left(2 \sin \frac{I_{21}}{2}\right)^2 + \left(\frac{e_1 + e_2}{2}\right)^2 \left(2 \sin \frac{\Pi_{21}}{2}\right)^2.$$

Результаты расчёта D-критерия по Саутворту-Хокинсу и по Йопеку для всех скоплений радиантов потоков и ассоциаций представлены на рисунке 5.3. Очевидно, что численное значение D-критерия, рассчитанного для потоков и ассоциаций по критерию Саутворта-Хокинса, находится в диапазоне от 0.025 до 0.2, а по критерию Йопека - в интервале от 0.05 до 0.27. Результаты расчёта, проводимого по обоим критериям, подтверждают достоверность этих потоков и ассоциаций.



**Рисунок 5.3. - Результаты вычисления D-критерия а) по Саутворту-Хокинсу и б) по Йопеку для метеороидов потоков и ассоциаций**

Для окончательного подтверждения принадлежности метеоров к той или иной группе нами по метеороидам, входящим в заданную группу, производился расчёт по критериям Саутворта-Хокинса и Йопека. В результате фильтрации по критериям Саутворта-Хокинса и Йопека, из 196 скоплений, отделяемых из спорадического фона, только 119 групп удовлетворяли указанным критериям и отнесены к каталогу малых потоков и ассоциаций.

В целом, в результате фильтрации данных группировок по скоростям и с применением D-критерия и исключения групп с численностью менее четырёх метеоров, осталось 314 потоков и ассоциаций.

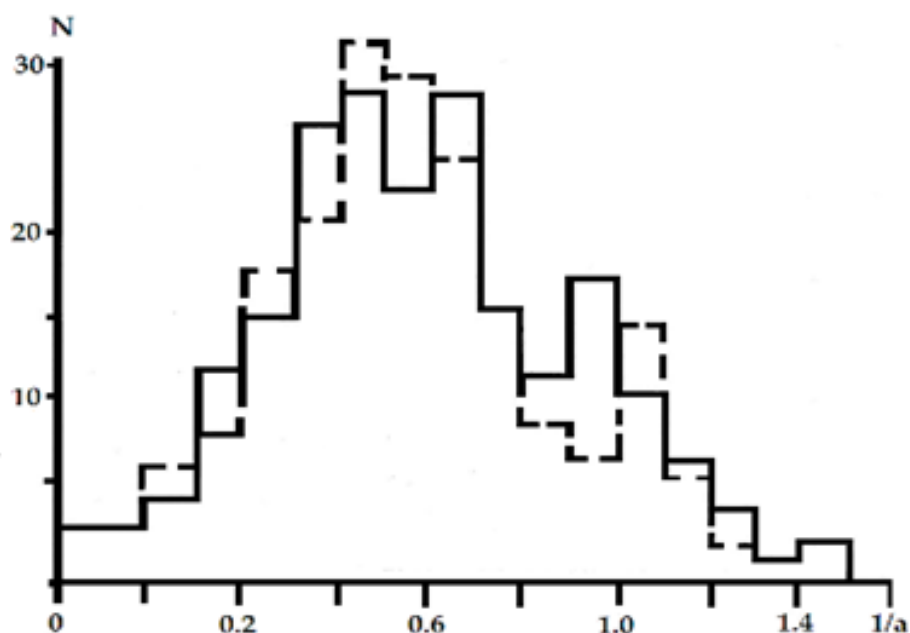
Результаты идентификации метеорных потоков и ассоциаций в виде

каталога представлены в приложении 2, где в первом столбце дан  $N$  – номер потока и ассоциации, во втором – период наблюдения, в третьем и четвертом столбцах – экваториальные координаты исправленного радианта  $\alpha_R$ ,  $\delta_R$ , в пятом – значение  $V_\infty$  – внеатмосферной скорости, в шестом – величина  $1/a$  – большой полуоси, в седьмом значение  $e$  – эксцентриситета, в восьмом –  $q$  – перигелийное расстояние, в девятом столбце приведён  $i$  – наклон эклиптики к экватору, в десятом столбце дана  $\Omega$  – долгота восходящего узла, в одиннадцатом –  $\omega$  – аргумент перигелия, и в последнем столбце дана принадлежность к потоку или ассоциации.

#### **5.4. Распределение метеорных потоков и ассоциаций по элементам орбит**

Далее, используя данные, приведённые в приложении 2 для метеорных потоков и ассоциаций, нами построены распределения метеорных тел по элементам орбит. Распределение значений больших полуосей  $1/a$  для метеорных потоков и ассоциаций по нашим результатам и результатам радиолокационных наблюдений более слабых метеоров в Харькове [224], приведено на рисунке 5.4. Несмотря на то, что наши данные относятся к более ярким метеорам, форма распределения по большим полуосям, как по нашим материалам, так и по данным, полученным в Харькове, близки друг другу.

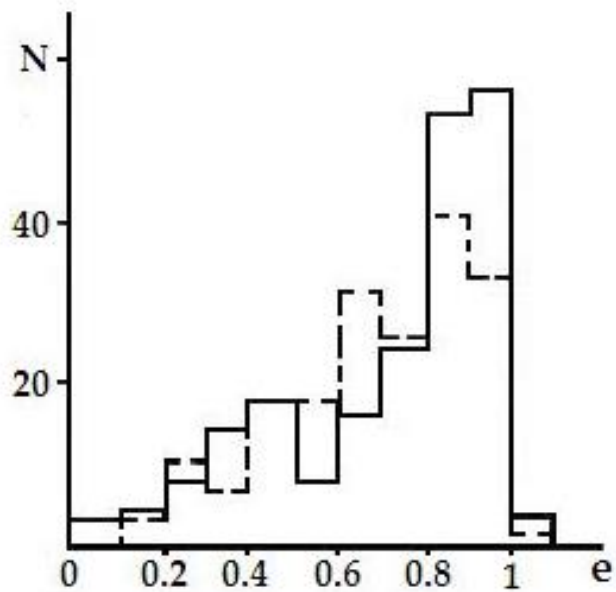
Из рисунка 5.4 следует, что у большинства метеорных потоков и ассоциаций значение большой полуоси находится в диапазоне 1-10 а.е., с максимумом в районе 2 а.е. В гистограмме распределения по большим полуосям наблюдаются два максимума. Первый максимум по обоим материалам приходится на интервал 1.4-3.3 а.е. с максимумом в районе 2.0. а.е. Второй максимум в распределении по  $1/a$  для наших метеоров приходится на интервал 0.9-1 а.е., а у метеоров, полученных в Харькове, находится в районе 1-1.2 а.е. Доля потоков и ассоциаций с гиперболическими орбитами составляет 1.9%, что возможно обусловлено ошибками измерения скоростей метеоров. Метеорные потоки и ассоциации с  $a < 1$  а.е. составляют 11.6% от общего количества метеоров.



**Рисунок 5.4. - Измеренное распределение большой полуоси  $1/a$  метеоров потоков и ассоциаций: сплошная линия - наши результаты, пунктирная - по работе [224]**

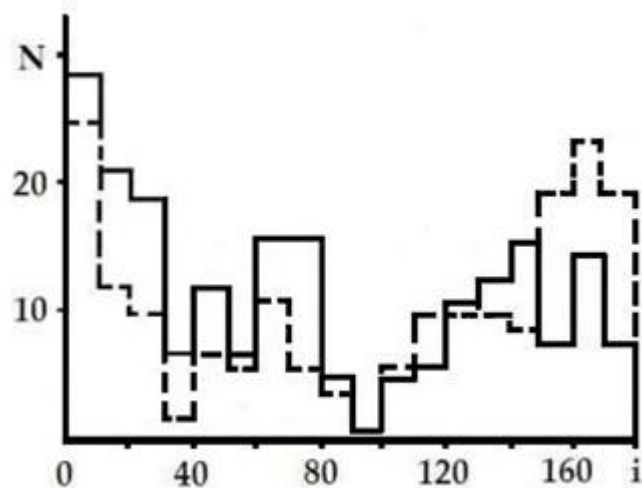
**Измеренное распределение по эксцентриситетам.** Гистограмма распределения метеоров по эксцентриситетам приведена на рисунке 5.5. Формы распределения по эксцентриситетам для наших метеоров и метеоров, полученных по результатам радиолокационных наблюдений в Харькове, в диапазоне 0.8-1 совпадают друг с другом. Для наших метеоров ярче +5 звёздной величины характерны два максимума в распределении по эксцентриситетам. Первый максимум для наших метеорных потоков и ассоциаций находится в диапазоне 0.4-0.5, а по материалам, полученным в Харькове, в интервале 0.6-0.7. Доля метеорных потоков и ассоциаций со значением  $0.3 \leq e \leq 0.5$  составляет всего 10 процентов.

Однако у 53% метеорных потоков и ассоциаций, выявленных по наблюдательным материалам в ГисАО, значение  $e$  находится в интервале 0.8-1. А у слабых метеоров, по данным телевизионных наблюдений, первый максимум наблюдается в районе 0.6-0.7, а второй максимум наблюдается в интервале 0.9-1 в распределении по  $e$ .



**Рисунок 5.5. - Измеренные распределения орбит метеоров потоков и ассоциаций по эксцентриситетам  $e$ : сплошная линия - наши результаты, пунктирная - по работе [224]**

**Измеренное распределение орбит по наклонам  $i$ .** На рисунке 5.6 приведено измеренное распределение орбит метеорных потоков и ассоциаций для массива, полученного нами в Душанбе (сплошная линия), и по результатам работ Б. Л. Кашеева и др. [224] в Харькове (пунктирная линия).

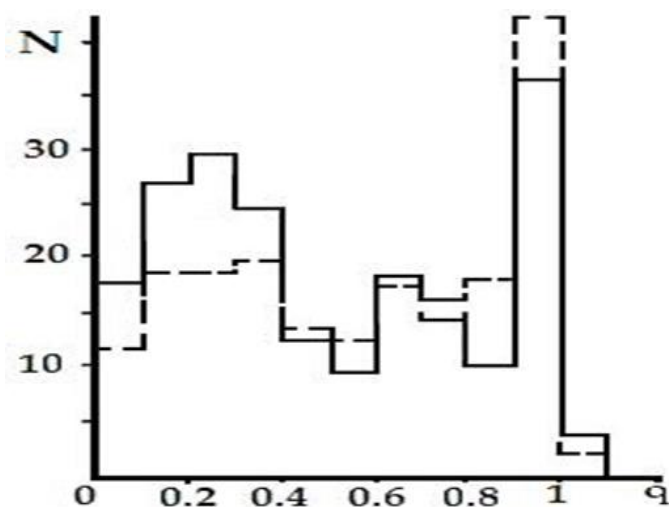


**Рисунок 5.6. - Измеренные распределения орбит метеоров потоков и ассоциаций по наклонам  $i$ : сплошная линия - наши результаты, пунктирная - по работе [224]**

Согласно рисунку 5.6, 61.4% потоков и ассоциаций имеют прямые движения, а более слабые метеоры преимущественно имеют орбиты с обратными движениями. Доля эклиптикальных потоков и ассоциаций по

нашим результатам составляет 14%. Минимальное число метеоров в ходе распределения по наклонам орбит, как по результатам телевизионных наблюдений слабых метеоров с абсолютной звёздной величиной 0.5-8.5 [69], так и во всех случаях радиолокационных наблюдений как ярких, так и слабых метеоров приходится на интервал 85-90°.

**Измеренное распределение по перигелийным расстояниям.** Распределение по перигелийным расстояниям по обоим источникам приведено на рисунке 5.7.



**Рисунок 5.7. - Измеренные распределения орбит метеоров потоков и ассоциаций по перигелийным расстояниям: сплошная линия - наши результаты, пунктирная - по работе [224]**

Приведённые результаты свидетельствуют о сходимости форм распределения по обоим массивам наблюдений. Согласно рисунку 5.7, в ходе распределения по перигелийным расстояниям по обоим источникам наблюдаются три максимума. Значительное количество перигелийных расстояний метеорных потоков и ассоциаций по обоим источникам сосредоточено в интервале  $0.1 \leq q \leq 0.4$  а.е. (первый максимум). Число метеоров и ассоциаций, входящих в первый максимум, по данным, полученным в Душанбе, в два раза больше числа метеоров, входящих в диапазон 0.9-1 а.е. Второй максимум в распределении приходится на диапазон 0.6-0.8 а.е.

В этом интервале сосредоточено наименьшее количество (около 10%) данных перигелийных расстояний метеорных потоков и ассоциаций. Третий

максимум является наиболее чётко выраженным и данные перигелийных расстояний для этой группы находятся в интервале 0.9-1 а.е. Однако количественное число перигелийных расстояний в каждой группе между данными Душанбе и Харькова различается между собой. Большинство метеорных потоков и ассоциаций, по нашим материалам имеют перигелийное расстояние в диапазоне  $0.1 \leq q \leq 0.4$  а.е.

Таким образом, в результате анализа данных координат радиантов и скоростей метеоров за цикл годичных базисных радиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане нами выявлено 430 метеорных потоков и ассоциаций. Результаты анализа координат радиантов показали, что около 30% наблюдаемых метеорных потоков и ассоциаций имеют отрицательные склонения. Такие радианты в работе [224] составляют около 10%. Результаты измерения радиантов и скоростей метеоров в потоках по нашим данным сопоставлялись с данными радиолокационных наблюдений, полученных в Гарварде [30-33], Харькове [47] и Обнинске [49]. Несмотря на то, что наблюдения проводились в разные годы, средние значения координат радиантов практически совпадают в большинстве случаев с данными, полученными в работах [47, 30-33] что, по-видимому, указывает на периодичность этих потоков и надёжность полученных результатов. Особенно хорошее сходство по координатам радиантов наблюдается между нашими данными и результатами, полученными в работе [49] для дневных потоков – Пегасид, о-Цетид, Писцид и майских Ариетид, где периоды наблюдений практически совпадают. Несколько разбросанными оказались координаты радиантов индивидуальных метеоров потока  $\eta$ -Акварид (то есть метеоры объединены в нескольких активных центрах). Из 2000 метеоров, зарегистрированных с 6 по 12 мая, к потоку отнесены 136 метеоров. Наиболее активными потоками, чётко отделяющимися от фона, за этот период оказались дневные потоки о-Цетид (N=91),  $\nu$ -Писцид (N=106). Чётко выделяются малоизученные дневные метеорные потоки: Северные и Южные майские Ариетиды, где радианты метеоров этих потоков сосредоточены в окружностях

радиусом в 4 градуса. Некоторые из потоков, такие как Северные и Южные  $\nu$ -Офиурхиды,  $\delta$ -Виргиниды,  $\alpha$ -Скорпиониды,  $\nu$ -Гидриды, Южные  $\alpha$ -Леониды, Южные Либриды, а также ряд ассоциаций радиолокационным методом выявлены впервые. Небольшие различия в координатах радиантов и значениях скоростей у некоторых потоков по различным источникам могут быть обусловлены недостаточной статистикой в численности метеоров, а также частично различием в периодах наблюдений.

Несмотря на то, что метеоры, наблюдаемые нами, относятся к относительно ярким радиометеорам и наблюдения охватывают период активности потока Персеид, к данному потоку отнесено малое количество метеоров. Из 260 метеоров с измеренными координатами радиантов и скоростями за август месяц 1969 г. только 11 принадлежат к Персеидам. Это объясняется тем, что часть очень ярких Персеид дали поворотные следы. Наибольшее число метеоров за этот период отнесено к метеорному потоку  $\delta$ -Акварид ( $N=23$ ). Этот поток отождествлён также по материалам, полученным за июль месяц.

### **5.5. Изучение физических характеристик метеороидов в потоках и ассоциациях**

Исходными характеристиками, необходимыми для определения физических свойств каждого метеороида, являются длительность радиоэхо и наличие высоты центрального пункта. Анализ измеренных значений длительностей показал, что в подавляющем большинстве случаев длительность радиоэха метеоров в малых потоках и ассоциациях не превосходит 4-х секунд, в то время как в главных метеорных потоках (например, Геминиды) наблюдаются метеоры с длительностью радиоэха до 22 секунд. В высокоскоростных метеорных потоках и ассоциациях измеренное значение длительности радиоэха ещё меньше и не превышает, как правило, 1.5 секунд.

Используя измеренные значения длительностей радиоэха ( $T$ ) и высот отражающих точек от центрального пункта  $h$ , внеатмосферные значения

скоростей  $V_\infty$  и зенитные расстояния радиантов  $Z_R$  для каждого метеора, принадлежащего потоку и ассоциации, нами были вычислены значения их масс  $M_o$  и плотностей  $\delta^*$  по формулам [98]:

$$M_o = 3 \mu H / 4 A' \lambda^2 \beta (Q - Q_H / Q - 2/3 Q_H)^3 \cdot (T e^{Tk} + r^2 / 4D) D / \cos Z_R, \quad (5.1)$$

$$\delta = \gamma (A \lambda H V^2 \rho_m / 2(Q - 2/3 Q_H) M_o \cos Z_R)^3, \quad (5.2)$$

где:  $\mu$  – масса атома метеорного вещества,  $H$  – высота однородной атмосферы,  $A'$  – постоянная,  $\lambda'$  – длина волны радиолокатора,  $Q$  – энергия, необходимая для испарения 1 г метеорного вещества,  $Q_H$  – энергия, необходимая для нагревания 1 г метеорного вещества до температуры испарения,  $k$  – скорость прилипания,  $r^*$  – начальный радиус следа,  $D$  – коэффициент амбиполярной диффузии,  $\gamma$  – поправочный коэффициент, учитывающий приближённо влияние дробления и других факторов, определяющих форму кривой ионизации,  $A$  – коэффициент формы,  $\lambda$  – коэффициент теплопередачи,  $\rho$  – плотность атмосферы.

Для определения  $D$ ,  $r^*$  мы использовали следующие известные выражения, принятые на Всесоюзном рабочем совещании по проблеме избирательности радионаблюдений метеоров (г. Обнинск, февраль 1982 г.):

$$\lg r^* = 1.47 \cdot 10^{-10} V^{0.65} \rho^{-1},$$

$$\lg D = 0.079 h - 6.6,$$

где  $h$  – высота и  $\rho$  – плотность атмосферы, которая, аппроксимировалась по формуле:

$$\rho = 3,3 \cdot 10^{-9} e^{(90 - h/H)}.$$

Значения  $\beta$  для заданной скорости  $V$  определялись согласно [99], а значение  $k$  вычислялось согласно выражению, полученному в [108]:

$$\lg k = 4.99 - 0.07h.$$

При расчётах было принято, что  $Q_H = 2 \cdot 10^{10}$  эрг/г,  $Q = 8 \cdot 10^{10}$  эрг/г,  $A = 1.2$ ,  $\mu = 3.8 \cdot 10^{-23}$  г,  $\gamma = 2.1$  и  $\lambda = 1$ .

Вычисленные значения масс и плотностей метеороидов в потоках и ассоциациях также неоднозначны и находятся в широком диапазоне. Для облегчения сравнения масс и плотностей метеороидов в разных потоках и

ассоциациях нами вычислены их средние значения.

### 5.6. Плотность метеорных тел потоков-близнецов и оценка величины их пористости

Результаты вычисления средних значений массы и плотности метеороидов в виде распределения приведены на рисунке 5.8. Средние значения масс метеороидов в потоках и ассоциациях находятся в интервале от  $7 \cdot 10^{-4}$  до 0.3 г, а их плотности в диапазоне  $0.3-7 \text{ г/см}^3$ . Результаты анализа данных плотностей показывают, что у 76% метеорных потоков и ассоциаций средние значения плотности метеороидов сосредоточены в диапазоне от 1 до  $4 \text{ г/см}^3$ . У 11% потоков и ассоциаций средние значения плотности метеороидов находятся в пределах от 4 до  $7 \text{ г/см}^3$ , а 13% метеороидов из потоков и ассоциаций имеют среднее значение плотности менее  $1 \text{ г/см}^3$ .

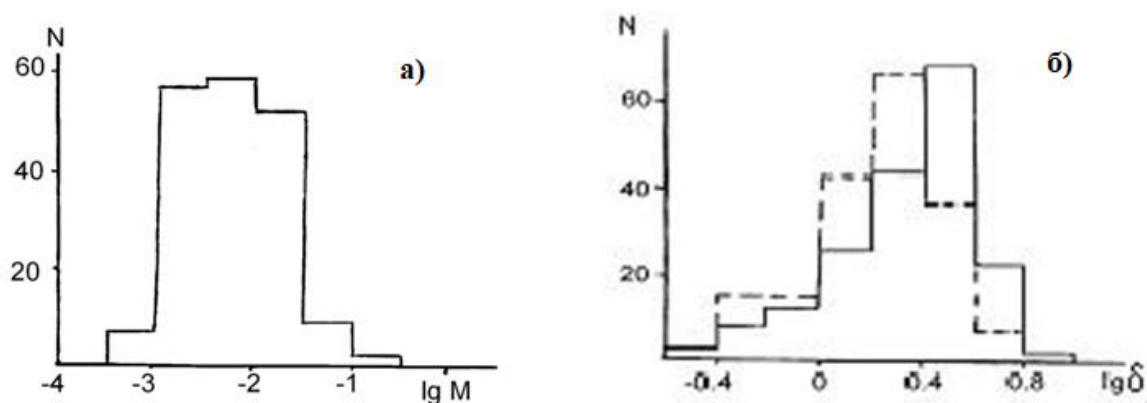
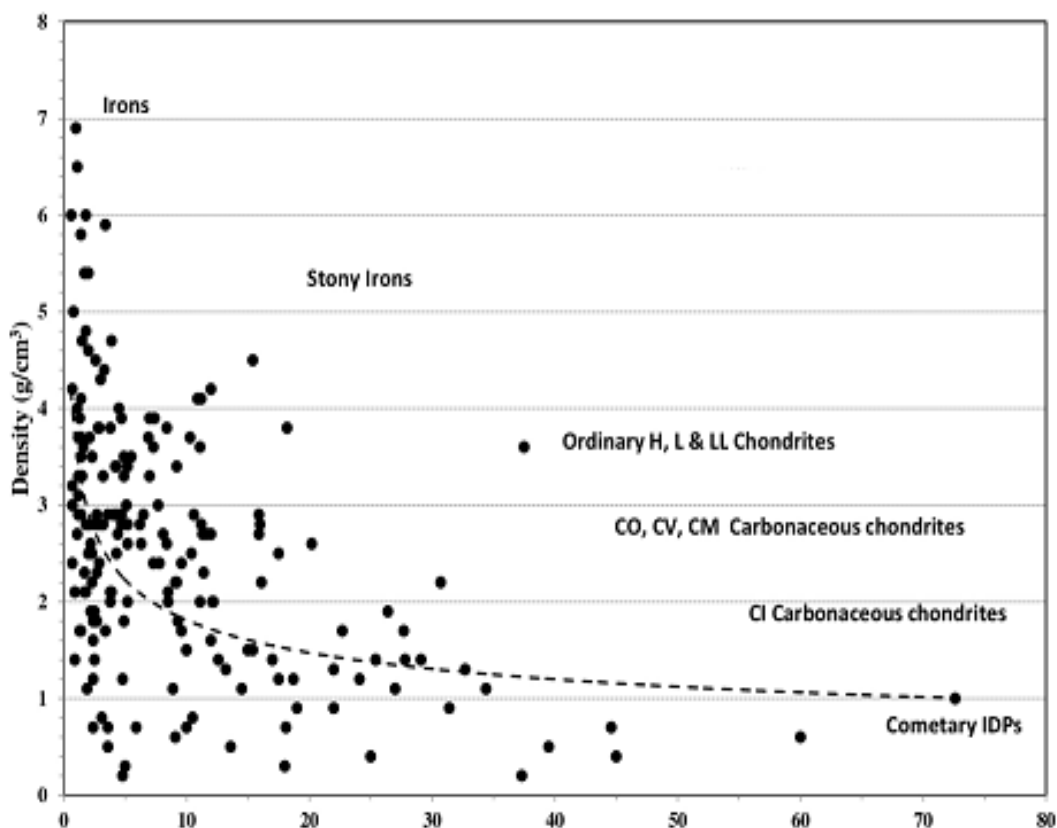


Рисунок 5.8. - Распределение среднего значения масс  $M$  (а) и плотностей  $\delta$  (б) метеороидов в потоках и ассоциациях. Пунктирная линия относится к плотностям, редуцированным к массе  $10^{-2}$  г

23 метеороида потоков и ассоциаций, согласно рисунку 5.9. имеют плотность рыхлого кометного вещества, 40 метеороидов относятся к группе углеродистых хондритов, 52 из потоков и ассоциаций имеют плотность углеродистых хондритов типа CO, CV и CM хондриты, 35 метеороидов относятся к обыкновенным H, L и LL хондритам и только 9 метеороидов потоков и ассоциаций имеют железокремнистый состав.



**Рисунок 5.9. - Зависимость плотности от массы метеороидов**

Анализ средних значений масс и плотностей метеороидов в потоках и ассоциациях показывает, что с увеличением среднего значения масс частиц уменьшается их средняя плотность (рисунок 5.9). Тенденцию увеличения доли плотных частиц с уменьшением их масс подтверждает также анализ результатов, полученных с помощью космических аппаратов «Вега-1» и «Вега-2», а также данные, полученные на космических аппаратах HEOS-2 и HELIOS [301] для частиц межпланетной пыли. Уменьшение средней плотности с увеличением массы частиц может быть обусловлено структурой частиц: они могут иметь различную пористость. Такие частицы, обладающие одной и той же массой и скоростью, будут иметь разные поперечные сечения и, следовательно, испаряться на различных высотах. Следовательно, при сравнении средних значений плотностей метеорных тел, полученных по результатам наблюдений в разных пунктах и на разной аппаратуре, следует иметь в виду различия в структуре частиц. Поэтому представляется интересным сравнение средних плотностей метеороидов в потоках и ассоциациях для одной

и той же массы. Но имеющихся наблюдательных данных для потоков и ассоциаций ещё недостаточно для проведения такого отбора. Исходя из этого, мы значения плотностей метеороидов редуцировали к массе  $M = 10^{-2}$  г. Оказалось, что плотности метеороидов с одинаковыми массами также неодинаковы и заключены в интервале  $0.4-7$  г/см<sup>3</sup>. Такой большой разброс плотностей среди метеороидов потоков и ассоциаций частично обусловлен недостаточной статистикой, а также различием в происхождении, возрасте и эволюции этих объектов. Для проверки последнего предположения, нами проанализирована плотность метеороидов потоков-близнецов. Данные о средних значениях плотностей для некоторых потоков представлены в таблице 5.1. Здесь же приведены средние значения плотностей  $\delta$  для ярких фотографических метеоров, полученных в Душанбе [42] и для слабых фотографических метеоров с учётом КНД и средних значений минералогических плотностей  $\delta_m$  из работ [240]. Средние плотности по данным работ [42] отличаются между собой незначительно. Некоторое их различие объясняется малой статистикой данных работ. Из таблицы 5.1 видно, что, во-первых, средние значения плотности метеорных тел в родственных потоках (они выделены сплошными линиями) незначительно отличаются друг от друга. В других, неродственных потоках, как например,  $\alpha$ -Каприкорниды и Геминиды, средние плотности отличаются в два раза. Причём в потоке Геминид значительная часть метеорных тел имеет плотность больше  $1$  г/см<sup>3</sup>, в то время как в потоке  $\alpha$ -Каприкорнид частицы имеют, в основном, плотность меньше  $1$  г/см<sup>3</sup>.

Во-вторых, плотности, полученные по формуле (5.2), систематически меньше минералогических плотностей. Это можно объяснить тем, что формула (5.2) позволяет определять только объёмную плотность. Если же предположить, что различие между минералогической и объёмной плотностью обусловлено пористостью  $K$  метеорных тел, то из сравнения плотностей по данным работ [155] и нашими результатами можно получить некоторую информацию о

структуре метеорных тел в родственных потоках. Как известно, объёмная  $\delta$  и минералогическая  $\delta_m$  плотности связаны следующим образом:

$$\delta = \delta_m (1 - K),$$

где  $K = V_p / V$ ,  $V_p$  – объём пор,  $V$  – полный объём тела. Вычисленная пористость  $K$  приведена также в таблице 5.1.

**Таблица 5.1. - Средняя плотность  $\delta$  (г/см<sup>3</sup>) метеорных тел в потоках (N - число радиометеоров; сплошными линиями отделены родственные потоки)**

Название потока	Наши данные		По [95]	По [168]	По [249]	K, %
	N	$\delta$	$\delta$	$\delta$	$\delta_m$	
$\eta$ -Аквариды	32	3.3	-	2.0	-	-
Ориониды	13	3.3	-	2.5	-	-
С-Тауриды	14	2.8	1	3.5	2.7	20
Ю-Тауриды	19	2.2	1	2.3	2.7	20
С.май.Ариетиды	53	1.9	-	-	-	-
Ю.май.Ариетиды	36	2.3	-	-	-	-
Квадрантид	28	1.7	1.4	2.8	3.4	50
С. $\delta$ -Аквариды	52	2.0	1.7	3.3	4.1	50
Ю. $\delta$ -Аквариды	152	2.3	1.7	3.3	4.1	40
С. i-Аквариды	26	1.5	5.1	-	-	-
Ю. i-Аквариды	50	1.9	3.2	-	-	-
о-Цетиды	89	2.7	-	-	-	-
Писциды	83	2.8	-	-	-	-
$\alpha$ -Каприкониды	36	1.2	1.0	2.5	2.8	60
$\psi$ -Сагитариды	4	0.7	-	-	-	-
Геминиды	71	2.4	1.6	4.4	3.3	30
$\alpha$ -Скорпииды	19	1.4	-	-	-	-
С. Либриды	8	1.1	-	-	-	-
Ю. Либриды	7	2.8	-	-	-	-
Ю.О-Офиухиды	15	3.8	-	-	-	-
С.О-Офиухиды	6	3.7	-	-	-	-
С. май. Офиухиды	23	1.3	-	-	-	-
Ю. май. Офиухиды	5	2.2	-	-	-	-
С. $\varepsilon$ -Ариетиды	6	1.3	-	-	-	-
Ю. $\varepsilon$ -Ариетиды	11	1.1	-	-	-	-
С. $\beta$ -Леониды	9	2.8	0.4	-	-	-
Ю. $\beta$ -Леониды	29	2.2	0.4	-	-	-

Согласно таблице 5.1, пористость метеорных тел кометного

происхождения составляет 20-60%. Как видим, частицы в родственных потоках имеют близкие значения пористости, в то время как в других потоках (например,  $\alpha$ -Каприкорниды и Геминиды) пористость отличается в два раза. Согласно результатам лабораторного моделирования кометных ядер [305], пористость матриц, отделяющихся с поверхности ядра, составляет 40-98%. По теоретическим оценкам пористость составляет 26% при самой плотной упаковке сферических частиц. Как видим, результаты лабораторного моделирования кометных явлений находятся в хорошем согласии с нашими результатами, полученными по наблюдениям метеорных потоков кометного происхождения.

Таким образом, по результатам комплексных радиолокационных и фотографических наблюдений метеоров можно сделать вывод о том, что метеорные тела в родственных потоках имеют сходные физические характеристики.

Создание Каталога радиантов, скоростей, орбит и атмосферных траекторий метеоров в Таджикистане осуществлялось при поддержке МНТЦ по проекту Т-2113.

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Итоговые выводы диссертационной работы:

1. **Получены** теоретические выражения, описывающие формы кривых ионизации метеороидов с учётом различных форм абляции [10-А].

2. 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 радиолокационный и фотографический болид со спектральными данными, 7 одновременно зарегистрированных фотографически и радиолокационных, и 57 радиотелевизионных метеоров [17-А; 28-А; 33-А; 47-А].

3. По результатам одновременных радиотелевизионных наблюдений одних и тех же метеоров **измерены** скорости двумя способами: а) комбинированным телевизионно-радиолокационным и б) радиолокационным методом. Установлено, что скорость, измеренная комбинированным способом, на 1,5–3 км/с выше, чем скорость, измеренная радиолокационным методом [34-А].

4. Впервые **получены** кривые блеска и ионизации одних и тех же метеоров ярче  $+4^m$  по результатам одновременных телевизионных и радиолокационных наблюдений. Скорости метеоров составляют  $14 \div 69$  км/с. Синхронность изменения интенсивности свечения и ионизации подтверждает их зависимость от единицы секундного расхода масс [6-А; 18-А].

5. **Исследованы** зависимости отношения интенсивности свечения к ионизации от скорости для слабых ( $0^m \div +8^m$ ) и ярких ( $-0^m \div -7,2^m$ ) метеоров. Установлено, что для слабых метеоров отношение уменьшается более чем на порядок с увеличением скорости. Лабораторные эксперименты показали, что изменение химического состава вещества увеличивает это отношение от  $-5,4$  до  $-3,6$  [29-А; 43-А].

6. **Установлены** зависимости радиовеличины от скорости. Разница в шкале радиовеличины между крайними группами скоростей составила  $1,7 \div 3^m$

[51-A].

7. **Впервые** определены шкалы масс (зависимость коэффициент ионизации от скорости) для слабых и ярких метеоров. Коэффициент ионизации увеличивается более чем на три порядка с ростом скорости [7-A].

8. **Рассчитаны** фотометрические и ионизационные массы для двух групп метеоров ( $0^m \div +8^m$  и  $-0^m \div -7,2^m$ , скорости 12–69 км/с). Получена хорошая согласованность между массами, рассчитанными по разработанной шкале [7-A; 29-A; 36-A; 37-A].

9. **Вычислены** параметры  $P$ , характеризующие месторасположение высоты максимума свечения и ионизации относительно начала и конца следа метеора. Установлено, что на первой половине распределения интенсивность возрастает экспоненциально, а на второй уменьшается плавно [20-A].

10. **Исследованы** распределения параметра  $P$  для различных метеорных популяций. Установлено, что болиды астероидного происхождения имеют максимум в интервале  $P = 0,7-0,8$ . Для кометных популяций (типы C2 и D) наблюдается смещение максимума, что свидетельствует о неоднородной структуре метеороидов [49-A].

11. **Впервые внедрен** пеленгационно-временной радиометод измерения радиантов и скоростей метеоров для редукции данных базисных радиолокационных наблюдений метеоров с четырёх–пяти пунктов в ГисАО. Для 10913 метеоров: сняты первичные данные с плёнки; выполнены счётные работы; определены горизонтальные координаты зеркальной точки и азимут радиантов; измерены дифракционные скорости, зенитные расстояния радиантов и пеленгационно-временные скорости; подготовлены исходные данные для расчёта экваториальных координат радиантов; составлена программа расчёта орбит и вычислены экваториальные и эклиптические координаты радиантов, а также внеатмосферные, геоцентрические и гелиоцентрические координаты метеоров [1-A; 5-A; 13-A; 15-A; 22-A].

12. **Разработана** методика определения атмосферной траектории метеоров, наблюдаемых с одной станции, вычислены линейная электронная

плотность, радиовеличины и массы метеоров. Проведена калибровка шкалы масс радиометеоров на основе одновременных радиооптических наблюдений. С использованием этой шкалы рассчитаны массы 8916 радиометеоров ( $5 \cdot 10^{-4}$  – 0,1 г) с максимумом около  $10^{-2}$  г [1-А; 2-А; 3-А; 30-А].

13. **Впервые составлен** Каталог радиантов, скоростей, орбит и данных атмосферных траекторий 8916 метеоров ярче  $+5^m$ . Каталог зарегистрирован в Центр метеорных данных Международного астрономического союза (ЦМД МАС) и не имеет аналогов среди ранее опубликованных каталогов [1-А].

14. **Исследованы** распределения радиантов, скоростей и элементов орбит метеороидов ярче  $+5^m$ . Установлено: а) радианты метеоров на северной небесной полусфере распределены почти равномерно; б) радиокомплекс МИР-2 способен зарегистрировать метеоры со склонением до  $-50^\circ$ ; в) распределение геоцентрических скоростей имеет бинарное свойство с максимумами в интервалах 35–40 км/с и 55–60 км/с [1-А; 3-А].

15. **Проведена** идентификация метеорных потоков и ассоциаций по данным каталога 8916 метеоров в три этапа: графическое построение двухмерного распределения по координатам радианта, отбор по скоростям и проверка по D-критериям Саутворта- Хокинса и Йопека. Выявлены 431 поток и ассоциация, половина из которых зарегистрирована радиолокационным методом впервые [14-А; 15-А; 23-А; 27-А].

16. Изучен механизм разрушения метеороидов и определены плотности поточных и спорадических метеороидов. Мелкие метеороиды более однородны по структуре. Наиболее плотные - Геминиды и Южные  $\delta$ -Аквариды, наименее плотные - Ориониды и Леониды [10-А; 12-А].

17. По интегральным распределениям метеорных тел по массам для дневных потоков  $\eta$ -Акварид, о-Цетид, Писцид,  $\nu$ -Писцид, Ариетид и ночных  $\delta$ -Акварид, Квадрантид, Геминид, Северных и Южных  $\delta$ -Акварид, i-Акварид **определены** параметры S. Параметры S по массам и длительностям хорошо согласуются, что позволяет использовать их для интерпретации радионаблюдений с одной станции [16-А].

18. **Выявлено**, что потоки Северных и Южных  $\delta$ -Акварид и дневные потоки о-Цетид и Писцид имеют одинаковый параметр  $S$ , что свидетельствует об их принадлежности к одному метеороидному рою и общности происхождения [26-А; 27-А].

## **РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПОЛУЧЕННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Полученные результаты могут быть использованы в следующих областях: метеорная астрономия и астрофизика, исследование распределения метеорных частиц в околоземном и межпланетном пространстве, изучение процессов распространения радиоволн через ионизированные следы метеоров, моделирование и прогнозирование риска столкновения крупных метеороидов с Землёй, обеспечение безопасности функционирования спутников и космических аппаратов, а также в космонавтике и космологии Солнечной системы. В частности:

**1. Каталог «Радянты, скорости, орбиты и атмосферные траектории 8916 радиометеоров, наблюдавшихся в Таджикистане»** является завершающим этапом редукции наблюдательных данных и воплощением разработанных в диссертации методов обработки и определения физических и кинематических свойств метеорных частиц. Каталог зарегистрирован для использования в Базе данных метеоров Международного астрономического союза (МАС).

**2. Шкалы радиовеличин**, полученные в диссертации, позволяют переводить радиолокационные данные в оптические наблюдения и наоборот. Это крайне важно для обработки и интерпретации данных, полученных с различной аппаратуры (радиолокационной и оптической) с различной чувствительностью и в широком диапазоне звёздных величин.

**3. Выражения и формулы, учитывающие совокупность факторов** (разновидности дробления, вариации коэффициентов формы и др.), влияющих на формирование формы кривых ионизации метеоров, могут быть

использованы для исследования процессов разрушения метеороидов в атмосфере Земли и определения их физических свойств.

**4. Идентификация потоков и ассоциаций метеороидов** позволяет проверять достоверность различных математических моделей эволюции метеорных роёв, моделировать и прогнозировать столкновения крупных объектов с Землёй.

**5. Данные одновременных радиооптических наблюдений метеоров** могут применяться для решения геофизических задач, таких как определение параметров турбулентной диффузии, изучение зависимости коэффициента прилипания электронов к нейтральным частицам от скорости, исследование факторов деионизации и т.д.

**6. Разработанная методика вычисления масс и плотностей метеороидов** может быть широко использована для редукции наблюдательных данных, полученных с одной станции, что актуально, поскольку большинство радионаблюдений метеоров проводится именно с одного пункта.

**7. Материалы диссертации** могут быть полезны докторантам, аспирантам, соискателям, магистрантам и студентам старших курсов кафедры астрономии и общей физики при преподавании специальных курсов, а также при подготовке дипломных и научных работ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brown, P. Meteorites from meteor showers: A case study of the Taurids / P. Brown, V. Marchenko, D. E. Moser, R. Weryk, W. Cooke // *Meteoritics and Planetary Science*. – 2013. – Vol. 48. – No 2. – P. 270-288. DOI: 10.1111/maps.12055.
2. Klumov, B. A. Collision of comet Shoemaker–Levi 9 with Jupiter: what shall we see? / B.A. Klumov, V. I. Kondaurov, A. V. Konyukhov [et al.] // *Physics-Uspekhi*. – 1994. – Vol. 37. – P. 577-589. DOI: org/10.1070/pu1994v037n06abeh000027.
3. Neslusan, L. The prediction of meteor showers from all potential parent comets / L. Neslusan, M. Hajdukova, D. Tomko [et al.] // *Proceedings of the IMC. – Giron, 2014*. – P. 1-7. DOI: org/10.48550/arXiv.1410.1307.
4. Gorbanev, Yu. M. Groups of Meteorite-Dropping Fireballs in Near-Earth Asteroidal Orbits / Yu. M. Gorbanev, N. A. Konovalova, N. Kh. Davrukov // *LPI Contributions*. – 2022. – Vol. 2695. – P. 6074.
5. Popova, O. P. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization / O. P. Popova, P. Jenniskens, V. Emel'yanenko [et al.] // *Scienceexpress*. – 2013. – Vol. 342. – P. 1069-1073.
6. Алимов, О. А. Метеорная активность и слоистая структура спорадического слоя E ионосферы / О. А. Алимов. – Душанбе: Дониш, 2015. – 206с.
7. Лебединец, В. Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Метеоры / В. Н. Лебединец. - Л.: Гидрометеиздат, 1980. - 246 с.
8. Лебединец В. Н. Аэрозоль в верхней атмосфере и космическая пыль / — Л.: В. Н. Лебединец. - Гидрометеиздат, 1981. — 272 с.
9. Davies, J. G. Combined photographic and radio echo observations of meteors / J. G. Davies, J. S. Greenhow, J. E. Hall // *Proceedings of the Royal Society of London*. – 1959. – Vol. 253. – No 1272. – P. 121-129.

10. Davies, J. G. The effect of attachment on radio echo observations of meteors / J. G. Davies, J. S. Greenhow, J. E. Hall // *Proceedings of the Royal Society of London*. – 1959. – Vol. 253. – No 1272. - P. 130-139.
11. Бабаджанов, П. Б. Свечение и ионизация метеоров / П. Б. Бабаджанов // *Доклады Академии Наук СССР*. – 1969. - Т. 184. – № 4. - С. 800-802.
12. Бабаджанов, П. Б. Определение скорости прилипания электронов по комбинированным фотографическим и радиолокационным наблюдениям метеоров / П. Б. Бабаджанов, Р. Ш. Бибарсов // *Геомагнетизм и аэрномия*. – 1971. – Т. 11. – № 2. - С. 303-307.
13. Nishimura, K. High sensitivity radar-optical observations of faint meteors / K. Nishimura, T. Sato, T. Nacamura, M. Ueda. - 2001. – P. 1877-1884.
14. Kohoutek, L. Comparison of radar and optical meteor observations / L. Kohoutek, J. Grygar, Z. Plavcov'a, J. Kv'izov'a // *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*. – 1970. – Vol. 21. – P. 18-28.
15. 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. – Vol. 102. – P. 221-229.
16. Michell, R. G. Simultaneous optical and dual-frequency radar observations of small mass meteors at Arecibo / R. G. Michell, M. DeLuca, D. Janches [et al.] // *Planetary and Space Science*. – 2019. – Vol. 166. – P. 1-8. DOI: [org/10.1016/j.pss.2018.07.015](https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.07.015)
17. Dijkema, T. J. Simultaneous broadband radio and optical emission of meteor trains imaged by LOFAR / AARTFAAC and CAMS / T. J. Dijkema, C. Bassa, M. Kuiack [et al.] // *WGN: Journal of the International Meteor Organization*. – 2021. – Vol. 49. – No 5. – P. 137-141.
18. Michell, R. G. Simultaneous optical and radar measurements of meteors using the Poker Flat Incoherent Scatter Radar / R. G. Michell // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2010. – Vol. 72. – P. 1212-1220.

19. Michell, R. G. Simultaneous optical and radar observations of meteor head-echoes utilizing SAAMER / R. G. Michell, D. Janches, M. Samara [et al.] // *Planetary and Space Science*. – 2015. – Vol. 118. – P. 95-101. DOI:org/10.1016/j.pss.2015.04.018.
20. 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. – Vol. 68. - P. 277-282.
21. Li, G. Z. First results of optical meteor and meteor trail irregularity from simultaneous Sonya radar and video observations / G. Z. Li, B. Q. Ning, A. Li [et al.] // *Earth and Planetary Physics*. – 2018. – Vol. 2. – P. 15-21. DOI: 10.26464/epp2018002.
22. Pecina, P. Relation between the optical and radar characteristics of meteors: Perseids 1998 and 1999 / P. Pecina, P. Koten, R. Stork, P. Pridal // In: *Proceedings of the Meteoroids 2001 Conference*. – 2001. - SP495. – P. 399-403.
23. Pecina, P. Simultaneous optical and radar observations of meteors: another criterion of commonness / P. Pecina, P. Koten, R. Stork [et al.] // *European Space Agency Special Publication*. – 2001. - 495. - P. 404-408.
24. Pupillo, G. Radio-Optical observations of meteors by BLM radar: preliminary results, Mem. / G. Pupillo, G. Cevolani [et al.] // *Smithsonian Astrophysical Observatory International Supplement*. – 2007. - Vol. 11. – P. 100-102.
25. 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 and Space Science*. – 2020. – Vol. 194. – P. 105011. DOI: 10.1016/j.pss.2020.105011.
26. Weryk, R. J. Simultaneous radar and video meteors. - I: Metric comparisons / R. J. Weryk, P. G. Brown // *Planetary and Space Science*. – 2012. – Vol. 62. – P. 132-152.
27. Subasinghe, D. Luminous efficiency estimates of meteors – I: Uncertainty analysis / D. Subasinghe, M. Campbell-Brown, E. Stokan // *Planetary*

and Space Science. – 2017. – Vol. 143. – P. 71–77. DOI: 10.1016/j.pss.2016.12.009.

28. Hawkes, R. L. Detection and analysis procedures for visual, photographic and image intensified CCD meteor observations / R. L. Hawkes / In: E. Murad, I. Williams. Meteors in the Earth's Atmosphere. - Cambridge, U.K: Cambridge Univ. Press, 2002. – P. 97-123.

29. Cook, A. F. Combined observations of meteors by image-orthicon television camera and multi-station radar / A. F. Cook, G. Forti, R. E. McCrosky [et al.] // Evolutionary and physical properties of meteoroids. IAU - Colloquium. NASA SP-319. – 1973. – P. 23-44.

30. Verniani, F. An Analysis of the physical parameters of 5759 faint radio meteors / F. Verniani // Journal of Geophysical Research. – 1973. – Vol. 78. – No 35. – P. 8429-8462.

31. Verniani, F. Physical characteristics of 320 faint radio meteors / F. Verniani // Journal of Geophysical Research. – 1966. – Vol. 71. – No 11. – P. 2749-2761.

32. Verniani, F. On the ionizing efficiency of meteors / F. Verniani, G. S. Hawkins // Astrophys. – 1964. – Vol. 140. – No 4. – P. 1590-1600.

33. Verniani, F. Structure and fragmentation of meteoroid / F. Verniani // Space Science Reviews. – 1969. – Vol. 10. – No 2. – P. 230-261.

34. Бибарсов, Р. Ш. Массы и плотности метеорных тел, порождающих метеоры +1 ÷ +4 звёздной величины / Р. Ш. Бибарсов, Р. П. Чеботарев // Астрономический вестник. – 1975. - Т. 9. - № 2. - С. 94-101.

35. Бибарсов, Р.Ш. Определение плотности и массы метеорного тела радиометодом / Р. Ш. Бибарсов // Доклады АН ТаджССР. – 1973. – Т. 7. – № 8. – С. 18-22.

36. Гартман, Н. А. К определению массы и плотности метеорных тел радиометодом / Н. А. Гартман // Бюллетень института астрофизики АН ТаджССР. – 1979. – № 68. - С. 20-27.

37. Jones, J. Visual and radar studies of meteor head echoes / J. Jones, A. R. Webster // *Planetary and Space Science*. – 1991. – Vol. 39. – P. 873.
38. Schult, C. Determination of meteor-head echo trajectories using the interferometric capabilities of MAARSY / C. Schult, G. Stober, J. L. Chau, R. Latteck // *Annales Geophysicae*. – 2013. – Vol. 31. – P. 1843-1851.
39. Close, S. Meteor head echo radar data: Mass–velocity selection effects / S. Close, P. G. Brown, M. D. Campbell-Brown [et al.] // *Icarus*. – 2007. – Vol. 186. – P. 547-556.
40. Close, S. A new method for determining meteoroid mass from head echo data / S. Close, M. Oppenheim, D. Durand, L. Dyrud // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – Vol. 110. – P. 101029.
41. Dyrud, L. Plasma and electromagnetic simulations of meteor head echo radar reflections / L. Dyrud, D. Wilson, S. Boerve [et al.] // *Earth, Moon and Planets*. – 2007. – Vol. 102. – P. 383–394.
42. Бабаджанов, П. Б. Квазинепрерывное дробление метеорных тел с учётом торможения / П. Б. Бабаджанов, Г. Г. Новиков, В. Н. Лебединец, А. В. Блохин. – Обнинск, Институт экспериментальной метеорологии: Госкомиздат, 1987. – № 19. - 125 с.
43. Ефремов, В. В. Абляция мелких метеорных тел: сравнение модели сплошного и пористого тела / В. В. Ефремов, О. П. Попова, Д. О. Глазачев, А. Маргонис, Ю. Оберст, А. П. Карташова. – Вестник Томского государственного университета. Математика и механика, – 2023. – № 81. – С. 110–122. DOI: 10.17223/19988621/81/10
44. Hawkins, G. S. The Harvard radio meteor project / G. S. Hawkins // *Smithson. Contribs. Astrophys.* – 1962. – Vol. 7. – P. 53-62.
45. Gartrell, G. Southern hemisphere meteor stream determinations / G. Gartrell, W. G. Elford // *Australian Journal of Physics*. – 1975. – Vol. 28. - No 5. – P. 591-620.

46. Nilsson, C. S. Orbital distribution of meteors of limiting magnitude +6 observed from the Southern Hemisphere / C. S. Nilsson // *The Zodiacal Light and the Interplanetary Medium*, 1967. - SP150. – P. 201-211.

47. Кашеев, Б. Л. Результаты радиолокационных наблюдений метеоров Каталог орбит метеоров до +12<sup>m</sup> / Б. Л. Кашеев, А. А. Ткачук // *Материалы мирового центра данных Б.* – 1980. - 232 с.

48. Костылев, К. В. *Астрономические основы метеорной радиосвязи* / К. В. Костылев. - Казань: Изд-во КГУ, 1970. - 142 с.

49. Корпусов, В. Н. Измерение скоростей и радиантов метеоров на волне 12 метров / В. Н. Корпусов // *Труды ИЭМ.* – 1970. – № 16. – С. 88-99.

50. Бабаджанов, П. Б. Результаты измерения радиантов метеоров на экваторе / П. Б. Бабаджанов, Б. Л. Кашеев, Н. В. Новоселова [и др.] // *Доклады АН СССР.* – 1974. – Т. 218. – № 2. – С. 308-311.

51. Malhotra, A. Study on Various Meteoroid Disintegration Mechanisms as Observed from the Resolute Bay Incoherent Scatter Radar (RISR) / A. Malhotra, J. D. Mathews // *Proceedings of the Meteoroids 2010 Conference held in Breckenridge.* - Colorado, USA, 2011. – P. 297-302.

52. Fritts, D. C. Southern Argentina Agile Meteor Radar: System design and initial measurements of large-scale winds and tides / D. C. Fritts, D. Janches, H. Iimura [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* – 2010. – Vol. 115. – D18112. DOI: [org/10.1029/2010JD013850](https://doi.org/10.1029/2010JD013850).

53. Sekanina, Z. Comet C/2011 W3 (Lovejoy): Orbit determination, outbursts, disintegration of nucleus, dust-tail morphology, and relationship to new cluster of bright sungrazers / Z. Sekanina, P.W. Chodas // *The Astrophysical Journal.* – 2012. – Vol. 757. – P. 127–160. doi: [10.1088/0004-637X/757/2/127](https://doi.org/10.1088/0004-637X/757/2/127)

54. Janches, D. A comparison of detection sensitivity between ALTAIR and Arecibo meteor observations: Can high power and large aperture radars detect low velocity meteor head-echoes / D. Janches, S. Close, J. T. Fentzke // *Icarus.* – 2008. – Vol. 193. – P. 105-111.

55. Schult, C. A meteoroid stream survey using meteor head echo observations from the Middle Atmosphere ALOMAR Radar System (MAARSY) / C. Schult, P. Brown, P. Pokorný [et al.] // *Icarus*. – 2018. – Vol. 309. – P. 177-186. DOI: 10.1016/J.ICARUS.2018.02.032.
56. Webster, A. R. The Canadian Meteor Orbit Radar (CMOR) / A. R. Webster, P. G. Brown, J. Jons [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. – 2004. – Vol. 4. – P. 1181-1201.
57. Mathews, J. D. Extensive meteoroid fragmentation in V/UHF radar meteor observations at Arecibo Observatory / J. D. Mathews, S. J. Briczinski, A. Malhotra, J. Cross // *Geophysical Research Letters*. – 2010. – Vol. 37. – P. L04103. DOI:10.1029/2009GL041967.
58. Pokorný, P. An orbital meteoroid stream survey using the Southern Argentina Agile Meteor Radar (SAAMER) based on a wavelet approach / P. Pokorný, D. Janches, P. G. Brown, J. L. Hormaechea // *Icarus*. – 2017. – Vol. 290. – P. 162-182.
59. Kelly, J. D. Initial results from Poker flat incoherent scatter radar (PFISR) / J. D. Kelly, C. J. Heinselman // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2009. – Vol. 71. - No 6-7. – P. 635-635.
60. Кащеев, Б. Л. Метеорные явления в атмосфере Земли / Б. Л. Кащеев, В. Н. Лебединец, М. Ф. Лагутин. - М.: Наука, 1967. – 260 с.
61. Мак-Кроски, Р. Е. Болиды Прерийной сети. - I. Общие сведения и орбиты / Р. Е. Мак-Кроски, Ц. И. Шао, А. Позен // *Метеоритика*. - 1978. – № 37. - С. 44-59.
62. Цеплеха, З. Болиды Европейской сети. 1 Фотографические программы: их прошлое и будущее / З. Цеплеха // *Метеоритика*. – 1978. – № 37. - С. 60-68.
63. Бабаджанов, П. Б. Предварительные результаты фотографирования метеоров по методу мгновенной экспозиции / П. Б. Бабаджанов, Е. Н. Крамер // *Астрономический журнал*. – 1965. - Т. 42. – № 4. - С. 660-665.

64. Бабаджанов, П. Б. Методика и некоторые результаты фотографических исследований метеоров / П. Б. Бабаджанов, Е. Н. Крамер. - М.: Изд-во. АН СССР, 1963. - 144 с.
65. Сводный каталог элементов орбит и кривых блеска метеоров, сфотографированных в Институте астрофизики АН Таджикистана (Душанбе) / Отв. ред. П. Б. Бабаджанов. – Душанбе: Дониш, 2006. – 208 с.
66. Jacchia, L. G. An analysis of the atmospheric trajectories of 413 precisely reduced photographic meteors / L.G. Jacchia, F. Verniani, R. E. Briggs // *Smithson. Contribs Astrophys.* – 1967. – Vol. 10. – No 1. – P. 81-231. DOI: [org/10.5479/si.00810231.10-1.1](https://doi.org/10.5479/si.00810231.10-1.1)
67. Jacchia, L. G. Precision orbits of 413 photographic meteors / K. G. Jacchia, F. L. Whipple // *Smithson. Contribs Astrophys.* – 1971. – Vol. 4. – No 4. - P. 97-129.
68. Sarma, T. Double - Station observations of 454 TV meteors. - I. Trajectories / T. Sarma, J. Jones // *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* – 1985. – Vol. 36. – P. 9-24.
69. Sarma, T. Double-Station observations of 454 TV meteors. - II. Orbits / T. Sarma, J. Jones // *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* – 1985. – Vol. 36. – P. 103-115.
70. Jones, J. Double-Station observations of 454 TV meteors. III. Populations / J. Jones, T. Sarma, Z. Cepelcha // *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* – 1985. –V. 36. –P.116- 122.
71. Нарзиев, М. Атмосферные траектории и орбиты 426 радиометеоров по наблюдениям с 4-5 пунктов в ГисАО (Таджикистан) / М. Нарзиев // *Вестник Таджикского национального университета.* – 2021. – № 4. - С. 162-194
72. Popova, O. Very low strength of interplanetary meteoroids and small asteroids / O. Popova, J. Borovicka, W.K. Hartman [et al.] // *Meteorit, Planet. Sci.* – 2011. – Vol. 46. – P. 1525-1550.
73. McKinley, D. W. R. Meteor science and engineering / D. W. R. McKinley. - New York: McGraw -Hill Book Co, 1961. – 309 p.

74. Бронштэн, В. А. Физика метеорных явлений / В. А. Бронштэн. - М.: Наука, 1981. – 416 с.
75. Левин, Б. Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе / Б. Ю. Левин. – М.: Из-во АН СССР, 1956. – 293 с.
76. James, A, Impacts of Meteoric Material on Earth's Atmosphere: Laboratory studies with Atmospheric Implications: PhD thesis / A. James. - University of Leeds, 2016. – 139 p.
77. Лебединец, В. Н. О распылении каменных метеоритов при высоких температурах / В. Н. Лебединец, В. М. Стученков, В. Б. Шушкова // *Астрономический вестник*. - 1969. – Т. 3. – № 3. - С. 142-148.
78. Lovell, A. C. V. Meteor astronomy / A. C. V. Lovell. - Oxford-New York: Univ. Press, 1954. – 463 p
79. Нарзиев, М. Исследование физических свойств метеоров и метеорных тел по радионаблюдениям: дис. ... канд. физ.-мат. наук / М. Нарзиев. – Душанбе, 2003. - 144 с.
80. Белькович, О. И. Статистическая теория радиолокации метеоров / О. И. Белькович. - Казань: Изд-во КГУ, 1971. - 103 с.
81. Opik, E. J. Meteor radiation, ionization and atomic luminous efficiency / E. J. Opik // *Proceedings of the Royal Society*. – 1955. – A230. – No 1183. – P. 463-501.
82. Opik, E. J. Physics of meteor flight in the atmosphere / E. J. Opik. - New York - London: Interscience, 1958. - 174 p.
83. Зеленин, В. Н. Распределение размеров частиц, образующихся при моделировании абляции метеорного вещества / В. Н. Зеленин, И. Е. Константинов, С. Г. Михеенко, О. Н. Салимов // *Астрономический вестник*. – 1982. – Т. 16. – № 3. - С. 174-182.
84. Бабаджанов, П. Б. О параметре дробления метеорных тел / В кн.: *Метеорное вещество в межпланетном пространстве* / П. Б. Бабаджанов, Р. Ш. Бибарсов, М. Нарзиев, Р. П. Чеботарев. - М., 1982. - С. 190-192.

85. Хаимов, И. М. Сравнение наблюдаемых и теоретических профилей вспышек метеоров / В кн.: Кометы и метеоры / И. М. Хаимов. – Душанбе: Дониш, 1976. – № 25. – С. 57-71.
86. Babadzhanov, P. V. Fragmentation and densities of meteoroids / P. V. Babadzhanov // *Astronomy & Astrophysics*. – 2002. – Vol. 384. – P. 317-321.
87. Симоненко, А. Н. Влияние дробления метеорных тел на фотометрической кривой метеор / А. Н. Симоненко // *Астрономический вестник*. – 1979. – № 13. – С. 34-38.
88. Симоненко, А. Н. Вспышки метеоров: Процессы отделения частиц / А. Н. Симоненко // *Метеоритика*. – 1978. – Т. 37. – С. 69-73.
89. Симоненко, А. Н. Размеры частиц, отделяющихся от метеорных тел во время вспышек / В кн.: Кометы и метеоры / А. Н. Симоненко. – Душанбе: Дониш, 1967. – № 15. – С. 34-44.
90. Калениченко, В. В. Физические параметры метеороидов, испытывающих квазинепрерывное дробление в атмосфере. I Методы определения параметров // *Астрономический вестник*. – 1982. – Т. 16. – №2. – С. 116.
91. 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.
92. Лагутин, М. Ф. Определение торможения радиометеоров / М. Ф. Лагутин, Д. М. Смагин, Х. Д. Гульмедов // *Астрономический циркуляр*. – 1970. – Т. 577. – № 5. – С. 5–7.
93. Лебединец, В. Н. Торможение слабых фотографических метеоров и плотность метеорных тел / В. Н. Лебединец // *Астрономический вестник*. – 1987. – Т. 21. – № 1. – С. 65-74.
94. Коновалова, Н. А. Исследование разрушения метеорных тел по данным мгновенных и базисных фотографических наблюдений метеоров: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Н. А. Коновалова. – Душанбе, 1990. – 152 с.

95. Коновалова, Н. А. О дроблении и плотностях метеорных тел по данным комбинированных радиооптических наблюдений / Н. А. Коновалова, М. Нарзиев // Вестник СибГАУ. – Красноярск. - 2011. – Т. 6. – № 39. - С. 95-98.
96. Коновалова, Н. А. О механизме разрушения и физических характеристиках совместных радиооптических метеороидов / Н. А. Коновалова, М. Нарзиев // Радиотехника. – 2010. – № 160. - С. 118-123.
97. Нарзиев, М. Кривые блеска метеоров и определение масс метеороидов по результатам комплексных радиотелевизионных наблюдений / М. Нарзиев, И. Ф. Малышев // Известия АН Республики Таджикистан. – 2009. – № 4 (137). - С. 36-45.
98. Бибарсов, Р.Ш. Определение плотности и массы метеорного тела радиометодом / Р. Ш. Бибарсов // Доклады АН ТаджССР. – 1973. – Т. 7. – № 8. - С. 18-22.
99. 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.
100. Гартман, Н. А. Кривые ионизации, массы и плотности 276 метеорных тел по радиолокационным наблюдениям с 5 пунктов / Н. А. Гартман, Р. П. Чеботарев // Кометы и метеоры. – 1982. – № 32. - С. 23-36.
101. Бибарсов, Р. Ш. Определение масс и плотностей метеороидов по радиолокационным наблюдениям с учётом процессов, влияющих на форму ионизационных кривых метеоров / Р. Ш. Бибарсов, М. Нарзиев, Р. П. Чеботарев // Доклады АН ТаджССР. – 1990. – Т. 33. – № 6. - С. 372-376.
102. Фиалко, Е. И. Некоторые проблемы радиолокации метеоров / Е. И. Фиалко. – Томск: Томский университет, 1961. – С. 209.
103. Исамутдинов, Ш. О. Исследование структуры метеорных потоков радиометодом: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Ш. О. Исамутдинов. – Душанбе, 1973. - 171 с.

104. Исамутдинов, Ш. О. О комплексных радиолокационных наблюдениях метеоров / Ш. О. Исамутдинов, Е. И. Фиалко // *Астрономический циркуляр*. – 1958. – № 193. – С. 28-33.
105. Лебединец, В. Н. Расчёты метеорных радиоэхо от следов переходного типа / В. Н. Лебединец, А. К. Соснова // *Труды ИПГ*. – 1969. – № 15. – С. 228-244.
106. Evans, J. V. Radio-echo studies of meteors at 68-centimeter wavelength / J. V. Evans // *J. Geophys. Res.* – 1965. – Vol. 70. – P. 5395–5416.
107. Байраченко, И. В. Влияние процессов деионизации на разрушение метеорных следов / И. В. Байраченко, Н. Абдрахмонов // *Проблемы космической физики*. – 1978. – № 13. – С. 31-34.
108. Бибарсов, Р. Ш. О деионизации метеорных следов в атмосфере Земли / *Геомагнетизм и аэрономия* / Р. Ш. Бибарсов, А. В. Блохин, Г. Г. Новиков. – М., 1980. – С. 1116-1118.
109. Бибарсов, Р. Ш. К радиолокационному способу определения скорости прилипания / Р. Ш. Бибарсов // *Бюллетень ин-та астрофизики АН ТаджССР*. – 1970. – № 55. – С. 18-20.
110. Бибарсов, Р. Ш. Скорость фотоотлипания электронов в метеорных следах / Р. Ш. Бибарсов // *Доклады АН ТаджССР*. – 1980. – Т. 23. – № 9. – С. 512-515.
111. Бибарсов, Р. Ш. Влияние атмосферные пыли в нейтральных частицах метеорного вещества на скорость образования отрицательных ионов в следе / Р. Ш. Бибарсов // *Кометы и метеоры*. – 1972. – № 21. – С. 32-43.
112. Бибарсов, Р. Ш. Высотная зависимость скорости прилипания по радиолокационным наблюдениям метеоров / Р. Ш. Бибарсов // *Астрономический циркуляр*. – 1968. – № 458. – С.32-37.
113. Rendtel, J. Letter - Meteoroid streams, meteor showers / J. Rendtel // *WGN. - Journal of the IMO* 42:5. – 2014. – P. 155-156.

114. Венгерская метеорная сеть. URL: <http://www.videometeor.hu/> (Дата обращения: 14.03.2016).
115. Европейская болидная сеть. URL: [http://www.dlr.de/pf/en/desktopdefault.aspx/tabid-170/226\\_read-397/](http://www.dlr.de/pf/en/desktopdefault.aspx/tabid-170/226_read-397/) (Дата обращения: 14.03.2024).
116. Испанская метеорная и болидная сеть. URL: <http://www.spmn.uji.es/> (Дата обращения: 14.03.2024).
117. Польская метеорная сеть. URL: <http://www.pkim.org/> (Дата обращения: 14.03.2024).
118. Северо-Американская метеорная сеть. URL: <http://www.namnmeteors.org/> (Дата обращения: 14.03.2024).
119. Французская метеорная сеть. URL: [http://www.boam.fr/carte\\_boam.htm](http://www.boam.fr/carte_boam.htm) (Дата обращения: 14.03.2024).
120. Хорватская метеорная сеть. URL: <http://cmn.rgn.hr/> (Дата обращения: 14.03.2024).
121. Центральная европейская метеорная сеть. URL: <http://cement.fireball.sk/> (Дата обращения: 14.03.2024).
122. Японская болидная сеть. URL: <http://www3.cnet.ne.jp/c-shimo/index-e.html> (Дата обращения: 14.03.2024).
123. Schult, C. Characteristics of very faint (+16) meteors detected with the middle atmosphere alomar radar system (maarsy) / C. Schult, G. Stober, P. Brown, P. Pokorn'ý, M. Campbell-Brown // *Icarus*. – 2020. – Vol. 340, – P. 113444. doi: 518 10.1016/j.icarus.2019.113444
124. Lindblad, B. A. Combined visual and radar observations of Perseid meteors. - I. Observations in 1953 / B.A. Lindblad // *Meddelelser från Lunds Astronomiska Observatorium*. – 1956. – Vol. 1. – No 189. – P. 1-98.
125. Lindblad, B. A. Combined visual and radar observations of Perseid meteors. - II. Observations. *Astron* / B.A. Lindblad // *Notes Univ. Gothenburg*. – 1962. – No 7. – P. 1-38.

126. Millman, P. M. Meteor echo duration and visual magnitudes / P. M. Millman, D. W. R. McKinley // Canadian Journal of Physics. – 1956. – Vol.34. – No 1. – P. 50-61.

127. Кручиненко, В. Г. Деякі результати паралельних радіолокаційних та візуальних спостережень метеорів / В. Г. Кручиненко, А. К. Терентьева // Вісник Київського ун-ту. Астрономія. – 1964. – № 6. - С. 98-104.

128. Znoil, V. The relation between optical brightness and properties of the ionized trail. - I. Observational techniques and basic characteristics of the observational data. (Results of the meteor expeditions Ondrejov 1972 and 1973) / V. Znoil, J. Grygar, M. Simek, M. Sulc // Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia. – 1980. – Vol. 31. – P. 14-33.

129. Znoil, V. The relation between meteor optical brightness and properties of the ionized trail. - III. Double Station Observation / V. Znoil, J. Hollan, M. Simek // Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia. – 1985. – Vol. 36. – No 1. – P. 44-56.

130. Znoil, V. The relation between meteor optical brightness and properties of the ionized trail. - II. The observation at the Ondrejov site / V. Znoil, M. Simek, J. Grugar, J. Hollan // Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia. – 1981. – Vol. 32. – No 1. – P. 1-19.

131. Lindblad, B. A. The relation between visual magnitudes of meteors and the duration of radar echoes / B. A. Lindblad // Smithon. Contribs Astrophys. – 1963. – Vol. 7. – P. 27-39.

132. Нарзиев, М. К зависимости между длительностью радиоэхо и звёздной величиной метеоров потока Персеид / М. Нарзиев // Республиканская научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов. – Ч. II. – Душанбе, 1984. - С. 126-127.

133. Millman, P. M. Image orthicon spectra of Geminids in 1969 / P. M. Millman, A. F. Cook, C. F. Hemenway // Evolutionary and Physical Properties of Meteoroids. – 1973. – SP. 319. – P. 147-151.

134. Gural, P. Development of a Very Faint Meteor Detection System based on an EMCCD Sensor and Matched Filter Processing / P. Gural, T. Mills, M. Mazur, P. Brown // *Experimental Astronomy*. – 2022. – Vol. 53. – P. 1085-1126.

135. Kero, J. First results from the 2009–2010 MU radar head echo observation programme for sporadic and shower meteors: the Orionids 2009 / J. Kero, C. T. Szasz, D. Nakamura [et al.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2011. - V. 416. - Issue 4. – P. 2550-2559. [doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19146.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19146.x)

136. Kero, J. On the meteoric head echo radar cross section angular dependence / J. Kero, C. Szasz, G. Wannberg, A. Pellinen-Wannberg, A. Westman // *Geophysical Research Letters*. – 2008. – Vol. 35, Issue 7. – P. L07101. doi: 10.1029/2008GL033402

137. Kero, J. Determination of meteoroid physical properties from tristatic radar observations / J. Kero, C. Szasz, A. Pellinen-Wannberg, G. Wannberg, A. Westman, D. D. Meisel // *Annales Geophysicae*. – 2008. – Vol. 26, – No 8. – P. 2217–2228. doi: 10.5194/angeo-26-2217-2008

138. Campbell-Brown, M. D. Photometric and ionization masses of meteors with simultaneous EISCAT UHF radar and intensified video observations / M. D. Campbell-Brown, J. Kero, C. Szasz [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2012. – Vol. 117. Issue A9. – P. A09323. doi: 10.1029/2012JA017800

139. 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. – Vol. 129. Issue 4. – P. e2023JA032281. doi: 10.1029/2023JA032281

140. Weryk, R. J. Simultaneous radar and video meteors / R. J. Weryk // *Electronic Thesis and Dissertation Repository*. - 2012. – P. 1021. <https://ir.lib.uwo.ca/etd/1021>.

141. Weryk, R. J. Simultaneous radar and video meteors. - I: Metric comparisons / R. J. Weryk, P. G. Brown // *Planetary and Space Science*. – 2012. – Vol. 62. – P. 132-152.

142. Weryk, R. J. Simultaneous radar and video meteors. - II: Photometry and ionization / R. J. Weryk, P. G. Brown // *Planetary and Space Science*. – 2013. – Vol. 81. – P. 32-47.

143. Максумов, М. Н. Астрофизические исследования в Таджикистане / М. Н. Максумов // *Бюллетень Института астрофизики АН ТаджССР*. – 1982. – № 73. - С. 3-13.

144. Максумов, М. Н. Более полувека плодотворных исследований космоса / М. Н. Максумов // *Известия АН ТаджССР, Отд. физ.-мат., хим. и геол. наук*. – 1984. – № 3. - С. 10-16.

145. Рубцов, Л. Н. Исследование параметров РЛС Гиссарской астрономической обсерватории для наблюдения слабых метеоров / Л. Н. Рубцов, Р. Г. Лазарев, Г. В. Андреев, О. Алимов // *Известия АН ТаджССР*. – 1977. – № 3 (65). - С. 44-52.

146. Бабаджанов, П. Б. Спектральные наблюдения метеоров по методу мгновенной экспозиции / П. Б. Бабаджанов, В. С. Гетман, О. Ф. Золова, Н. А. Коновалова // *Астрономический вестник*. – 1979. – Т. 13. - № 4. - С. 243-247.

147. Бабаджанов, П. Б. Телевизионные наблюдения метеоров в Душанбе / П. Б. Бабаджанов, И. Ф. Малышев // *Астрономический циркуляр*. – 1979. – № 1071. - С. 5-6.

148. 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. doi: 10.30837/rt.2020.2.201.05

149. Бабаджанов, П. Б. Плотность, температура и давление атмосферы по фотографическим наблюдениям метеоров / П. Б. Бабаджанов, Л. А. Катасев, В. П. Коноплева, Е. Н. Крамер // *Геофизический бюллетень*

(Межведомственный геофизический комитет при Президиуме АН СССР). – 1963. – № 13. - С. 43.

150. Бабаджанов, П. Б. Кривые свечения и ионизации метеоров по результатам параллельных телевизионных и радиолокационных наблюдений / П. Б. Бабаджанов, И. Ф. Малышев, М. Нарзиев, Р. П. Чеботарев // Кометы и метеоры. - 1985. – № 37. - С. 28-33.

151. Бабаджанов, П. Б. Родственные метеорные потоки астероидов комплекса Таурид / П. Б. Бабаджанов // Астрономический вестник. – 1999. – Т. 33. - № 2. - С. 168-177.

152. Бабаджанов, П. Б. Телевизионные наблюдения Квадрантид в 1979 г. в Душанбе / П. Б. Бабаджанов, И. Ф. Малышев // Кометы и метеоры. – 1987. – № 38. - С. 7-9.

153. Бабаджанов, П. Б. О форме короткопериодических метеорных роёв / П. Б. Бабаджанов, Ю. В. Обрубков // Доклады АН ТаджССР. – 1987. – Т. 30. – № 8. - С. 486-491.

154. Бабаджанов, П. Б. Пространственная форма метеорных роёв Геминид и Квадрантид / П. Б. Бабаджанов, Ю. В. Обрубков // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 7. – № 1. – С. 54-57.

155. Бабаджанов, П. Б. Плотность и пористость метеороидов / П. Б. Бабаджанов, Г. И. Кохирова // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2006. - Т. 49. - № 6. - С. 493-500.

156. Чеботарев, Р. П. Индикатор метеорного радиолокатора с ждущее-непрерывной фоторегистрацией / Р. П. Чеботарев, Н. А. Гартман // Бюллетень Института астрофизики АН ТаджССР. – 1979. – № 68. - С. 28-34.

157. Чеботарев, Р. П. Многолучевой индикатор метеорного радиолокатора / Р. П. Чеботарев, Ш. О. Исамутдинов // Бюллетень Института астрофизики АН ТаджССР. - 1970. – № 55. - С. 34-39.

158. Чеботарев, Р. П. Система точного измерения дальности до метеорного следа / Р. П. Чеботарев, В. Н. Сидорин // Бюллетень Института астрофизики АН ТаджССР. – 1970. – № 55. - С. 29-33.

159. Чеботарев, Р. П. Комплекс аппаратуры для радиолокационных исследований метеоров в Душанбе / Р. П. Чеботарев, В. Н. Сидорин, Г. А. Полушкин [и др.] // Бюллетень Института астрофизики АН ТаджССР. - 1970. – № 55. - С. 25-28.
160. Абраменко, А. Н. Телевизионная астрономия / А. Н. Абраменко, Е. С. Агапов, В. Ф. Анисимов [и др.]. - М.: Наука, 1984. - 272 с.
161. Бабаджанов, П. Б. Определение скорости прилипания электронов по комбинированным фотографическим и радиолокационным наблюдениям метеоров / П. Б. Бабаджанов, Р. Ш. Бибарсов // Геомагнетизм и аэрономия. – 1971. – Т. 11. – № 2. - С. 303-307.
162. Бибарсов, Р. Ш. Определения скорости фотоотлипания электронов в метеорных следах / Р. Ш. Бибарсов, Е. И. Фиалко // Кометы и метеоры. – 1970. - № 19. – С. 44-50
163. Нарзиев, М. Некоторые результаты поиска совместных фото-радиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане / М. Нарзиев // Радиотехника. – 2016. – № 184. - С. 49-52.
164. Нарзиев, М. О результатах поиска совместных фото-радиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане / М. Нарзиев // Международная конференция «Околосемная астрономия». – Терскол, 2015. - С. 64-69.
165. Нарзиев, М. Результаты комплексных радиотелевизионных (ТВ) наблюдений метеорных потоков в Таджикистане. - I. Динамические характеристики / М. Нарзиев, И.Ф. Малышев // Бюллетень Института астрофизики АН Республики Таджикистан. – 2006. – № 85. – С. 35-45.
166. Нарзиев, М. О массе параллельных радиооптических слабых метеоров по величине интенсивности свечения и ионизации на высоте зеркальной точки / М. Нарзиев, Х. Ф. Худжаназаров // Экологический вестник научных центров ЧЭС. – 2017. – № 4 (3). - С. 109-114.
167. Нарзиев, М. Вариации свечения и ионизации вдоль следа одних и тех же метеоров / М. Нарзиев // Радиотехника. – 2016. – № 184. - С. 53-58.

168. Friichtenicht, J. F. Determination of meteor parameters using laboratory simulation techniques / In: Evolutionary and physical properties of meteoroids / J. F. Friichtenicht, D. G. Becker / Ed. C. L. Hemenway, P. M. Millman, A. F. Cook // NASA Special Publication, New York. – 1973. – Vol. 319. – P. 53-82.

169. Slattery, J. C. Ionization probability of iron particles at meteor velocities / J. C. Slattery, J. F. Friichtenicht // Astrophysical Journal. – 1967. – Vol. 147. – P. 235-244.

170. Boitnott, D. S. Luminous efficiency measurements for silicon and aluminium simulated micrometeors / D. S. Boitnott, J. C. Slattery // Astrophysical Journal. – 1973. – Vol. 186. - No 3. – P.1127 - 1139.

171. Boitnott, C. A. Light emission measurements of calcium and magnesium at simulated meteor conditions II Spectral luminous efficiencies / C. A. Boitnott, H. F. Savage // Astrophysical Journal. – 1971. – Vol. 167. - No 2. – P. 349-355.

172. Boitnott, C. A. Light emission measurements of sodium at simulated meteor conditions / C. A. Boitnott, H. F. Savage // Astrophysical Journal. – 1970. – Vol. 161. – No 1. – P. 351- 358.

173. Ayers, W. G. Photographic observation of 10 artificial meteor / W.G. Ayers, R.E. McCrosky, C.Y. Shao // Special Report of the Smithsonian Astrophysical Observatory. – 1970. – No 317, 45 p.

174. McCrosky, R. E. Result from an artificial iron meteoroid at 10 km/s / R.E. McCrosky, R.K. Soferman // Smithsonian Contributions to Astrophysics. – 1963. – Vol. 7, – P. 199- 208.

175. Нарзиев, М. Зависимость свечения и ионизации от скорости и химсостава метеоров / М. Нарзиев // Радиотехника. – 2010. – № 160. - С. 127-131.

176. Stober, G. Meteoroid mass determination from un-derdense trails / G. Stober, C. Jacobi, W. Singer Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, – 2011, – Vol. 73(9), – P. 895-900. [doi.org/10.1016/j.jastp.2010.06.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.06.009)

177. Нарзиев, М. Масса метеороидов по результатам параллельных наблюдений. Шкала масс радиометеоров / М. Нарзиев // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2003. – Т. 40. – № 1. - С. 3-12.

178. Brown, P. The fall of the Grimsby meteorite. - I: Fireball dynamics and orbit from radar, video, and infrasound records / P. Brown, P. J.A. McCausland., M. Fries [et al.] // Meteoritics and Planetary Science. – 2011. – Vol. 46. – No 3. – P. 339-363. DOI: org/10.1111/j.1945-5100.2010.01167.x

179. Делов, И. А. Распределение ионизации вдоль следов слабых метеоров/ И. А. Делов, Б. Л. Кащеев // Астрономический вестник. – 1971. – № 3. - С. 190-195.

180. Greenhow, J. S. The variation of ionization along a meteor trail / J. S. Greenhow, E. L. Neufeld // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1957. – Vol. 117. – No 4. – P. 359-369.

181. Gural, P. S. A new method of meteor trajectory determination applied to multiple unsynchronized video cameras / P. S. Gural // Meteoritics & Planetary Science. – 2012. – Vol. 47. – P. 1405-1418.

182. Бибарсов, Р. Ш. Некоторые характеристики метеорных тел и их ионизационных следов / Р. Ш. Бибарсов, Р. П. Чеботарев // Астрономический вестник. – 1976. – Т. 10. – № 3. - С. 144-150.

183. Бибарсов, Р. Ш. Влияние процессов деионизации на длительность метеорного радиозэхо / Р. Ш. Бибарсов // Бюллетень Института астрофизики АН ТаджССР. – 1970. – № 55. - С. 3-9.

184. Narziev, M. The form of ionization curves producing bright meteors / M. Narziev // 45th Lunar and Planetary Science Conference, 2014. - PDF1681.

185. Narziev, M. Physical and kinematic characteristics of meteoroids producing bright radio meteors / Meteor showers and Narziev associations / Meteoroids 2013 / M. Narziev // Proceedings of the Astronomical Conference, held at A.M. University, Poznan. – Poland, 2013. – P. 163-176.

186. Мак-Кроски, Р. Е. Болиды Прерийной сети. 2. Траектории и кривые блеска / Р.Е. Мак-Кроски, Ц.И. Шао, А. Позен // Метеоритика. – 1979, – Вып. 38. – С. 106-156.

187. McCrosky, R.E. Orbital elements of photographic meteors / R.E. McCrosky, A. Posen // Contr. Smith. Astrophys. Obs. – 1961, – Vol. 4. – No 2, 1961. – P. 15-84.

188. Cepelcha, Z. Fireballs photographed in central Europe / Z. Cepelcha // Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia. – 1977. – Vol. 28. – No 6. – P. 328–340.

189. Dean, J. D. Residual mass from ablation of meteoroid grains detached during atmospheric flight / J. D. Dean, R. L. Hawkes // Planetary and Space Science. – 1986. – Vol. 34. – No 12. – P. 1201–1212. DOI:10.1016/0032-0633(86)90057-7.

190. Чеботарев, Р. П. Возможности пеленгационно-временного радиометода определения радиантов и скоростей индивидуальных метеоров / Р. П. Чеботарев // Кометы и метеоры. – 1976. - № 24. - С. 19-27.

191. Close, S. A technique for calculating meteor plasma density and meteoroid mass from radar head echo scattering / S. Close, M. Oppenheim, S. Hunt, A. Coster // Icarus. – 2004. – Vol. 168, – No 1. – P. 43–52. DOI: 10.1016/j.icarus.2003.11.018.

192. Narziev, M. IAU MDC meteor orbits database-A sample of radio-meteor data from the Hissar Observatory / M. Narziev, R. P. Chebotarev, T. J. Jopek [et al.] // Planetary and Space Science. – 2020. – Vol. 192. – P. 105008. doi.org/10.1016/j.pss.2020.105008.

193. Narziev, M. Analysis data of atmospheric trajectory 8916 radio meteoroids registered in HisAO / M. Narziev, T. J. Jopek, H. F. Khujanazarov // European Planetary Science Congress, Abstracts. – 2018. - Vol. 12. - EPSC2018-728-1.

194. Vida, D. Modeling the measurement accuracy of preatmosphere velocities of meteoroids / D. Vida, P.G. Brown, M. Campbell-Brown // Monthly

Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – Vol. 479. – No 4. – P. 4307–4319. DOI: 10.1093/mnras/sty1841.

195. Elford, W.G. Meteor velocities: a new look at an old problem / W.G. Elford, M.A. Cervera, D.I. Steel // *Earth, Moon, and Planets*. – 1995. – Vol. 68, № 1–3. – P. 257–266. DOI: 10.1007/BF00671514.

196. Hunt, S. Determination of the meteoroid velocity distribution at the Earth using high gain radar / S. Hunt, M. Oppenheim, S. Close, P. Brown, F. McKeen, M. Minardi // *Icarus*. – 2004. – Vol. 168, – No 1. – P. 34–42. DOI: 10.1016/j.icarus.2003.08.006.

197. Campbell-Brown, M. Model of the ablation of faint meteors / M. Campbell-Brown, D. Koschny // *Astronomy & Astrophysics*. – 2004. – Vol. 418. – P. 751–758. DOI: 10.1051/0004-6361:20041001-1.

198. Тохтасьев, В. С. Вероятность ионизации в метеорных следах / В. кн.: Метеорное распространение радиоволн / В. С. Тохтасьев. – Казань: Изд-во КГУ, 1970. – № 7. - С. 33-49.

199. Нарзиев, М. Массы параллельных радиооптических метеоров по величине интенсивности свечения и линейной электронной плотности / М. Нарзиев, Х.Ф. Худжаназаров // II Международная научно-практическая конференция «Роль молодых учёных в развитии науки, инновации и технологии». – Душанбе, 2017. - С. 146-150.

200. Нарзиев, М. О массе параллельных радиооптических слабых метеоров по величине интенсивности свечения и ионизации на высоте зеркальной точки / М. Нарзиев, Х. Ф. Худжаназаров // *Экологический вестник научных центров ЧЭС*. – 2017. – № 4 (3). - С. 109-114.

201. Нарзиев, М. Фотометрические и ионизационные массы одних и тех же ярких оптических и радиолокационных метеоров / In: Abstract book, SAMMAC-2017 / М. Нарзиев, Х. Ф. Худжаназаров. – Винница, Украина, 2017. - С. 65-74.

202. Нарзиев, М. Некоторые результаты симультанных фотографических, телевизионных, спектральных и радиолокационных

наблюдений метеоров в Таджикистане/ М. Нарзиев // Uzbek Journal of Modern Physics. –2025. –Т.2. – №1. – С. 42-52.

203. Астапович, И. С. Метеорные явления в атмосфере Земли / И. С. Астапович. - М: Физматгиз, 1958. - 640 с.

204. Whipple, F. L. The Physical theory of meteors. - VII. On meteor luminosity and ionization / F. L. Whipple // Astrophys. J. – 1955. – Vol. 121. – P. 241-249.

205. CIRA. Cospas International Reference Atmosphere - Berlin: Akademie-Verlag, 1972. – 150 P.

206. Kikwaya, J.-B. Bulk density of small meteoroids / J.-B. Kikwaya, M. Campbell-Brown, P. Brown // Astronomy & Astrophysics. – 2011. – Vol. 530 (113). – P. 1–17. DOI: 10.1051/0004-6361/201116431.

207. Светашкова, Н. Т. Плотность метеорных тел в потоках Геминид, Квадрантид, Ариетид / Н. Т. Светашкова // Астрономический циркуляр. – 1979. – № 1075. - С. 1-3.

208. Sparrow, C. M. Physical Theory of Meteors / C.M. Sparrow // Astrophys. J. – 1926. – Vol. 63. – No 2. – P. 90-100.

209. ReVelle, D. O. Meteors in the Earth's atmosphere: meteoroids and cosmic dust and their interactions with the Earth's upper atmosphere / D. O. ReVelle // Eos, Transactions American Geophysical Union. – 2003. – Vol. 84. – No 26. – P. 249-249. DOI: 10.1029/2003EO260012.

210. Brown, P. G. Электронный ресурс: URL: <http://meteor.uwo.ca/research/fireboll/usaf/sandia28001.pdf> (дата обращения: 06.08.2008).

211. Popova, O. P. The detection of superbolide over Tajikistan (July 23, 2008) / O. P. Popova, E. Silber, Yu. Rybnov // Proceedings, conference Physics of the Environment. – 2011. – P. 150-153.

212. Кохирова, Г. И. Результаты астрометрии суперболида 23 июля 2008 г. / Г. И. Кохирова, С. П. Литвинов, У. Х. Хамроев, М. Р. Ахметзянов //

Известия АН Республики Таджикистан. – Отд. физ.-мат., хим., геол. и тех. наук. – 2015. – № 4. - С. 32-45.

213. Коновалова, Н. А. Геофизические параметры суперболида 23 июля 2008 г. (Таджикистан) / Н. А. Коновалова, О. А. Алимов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2011. – Т. 54. – № 4. – С. 286-289.

214. Konovalova, N. A. The Tajikistan superbolide of July 23, 2008. - I. Trajectory, orbit, and preliminary fall data / N. A. Konovalova, J. M. Madiedo, J. M. Trigo-Rodriguez // Meteoritics planetary science. – 2013. – Vol. 48. - № 12. – P. 2469-2479. DOI: org/10.1111/maps.12217.

215. Андреев, Г. В. Плотность и приток вещества метеорных потоков Геминид, Квадрантид и Леонид по наблюдениям в Душанбе / В кн.: Метеорное вещество в межпланетном пространстве / Г. В. Андреев, Р. Г. Лазарев, Л. Н. Рубцов, Г. О. Рябова. - Казань: Изд-во КГУ, 1982. - С. 60-66.

216. Андреев, Г. В. Структурные характеристики метеорных потоков по радионаблюдениям на  $\lambda=10$  м / В кн.: Метеорное вещество в межпланетном пространстве / Г. В. Андреев, Л. Н. Рубцов, Г. О. Рябова. - Казань: Изд-во КГУ, 1982. – С. 129-130.

217. Белькович, О. И. Некоторые структурные особенности метеорных потоков Геминид и Квадрантид / В кн.: Взаимодействие метеорного вещества с Землёй и оценка притока метеорного вещества на Землю и Луну / О. И. Белькович, В. С. Тохтасьев, Н. И. Сулеймонов. – Душанбе: Дониш, 1975. – С. 93-99.

218. Рябова, Г. О. Математическое моделирование образования и эволюции метеорных потоков: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Г. О. Рябова. – Томск, 2001. – 200 с.

219. Светашкова, Н. Т. Характеристики падающего потока в эпохи действия метеорных потоков Квадрантид и Леонид / В кн.: Метеорное вещество в межпланетном пространстве / Н. Т. Светашкова. - Казань: Изд-во КГУ, 1982. - С. 102-103.

220. Blaauw, R. C. The mass index and mass of the Geminid meteoroid stream as determined with radar, optical and lunar impact data / R. C. Blaauw // Planetary and Space Science. – 2017. – Vol. 143. – P. 83-88.

221. Blaauw, R. C. A meteoroid stream survey using the Canadian Meteor Orbit Radar – III. Mass distribution indices of six major meteor showers / R. C. Blaauw, M. D. Campbell-Brown, R. J. Weryk // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2014. – Vol. 414. – No. 4. – P. 3322–3329.

222. Reddy, K. C. Visual observations of Geminid meteor shower 2004 / K. C. Reddy, V. P. D. Kumar, G. Yellaiah // Bull. Astron. Soc. India. – 2006. – Vol. 34. – P. 225-233.

223. Reddy, K. C. Geminid Meteor shower activity 2003-2005 as observed by Gadanki radar / K. C. Reddy, P. Venkata, D. Kumar, G. Yellaiah / Geminid // Planet. Space Sci. – 2008. – Vol. 56. – P. 1014- 1022.

224. Кашеев, Б. Л. Результаты радиолокационных наблюдений метеоров /Каталог орбит метеоров до +12<sup>m</sup> / Б. Л. Кашеев, А. А. Ткачук // Материалы мирового центра данных Б. – 1980. - 232 с.

225. Орбиты и численность метеоров по наблюдениям в Экваторе / Каталог за декабрь 1968 - июль 1970. - Москва, 1975. - 168 с. Терентьева, А. К. Малые метеорные рои / В кн.: Исследования метеоров / А. К. Терентьева. - М.: Наука, 1966. – № 1. - С. 62-132.

226. Астапович, И. С. Основной каталог радиантов XIX века / И. С. Астапович. - Ашхабад: Изд-во АН Туркменской ССР, 1956. - С. 106.

227. Терентьева, А. К. Некоторые особенности и свойства малых метеорных роёв / А. К. Терентьева // Астрономический циркуляр. – 1964. – № 277. - С. 1-3.

228. Бахарев, А. М. Радианты телескопических метеоров по наблюдениям в СССР / А. М. Бахарев // Бюллетень Сталинабадской астрономической обсерватории. – 1955. – № 12. - С. 10-27.

229. Бахарев, А. М. Радианты потоков по наблюдениям телескопических метеоров в 1942-1945 гг. / А. М. Бахарев // Циркуляр Сталинабадской астрономической обсерватории. – 1948. – № 66. – С. 2-4.

230. Штепан, В. Е. Каталог радиантов телеметеоров / В. Е. Штепан // Бюллетень Комиссии по кометам и метеорам Астрономического совета АН СССР. – 1958. – Т. 3. – С. 33.

231. Ueda, M. Thirteen meteor showers from double-station TV meteors in 2004 and 2005 / M. Ueda, S. Okamoto // WGN: Journal of the International Meteor Organization. – 2008. – Vol. 36. – P. 14–18.

232. Jones, J. The Canadian Meteor Orbit Radar: system overview and preliminary results / J. Jones, P. Brown, K. Ellis [et al.] // Planetary and Space Science. – 2005. – Vol. 53. – P. 413-421.

233. Opik, E. J. Acta et Commentaria / E. J. Opik // Univ. Tartu. – 1933. – Vol. 26. – No 2. – P. 1-39.

234. Fisher, W. J. Mass and velocity of meteorites and the air density along their luminous paths / W. J. Fisher // Harv. Circ. – 1934. – No 385. – P. 1-16.

235. Stober, G. Meteoroid mass determination from underdense trails / G. Stober, C. Jacobi, W. Singer // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2011. – Vol. 73. – No 9. – P. 895–900.

236. Borovička, J. Spectroscopic analysis of Geminid meteors: тезисы докладов / J. Borovička // 69th Annual Meteoritical Society Meeting, 2006. 5085.pdf

237. Волощук, Ю.И. Метеорные потоки и ассоциации, выявленные по результатам многолетних радиолокационных наблюдений метеоров в Харькове / Ю.И. Волощук, Д.Ю. Горелов // Харьков: Изд-во «НТМТ». – 2011. – 383 с.

238. Всехсвятский, С.К. Эруптивные процессы в Галактике и гиперболические метеоры / С.К. Всехсвятский // Проблемы космической физики. – 1978. – № 13. – С. 141–146.

239. Narziev, M. *Advances in Astronomy and Space Physics* / M. Narziev, H. F. Khujanazarov // *Advances in Astronomy and Space Physics*. – 2022. – Vol. 12. – P. 8–12. DOI: 10.17721/2227-1481.12.8-12.

240. Бенюх, В.В. О минералогической плотности метеорных тел в некоторых потоках / В.В. Бенюх // *Астрономический вестник*. – 1974. – Т. 8. – № 2. – С. 96–101.

241. Бенюх, В.В. О минералогической плотности спорадических метеорных тел / В.В. Бенюх // *Астрономический вестник*. – 1973. – Т. 7. – № 1. – С. 21–29.

242. Jenniskens, P. CAMS newly detected meteor showers and the sporadic background / P. Jenniskens, Q. Nénon, P.S. Gural [et al.] // *Icarus*. – 2016. – Vol. 266. – P. 384–409.

243. Jenniskens, P. The established meteor showers as seen in video meteoroid orbit surveys / P. Jenniskens, P.S. Gural, D. Holman // In: M. Gyssens, P. Roggemans (Eds.) *31st International Meteor Conference*. – La Palma, 2012–2013. – P. 38–43.

244. Kornoš, L. EDMOND Meteor Database / L. Kornoš, J. Koukal, R. Piffli, J. Tóth // Eds.: M. Gyssens, P. Roggemans, P. Zoladek. *Proceedings of the International Meteor Conference*. – Poznan, Poland: International Meteor Organization, 2013. – P. 23–25. ISBN 978-2-87355-025-7.

245. Koseki, M. EDMOND and SonotaCo net / M. Koseki // *Journal of Meteorology and Navigation*. – 2019. – No 4. – P. 220–224.

246. Veres, P. Analysis of the SonotaCo video meteor orbits / P. Veres, J. Tóth // *Journal of the International Meteor Organization*. – 2010. – Vol. 38. – P. 54–57.

247. Brown, P. A meteoroid stream survey using the Canadian Meteor Orbit Radar. I: Methodology and radiant catalogue / P. Brown, R.J. Weryk, D.K. Wong [et al.] // *Icarus*. – 2008. – Vol. 195. – P. 317–339.

248. Brown, P. A meteoroid stream survey using the Canadian Meteor Orbit Radar. II: Identification of minor showers using a 3D wavelet transform / P.

Brown, D.K. Wong, R.J. Weryk, P. Wiegert // *Icarus*. – 2010. – Vol. 207. – P. 66–81.

249. Mazur, M. Precision measurements of radar transverse scattering speeds from meteor phase characteristics / M. Mazur, P. Pokorný, P. Brown, R.J. Weryk, D. Vida, C. Schult, A. Agrawal // *Radio Science*. – 2020. – Vol. 55. – No 10. – e2019RS006987. DOI: 10.1029/2019RS006987.

250. Molau, S. Comprehensive list of meteor showers obtained from 10 years of observations with the IMO Video Meteor Network / S. Molau, J.A. Rendtel // *WGN: Journal of the International Meteor Organization*. – 2009. – Vol. 37. – P. 98–121.

251. Nilsson, C. S. Orbital distribution of meteors of limiting magnitude +6 observed from the Southern Hemisphere / C. S. Nilsson // *The Zodiacal Light and the Interplanetary Medium*. – 1967. – SP150. – P. 201–211.

252. Kulikova, N. V. Comets and meteoroid complexes / N. V. Kulikova, V. I. Tishchenko // *International Conference on Near-Earth Astronomy*. – Terskol, 2007. – P. 52.

253. Kostylev, K. V. Astronomical foundations of meteor radio communication / K. V. Kostylev. – Kazan: Kazan State University, 1970. – 142 p.

254. Davies, J. G. A table for the calculation of meteor velocity / J. G. Davies // *Jodrell Bank Annals, Ser. 1*. – 1954. – No 3. – P. 58–67.

255. Hunt, S. Determination of the meteoroid velocity distribution at the Earth using high gain radar / S. Hunt, M. Oppenheim, S. Close, P. Brown, F. McKeen, M. Minardi // *Icarus*. – 2004. – Vol. 168. – No 1. – P. 34–42. DOI: 10.1016/j.icarus.2003.08.006

256. Davies, J. G. Radio echo method measurements of the orbits of faint sporadic meteors / J. G. Davies, J. C. Gill // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1960. – Vol. 121, No. 5. – P. 437–452.

257. Dyrud, L. P. Interpretation of non-specular radar meteor trails / L. P. Dyrud, M. M. Oppenheim, S. Close, S. Hunt // *Geophysical Research Letters*. – 2002. – Vol. 29, No. 21. – P. 81–84.

258. Dyrud, L. P. Plasma and electromagnetic simulations of meteor head echo radar reflections / L. P. Dyrud, D. Wilson, S. Boerve [et al.] // *Earth, Moon, and Planets*. – 2007. – Vol. 102. – P. 383–394.

259. Galligan, D. P. The radiant distribution of AMOR radar meteors / D. P. Galligan, W. J. Baggaley // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2005. – Vol. 359. – P. 551–560.

260. Gartrell, G. Southern hemisphere meteor stream determinations / G. Gartrell, W. G. Elford // *Australian Journal of Physics*. – 1975. – Vol. 28, No. 5. – P. 591–620.

261. Gill, J. C. A radio echo method of meteor orbit determination / J. C. Gill, J. G. Davies // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1956. – Vol. 116. – P. 105–113.

262. Jenniskens, P. On removing showers from the IAU working list of meteor showers / P. Jenniskens, T. J. Jopek, D. Janches [et al.] // *Planetary and Space Science*. – 2020. – Vol. 182. – P. 104821. DOI: 10.1016/j.pss.2019.104821

263. Narziev, M. Catalog of radiants, velocities, orbits and atmospheric trajectories of radio meteors observed in Tajikistan / M. Narziev, R. P. Chebotaryov. – Dushanbe, 2019. – 1318 p.

264. Chebotaryov, R. P. Capabilities of the bearing-time radio method for determining radiants and velocities of individual meteors / R. P. Chebotaryov // *Comets and Meteors*. – 1976. – No. 24. – P. 19–27.

265. Park, R. S. The JPL planetary and lunar ephemerides DE440 and DE431 / R. S. Park, W. M. Folkner, J. G. Williams, D. H. Boggs // *The Astronomical Journal*. – 2021. – Vol. 161. – P. 1–15. DOI: 10.3847/1538-3881/abd414

266. Lindblad, B. A. The IAU Meteor Data Center in Lund / B. A. Lindblad // In: Z. Ceplecha, P. Pecina (Eds.), *Interplanetary Matter. Proc. 10th ERAM*. – Astronomical Institute of the Czechoslovak Academy of Sciences, 1987. – P. 201–204.

267. Lindblad, B. A. The relation between visual magnitudes of meteors and the duration of radar echoes / B. A. Lindblad // *Smithsonian Contributions to Astrophysics*. – 1963. – Vol. 7. – P. 27–39.

268. Lindblad, B. A. A survey of meteoroid orbits obtained by two-station video observations / B. A. Lindblad // *Meteoroids*. – Washington: Astronomical Society of the Pacific, 1998. – P. 233–236.

269. Lindblad, B. A. IAU Meteor Database of photographic orbits – version 2003 / B. A. Lindblad, L. Neslusan, V. Porubcan, J. Svoren // *Earth, Moon, and Planets*. – 2005. – Vol. 93. – P. 249–260.

270. Dyrud, L. P. Interpretation of non-specular radar meteor trails / L. P. Dyrud, M. M. Oppenheim, S. Close, S. Hunt // *Geophysical Research Letters*. – 2002. – Vol. 29. – No 21. – P. 81–84.

271. Lindblad, B. A. The IAU Meteor Data Center in Lund / B. A. Lindblad // *Earth, Moon, and Planets*. – 1995. – Vol. 68. – P. 405–408.

272. Jenniskens, P. The established meteor showers as observed by CAMS / P. Jenniskens, Q. Nénon, J. Albers [et al.] // *Icarus*. – 2016. – Vol. 266. – P. 331–354.

273. Jenniskens, P. *Meteor Showers and Their Parent Comets* / P. Jenniskens. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006. – 790 p.

274. Jenniskens, P. The established meteor showers as seen in video meteoroid orbit surveys / P. Jenniskens, P. S. Gural, D. Holman // In: M. Gyssens, P. Roggemans (Eds.), *Proceedings of the 31st International Meteor Conference*. – La Palma, 2012–2013. – P. 38–43.

275. Jenniskens, P. CAMS confirmation of previously reported meteor showers / P. Jenniskens, Q. Nénon, P. S. Gural [et al.] // *Icarus*. – 2016. – Vol. 266. – P. 355–370.

276. Veres, P. Analysis of the SonotaCo video meteor orbits / P. Veres, J. Tóth // *Journal of the International Meteor Organization*. – 2010. – Vol. 38. – P. 54–57.

277. Southworth, R. B. Statistics of meteor streams / R. B. Southworth, G. S. Hawkins // *Smithsonian Contributions to Astrophysics*. – 1963. – Vol. 7. – P. 261–285.

278. Drummond, J. D. A test of comet and meteor shower associations / J. D. Drummond // *Icarus*. – 1981. – Vol. 45. – P. 545–553.

279. Emelyanenko, V. V. Dynamics of periodic comets and meteor streams / V. V. Emelyanenko // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. – 1992. – Vol. 54. – P. 91–110.

280. Neslusan, L. Meteoroid Stream of Comet C/1961 T1 (Seki) and Its Relation to the December  $\rho$ -Virginids and  $\gamma$ -Sagittariids / L. Neslusan, M. Hajdukova // *The Astronomical Journal*. – 2021. – Vol. 162. – P. 1–9. DOI: 10.3847/1538-3881/abfdc9.

281. Neslusan, L. The prediction of meteor showers from all potential parent comets / L. Neslusan, M. Hajdukova, D. Tomko [et al.] // *Proceedings of the International Meteor Conference*. – Giron, 2014. – P. 1–7. DOI: 10.48550/arXiv.1410.1307

282. Williams, I. P. The origin and evolution of meteor showers and meteoroid streams / I. P. Williams // *Astronomy & Geophysics*. – 2011. – Vol. 52. – P. 20–26

283. Ye, Q. Comets and meteor showers / Q. Ye, P. Jenniskens // *Earth and Planetary Astrophysics*. – 2022. – Vol. 4. – No 3. – P. 1–15. DOI: 10.48550/arXiv.2209.10654

284. Акимов, В. А. Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия / В. А. Акимов, Д. О. Глазачев, В. В. Емельяненко [и др.]. – Москва, 2015. – 272 с.

285. Емельяненко, В. В. Динамическая эволюция комет и метеорных роёв: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / В. В. Емельяненко. – Челябинск, 1993. – 310 с.

286. Заусаев, А. Ф. Математическое моделирование орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы / А. Ф. Заусаев, А. А. Заусаев. – Москва: Машиностроение, 2008. – 250 с.

287. Крамер, Е. Н. Кометные радианты и связь метеорных потоков с кометами / Е. Н. Крамер // Известия Астрономической обсерватории Одесского университета. – 1953. – Т. 3, Вып. 2. – С. 163–247.

288. Клумов, Б. А. Столкновение кометы Шумейкер-Леви 9 с Юпитером: что мы увидим? / Б. А. Клумов, В. И. Кондауров, А. В. Конюхов [и др.] // Успехи физических наук. – 1994. – № 164. – С. 617–629

289. Arlt, R. The new working list of visual meteor showers / R. Arlt // WGN: Journal of the International Meteor Organization. – 1995. – Vol. 23, No. 4. – P. 105–109

290. Šegon, D. New showers from parent body search across several video meteor databases / D. Šegon, P. Gural, Z. Andreić, I. Skokić [et al.] // WGN: Journal of the International Meteor Organization. – 2014. – Vol. 42. – P. 57–64

291. Jopek, T. J. Remarks on the Meteor Orbital Similarity D-Criterion / T. J. Jopek // Icarus. – 1993. – Vol. 106. – No. 2. – P. 603–607

292. Jopek, T. J. Meteor stream identification: a new approach – III. The limitations of statistics / T. J. Jopek, G. B. Valsecchi, C. Froeschlé // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2003. – Vol. 344, No. 2. – P. 665–672

293. Porubcan, V. A search for fireball streams among photographic meteors / V. Porubcan, M. Gavajdova // Planetary and Space Science. – 1994. – Vol. 42. – No. 2. – P. 151–155

294. Rudawska, R. New meteor showers identified in the CAMS and SonotaCo meteoroid orbit surveys / R. Rudawska, P. Jenniskens // In: T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, I. P. Williams (Eds.), The Meteoroids 2013: Proceedings of the Astronomical Conference held at Adam Mickiewicz University. – Poznań, 2014. – P. 217–224.

295. Kornoš, L. Confirmation and characterization of IAU temporary meteor showers in EDMOND database / L. Kornoš, P. Matlovič, R. Rudawska [et al.] // In: T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, I. P. Williams (Eds.), *The Meteoroids 2013: Proceedings of the Astronomical Conference held at Adam Mickiewicz University*. – Poznań, 2014. – P. 225–233.

296. Sekanina, Z. Statistical Model of Meteor Streams. III. Stream Search Among 19303 Radio Meteors / Z. Sekanina, J. Cook, T. Harris // *Icarus*. – 1973. – Vol. 18, No. 2. – P. 253–284

297. Sekanina, Z. Statistical Model of Meteor Streams. IV. A Study of Radio Streams from the Synoptic Year / Z. Sekanina, C. Miller // *Icarus*. – 1976. – Vol. 27. – No. 2. – P. 265–321

298. Andreić, Ž. Ten possible new showers from the Croatian Meteor Network and SonotaCo datasets / Ž. Andreić, D. Šegon, K. Korlević [et al.] // *WGN: Journal of the International Meteor Organization*. – 2013. – Vol. 41. – No. 4. – P. 103–108

299. Нарзиев, М. Январские метеорные потоки и ассоциации по результатам радиолокационных наблюдений в ГисАО / М. Нарзиев, Х. Ф. Худжаназаров, Т. Ё. Ёопек // *Доклады НАН Таджикистана*. – 2023. – Т. 66. – № 9–10. – С. 550–560

300. Худжаназаров, Х. Ф. Потоки и ассоциации метеороидов, идентифицированные по результатам радионаблюдений в ГисАО за декабрь 1969 г. / Х. Ф. Худжаназаров, М. Нарзиев // *Вестник ТНУ, Серия естественных наук*. – 2022. – № 1. – С. 140–154

301. Smirnov, V. An attempt to evaluate the structure of cometary dust particles / V. Smirnov, O. Vaisberg, S. Anisimov // *20th ESLAB Symposium on the Exploration of Halley's Comet*. – 1986. – SP-250, Vol. II. – P. 195–199

302. Киселев, Н. Н. Поляриметрические исследования комет в Крымской астрофизической обсерватории / Н. Н. Киселев, В. К. Розенбуш, Н. М. Шаховской, Ю. С. Ефимов // *Известия Крымской астрофизической обсерватории*. – 2007. – Т. 103. – № 4. – С. 216–230

303. Kiselev, N. N. Dust in comet C/1975 V1 (West) / E. Zubko, K. Muinonen, G. Videen, N. N. Kiselev // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2014. – Vol. 440. – P. 2928–2943.

304. Rosenbush, V. Photometry and polarimetry of comet 46P/Wirtanen in the 2018 apparition / V. Rosenbush, N. Kiselev [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2021. – Vol. 503. – No. 3. – P. 4297–4308.

305. Ибадинов, Х. И. Дезинтеграция кометных ядер: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Х. И. Ибадинов. – Москва: ИК РАН, 1998. – 296 с.

306. Janches, D. An initial meteoroid stream survey in the Southern Hemisphere using the Southern Argentina Agile Meteor Radar (SAAMER) / D. Janches, J. L. Hormaechea, C. Brunini [et al.] // Icarus. – 2013. – Vol. 223. – P. 677–683.

307. Campbell-Brown, M., Brown, P. G. A 13-year radar study of the  $\eta$ -Aquariid meteor shower / M. Campbell-Brown, P. G. Brown // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2015. – Vol. 446. – P. 3669–3675.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Монографии:*

[1-А]. **Narziev, M.** Catalog of radiant's, velocities, orbits and atmospheric trajectories of radio meteors observed in Tajikistan, December 1968 - December 1969 / M. Narziev, R. P. Chebotaryov. – Dushanbe, 2019. - 1318 p.

### *Статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан:*

[2-А]. **Нарзиев, М.** 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.

[3-А]. **Нарзиев, М.** Определение масс и плотностей метеороидов по радиолокационным наблюдениям с учётом процессов, влияющих на форму ионизационных кривых метеоров / Р. Ш. Бибарсов, М. Нарзиев, Р. П. Чеботарев // *Доклады АН ТаджССР*. – 1990. - Т. 33. - № 6. - С. 372-376.

[4-А]. **Нарзиев, М.** Плотность метеорных тел в родственных потоках / М. Нарзиев, Р. Ш. Бибарсов, Р. П. Чеботарев // *Доклады АН ТаджССР*. – 1991. - Т. 34. - № 7. - С. 412-414.

[5-А]. **Нарзиев, М.** Кинематические и физические характеристики метеороидов в майских потоках и ассоциациях / М. Нарзиев, Р. Ш. Бибарсов // *Доклады АН ТаджССР*. – 1992. - Т. 35. - № 9-10. - С. 417-420.

[6-А]. **Нарзиев, М.** Кривые свечения и ионизации метеоров по результатам параллельных телевизионных и радиолокационных наблюдений / П. Б. Бабаджанов, И. Ф. Малышев, М. Нарзиев, Р. П. Чеботарев // *Кометы и метеоры*. - 1985. - № 37. - С. 28-33.

[7-А]. **Нарзиев, М.** Масса метеороидов по результатам параллельных наблюдений. Шкала масс радиометеоров / М. Нарзиев // *Доклады АН Республики Таджикистан*. – 2003. - Т. 46. - № 9-10. - С. 4-9.

[8-А].**Нарзиев, М.** О механизме разрушения и плотностях метеороидов по результатам совместных фото-радиолокационных и радиотелевизионных наблюдений / Н. А. Коновалова, М. Нарзиев // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2008. – Т. 51. – № 4. - С. 264-270.

[9-А].**Нарзиев, М.** Кривые блеска метеоров и определение масс метеороидов по результатам комплексных радиотелевизионных наблюдений / М. Нарзиев, И. Ф. Малышев // Известия АН Республики Таджикистан. – 2009. – № 4 (137). - С. 36-45.

[10-А].**Нарзиев, М.** О механизме разрушения и физических характеристиках совместных радиооптических метеороидов / Н. А. Коновалова, М. Нарзиев // Радиотехника. – 2010. – № 160. - С. 118-123.

[11-А].**Нарзиев, М.** Зависимость свечения и ионизации от скорости и химсостава метеоров / М. Нарзиев // Радиотехника. – 2010. – № 160. - С. 127-131.

[12-А].**Нарзиев, М.** О дроблении и плотностях метеорных тел по данным комбинированных радиооптических наблюдений / Н. А. Коновалова, М. Нарзиев // Вестник СибГАУ. – Красноярск. - 2011. – Т. 6. – № 39. - С. 95-98.

[13-А].**Нарзиев, М.** Исследование метеорных потоков и ассоциации по результатам радиолокационных наблюдений в Таджикистане / М. Нарзиев // СибГАУ. – Красноярск. – 2011. – Т. 6. – № 39. - С. 99-104.

[14-А].**Нарзиев, М.** Радианты, скорости, массы и плотности метеоров в метеорных потоках и ассоциациях / М. Нарзиев // Вестник Таджикского технического университета. – 2013. - № 4 (24). – С. 9-16.

[15-А].**Нарзиев, М.** Орбиты метеорных потоков и ассоциаций по результатам радиолокационных наблюдений в Таджикистане / М. Нарзиев // Экологический вестник научных центров ЧЭС. – 2013. – № 4. Т. 2. – С. 107-115.

[16-A].**Нарзиев, М.** Распределение метеорных тел по массам в некоторых метеорных потоках / М Нарзиев // Экологический вестник научных центров ЧЭС. – 2013. – № 4. Т. 2. – С. 106-111.

[17-A].**Нарзиев, М.** Некоторые результаты поиска совместных фоторадиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане / М. Нарзиев // Радиотехника. – 2016. - № 184. - С. 49-52.

[18-A].**Нарзиев, М.** Вариации свечения и ионизации вдоль следа одних и тех же метеоров / М. Нарзиев // Радиотехника. – 2016. – № 184. - С. 53-58.

[19-A].**Нарзиев, М.** О массе параллельных радиооптических слабых метеоров по величине интенсивности свечения и ионизации на высоте зеркальной точки / М. Нарзиев, Х.Ф. Худжаназаров // Экологический вестник научных центров ЧЭС. – 2017. - № 4. - Вып. 3. - С. 109-114.

[20-A].**Narziev, M.** Physical properties of the meteoroids using simultaneous radar and optical observations / M. Narziev // Planetary and Space Science. – 2019. – Vol. 173. - № 1. – P. 42-48.

[21-A].**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. doi: 10.30837/rt.2020.2.201.05

[22-A].**Нарзиев, М.** Радиометеорные данные Гиссарской обсерватории в базе данных ЦМД МАС / М. Нарзиев, Р. П. Чеботарев, Т. Й. Йопек [и др.] // Политехнический вестник. Серия Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. - № 3 (51). - С. 18-21.

[23-A].**Narziev, M.** IAU MDC meteor orbits database - A sample of radio-meteor data from the Hissar observatory / M. Narziev, R. P. Chebotarev, T. J. Jopek, L. Neslušán, V. Porubčan, J. Svoreň, H. F. Khujanazarov, R. Sh. Bibarsov, Sh. N. Irkaeva, Sh. O. Isomutdinov, V. N. Kolmakov, G. A. Polushkin, V. N. Sidorin // Planetary and Space Science. – 2020. – Vol. 192. – P. 105008. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.105008>

[24-A]. **Нарзиев, М.** Потоки и ассоциации метеороидов, идентифицированные по результатам радионаблюдений в ГисАО за декабрь 1969 г. / Х. Ф. Худжаназаров, М. Нарзиев // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2022. - № 1. - С. 140-154.

[25-A]. **Нарзиев, М.** Атмосферные траектории и орбиты 426 радиометеоров по наблюдениям с 4-5 пунктов в ГисАО (Таджикистан) / М. Нарзиев // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2022. - № 4. - С. 162-194.

[26-A]. **Narziev, M.** The physical properties of the superbolide of Tajikistan on the results of combined satellite and ground-based observations / M. Narziev, H. F. Khujanazarov // Advances in Astronomy and Space Physics. – 2022. – Vol. 12. – Issue 1-2. –P. 8-12. doi: 10.17721/2227-1481.12.8-12.

[27-A]. **Нарзиев, М.** Физических свойств 8916 радиометеоров, наблюденных в ГисАО / М. Нарзиев, Х.Ф. Худжаназаров // Политехнический Вестник, Серия Интеллект. Инновации. Инвестиции. –2023. –№3(63). – С.22-26.

[28-A]. **Нарзиев, М.** Январские метеорные потоки и ассоциации по результатам радиолокационных наблюдений в ГисАО / М. Нарзиев, Х.Ф. Худжаназаров, Т.Й. Йопек // Доклад НАНТ. –2023. – Т.66. – №9-10. – С. 550-560.

[29-A]. **Нарзиев М.** Зависимость шкалы радиовеличины от скорости метеоров / М. Нарзиев // Научные труды Института астрономии РАН. – 2025. – Т. 10, № 4. – С. 267-271. – DOI 10.51194/INASAN.2025.10.4.012.

[30-A]. **Narziev, M.** Meteoroid Streams and Associations Based on Radar Observations at the Hisar Astronomical Observatory in January 1970 / M. Narziev, H. F. Khujanazarov // Advances in Space Research. – 2026, – Vol.77, – Issue 6, – P.7484-7493. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2026.01.021>.

**Результаты, изложенные в других публикациях по теме  
диссертации:**

[31-A].**Нарзиев, М.** Результаты комплексных радиотелевизионных (ТВ) наблюдений метеорных потоков в Таджикистане. - I. Динамические характеристики / М. Нарзиев, И.Ф. Малышев // Бюллетень Института астрофизики АН Республики Таджикистан. – 2006. – № 85. - С. 35-45.

[32-A].**Narziev, M.** Dependences of Ratio of the Luminosity to Ionization on Velocity and Chemical Composition of Meteors / Meteoroids: The Smallest Solar System Bodies / M. Narziev // NASA/CP-2011-216469. - Breckenridge, Colorado, USA, 2011. - P. 168-173.

[33-A].**Narziev, M.** Meteoroids Mass by Results of the combined Radio-Television observations / M. Narziev // Dust, Atmosfere and Plasma Enviroment of the Moon and Smoll Bodies (DAP-2012). - Boulder, Colorado, 2012.

[34-A].**Нарзиев, М.** Радианты, скорости и орбиты метеорных потоков и ассоциаций по результатам радиолокационных наблюдений в Таджикистане / М. Нарзиев // Международная конференция «Околоземная астрономия»: Сборник тезисов. - Краснодар, 2013. - С. 105-106.

[35-A].**Нарзиев, М.** Распределение метеорных тел по массам в некоторых метеорных потоках / М. Нарзиев // Международная конференция «Околоземная астрономия»: Сборник тезисов. – Краснодар, 2013. - С. 115-117.

[36-A].**Нарзиев, М.** О результатах поиска совместных фото-радиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане / М. Нарзиев // Международная конференция «Околоземная астрономия». – Терскол, 2015. - С. 64-69.

[37-A].**Нарзиев, М.** Скорость метеоров по результатам комбинированных радиотелевизионных наблюдений / М. Нарзиев // Международная конференция «Околоземная астрономия»: Сборник тезисов. – Терскол, 2015. - С. 70-75.

[38-A].**Нарзиев, М.** Дар бораи баъзе аз параметҳои физикавии Суперсоқибай Тоҷикистон (О некоторыми физическими параметрами суперболида Таджикистан) / М. Нарзиев, Х. Ф. Худжаназаров //

Международная научная конференция «Роль молодых учёных в развитии науки, инноваций и технологий», посвящённая 25-летию Государственной независимости Республики Таджикистан. – Душанбе, 2016. - С. 15-18.

[39-A]. **Нарзиев, М.** Фотометрические и ионизационные массы одних и тех же ярких оптических и радиолокационных метеоров / In: Abstractbook, SAMMAS-2017 / М. Нарзиев, Х. Ф. Худжаназаров. – Винница, Украина, 2017. - С. 65-74.

[40-A]. **Нарзиев, М.** О каталоге радиантов, скоростей, орбит и атмосферных траекторий 4500 радиометеоров, наблюдаемых в Таджикистане / М. Нарзиев, Р. П. Чеботарев // Comets, Asteroids, Meteors, Meteorits, Astroproblemes, Craters VINNUTCIA. – 2017. - С. 91-103.

[41-A]. **Нарзиев, М.** Массы параллельных радиооптических метеоров по величине интенсивности свечения и линейной электронной плотности / М. Нарзиев, Х.Ф. Худжаназаров // II Международная научно-практическая конференция «Роль молодых учёных в развитии науки, инновации и технологии». – Душанбе, 2017. - С. 146-150.

[42-A]. **Нарзиев, М.** Величины линейной электронной плотности, радиомagnitude, массы и плотности 8916 радиометеоров, зарегистрированных в ГисАО / М. Нарзиев, Т. Й. Йопек, Х.Ф. Худжаназаров // VI Международная конференция «Современные проблемы физики». – Душанбе: «ЭР-граф», 2018. - С. 293-295.

[43-A]. **Нарзиев, М.** Применение критерия конечных высот для определения плотности параллельных радиооптических метеороидов / М. Нарзиев, Х. Ф. Худжаназаров // Международная научно-практическая конференция «Электроэнергетика: Проблемы и перспективы развития энергетики региона». - Душанбе, 2018. - С. 14-24.

[44-A]. **Narziev, M.** IAUMDC, version 2018 / M. Narziev [et al.] // The 1968-1969 samples of HISSAR radio-meteor data: <https://www.astro.sk/~ne/IAUMDC/PhVR2018/>

[45-А].**Нарзиев, М.** Радианты, скорости и орбиты метеоров по результатам комбинированных радиотелевизионных наблюдений/ Нарзиев, М// МАТЕРИАЛЫ международной научно-практической конференции на тему «Современные проблемы астрофизики», посвященная «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования (2020-2040 годы)» и «80-летие Члена корр. НАНТ, д.ф.м.н., профессора Ибадинова Х.И.», Душанбе – 2024, с. 49-58.

[46-А].**Нарзиев, М.** Ошкор намудани селҳо ва ассотсияҳои метеории моҳи феврал / Хучаназаров Ҳ. Ф., Нарзиев М// МАТЕРИАЛЫ международной научно-практической конференции на тему «Современные проблемы астрофизики», посвященная «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования (2020-2040 годы)» и «80-летие Члена корр. НАНТ, д.ф.м.н., профессора Ибадинова Х.И.», Душанбе – 2024, С. 74-83.

[47-А].**Нарзиев, М.** Мавқеи мушоҳидаҳои муштараки оптикию радиолокатиони Тоҷикистон дар таҳқиқи ҳодисаи метеорӣ/ Нарзиев М // МАТЕРИАЛЫ международной научно-практической конференции на тему «Современные проблемы астрофизики», посвященная «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования (2020-2040 годы)» и «80-летие Члена корр. НАНТ, д.ф.м.н., профессора Ибадинова Х.И.», Душанбе – 2024, С. 89-97 .

[48-А].**Нарзиев, М.** Орбиты и атмосферные траектории 6544 радио метеоров, зарегистрированных в Гиссарской астрономической обсерватории /Х. Ф. Худжаназаров, М. Нарзиев // Uzbek Journal of Modern Physics. –2025. – Т.2. – №1. – С. 24-33.

[49-А].**Нарзиев, М.** Некоторые результаты симультанных фотографических, телевизионных, спектральных и радиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане / М. Нарзиев // Uzbek Journal of Modern Physics. –2025. –Т.2. – №1. – С. 42-52.

[50-А].**Нарзиев, М.** Об особенностях формы кривых свечения метеороидов разных популяций и источников происхождения //Материалы II International Conference Fundamental and Applied Research in Physics, NUUz, May 16-17, 2025, С.167.

[51-А].**Нарзиев, М.** Физические параметры метеорных потоков и ассоциаций за декабрь / Х. Ф. Худжаназаров, М. Нарзиев // Распространение радиоволн: Труды XXIX Всероссийской открытой научной конференции, Казань, 30 июня – 04 2025 года. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2025. – С. 670-673. – DOI 10.26907/rwp29.2025.670-673.

[52-А].**Нарзиев, М.** Зависимость шкалы радиовеличины от скорости метеоров / Нарзиев М. // Сборник тезисов Научно-практическая конференция с международным участием, “Околоземная астрономия – 2025”. 2 - 4 июня 2025, Москва, С.78.