

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт астрономии Российской академии наук

На правах рукописи

Карташова Анна Петровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА МЕТЕОРНОГО ВЕЩЕСТВА
ЧЕРЕЗ ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО ПО ДАННЫМ
ТЕЛЕВИЗИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

01.03.01 – астрометрия и небесная механика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико–математических наук

Научный руководитель:
д. ф. – м. н. Багров А. В.

Москва – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ИЗУЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ, ПРОНИКАЮЩИХ В	
АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ	21
1.1. Методы регистрации метеорных событий	22
1.1.1. Визуальный метод.....	23
1.1.2. Фотографический метод.....	25
1.1.3. Телевизионный метод.....	27
1.1.4. Радиолокационный метод	29
1.2. Метеорные телевизионные камеры.....	31
1.2.1. Широкоугольные метеорные системы	32
1.2.1.1. All-sky камеры.....	32
1.2.1.2. Метеорные камеры типа «PatrolCa»	33
1.2.2. Метеорная камера с высокой проникающей способностью	
FAVOR (FASt Variability Optical Registrator).....	38
1.3. Космические риски, связанные с метеороидами. Модели метеорного	
вещества	42
1.3.1. Meteoroid Engineering Model (MEM) и Interplanetary Meteoroid	
Engineering Model (IMEM)	43
1.3.2. ГОСТ 25645.128-85 «Вещество метеорное. Модель	
пространственного распределения».....	46
1.4. Риски, относящиеся к астероидно - кометной опасности.....	49
1.5. Заключение	54
ГЛАВА 2 МЕТОДЫ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТЕОРОВ ...	55
2.1. Разработка метода определения координат метеоров по	
наблюдениям на широкоугольных телевизионных камерах.....	57

2.1.1. Определение экваториальных координат точек метеорного трека	59
2.1.2. Поправка за смещение камеры	64
2.1.3. Точность метода.....	66
2.2. Координатные измерения метеоров по наблюдениям телевизионной камерой FAVOR	68
2.3. Заключение	72
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТЕОРНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ	74
3.1. Методы оценки метеорной активности	75
3.1. 1. Зенитное часовое число (ZHR).....	75
3.1.1.1. Значение ZHR по данным телевизионных наблюдений	80
3.1.2. Индекс Метеорной Активности (ИМА)	82
3.1.2.1. ИМА по наблюдениям на камере FAVOR в августе – декабре 2006 г.....	87
3.2. Индекс Метеорной Активности сильных метеорных потоков	92
3.2.1. Метеорный поток Ориониды 2006 – 2008 гг.	93
3.2.1.1. Распределение Орионид по яркости в 2006 – 2008 гг.....	95
3.2.1.2. ИМА Орионид в 2006 – 2008 гг.....	96
3.2.2. Метеорные потоки Северные и Южные Тауриды 2006 – 2008 гг.	98
3.2.2.1. Распределение Северных и Южных Таурид по яркости 2006 – 2008 гг.	100
3.2.2.2. ИМА Северных и Южных Таурид в 2006 – 2008 гг.	101
3. 3. Заключение	105
ГЛАВА 4 БАЗИСНЫЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ МЕТЕОРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ	107
4.1. Базисные наблюдения в ИНАСАН.....	107

4.1.1. Оборудование и программы для обработки телевизионных метеорных наблюдений.....	109
4.1.2. Результаты базисных наблюдений в 2012 – 2013 гг.	112
4.2. Результаты базисных наблюдений метеорного потока Персеиды в 2012 – 2013 гг.....	113
4.2.1. Распределение Персеид по звездной величине	115
4.2.2. Радиант метеорного потока Персеиды	118
4.2.3. Высоты метеоров потока Персеиды	123
4.2.4. Индекс Метеорной Активности Персеид в 2012 – 2013 гг.....	125
4.2.5. Орбитальные параметры метеорных частиц потока Персеиды.....	127
4.3. Заключение	128
ГЛАВА 5 АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА ПО ВИДЕОРЕГИСТРАЦИЯМ И ОПРОСУ ОЧЕВИДЦЕВ.....	130
5.1. Анализ эффектов, зафиксированных при пролете Челябинского метеороида.....	131
5.2. Анализ записей с видео регистраторов.....	135
5.3. Траектория и орбита Челябинского метеороида	141
5.4. Заключение	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	149
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	164

ВВЕДЕНИЕ

Метеорная астрономия изучает миграцию малоразмерного вещества в Солнечной системе. Поскольку метеороидные частицы имеют очень малый размер (10 мкм – 1 м в диаметре), их наблюдения астрономическими инструментами практически невозможно, и единственный способ их регистрации состоит в наблюдениях собственно метеорных явлений – процесса сгорания метеороидных частиц при их столкновении с атмосферой Земли (соответствующее световое явление называется *метеор*). В связи с тем, что метеороиды движутся с космическими скоростями (от 11 до 72 км/с), их кинетическая энергия очень велика. При взаимодействии с атмосферой она расходуется на испарение частицы, на ударное возбуждение атмосферных атомов и молекул и высвечивание части этой энергии в видимом диапазоне электромагнитных волн, а также на ионизацию атмосферы вдоль траектории метеора.

Метеорная материя представляет собой тугоплавкую фракцию кометных ядер, то есть является частью того первичного вещества, из которого образовались все тела планетной системы. Поэтому изучение происхождения и эволюции метеорных потоков является источником важнейшей информации о космогонии Солнечной системы.

Задачей исследований метеорной материи является определение ее распределения в Солнечной системе, выявление потоков и их динамических характеристик, изучение физических свойств вещества метеорных частиц.

Решение задач метеорной астрономии связано с получением наблюдательных данных о метеорных явлениях. Продолжительность светового явления «метеор» составляет обычно доли секунды, место и момент появления метеора в небе совершенно непредсказуемы. Видимая яркость метеоров, как правило, близка к яркости звезд, и очень редко превышает яркость планет в их максимальном блеске, поэтому в оптическом

диапазоне метеоры можно наблюдать только в ночное время. Длина метеорного трека может достигать нескольких десятков градусов, поэтому наблюдения с узкопольными инструментами не имеют смысла. Для наблюдений метеоров необходимо использовать приемник с широким полем зрения, высоким временным разрешением и очень высокой чувствительностью.

Высвечиваемое излучение часто достаточно интенсивно, чтобы его можно было увидеть невооруженным глазом, сфотографировать или зарегистрировать современной телевизионной техникой. Ионизованный след хорошо отражает радиоволны, и это позволяет регистрировать метеорные явления как отражения зондирующих радиолокационных импульсов. Как показали многочисленные исследования, выполненные в XX веке [1], подавляющее число радиолокационных отражений получается от вторжения в земную атмосферу очень мелких частиц, которые формируют настолько слабое оптическое излучение, что оно недоступно для обнаружения современной техникой.

Телевизионные наблюдения метеоров вошли в практику только в конце прошлого века. Все представления о метеорах были сформированы к этому времени на основе визуальных, фотографических и радиолокационных наблюдений, массово проводившихся в середине XX века. Визуальные наблюдения давали невысокую точность координатных и фотометрических измерений и были отягощены сильными субъективными факторами. Фотографические наблюдения носили характер объективных регистраций и давали очень высокую точность измерений, но низкая чувствительность фотоматериалов обеспечивала наблюдение только самых ярких метеоров, а трудоемкость самих наблюдений и их обработки резко ограничивала их массовость. Радиолокационные наблюдения, напротив, обеспечивали объективную регистрацию десятков и сотен тысяч метеоров ежедневно, причем независимо от погодных условий, но с очень невысокой

координатной точностью.

Собранные к началу текущего столетия сведения о метеорах сводятся к самым общим представлениям:

1. Примерно половина наблюдаемых метеоров образует потоки частиц, находящихся на очень близких орбитах, число которых в каталоге IAU MDC составляет 750 (112 подтвержденных) [2]. Продолжительность действия потоков и характер распределения в них частиц по их пространственной плотности и по массам частиц являются индивидуальными характеристиками потоков, которые могут быть крайне нестабильными во времени.

2. Метеорные потоки возникают при распаде комет; существуют прямые свидетельства как распада комет и появления на их родительских орбитах метеорных частиц, так и существование комет на орбитах, близких к орбитам сильных метеорных потоков. Есть подозрения, что некоторые метеорные потоки находятся на орбитах, имеющих сходство с орбитами астероидов, но эти астероиды, скорее всего, являются потухшими кометами.

3. Распределение метеороидов по массам известно с низкой точностью. Оно получено из объединения данных об оптических метеорах, радиометеорах и данных датчиков соударений на космических аппаратах. Ошибка определения масс в каждом из этих распределений может достигать двух порядков. При этом остается открытым вопрос о допустимости объединения рассматриваемых распределений в общую модель (см. параграф 1.3).

Интерес к изучению метеоров после начала космической эры резко повысился, поскольку метеороиды могут представлять реальную угрозу безопасности космических аппаратов. Теоретические оценки и натурные эксперименты показали, что метеороид массой 10^{-6} г пробивает насквозь алюминиевый лист толщиной 0,5 мм. Более мелкие частицы обладают меньшей разрушительной силой и вызывают только эрозию поверхности космических аппаратов [3]. Отсюда следует задача прикладного изучения

метеороидов с массой более 10^{-6} г.

Для качественного прогнозирования уровня метеорной опасности космической деятельности создаются модели метеорного вещества (см. параграф 1.3), которые постоянно обновляются с целью учета динамической нестабильности метеорных потоков. Все модели основаны на компиляции накопленного разнородного наблюдательного материала.

Крупные тела могут вызвать более серьезные последствия. Падение космических тел на Землю представляет реальную угрозу для человечества [4]. Даже скромные по астрономическим меркам события, подобные падению Челябинского метеорита (около 20 метров в диаметре), способны вызвать довольно существенный материальный урон (в случае Челябинского феномена около 1 млрд. руб.), а также иметь огромный общественный резонанс. Такие события относительно часты (несколько раз в столетие). Падения тел размером более 50 м происходят реже, но человечество должно быть готовым к реагированию не на уже свершившееся событие, а на существенную угрозу такого события с целью ее предотвращения.

Актуальность работы

Накопление наблюдательных данных о метеорных явлениях, получаемых объективными методами, является актуальной задачей для прогнозирования уровня метеорной опасности при проектировании и эксплуатации космической техники. Актуальность этой работы проистекает из необходимости построения моделей метеорного вещества на основе объективных регистраций, относящихся к наблюдению частиц в диапазоне масс ($>10^{-6}$ г), представляющем реальную опасность для космических аппаратов.

Для получения картины направлений и скоростей прихода на Землю метеорных частиц необходимо обеспечить массовое определение

индивидуальных орбит каждого метеороида, поэтому переход к базисным наблюдениям метеоров является актуальной задачей.

Использование телевизионной техники при наблюдениях метеоров требует адаптации методов первичной обработки получаемых телевизионных регистраций, к специфическим особенностям широкоугольных наблюдений быстро движущихся объектов.

Исключительную важность в последнее время приняло изучение тел Солнечной системы декаметрового размера. Прямые измерения параметров Челябинского метеороида представляют особый интерес в силу его уникальности.

Цели диссертационной работы

- разработать метод измерений координат точек метеорных треков в телевизионных кадрах с широким полем зрения;
- провести базисные наблюдения метеоров с современной телевизионной техникой регистрации явлений в режиме мониторинга;
- получить орбитальные характеристики метеорных частиц по данным телевизионных базисных наблюдений;
- исследовать потоки метеорного вещества в Солнечной системе на основе их орбитальных параметров;
- провести сопоставление Зенитного часового числа (ZHR) и Индекса Метеорной Активности (ИМА) как параметров, характеризующих приток метеорного вещества в околоземное пространство;
- оценить величину притока вещества и временную не стабильность избранных метеорных потоков (Ориониды, Северные и Южные Тауриды, Персеиды) и спорадического фона;
- определить траекторию, орбиту и эффекты вызванные пролетом Челябинского метеороида.

Новизна и научная ценность работы

- разработан новый метод вычисления небесных координат метеорных явлений из телевизионных регистраций в широком поле зрения;
- при участии автора получен обширный наблюдательный материал, относящийся к объективным регистрациям метеорных явлений (односторонние и базисные наблюдения метеоров на разных широкоугольных телевизионных установках);
- проведена обработка наблюдательного материала, полученного на камерах FAVOR (13309 метеоров было зарегистрировано за период с 2006 по 2009гг.) и PatrolCa (2438 метеоров было зафиксировано двумя камерами такого типа за 2012–2013гг.);
- впервые получена объективная оценка притока метеорного вещества в виде Индекса Метеорной Активности для полугодового периода наблюдений и для сильных метеорных потоков Ориониды, Северных и Южных Таурид, Персеиды на трехлетнем интервале;
- впервые по наблюдениям на камере FAVOR были получены распределения метеоров по яркости для ранее не исследованного диапазона (слабее $+5^m$);
- расширена область наблюдений метеоров современными оптическими средствами в восточном направлении долгот (т.е. восстановлено соучастие России в метеорных исследованиях);
- впервые исследованы астрономические аспекты уникального Челябинского метеороида.

Практическая ценность работы

- накоплен обширный наблюдательный материал в широком диапазоне масс до 10^{-6} г, который может являться основой для изучения распределения метеорного вещества в Солнечной системе,

происхождения и эволюции метеорных потоков, оценки рисков для космической деятельности и т.п.;

- обосновано применение Индекса Метеорной Активности (ИМА), как объективного критерия для оценки уровня метеорной опасности в околоземном пространстве;
- получены значения ИМА для сильных метеорных потоков (Ориониды, Северные и Южные Тауриды, Персеиды) за несколько лет наблюдений, которые позволили оценить вклад от этих потоков в общий приток метеорного вещества на Землю;
- разработан метод вычисления небесных координат объектов в поле зрения широкоугольной телевизионной камеры, который может быть применен при полном отсутствии опорных звезд в кадре;
- определены текущие характеристики метеорных потоков Персеиды, Ориониды, Северные и Южные Тауриды;
- исследован состав сильных метеорных потоков Ориониды, Северные и Южные Тауриды в малоизученном диапазоне яркостей (слабее $+5^m$);
- предложенные автором методы и подходы были применены при анализе случайных регистраций Челябинского события.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработан метод вычисления небесных координат метеорного трека для телевизионных камер с широким полем зрения, не чувствительный к абберациям в кадре и позволяющий определять координаты при малом числе опорных звезд без потери точности.
2. Организован мониторинг метеорных событий в России. Получен массив телевизионных метеорных наблюдений из 2359 метеоров (включая 488 базисных) в 2012 – 2013 гг.
3. Измерен уровень притока метеорного вещества на Землю в форме Индекса Метеорной Активности (ИМА) для второго полугодия наблюдений и

конкретно для метеорных потоков (Персеиды, Ориониды, Северные и Южные Тауриды).

4. Исследованы метеорные потоки (Ориониды, Северные и Южные Тауриды) в малоизученном диапазоне яркости (слабее $+5^m$).
5. Измерены индивидуальные характеристики метеоров потока Персеиды в 2012 – 2013 гг. по базисным наблюдениям.
6. Проведены астрономические измерения координат траектории Челябинского метеороида по видеорегистрациям случайных свидетелей.

Апробация работы

Результаты работы докладывались автором и обсуждались на научных семинарах ИНАСАН, ИДГ РАН, Братиславского университета им. А. Я. Коменского, конкурсах молодых ученых ИНАСАН (2006, 2008, 2010), а также были представлены на международных и российских конференциях:

1. JENAM (2007, 2011)
2. Asteroids, Comets, Meteors (ACM) (2008 , 2012, 2014)
3. International meteor conference (IMC) (2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015)
4. Meteoroids (Познань, 2013)
5. COSPAR (Москва, 2014)
6. IAA Planetary Defense Conference (2007, 2013)
7. CAMMAC (Винница, 2008)
8. «100 лет Тунгусскому феномену: прошлое, настоящее, будущее» (Москва, 2008)
9. IAU XXVIII General Assembly (Пекин, 2012)
10. European Planetary Sciences Congress (EPSC) (2012, 2013, 2015)
11. AGU Fall Meeting 2013 (Сан-Франциско, 2013)
12. The Solar System Bodies: from Optics to Geology (Харьков, 2008)
13. Fireball workshop (Арма, 2010)
14. Workshop «Radio meteor», «Meteor orbit» (Сибирь, 2011)

15. 7-th European Strategic Meteor Workshop (Москва, 2012)
16. Workshop «Meteor observations» (Модра, 2013)
17. «V Бредихинские чтения» (Заволжск, 2014)
18. «Физика космоса» (Екатеринбург, 2005, 2006 , 2012, 2016)
19. «Наблюдение околоземных космических объектов» (Звенигород, 2007)
20. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК) (Казань, 2007)
21. Шестой Международный Аэрокосмический Конгресс (Москва, 2009)
22. VII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Москва, 2010)
23. «Околоземная астрономия» (2005, 2007, 2009, 2011, 2013)

Публикации по теме диссертации

1. **Карташова А. П.**, Горбанев Ю. М. Результаты обработки и наблюдений метеорных потоков с использованием телевизионных оптико-электронных систем.// Труды 35-й Международной студенческой научной конференции «Физика космоса». — Екатеринбург. — 2006. — С. 246.
2. **Карташова А.П.**, Горбанев Ю. М., Голубаев А.В. и др. Наблюдения метеорных потоков на Звенигородской обсерватории ИНАСАН с использованием телевизионных оптико-электронных систем// Труды международной конференции «Околоземная астрономия 2005». — 2006. — С.79.
3. **Kartashova A.P.**, Bagrov A.V., Bolgova G.T., Leonov V.A. The half-year monitoring of meteoroid influx to the near-earth space by TV-observations// Odessa Astronomical Publications.— 2007. — Vol. 20, N. 2.— P. 46–49.
4. Багров А.В., Болгова Г.Т., **Карташова А.П.** и др. Задачи оперативных наблюдений тел естественного происхождения в околоземном космическом пространстве // Радиотехнические тетради. — 2008. — N.36. — С. 20–22.

5. **Карташова А.П.** Метод определения экваториальных координат объекта. // Труды международной конференции «Околоземная астрономия 2007». — Нальчик: Изд. М.и В.Котляровы, 2008. — С. 269-273.
6. Багров А.В., Болгова Г.Т., Бондарь С.Ф., Карпов С.В., **Карташова А.П.** и др. Каталог телевизионных метеоров яркостью до +8m, зарегистрированных камерой FAVOR в 2006 г. // Труды Межд. конф. «Астрономия и мировое наследие: через время и континенты». — Казань: Казан. гос. ун-т., 2009. — С.239–243.
7. **Карташова А.П.** Оценка уровня притока метеорного вещества на Землю в 2006 году// Труды международной конференции "Астрономия и всемирное наследие: через время и континенты". — Казань: Казан. гос. ун-т., 2009. — С.117–118.
8. **Kartashova A.** Measurements of celestial coordinates of meteor events registered by TV system// Proceedings of IMC 2010. — IMO, 2011. — P. 37– 40.
9. **Kartashova A.** Determination of meteor influx (Index of meteor activity) to the Earth// Proceedings of IMC 2010. — IMO, 2011. — P. 32–36.
10. Bagrov A., Bolgova G., **Kartashova A.**, Leonov V., Sorokin N. Model estimate of the angle sizes of the radiation area young meteor shower// Vestnik of the Astronomy school. — 2011. — Vol. 7, N.1–2. — С.161–165.
11. Bagrov A., Bolgova G., **Kartashova A.**, Leonov V., Sorokin N. The model of formation of wide meteoroid showers produced by multistage comet nucleus disintegration // Vestnik of the Astronomy school. — 2011. — Vol.7, N. 1–2. — С.166–170.
12. Bagrov A., Bolgova G., **Kartashova A.**, Leonov V., Sorokin N. The research of flash activity of comets as a basis for the identification of interplanetary meteor shower // Vestnik of the Astronomy school. — 2011. — Vol.7, N. 1–2. — С.171–174.
13. **Карташова А.** , Болгова Г. Результаты наблюдений метеорного потока Тауриды в период с 2006 по 2008 год// Вестник СибГАО. — 2011. — Т. 6, N. 39. — С. 105–108.

14. **Kartashova A. P.** The method of measurements of celestial coordinates in wide-field TV-frames// Earth, Moon and Planets. — 2012. — Vol.108. — P.165–173.
15. **Kartashova A.** The results of Orionids observations by the FAVOR camera in 2006-2008// Proceedings of IMC 2011. — IMO, 2012. — P. 91– 93.
16. **Карташова А. П.** Метеорные наблюдения на Звенигородской обсерватории ИНАСАН в 2011г// Труды международной студенческой конференции «Физика космоса». — Екатеринбург. — 2012. — С. 242.
17. **Kartashova A.** Television meteor observations in INASAN// Proceedings of the International Meteor Conference 2012, Eds.: Gyssens M. and Roggemans P. — IMO, 2013. — P. 174 – 177.
18. **Карташова А. П.**, Болгова Г. Т. Исследование метеорного потока Ориониды по телевизионным наблюдениям в 2006-2008 гг.// Астрономический вестник. — 2013. — Т. 47, N. 3. — С. 213 – 218.
19. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н., Шеляков М. А., Пахомов Ю. В., Шустов Б. М., Шувалов В. В., Бирюков Е. Е., Рыбнов Ю. С., Маров М. Я., Рыхлова Л. В., Нароенков С. А., **Карташова А. П.**, Харламов В. А., Трубецкая И. А. Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. — 2013. — Т. 47, N. 4. — С. 262–277.
20. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., **Kartashova A.** et.al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization// Science. — 2013. — Vol. 342. — P.1069–1073.
21. Попова О.П., Шувалов В.В., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А., Глазачев Д.О., Емельяненко В.В., **Карташова А.П.**, Jenniskens P. Параметры челябинского метеороида: анализ данных// Динамические процессы в геосферах. — Выпуск 4: сборник научных трудов ИДГ РАН. — Москва. ГЕОС, 2013. — С.10–21.

22. Popova O., Jenniskens P., Shuvalov V., Emelyanenko V., Rybnov Yu., Kharlamov V., **Kartashova A.**, et al. Chelyabinsk meteoroid entry and airburst damage// Proceedings of Meteoroids 2013 conference. Eds.: Jopek T., Rietmeijer F., Watanabe J., Williams I.— AM University press, 2014. — P. 3 – 9.
23. **Kartashova A.**, Popova O., Jenniskens P. et al. A field study of the Chelyabinsk airburst event// Proceedings of the International Meteor Conference 2013. Eds. Gyssens M. and Roggemans P. — IMO, 2014. — P. 161–165.
24. **Kartashova A.**, Popova O., Jenniskens P. et al. Eye-witness interviews on the Chelyabinsk airburst// Proceedings of the International Meteor Conference 2013. Eds. Gyssens M. and Roggemans P. — IMO, 2014. — P.189–192.
25. Leonov V.A., Bagrov A.V., Bolgova G.T., **Kartashova A.P.**, Kryuchkov S.V. and Mazurov V.F. Theoretical view on meteor meteor streams and observational equipment for their study// Proceedings of the International Meteor Conference 2013. Eds. Gyssens M. and Roggemans P. — IMO, 2014. — P.181–184.
26. **Карташова А.П.**, Попова О.П., Дженнискенс П. и др. Челябинское событие: опрос очевидцев// Сборник научных трудов ИДГ РАН. — Выпуск 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеорита. Ред. Ю.И.Зецер. — 2014. — С. 146–155.
27. Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н. Н., Шеляков М. А., Пахомов Ю. В., Шустов Б. М., Шувалов В. В., Бирюков Е. Е., Рыбнов Ю. С., Рыхлова Л. В., Нароенков С. А., **Карташова А. П.**, Харламов В.А., Трубецкая И.А. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Метеорит Челябинск - год на Земле. Материалы Всероссийской научной конференции. — Челябинск. — 2014. — С. 58–81.

28. Попова О.П., Шувалов В.В., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А., Глазачев Д.О., Емельяненко В.В., **Карташова А.П.**, Дженнискенс П. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных.// Метеорит Челябинск - год на Земле. Материалы Всероссийской научной конференции. — Челябинск. — 2014.— С. 364–376.
29. **Карташова А. П.** Метеорные телевизионные сети, Наблюдения ИНАСАН// Сборник трудов международной конференции «V Бредихинские чтения». — Изд. «Янус-К», Москва. — 2014. — С. 132–139.
30. **Kartashova A.** Meteor television observations in Russia// Proceedings of the International Meteor Conference 2014. Eds. Gyssens M. and Roggemans P. — IMO, 2014. — P. 101–103.
31. **Kartashova A. P.**, Bolgova G. T., TV observations of the Perseid meteor shower in 2012-2013//Planetary and Space Science. — 2015. —Vol. 118C. —P. 120–126.
32. **Kartashova A.**, Bolgova G. Double-station meteor observations by INASAN // Proceedings of the International Meteor Conference 2015. Eds.: Rault J.-L. and Roggemans P. — IMO, 2015. — P. 147–148.
33. **Карташова А. П.**, Болгова Г.Т. Базисные метеорные наблюдения в Институте астрономии РАН// Труды 45-й международной студенческой конференции «Физика космоса» — Екатеринбург. — 2016. — С. 217.

Структура и объем диссертации

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение, библиографию и два приложения. Общий объем составляет 164 страницы текста, включая 82 рисунка и 23 таблицы. Библиография включает в себя 137 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обсуждается актуальность темы диссертационной работы, описываются поставленные цели, формулируется постановка задачи, предмет и методы исследования. Также приводится краткий обзор содержания диссертации и говорится о научной новизне и практической значимости результатов. Во Введении содержатся основные положения, выносимые на защиту, список публикаций, на основании которых представляется данная диссертация.

В **первой главе** дан краткий аналитический обзор опубликованных работ, связанных с исследованием метеоров и построением моделей метеорного вещества. Рассмотрены основные методы наблюдений метеоров и показано преимущество телевизионного метода наблюдений перед всеми остальными. Сформулированы требования к наблюдательному материалу для получения значимой информации о притоке метеорного вещества на Землю. Дан краткий обзор существующих моделей метеорного вещества. Описана наблюдательная техника, использованная в диссертационной работе. Рассмотрена проблема астероидно - кометной опасности (АКО).

Во **второй главе** исследована задача получения координатной информации из телевизионных регистраций. Предложен новый метод получения экваториальных координат из измерений прямоугольных координат в кадре, не зависящий от характера и величины аберраций оптики. Оценена точность координатных измерений при наблюдениях с телевизионной аппаратурой. Описан массив полученных телевизионных наблюдений метеоров, прошедший первичную (координатную) обработку.

В **третьей главе** рассмотрено два подхода оценки метеорной активности: Зенитное часовое число (ZHR) и Индекс Метеорной Активности (ИМА). Впервые параметры метеорной активности были расширены в сторону слабых метеоров (слабее $+5^m$), вплоть до границ, представляющих опасность для работы космических аппаратов. В Главе 3 был проведен

анализ притока метеорного вещества в виде ИМА для полугодового периода наблюдений. Проведен анализ активности и вычислен ИМА сильных метеорных потоков (Ориониды, Северные и Южные Тауриды) за 2006–2008 гг. Рассмотрено распределение метеорных частиц данных метеорных потоков по яркости за три года наблюдений. Впервые был показан характер изменения распределения по яркости для слабых метеоров за трехлетний период наблюдений.

В **четвертой главе** анализируются данные, полученные в Институте астрономии РАН по базисным наблюдениям. Исследование наблюдательных данных показало, что активность Персеид в 2012–2013 гг. была типична для данного потока. Максимум активности наблюдался 12 августа. Вычислен суточный дрейф радианта потока: $\Delta\alpha = 1.01^\circ$; $\Delta\delta = 0.20^\circ$ в 2012 г. и $\Delta\alpha = 1.45^\circ$; $\Delta\delta = 0.37^\circ$ в 2013 г. Полученные наблюдения позволили определить значение радианта метеорного потока Персеиды в пик активности: $\alpha = 47.52^\circ$, $\delta = +58.13^\circ$ в 2012 г. и $\alpha = 48.31^\circ$, $\delta = +58.05^\circ$ в 2013 г. Используя наблюдения 2012–2013 гг. были вычислены орбитальные параметры Персеид. Было показано, что орбитальные параметры всех метеоров, отождествленных с метеорным потоком Персеиды, близки к орбите родительской кометы 109P/Swift–Tuttle. Был вычислен Индекс Метеорной Активности для данного потока. Максимальное значение ИМА равно $192 \cdot 10^3$ в 2012 г. ($\lambda = 140.4^\circ$) и $122 \cdot 10^3$ в 2013 г. ($\lambda = 140.2^\circ$) (частиц на Землю в час) (ИМА, вычисленное для КА (1 м^2) равно $39 \cdot 10^{-10}$ в 2012 г. ($\lambda = 140.4^\circ$) и $26 \cdot 10^{-10}$ в 2013 г. ($\lambda = 140.2^\circ$) (частиц на 1 м^2 в час)) было получено в максимуме активности потока (12 августа). Проведенный анализ базисных метеорных наблюдений показал, что по сравнительно небольшому числу метеорных регистраций (91- базисный метеор из потока Персеиды) мы получили основные характеристики исследуемого потока, которые подтвердили ранее полученные результаты, в том числе и кометное происхождение данного потока, и его связь с кометой 109P/Swift–Tuttle.

Пятая глава посвящена исследованию уникального события, произошедшего 15 февраля 2013 года – пролета суперболида над Челябинском. В ходе организованной в место события экспедиции были собраны видеозаписи и показания очевидцев с геодезической привязкой точек наблюдения на местности. В результате был проведен анализ собранного материала, доступного в сети Интернет, и полученного в ходе экспедиции. На его основе были рассчитаны радиант, скорость, траектория и орбита данного тела. Результаты исследований показали, что метеороид был диаметром 19.8 м, его яркость -27.3^m , скорость входа в атмосферу 19.16 км/с под углом 18.3° . Оценка энергии Челябинского события 570 ± 150 кт ТНТ. Был проведен анализ вторичных эффектов, сопровождающих пролет метеороида (приход ударной волны, вызвавший разрушения зданий и повлекший травмы у людей, тепловые, звуковые эффекты и т. д.). Небесное тело, взорвавшееся в небе над Челябинской областью, показало степень опасности таких тел (данное тело классифицируется как не опасное в рамках АКО) и необходимость заблаговременного обнаружения таких тел.

В **Заключении** сформулированы выводы и обозначены перспективы дальнейшей работы, приведен список литературы, который использовался при написании диссертации.

В **Приложении А** приводится таблица с характеристиками метеорных камер, расположенных в разных странах.

В **Приложении Б** приводится список сокращений, использованный в диссертации.

ГЛАВА 1

ИЗУЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ, ПРОНИКАЮЩИХ В АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

Солнечная система содержит (помимо восьми больших и карликовых планет и их спутников, астероидов, комет) большое число твердых мелких тел различного размера. Такие тела, размером меньше астероида и больше атома или молекулы, движущиеся в межпланетном пространстве называют *метеорными (или метеороидами)* [5]. Метеорные тела (*метеороиды*) имеют размеры от 10 мкм до 1 м в диаметре.

Метеор – это явление свечения и ионизации, сопровождающее вторжение в атмосферу Земли твердого тела из межпланетного пространства [5].

Спорадическими принято называть метеоры, которые не удается связать с метеорными потоками [5]. Они движутся во всех направлениях и с разными скоростями. Для спорадических метеоров важной характеристикой является их распределение по орбитальным параметрам.

Метеоры, которые появляются в определенное время года и движутся в пространстве целыми группами, называют *поточными* [5]. Метеоры одного потока движутся почти по параллельным траекториям, но визуально представляется, что они летят из общей точки на небе, называемой *радиантом*.

Названия метеорным потокам дают по имени того созвездия или звезды, вблизи которой расположен его радиант. Метеорные потоки по наблюдаемой интенсивности (количества метеоров в час) можно разделить на стабильные, чья интенсивность из года в год не меняется, что говорит о том, что их метеорные тела равномерно распределены вдоль всей орбиты метеорного роя (например, Персеиды, Геминиды), и на те, в которых

метеорные тела сконцентрированы в плотные рои, занимающие лишь часть орбиты (например, Леониды, Дракониды). Поэтому, когда Земля пересекает область орбиты с наибольшей плотностью метеорных тел, наблюдается всплеск активности данного потока (иногда наблюдатель может видеть до 1000 и более метеоров в час). Такие явления называются *метеорными ливнями* или *дождями*.

Широко известны метеорные дожди Леонид, которые наблюдались в 1833, 1866, 1966 гг., 1999 г., Андромедид - в 1872, 1885 гг., Драконид - в 1933, 1946, 1985, 2011 г.

1.1. Методы регистрации метеорных событий

Метеорные тела, вызывающие метеорные явления, практически недоступны прямым наблюдениям даже в самые мощные телескопы. Основные результаты о них были получены с помощью методов, основанных на наблюдении кратковременных световых явлений (*метеоров*), которые создаются метеорными телами при их вторжении в атмосферу Земли [5]. Другим источником информации о космических телах являются метеориты - метеорное тело, достигшее поверхности Земли [5].

При изучении метеоров применяются различные методы наблюдений: визуальный, фотографический, радиолокационный и телевизионный наблюдения, регистрация ударов метеорных тел с помощью датчиков, установленных на геофизических ракетах, космических зондах и искусственных спутниках Земли; сбор и счет пылинок в верхней части атмосферы с помощью ловушек и счетчиков, устанавливаемых на геофизических ракетах и т.д. Каждый из этих методов имеет свою область применения, специфические особенности и результативность.

1.1.1. Визуальный метод

Визуальный метод был долгое время главным способом получения информации о метеорах.

Невооружённым глазом регистрируются большей частью метеоры с видимой яркостью, сопоставимой с видимой яркостью звезд до +4 звёздной величины. С помощью визуальных наблюдений можно решить ряд задач. Первой основной задачей является определение функции светимости метеоров и распределение метеорных тел по массам, изучение суточной и сезонной вариации численности метеоров, пространственной плотности метеорных тел, притока метеорного вещества на Землю и т.д. Второй задачей является поиск и подтверждение теоретических кометных радиантов, определение и смещение радиантов слабых метеорных потоков (т.е. численность которых составляет 2–3 метеора в час), выявление радиантов новых потоков.

Первая задача решается путем длительных наблюдений. Более полную информацию дают одновременные наблюдения группой наблюдателей (Рис.1.1) (многократный счет). Наблюдения, проводимые параллельно несколькими наблюдателями, позволяют получить много ценной информации. В частности определить число метеоров появившихся на обозреваемой области неба и вычислить коэффициент замечаемости (см. параграф 3.1.1) метеоров разной яркости отдельным наблюдателем. Вычислив площадь наблюдаемой площадки можно определить плотность потока метеоров, а при известной геоцентрической скорости и пространственную плотность роя. С помощью регулярных наблюдений можно изучать структуру потока, пространственную плотность и распределение по яркости (массам).

Для решения второй задачи используется нанесение путей метеоров на карты звездного неба в гномонической (центральной) проекции для определения координат радиантов графическим путем. В случае, когда

наблюдения проводятся в группе (Рис. 1.1) информацию о метеорах (момент и продолжительность полета, угловая длина, звездная величина, принадлежность к метеорному потоку и т.п.) записывает секретарь, который сам не наблюдает.

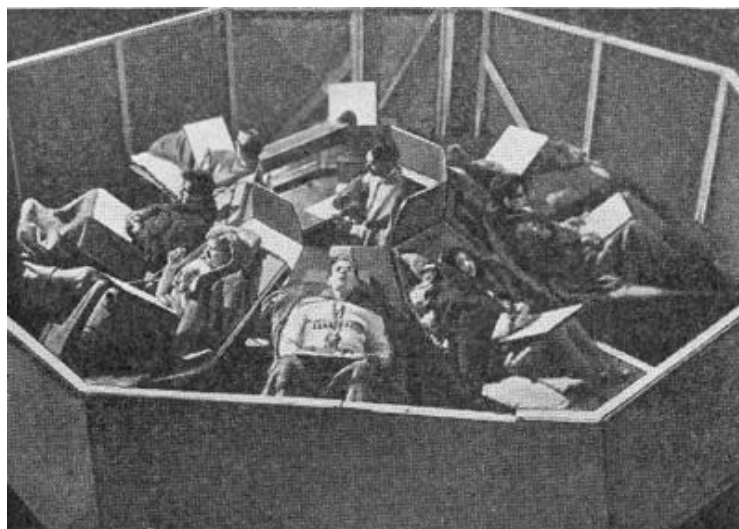


Рис. 1.1. Группа визуальных наблюдателей метеоров (в центре – секретарь) [6]

Большинство из полученных характеристик даёт возможность косвенными способами определить скорость движения метеоров в межпланетном пространстве. Одним из главных итогов визуальных наблюдений 19 века стал Основной каталог метеорных радиантов XIX века Астаповича И. С. [7].

Существенными недостатками визуальных наблюдений метеоров являются их большая трудоёмкость и невысокая точность результатов. Однако внезапность появления метеоров и трудность применения к их наблюдениям инструментальных способов на долгое время оставляли визуальные наблюдения главным методом изучения метеоров. Поэтому многие сведения о метеорах были получены из анализа визуальных наблюдений.

Несмотря на недостатки, доступность и простота визуальных наблюдений сыграли значительную роль в накоплении обширных наблюдательных данных. На основе этих наблюдений были каталогизированы метеорные потоки, определены орбиты многих метеороидов, обнаружена связь метеорных потоков с кометами. В настоящее время визуальный метод сохраняет некоторое научное значение, но в силу повсеместного развития более точных инструментальных методов в основном применяется лишь астрономами-любителями.

В настоящее время визуальные наблюдения заносятся в базу данных Международной метеорной организации (ИМО) [8]. Но эти наблюдения не вносят принципиально новой информации о свойствах метеорных частиц.

1.1.2. Фотографический метод

Фотографический метод наблюдения стал применяться с 19 века после изобретения фотографии. Главное отличие этого метода от визуального метода, - это высокая точность определения положения метеорного трека и объективность оценки яркости метеора. Фотографические наблюдения дают наибольший объем информации о каждом метеоре: положение, скорость и звездную величину в любой точке видимого трека метеора.

Так как метеорное событие кратковременно, и нельзя заранее знать время и место появления метеора, то фотографирование метеоров в отличие от фотографирования других астрономических объектов необходимо проводить с помощью широкоугольных и светосильных камер, обладающих высокой разрешающей проникающей способностью, и с использованием длительных экспозиций.

Фотографирование метеоров возможно как одним фотоаппаратом с широким полем зрения (не менее $30^\circ - 40^\circ$), так и несколькими камерами, соединенными в единую систему для охвата большей части неба (Рис. 1.2). Камеры направлялись в различные участки неба.

Для определения скорости метеора, в одном из пунктов перед объективом камеры устанавливается специальный затвор - обтюратор. Обтюратор представляет собой диск с вырезами или лопасти, вращаемые электродвигателем (лучше синхронным) с определенной скоростью и периодически (несколько десятков раз в секунду) закрывающие объектив.

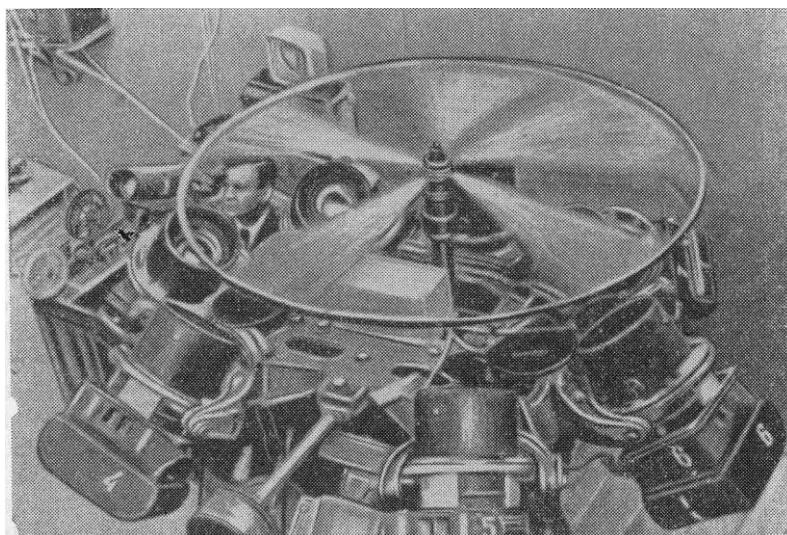


Рис. 1.2. Метеорный патруль с обтюратором Института астрофизики АН Таджикской ССР [9]

Систематические базисные (с двух и более пунктов) фотографические метеорные наблюдения позволили определить атмосферные траектории, высоты, скорости, орбиты метеороидов и радианты метеорных потоков с высокой точностью. С помощью базисных фотографий метеоров были сделаны оценки масс и получены значения плотности атмосферы на высотах 80 - 100 км. С помощью фотографического метода стало возможным регистрировать спектры ярких метеоров [10], что позволяет получать информацию о химическом составе метеорного вещества.

Проницающая способность фотографического метода наблюдений ограничивается $+5^m$ для звезд (метеоры до $+2^m$) [10].

К сожалению, ввиду сложности обработки и большого времени, затрачиваемого на продолжительную экспозицию при съемке,

эффективность фотографирования метеоров весьма невелика. Однако из фотографических наблюдений можно получить гораздо более точную информацию, чем при визуальном методе.

1.1.3. Телевизионный метод

Регистрация слабых метеоров (слабее $+2^m$), недоступных фотографическому методу, может быть осуществлена телевизионной техникой. Телевизионный метод в отличие от фотографического позволяет регистрировать явления во временной развертке, что позволяет изучать структуру свечения метеорного трека. Телевизионные камеры обладают в десятки раз более высокой чувствительностью, и высокой линейностью отклика на световой сигнал. С телевизионным методом стало возможным автоматизировать как сами наблюдения (автоматизация регистрации метеоров), так и их обработку.

Точность определения координат точек метеорного трека телевизионным методом выше, чем визуальным. Общее число метеорных регистраций, полученных телевизионным методом, в сотни раз превышает число метеорных регистраций, полученных фотографическими патрулями. С появлением техники телевизионной регистрации метеоров стало возможным получать полную наблюдательную информацию о метеорах, - кривые блеска и спектры, пространственное положение, время пролета, скорости и положения радианта. Телевизионные наблюдения имеют преимущество перед фотографическими как по проникающей силе, так и по временному разрешению.

К недостаткам телевизионного метода относят геометрические искажения изображения и дисторсии электронно-оптического преобразователя (если он применяется), также случайные искажения из-за высокого уровня шумов и т.п. Эти недостатки снижают возможности телевизионного метода при решении ряда задач метеорной астрономии.

Получение наблюдательных данных на различных долготах, без перерывов, позволяют изучать тонкую поперечную структуру метеороидных роев. При таком подходе можно зарегистрировать различные неоднородности в рое, отличающиеся как плотностью, так и распределением по массе.

Простота дизайна и сравнительная дешевизна телевизионных систем позволяет привлечь большое число наблюдателей и проводить метеорные наблюдения в любом месте (от маленькой обсерватории до жилого дома). В последние годы количество метеорных установок, которые используют профессиональные метеорные группы в сотрудничестве с астрономами-любителями, расположенных по всему миру, резко возросло. Они образуют плотные метеорные сети в Европе, Японии, Канаде, Северной Америке и других странах (Рис. 1.3) [11–26].



Рис. 1.3. Карта с пунктами, где проводятся метеорные телевизионные наблюдения

В настоящее время метеорные группы объединяются в единую сеть, для того чтобы проводить совместные наблюдения [12]. Базисы между

пунктами варьируются от 10 до 150 км. При этом одновременно используются комбинации из основных методов наблюдений (визуального, фотографического, телевизионного, спектрального, радиолокационного методов) [12]. Для наблюдений используется всевозможная техника и методы обработки результатов, поэтому для того, чтобы объединить всех наблюдателей в единую сеть и упорядочить наблюдательные данные была создана Виртуальная метеорная обсерватория (VMO) [27].

Начиная с 2001 г. в Институте астрономии РАН проводятся телевизионные метеорные наблюдения с помощью различных широкоугольных камер (см. параграф 1.2) [28–30].

1.1.4. Радиолокационный метод

Метод радиолокационных наблюдений метеоров основан на регистрации радиоволны, отражённой от ионизованного следа метеоров — метеорного радиоэха. Вследствие дифракции радиоволн на формирующемся метеорном следе, амплитуда радиоэха имеет флуктуации во времени; измеряя расстояния между различными максимумами дифракционной картины радиоэха и зная расстояние до метеора, можно вычислить скорость метеора. Радиолокационный метод позволяет, зная время прохождения сигнала до метеора и обратно, сразу определять расстояние до метеора. С помощью радиолокационного метода можно определить характеристики движения метеоров, вычислить, как и с помощью других методов, применяя базисные наблюдения (наблюдения с двух и более пунктов), радианты и орбиты метеорных потоков.

Для наблюдений метеоров используются радиолокаторы на длине волны от 4 до 12 м [31]. Радиолокационный метод отличается высокой чувствительностью, позволяя регистрировать метеоры до +15 звездной величины.

Основное преимущество радиолокации метеоров состоит в том, что на распространение радиоволны не влияют ни облачность, ни дневной свет и наблюдать метеоры, таким образом, можно круглосуточно. Это особенно ценно при изучении суточных и сезонных изменений численности метеоров, исследовании кратковременных метеорных потоков. В настоящее время радиолокационный метод – это единственный метод обнаружения дневных метеорных потоков (Рис. 1.4).

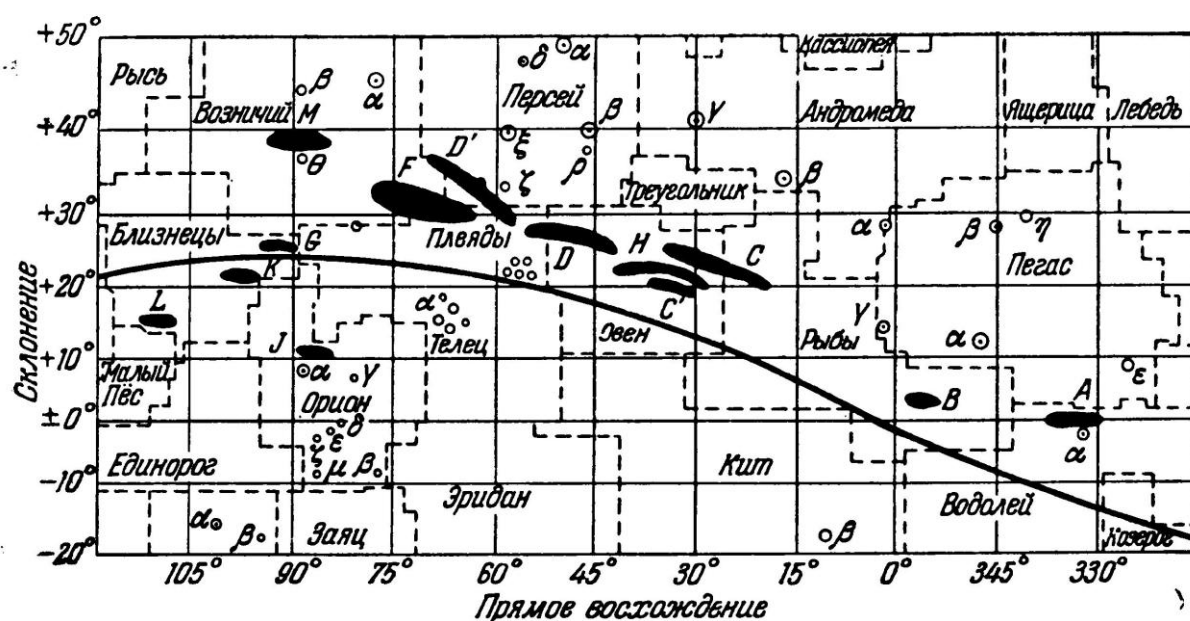


Рис. 1.4. Радианты дневных метеорных потоков (по радиолокационным наблюдениям) [10]

Радиолокационные наблюдения фиксируют сотни тысяч явлений в сутки, и они являются самым массовым источником сведений о потоках пыли из космоса. Траекторные наблюдения при радиолокации метеоров с приемниками в нескольких точках местности не уступают по точности оптическим методам. Но все измерения относятся к трекам ионизации, а не к тем метеорам, которые мы изучаем в оптическом диапазоне. Модели ионизации еще недостаточно точные, чтобы из радиолокационных наблюдений получать характеристики метеоров с высокой точностью.

1.2. Метеорные телевизионные камеры

Большинство метеорных наблюдателей используют стандартные телевизионные камеры с частотой записи 25 (30) кадров в секунду (см. Приложение А). При этом метеоры средней продолжительности свечения 0.7 секунд регистрируются на 5 кадрах и более. Это позволяет не только точно измерить угловую скорость метеора, но и получить изменение яркости вдоль всего метеорного трека. Последнее время появились телевизионные камеры с CMOS - матрицами, которые позволяют проводить метеорные наблюдения с частотой до 1000 кадров в секунду (чем выше частота кадров, тем точнее измеряется динамика полета метеорной частицы) [32]. Такие наблюдения позволяют экспериментально измерить торможение метеорных частиц в атмосфере, получить точные кривые блеска метеоров.

Телевизионные наблюдения с высокой частотой кадров обеспечивают получение точечных изображений звезд и коротких метеорных треков в каждом кадре. Поэтому для наблюдений метеорных потоков удобно использовать камеры, направленные в сторону их радианта, и применять часовое ведение для таких наблюдений. Но можно направлять камеру в область зенита с целью охвата всех действующих метеорных потоков, чьи радианты находятся над горизонтом.

В течение года приток метеорного вещества из разных частей неба сильно варьируется, поэтому необходимо проводить наблюдения в режиме мониторинга. Поскольку при этом не ставится задача наблюдений в избранных точках небесной сферы, метеорная камера в течение всего года остается неподвижной и направлена в зенит. Такие наблюдения позволяют решить задачу определения притока метеорного вещества на Землю (см. Глава 3). Главной задачей таких исследований является изучение пространственного распределения метеоров, а также их распределение по яркости (массам), особенно в области их малых значений. Даже самые

слабые из этих метеоров могут представлять реальную угрозу работе космических аппаратов (КА) (см. параграф 1.3) [3].

Для исследования пространственного распределения метеорного вещества требуются орбитальные характеристики метеорных частиц, которые можно получить из базисных (многосторонних) наблюдений.

1.2.1. Широкоугольные метеорные системы

1.2.1.1. All-sky камеры

Когда ставится задача регистрация метеорных явлений на видимой части небосвода, используются камеры типа All-sky (Рис. 1.5). Такие установки способны регистрировать только яркие метеоры и болиды (Рис. 1.6).

All-sky камеры широко используются в болидных сетях. Сравнительно невысокая стоимость (по сравнению с телескопами) таких камер позволяет разворачивать болидные сети, перекрывающие обширные территории. Это позволяет получать базисные регистрации редких болидных явлений.

Масштаб изображений в таких системах - несколько минут ($\sim 15'$) на элемент разрешения, а проникающая сила по звездам редко превышает $+3.5^m$ при телевизионной частоте кадров (см. Приложение А) [33]. Сравнительно низкая чувствительность этих камер, позволяет использовать их даже в дневное время. Дневные болиды наблюдаются при движении в нижних, плотных слоях атмосферы, где они быстро тормозятся. Продолжительность болидных явлений достигает нескольких секунд, поэтому каждое такое событие регистрируется на нескольких десятках кадров, по которым можно провести не только траекторное измерение, но и измерение торможения болидных тел в Земной атмосфере.



Рис. 1.5. Камера NASA's All Sky Fireball Network [34]



Рис. 1.6. Метеор, зарегистрированный на NASA's All Sky 26.08.2014 в 05:04:23 UTC [34]

Благодаря анализу болидных наблюдений, удастся вычислить места их падения на Землю и обнаружить на этом месте упавший метеорит. Таким образом, были определены места падения метеоритов: Пршибрам, Чехословакия, 1959 [35], Лост - Сити, США, 1970 [36], Иннисфри, Канада, 1977 [37], Нойшванштайн, Германия, 2002 [38,39] и Барбарра Рокхоли, Австралия, 2007 [40].

1.2.1.2. Метеорные камеры типа «PatrolCa»

Для наблюдения более слабых метеоров в режиме мониторинга нами используются патрульные метеорные камеры (PatrolCa) с полями зрения $50^\circ - 60^\circ$ и с большей проникающей силой (чем у камер all-sky). В настоящее время самыми эффективными телевизионными приемниками, являются камеры Watec [41], со светосильными объективами (со светосилой $1 \div 0.8$), которые обеспечивают предельно достижимую проникающую силу телевизионных камер (до 6^m по звездам). Большинство наблюдателей используют аналогичные установки (см. Приложение А).

Телевизионные метеорные установки PatrolCa (Рис. 1.7), используемые для наблюдений в Институте астрономии РАН (ИНАСАН), состоят из следующих компонентов: черно-белой видео камеры высокого разрешения Wattec LCL-902HS Ultimate, широкоугольного объектива Computar 6/0.8 ($F=6$ мм, светосила 1:0.8), персонального компьютера и системы видеозахвата UFOCapture [42]. Вся светоприемная аппаратура помещена в термокожух с собственной системой питания 12В и крышкой закрывающей входной иллюминатор между наблюдениями. Поле зрения камер $50^\circ \times 40^\circ$, предельная звездная величина для метеоров $\sim +4^m$ (Рис. 1.7-1.8).

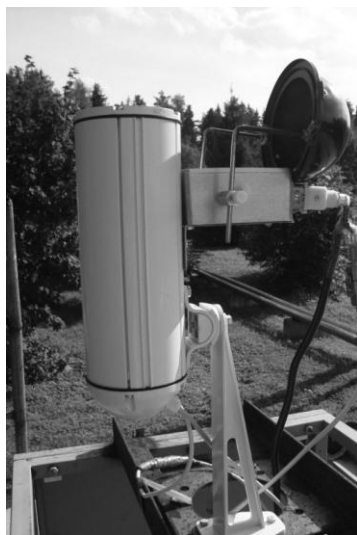


Рис. 1.7. Камера PatrolCa установленная на ЗО ИНАСАН

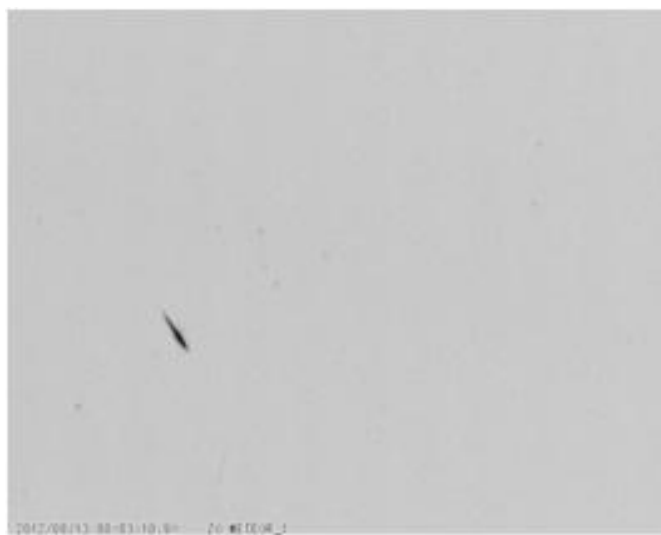


Рис. 1.8. Пример кадра, полученного на камере PatrolCa установленной на ЗО ИНАСАН

Метеорные наблюдения в ИНАСАН проводятся на двух пунктах — на Звенигородской обсерватории ИНАСАН (ЗО ИНАСАН) и на наблюдательном пункте «ИСТРА» (нп «ИСТРА») (Рис. 1.9). Пункты расположены в Московской области на расстоянии 20 км друг от друга.

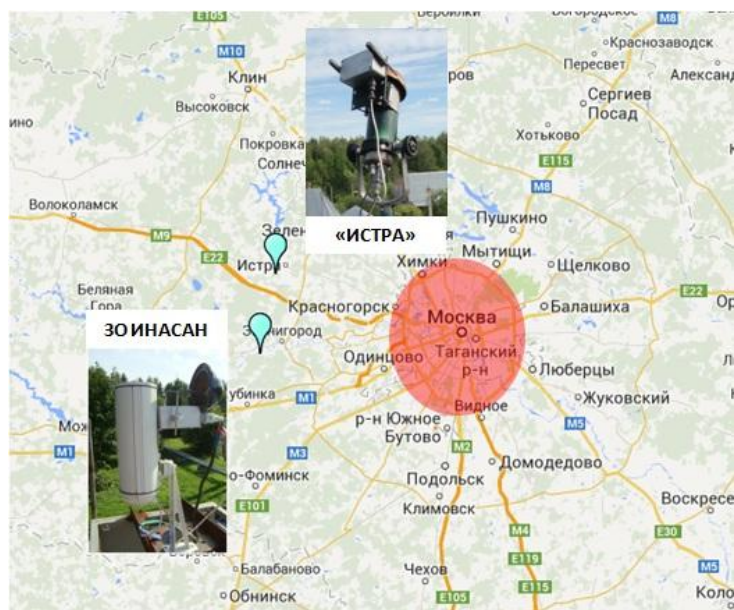


Рис. 1.9. Расположение пунктов наблюдения ИНАСАН

Метеорные наблюдения проводятся каждую ясную ночь. В результате с помощью данных установок мы регистрируем, в зависимости от действующих потоков, до сотни метеоров за ночь (в среднем 8 часов наблюдения).

Камера, расположенная на ЗО ИНАСАН, направлена в зенит, камера, на НП «ИСТРА», является камерой «базисной поддержки» и направлена таким образом, чтобы ее поле зрения перекрывало поле зрения первой камеры на высоте метеорных событий (в нашем случае поля зрения перекрываются на 90% на высоте 100 км).

В период с 2012 по 2013 гг. на двух пунктах было зарегистрировано 2438 метеоров (Таблица 1.1) [43].

Таблица 1.1. Статистика наблюдений метеоров в ИНАСАН на камерах типа PatrolCa в 2012-2013гг.

Период наблюдений	2012 г.		2013 г.	
	ЗО ИНАСАН	нп «ИСТРА»	ЗО ИНАСАН	нп «ИСТРА»
Январь	-	-	-	-
Февраль	-	-	69	-
Март	-	-	45	-
Апрель	-	-	94	-
Май	-	-	40	46
Июнь	34	19	40	11
Июль	166	40	60	18
Август	378	169	380	333
Сентябрь	22	-	64	-
Октябрь	9	-	92	-
Ноябрь	0	-	-	-
Декабрь	309	-	-	-
Всего	918	228	884	408

На рисунке 1.10 показано распределение времени наблюдений и количества зарегистрированных метеоров за период 2012–2013 гг. на ЗО ИНАСАН, на рисунке 1.11 – на нп «ИСТРА».

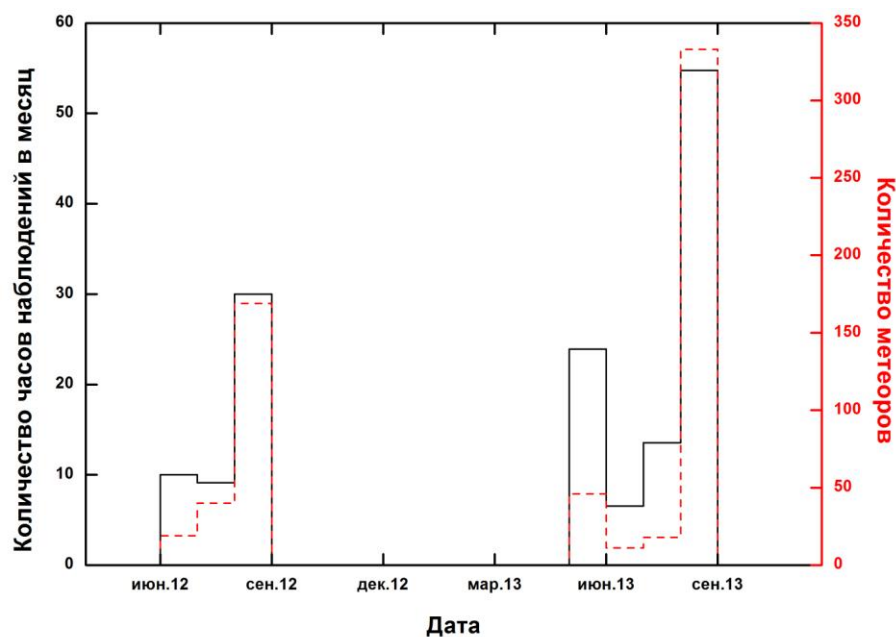


Рис. 1.10. Количество метеоров (красная пунктирная линия), зафиксированных на ЗО ИНАСАН и количество часов наблюдений в месяц (черная линия) в 2012 – 2013 гг.

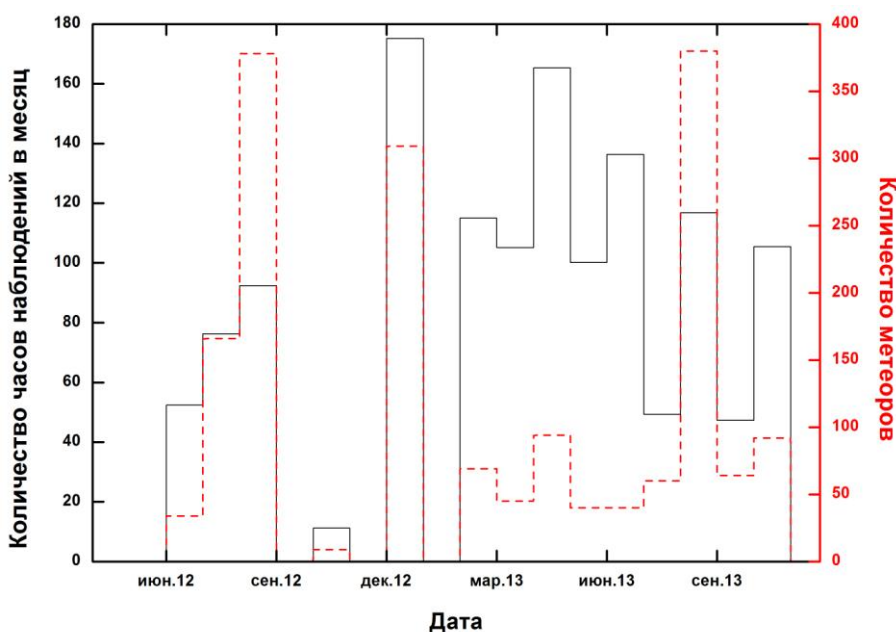


Рис. 1.11. Количество метеоров (красная пунктирная линия), зафиксированных на НП «ИСТРА» и количество часов наблюдений в месяц (черная линия) в 2012 – 2013 гг.

Анализ полученных результатов подробно описан в Главе 4.

1.2.2. Метеорная камера с высокой проникающей способностью FAVOR (FAst Variability Optical Registrator)

В рамках геометрической оптики принципиально невозможно достичь светосилы выше 0.1 – 0.75 в широких полях зрения. Но это можно сделать, если использовать промежуточный усилитель яркости с масштабированием изображения. За счет масштабирования изображения эффективная светосила может быть доведена до 0.1 – 0.28. Такие гибридные телевизионные камеры позволяют получать регистрации самых слабых метеоров (слабее $+5^m$). Метеоры такой яркости еще не исследованы, поэтому изучение их динамики и распределения представляет особый научный интерес.

Одним из примеров гибридных камер является камера FAVOR (Рис.1.12) [44]. Данная камера была установлена на Северном Кавказе. Функции питающей оптики камеры выполняет светосильный линзовый объектив с апертурой 150 мм и фокусным расстоянием 180 мм (светосила 1:1.2). В данной установке используется ЭОП первого поколения, который обеспечивает уменьшение масштаба изображения в 4.5 раза и усиление света до 140 раз, ПЗС приемник фирмы «Видеоскан» VS-СТТ285 2001. В нем использована 2/3-дюймовая ПЗС матрица фирмы «Sony» ICX285, имеющая формат 1380 x 1024 пиксель. Поле зрения камеры $18^\circ \times 20^\circ$. Приемник работает при максимальной кадровой частоте 7.5 Гц [44].

Широкоугольная камера FAVOR была разработана для обнаружения источников рентгеновских вспышек в оптическом диапазоне (барстеров). В процессе плановых наблюдений в поле зрения камеры регистрировались метеоры. Метеорные записи являлись побочным продуктом. В течение ночи камера была направлена в противосолнечную точку, что снижало эффективность наблюдений в отношении метеоров.



Рис. 1.12. Общий вид камеры FAVOR

Камера FAVOR имеет проникающую силу по метеорам до $+10.0^m$. Метеоры такой яркости имеют продолжительность свечения менее 0.1 секунды, и регистрируются камерой в одном кадре. Из таких регистраций невозможно ни определить направление движения метеора, ни его угловую скорость. Чтобы избежать накопления не предполагающих обработку регистраций, порог автоматического обнаружения метеоров был задан как 9.0^m . Наблюдения проводились с 2006 по 2009 гг. После выхода из строя ЭОП в 2009 г. камера прекратила свою работу (аналогов примененного ЭОП больше не выпускается).

Примеры кадров с метеорами, полученные на камере FAVOR, показаны на рисунках 1.13–1.14.

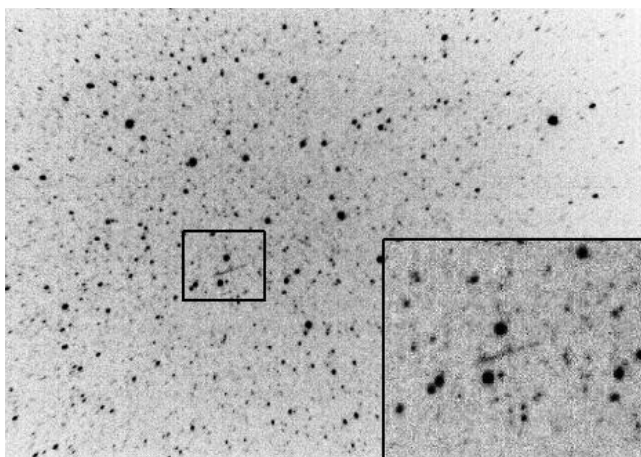


Рис. 1.13. Пример кадра, полученного на камере FAVOR, с метеором $+8^m$. В правом нижнем углу показана увеличенная область с метеором

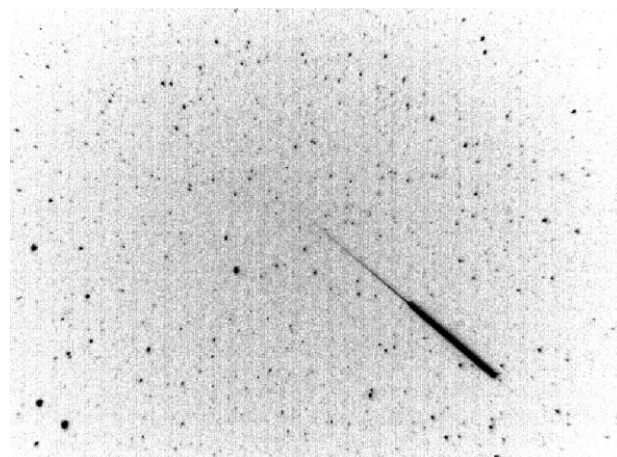


Рис. 1.14. Пример кадра, полученного на камере FAVOR с метеором $+2^m$

Распределение продолжительности работы камеры и числа зафиксированных метеоров за период 2006–2009 гг. показано на рисунке 1.15 и в таблице 1.2. На камере FAVOR проводились наблюдения каждую ясную ночь. В итоге в среднем за ночь (6–8 часов) фиксировалось 50 – 60 метеоров.

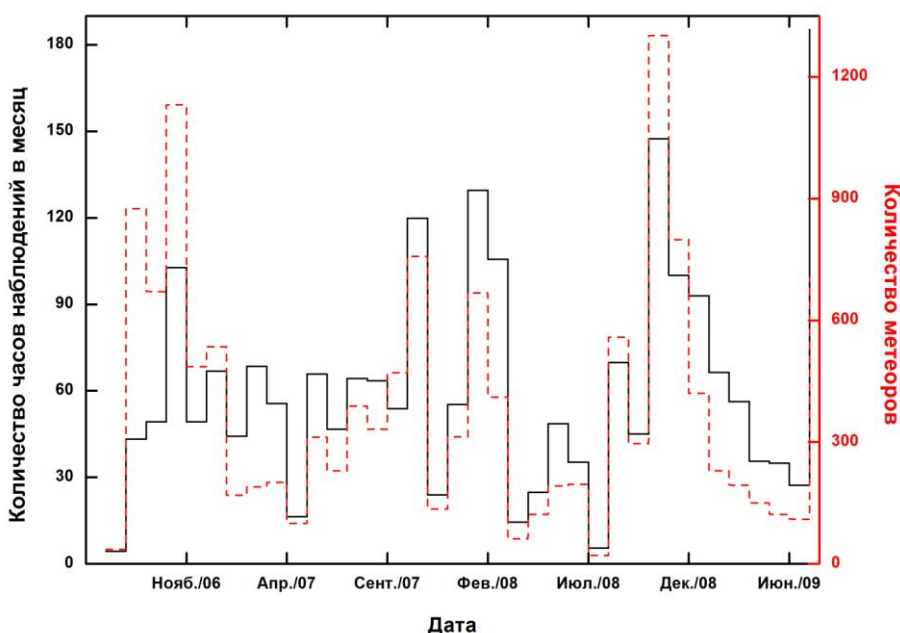


Рис. 1.15. Распределение продолжительности работы камеры FAVOR (черная линия) и числа зафиксированных на камере FAVOR метеоров (красная пунктирная линия) в 2006–2009 гг.

Таблица 1.2. Статистика наблюдений на камере FAVOR 2006–2009 гг.
Обработанные наблюдения выделены жирным шрифтом

Период наблюдений	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.
Январь	-	169	668	229
Февраль	-	190	411	194
Март	-	201	62	150
Апрель	-	100	122	122
Май	-	312	192	-
Июнь	-	229	196	110
Июль	36	389	21	134
Август	911	332	558	-
Сентябрь	671	471	296	-
Октябрь	1131	758	1302	-
Ноябрь	486	135	799	-
Декабрь	525	313	420	-
Всего	3760	3599	5047	939
Обработано	3760	1533	2397	0

Телевизионные метеорные наблюдения в широком поле зрения (в данном случае поле зрения $18^\circ \times 20^\circ$) с высокой проникающей способностью (до $+9.0^m$ для метеоров) уникальны. Они позволили получить информацию о слабых метеорах (на одну звездную величину выше порога гарантированного обнаружения), которые прежде можно было наблюдать только лишь с помощью радиолокационных наблюдений.

Подробно результаты наблюдений на камере FAVOR описаны в Главе 3.

1.3. Космические риски, связанные с метеороидами. Модели метеорного вещества

В условиях открытого космоса на поверхности космических аппаратов воздействует целый ряд факторов, приводящих к эрозии поверхностей или даже к уничтожению КА. К ним относятся ударное воздействие метеорных тел, столкновения с частицами космического мусора, бомбардировка высокоэнергетическими космическими лучами, воздействие потоков заряженных частиц, идущих от Солнца, электризация космических аппаратов и оседание пыли (Рис. 1.16 – 1.17).

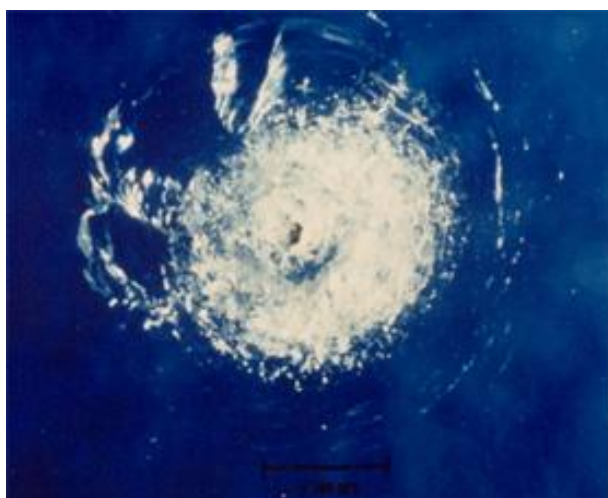


Рис. 1.16. Небольшой ударный кратер в переднем иллюминаторе КА «Челленджер», обнаруженный после проведения миссии STS-7. Предполагается, что ударником явилась крошка отслоившейся краски [3]



Рис. 1.17. – один из кратеров на поверхности солнечных батарей КА «Hubble Space Telescope» [3]

На рисунке 1.16 показан скол на поверхности лобового иллюминатора КА «Челленджер», а на рисунке 1.17 – один из ударных кратеров на

поверхности солнечных батарей КА «Hubble Space Telescope», доставленных после их замены на Землю для изучения характера микрометеоритной эрозии.

Многолетние метеорные наблюдения выявили некоторые особенности потоков метеорного вещества в околоземном пространстве (ОКП). Главное – это их нестабильность, как в течение года, так и год от года. Около половины всех регистрируемых метеоров входят в метеорные потоки, для которых характерны короткое время действия (от нескольких часов до нескольких недель) и явно выделенное направление их движения. Численность метеоров в потоках нестабильна во времени; максимальная активность большинства потоков изменяется год от года. Особенная значимость этого явления связана с тем, что иногда мощность потоков возрастает настолько, что обычный «звездопад» превращается в «звездный ливень», когда часовое число метеоров превышает сотни и тысячи. В любом случае, точно предсказать плотность метеорных частиц в потоках совершенно невозможно. Поэтому в моделях метеорного вещества приводятся усредненные характеристики потоков.

При NASA и ESA действуют специальные подразделения, в задачи которых входит отслеживание этих изменений и учет их в рабочих моделях метеорного вещества. В России подобной группы исследователей нет, несмотря на очевидное значение этой работы для космонавтики.

1.3.1. Meteoroid Engineering Model (MEM) и Interplanetary Meteoroid Engineering Model (IMEM)

В США потребность в инженерной модели метеорного вещества возникла с подготовкой пилотируемых полетов к Луне [45]. Первая модель метеорного вещества была предложена в 1965 г. NASA [46]. Эта модель с момента ее появления нуждалась в детализации и уточнениях, поэтому уже через год такие уточнения были опубликованы [47, 48]. Подготовка к лунной

программе вынудила NASA особое внимание уделить метеорной обстановке вблизи Луны [45, 46]. При создании модели NASA SP-8013 (Meteoroid Engineering Model - 1969. Near Earth to Lunar surface) [49] использовались фотографические (данные о метеороидах больше 10^{-3} г) и радиолокационные (данные о метеороидах больше 10^{-6} г) наблюдения, данные с детекторов, установленных на КА (данные о метеороидах от 10^{-13} до 10^{-6} г), а также использовались акустические сенсоры (микрофоны) и данные о микрократерах на Луне. В итоге были получены данные о пространственном распределении метеороидов кометного происхождения (а вклад от метеороидов астероидного происхождения считался незначительным) массой от 10^{-12} до 1 г на расстоянии 1 а. е. от Солнца. Определены распределения метеороидов по плотности и скорости.

Очевидность учета метеорной обстановки при освоении космического пространства привела к созданию следующей версии модели NASA. Модель NASA SP-8038 (Meteoroid Engineering Model - 1970. Interplanetary and planetary) [50] описывает распределение космических частиц (как кометного, так и астероидного происхождения) по массам от 10^{-12} до 10^2 г на расстоянии от 0.1 до 30 а. е. от Солнца. В модели распределения метеорного вещества на основе наблюдений были приняты средняя скорость движения частиц в космическом пространстве, равная 20 км/с, и средняя плотность вещества, равная 0.5 г/см^3 . Экспериментально модель опирается на те же виды наблюдений, что и в модели NASA SP - 8013, но также использовались наблюдения астероидов. Созданные модели распределения метеорного вещества постоянно обновляются с привлечением всех вновь получаемых данных.

В настоящее время для оценки метеорной обстановки в NASA используется модель Meteoroid Engineering Model (MEM) (SEE/CR-2004-400), которая является компиляцией всех предшествующих моделей с привлечением современных наблюдений (Таблица 1.3) [51, 52].

Европейское Космическое Агентство тоже разрабатывает и использует в своей деятельности модели метеорного вещества [53 - 56]. Модель ESA Interplanetary Meteoroid Engineering Model (IMEM) была добавлена в модель распределения космического мусора MASTER [57 - 59]. IMEM [60, 61] основана на наблюдательных данных в инфракрасном диапазоне, полученных на COBE (Cosmic Background Explorer) околоземной обсерватории, на данных, полученных с детекторов установленных на с КА Galileo и Ulysses. Также использовалось распределение лунных кратеров. IMEM разработана для представления пространственного распределения метеороидов с массами от 10^{-18} до 1 г на расстоянии от 0.1 до 5.0 а. е. от Солнца.

Сопоставление величин потоков частиц как функции их масс в моделях NASA и ESA показано на рисунке 1.18 [62].

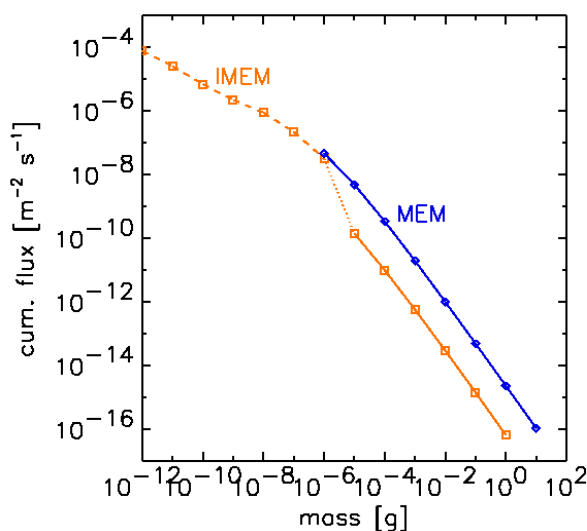


Рис. 1.18. Общий поток метеорного вещества по данным МЕМ (синяя линия) и IMEM (оранжевая линия) на сферу радиусом 1 а.е. [62]

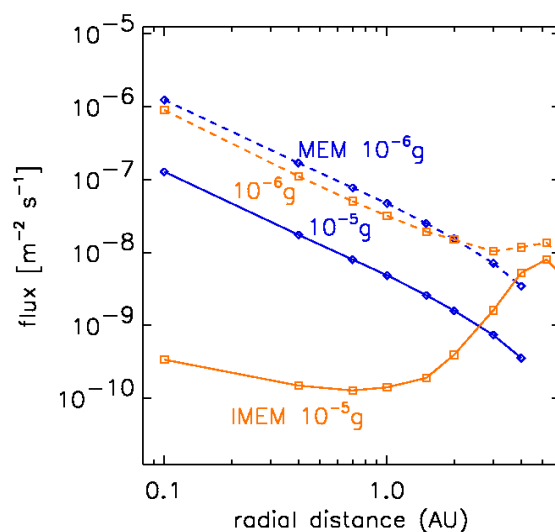


Рис. 1.19. Пространственное распределение потока частиц массой 10^{-6} г и 10^{-5} г согласно моделям IMEM (оранжевая линия) и МЕМ (синяя линия) [62]

Обе эти модели основаны на метеорных наблюдениях в видимом и радио - диапазонах, а также на регистрациях микрометеоритных ударов

датчиками на КА. Поскольку практически все модели используют одни и те же исходные данные, их усреднение в различных сочетаниях приводит к близким результатам (Рис. 1.20). Но при детализации результаты моделей могут отличаться на несколько порядков (Рис. 1.18 – 1.19).

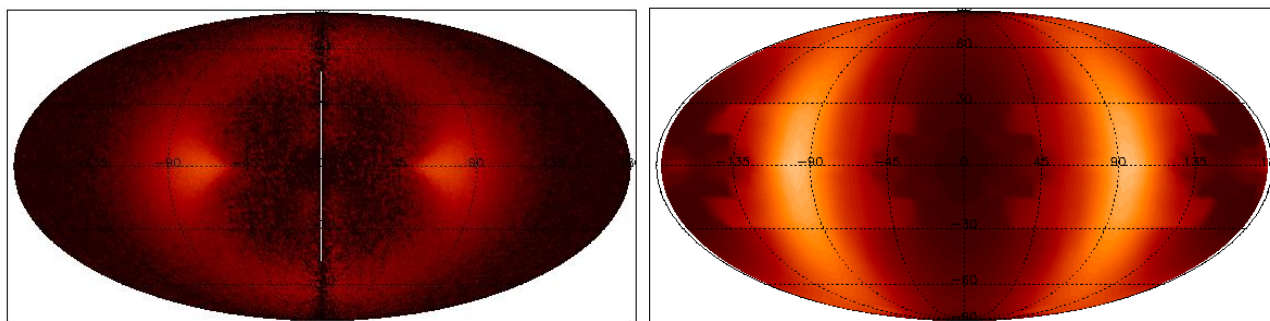


Рис. 1. 20. Карта распределения метеороидов массой $> 10^{-6}$ г по сфере радиусом 1 а.е. в эклиптике по данным MEM (левый рисунок), IMEM (правый рисунок) [62]

1.3.2. ГОСТ 25645.128-85 «Вещество метеорное. Модель пространственного распределения»

В России до сих пор национальным стандартом остается ГОСТ 25645.128-85 «Вещество метеорное. Модель пространственного распределения» [63]. Введенный более четверти века назад ГОСТ по сравнению с моделями NASA и ESA не обновлялся со времени своего создания. Данный ГОСТ уже не отвечает современным требованиям и требует обновления на основе современных наблюдений.

ГОСТ 25645.128 - 85 является национальным вариантом используемых за рубежом моделей, принятым через 20 лет после первой американской модели. В значительной степени ГОСТ 25645.128 - 85 повторяет структуру стандартов NASA. ГОСТ 25645.128-85 устанавливает модель, характеризующую пространственное распределение метеорных тел в плоскости эклиптики с массой метеорных тел $10^{-6} < m \leq 10^2$ г на удалении от поверхности Земли до ~ 1000000 км и метеорных тел массой $10^{-9} \leq m \leq 10^{-6}$ г на

удалении от 200 до 1000 км. Данные о пространственном распределении метеорных тел массой $m > 10^{-6}$ г (Рис. 1.21) получены из наземных радиолокационных и фотографических наблюдений метеоров, а для метеорных тел массой $m \leq 10^{-6}$ г (Рис. 1.22) - из измерений при помощи датчиков соударения, установленных на КА. Стандарт предназначен для использования в расчетах при определении условий функционирования технических устройств в космическом пространстве.

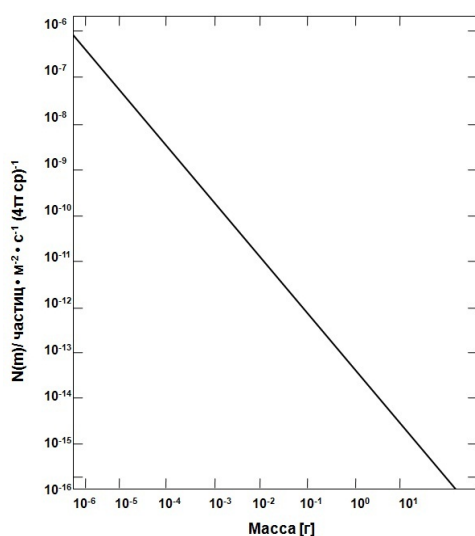


Рис. 1.21. Усредненная за год плотность потока спорадических метеорных тел массой $m > 10^{-6}$ г [63]

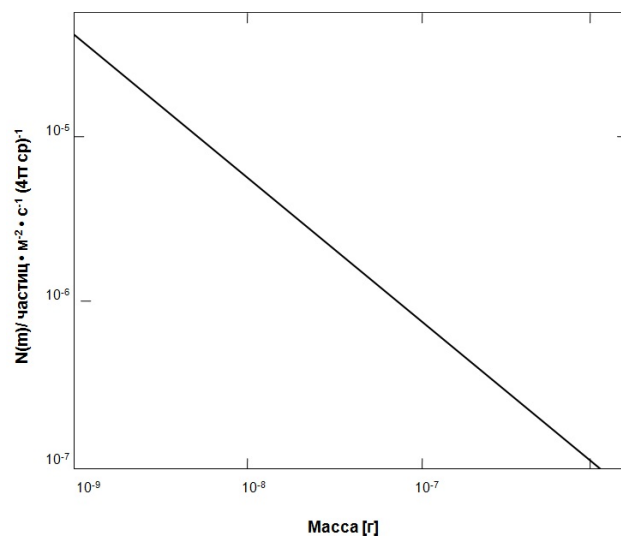


Рис. 1.22. Усредненная за год плотность метеорных тел массой $m \leq 10^{-6}$ г [63]

Из таблицы 1.3 видно, что диапазон масс частиц метеороидов (т.е. частиц, опасных для КА), используемый для создания стандартов (ГОСТа), варьируется от 10^{-18} г до 10^2 г.

Используя полуэмпирические отношения массы к звездной величине метеоров, согласно исследованиям [64, 65], получаем эквивалентный диапазон абсолютных звездных величин от -3^m до $+27^m$. Но как было сказано ранее, ущерб работе космической техники могут нанести частицы с массами более 10^{-6} г, что соответствует звездным величинам метеоров ярче $+8.0^m$.

Таблица 1.3. Существующие модели распределения метеорного вещества

Хар-ки модели	Модели						
	Grüen et al. [53]	Divine [66]	Divine- Staubach [67]	SSP 30425 (ISS) [68]	IMEM (ESA) [60, 61]	MEM (NASA) [51, 52]	ГОСТ 25645.128-85 [63]
Спорадика или потоки	Спорадика	Спорадика	Спорадика	Спорадика	Спорадика	Спорадика	Спорадика, Потоки, пылевая оболочка Земли
Межпланетная	Нет	0,1 ÷ 20 а.е.	0,1 ÷ 20 а.е.	Нет	0,1 ÷ 10 а.е.	0,2 ÷ 2 а.е.	1). 1 а.е. 2). 200-100 км
Диапазон масс	$10^{-18} \div 10^2$ г	$10^{-18} \div 1$ г	$10^{-18} \div 1$ г	$10^{-18} \div 10^2$ г	$10^{-12} \div 10^2$ г	$10^{-6} \div 10$ г	1). $10^{-6} \div 10^2$ г 2). $10^{-9} \div 10^{-6}$ г
Учет гравитации	Нет	Только Земли	Только Земли	Только Земли	Только Земли	Только Земли	Только Земли
Учет экранирования	Нет	Только Землей	Только Землей	Только Землей	Только Землей	Только Землей	Только Землей
Распределение скоростей	20 км/с	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Плотность	2,5 г/см ³	2 г/см ³ ($m < 10^{-6}$ g); 1 г/см ³ ($10^{-6} - 10^{-2}$ g); 0.5 г/см ³ ($m > 10^{-2}$ g)	2 г/см ³ ($m < 10^{-6}$ g); 1 г/см ³ ($10^{-6} - 10^{-2}$ g); 0.5 г/см ³ ($m > 10^{-2}$ g)	2 г/см ³ ($m < 10^{-6}$ g); 1 г/см ³ ($10^{-6} - 10^{-2}$ g); 0.5 г/см ³ ($m > 10^{-2}$ g)	2,5 г/см ³	1 г/см ³	-
Экспериментальные данные	-Натурные эксперименты, -зодиакальный свет, данные о лунных кратерах	- Данные о зодиакальном свете - Данные Harvard Radio Meter Project (HRMP)	- расчет Staubach с учетом данных с КА Ulysses и Galileo	Не доступны данные	-Экспериментальные данные с КА Ulysses и Galileo -COBER IR, -данные о лунных	Данные Канадской радиолокационной системы (Canadian Meteor Orbit Radar (CMOR))	Радиолокационные и фотографические наблюдения, данные с пробойных датчиков на КА
Дата создания	1985	1993	1996	1994 (редакция)	2004	2006	1985

В параграфе 1.2.1.2 была описана камера PatrolCa, которая способна регистрировать метеоры до $+4^m$. Это соответствует сиреневому диапазону на рисунке 1.23. Диапазон звездных величин камеры FAVOR (см. параграф 1.2.2) шире и с ее помощью возможны наблюдения метеоров до $+9.0^m$ (на Рис. 1.23 розовый участок).

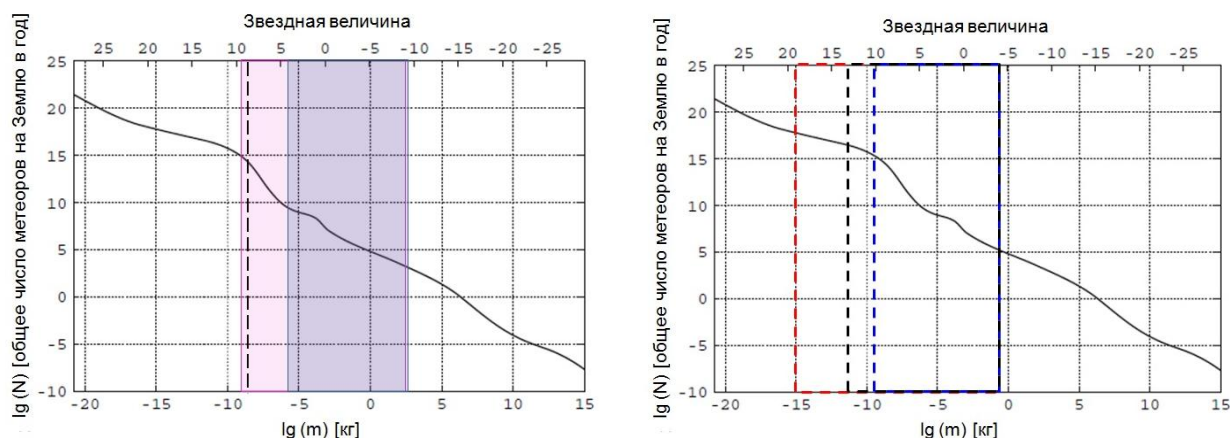


Рис. 1.23. Распределение числа метеоров в зависимости от яркости /звездной величины [64, 65]. На рисунке слева обозначены: нижние границы регистрируемых метеоров на камере FAVOR (розовый цвет) и на камере PatrolCa (сиреневый цвет); вертикальной пунктирной линией отмечена граница нижнего предела масс частиц опасных для КА. На рисунке справа показаны границы применимости моделей MEM (синяя пунктирная линия), IMEM (красная пунктирная линия), ГОСТ (черная пунктирная линия)

Таким образом, совокупность наблюдений на таких установках, как PatrolCa и FAVOR, позволяют получать наблюдения метеоров, которые представляют опасность для полетов КА (больше 10^{-6} г) (пунктирная линия на Рис. 1.23 (слева)). Эти наблюдения позволяют получить характеристики спорадического метеорного фона и потоковых метеоров, и уточнять (или как в случае с ГОСТ 25645.128 – 85 пересмотреть) существующие модели метеорного вещества.

1.4. Риски, относящиеся к астероидно – кометной опасности

В последние десятилетия существенно изменилось отношение к опасности, которую представляет падение на Землю космических тел. Столкновение Земли с такими телами неоднократно имели место в прошлом и, несомненно, угрожают ей в настоящем и будущем.

Под понятием астероидно–кометная опасности (АКО) понимается угроза нанесения серьезного ущерба человечеству в результате столкновения космических тел размером более нескольких десятков метров (т.е.

астероидов и комет) с Землей. Проблема астероидно–кометной опасности комплексная, ее можно разделить на три составляющие: обнаружение всех опасных тел, сближающихся с Землей (ОСЗ), определение степени угрозы с оценкой рисков и противодействие с целью уменьшения ущерба.

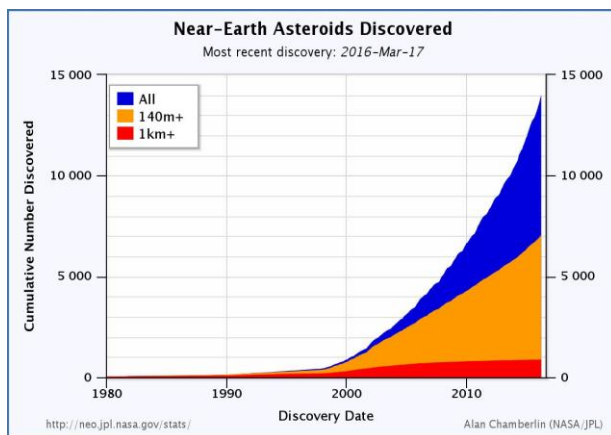


Рис. 1.24. Распределение по размерам открытых астероидов, сближающихся с Землей (17.03.2016) [69]

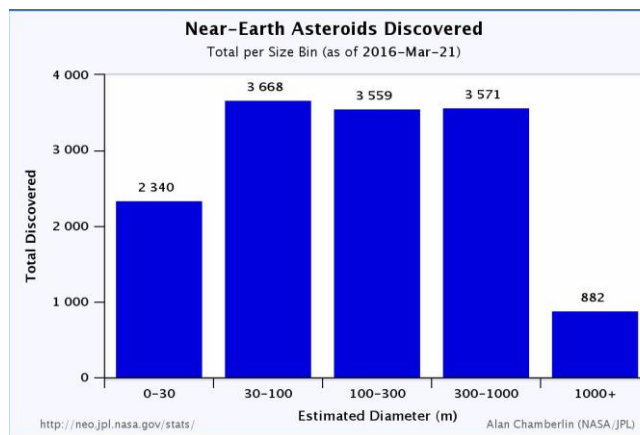


Рис. 1.25. Распределение по размерам открытых астероидов, сближающихся с Землей (17.03.2016) [69]

По состоянию на 17 марта 2016 г. объектов, сближающихся с Землей ((ОСЗ, Near Earth Objects – NEO) – астероиды и кометы, чьи орбиты имеют перигелийные расстояния $q < 1.3$ а.е.), обнаружено 14020 [69]. Из них 7022 астероида имеют размеры 140 м и более, 882 - размеры 1 км и более (Рис. 1.24 – 1.25).

Последствия столкновения небесного тела с Землей разнообразны и могут иметь самые печальные последствия для жизни и деятельности людей (Таблица 1.4).

Таблица 1.4. Частота и результаты столкновений малых тел с Землей [4]

Объект	Размеры	Частота (раз в ... лет)	Размер кратера (км)	Результат столкновения с Землей
Пылинка	$D < 0.1 \text{ см}$			Сгорает
Метеороид	$0.1 \text{ см} < D < 0.5 \text{ м}$			Сгорает
	$0.5 \text{ м} < D < 20 - 30 \text{ м}$			Долетают до Земли с малой скоростью
	$> 30 \text{ м}$	250	Нет Да	Типа Тунгусского тела Кратер типа Аризонского Локальная катастрофа
Астероид (комета)	$> 100 \text{ м}$	5 тыс.	> 2	Региональная катастрофа
	$> 1 \text{ км}$	1 млн.	> 20	Глобальная катастрофа
	10 км	100 млн.	200	Конец цивилизации

В настоящее время используется Туринская шкала (The Torino Impact Hazard Scale) (Рис. 1.26) [70] для оценки угрозы, исходящей от космического объекта.

Степень угрозы рассчитывается на основе двух критериев: 1) вероятности столкновения астероида с Землей, которая определяется его орбитой, и 2) масштабом разрушений, которые могут возникнуть вследствие столкновения. Этот масштаб определяется кинетической энергией малого тела при входе в атмосферу Земли. В зависимости от степени потенциальной опасности со стороны космического тела Туринская шкала различает 11 уровней опасности. Балл по Туринской шкале присваивается системы после обнаружения малого тела Солнечной

системы. Степень риска 0 означает, что никакой угрозы нет, то есть либо столкновения не произойдет, либо тело настолько мало, что столкновение не опасно. Степени 8–10 означают неизбежное столкновение и катастрофу от локальной (степень 8) до глобальной (степень 10).



Рис. 1.26. Туринская шкала [70]

Военные спутники на высоких орбитах непрерывно наблюдают за земным шаром, отслеживая испытания атомных бомб и запуски ракет. Наблюдения болидов – побочный продукт таких систем наблюдений. Спутниковые наблюдения могут регистрировать момент входа и определить кинетическую энергию при входе тела в атмосферу Земли, но не могут регистрировать динамические данные (скорость, угол входа и т.п.). Спутниковой сетью за 19 лет было зарегистрировано 556 вспышек (255–дневных, 301–ночных) (Рис. 1.27), ассоциированных с входом метеороидов [71].

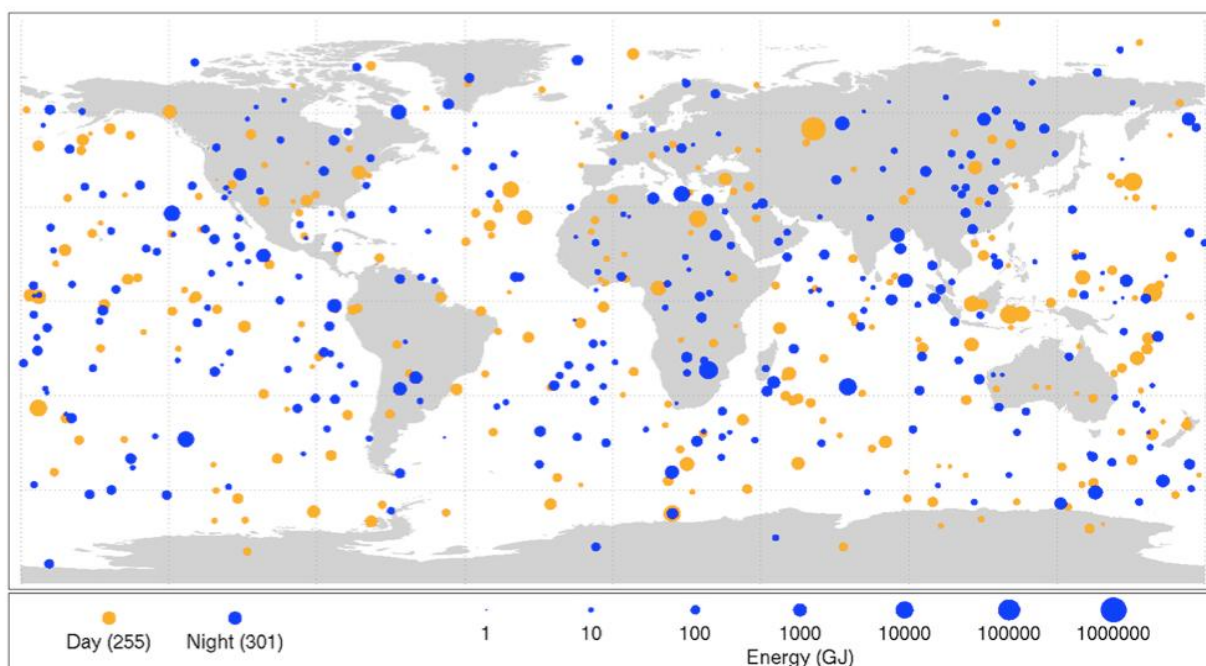


Рис. 1.27. Изображение карты с данными о входах метеороидов (от 1 м до 20м) в атмосферу Земли зафиксированных спутниками в 1994–2013гг. Желтые точки – болиды зафиксированные в дневное время, синие точки – болиды зафиксированные ночью. Размеры точек пропорциональны энерговыделению при вхождении объекта в атмосферу [71]

Актуальность задачи раннего обнаружения опасных космических тел стала особо очевидной после падения Челябинского метеорита. При падении Челябинского метеорита выделилась энергия порядка 570 ± 150 кт ТНТ [72], что сравнимо с мощностью ~ 28 атомных бомб, сброшенных на Нагасаки (эквивалентен сбросу ядерной бомбы – 21 кт ТНТ). Взрыв двадцатиметрового метеороида в атмосфере над Челябинском 15 февраля 2013 г. показал, что даже небольшое космическое тело (не классифицирующееся как опасное в рамках АКО) может вызвать существенные повреждения.

Поскольку в известных метеороидных роях могут находиться крупные тела [73 – 75], то их изучение может представлять собой важный аспект раннего обнаружения опасных космических объектов.

Исследования астрономических аспектов уникального Челябинского события описаны в Главе 5.

1.5. Заключение

Выше показано, что телевизионный метод позволяет получать объективные данные о метеорах на современном уровне (их физические и динамические параметры).

Телевизионная техника является самой эффективной для проведения метеорных наблюдений в оптическом диапазоне. Поэтому материалы диссертационной работы основаны на наблюдениях, выполненных автором, на телевизионной аппаратуре. Особенное внимание уделено анализу метеорных регистраций, полученных на уникальной камере FAVOR, которые расширили диапазон наблюдаемых метеорных явлений до той границы, где метеорная частица еще представляет опасность для КА.

Пространственная неоднородность потока метеорных частиц в Солнечной системе требует не только проведения наблюдений в режиме мониторинга, но и постоянного обновления инженерных моделей метеорного вещества. Такие наблюдения метеоров в режиме мониторинга со станций, по возможности равномерно разнесенных по долготе, дадут возможность уточнить современные модели метеорного вещества и максимально приблизить их к действительности.

Кроме того, ясное понимание природы метеорных тел позволяет по наблюдениям метеоров решить ряд задач связанных с предотвращением астероидно–кометной опасности.

ГЛАВА 2

МЕТОДЫ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТЕОРОВ

В метеорной астрономии, начиная со второй половины 20 века, для наблюдений в видимом диапазоне используются телевизионные камеры различной конструкции [76–80]. Полученные телевизионные кадры являются серией мгновенных изображений метеоров и звезд, из которых можно получить координаты точек метеорного трека как функцию времени. Для этого обычно используются методы координатной обработки снимков, разработанные для анализа астрономических фотографий.

Все основные методы вычисления небесных координат на снимках, содержащих измеряемый объект и звезды поля, основаны на сопоставлении положений измеряемых точек в кадре относительно изображений звезд с известными координатами [9, 81, 82]. Классические методы фотографической астрометрии основаны на измерении снимков с большим количеством опорных звезд, что позволяет учитывать разнообразные искажения координат во всем поле зрения [83]. На метеорных снимках с очень большими полями зрения (от десятков кв. градусов до полусферы) необходимо дополнительно учитывать полевые аберрации оптики и нелинейность проекции небесной сферы на плоскость телевизионной матрицы.

При первых телевизионных регистрациях метеоров использовались светосильные фотографические объективы, обладавшими низким разрешением даже в центре поля зрения и большими искажениями на краях кадра. Особенно существенны они были у камер типа all-sky с полем зрения до $180^\circ \times 180^\circ$. Учет аберрации оптики – это весьма сложная задача, которую нужно решать при обработке телевизионных кадров с метеорами в широких полях зрения [84, 85].

При обработке широкоугольных телевизионных кадров также необходимо исправлять искажения, связанные с отображением сферических участков неба на плоскость телевизионных матриц. Для преобразования прямоугольных координат на матрице (x, y) в экваториальные координаты на небе (α, δ) (для «идеального» объектива без аберраций) обычно используется аппроксимация полиномами высокого порядка [86].

Аберрацию оптики широкоугольных объективов, применяемых для телевизионных наблюдений метеоров, сложно точно рассчитать теоретически. Для их учета обычно производится большое количество измерений небесных координат опорных звезд в поле зрения, по которым создается математическая модель аберраций. Для этого необходимо иметь в кадре большое количество опорных звезд. При фотографических регистрациях, проводившихся исключительно в ясные ночи с длительными экспозициями, на снимках получались изображения сотен звезд, которые использовались для координатных измерений метеоров и вычисления коэффициентов редукции [83]. После перехода от фотографических наблюдений метеоров к телевизионным с регистрацией изображений неба в оцифрованном виде прямо на компьютере, стало возможно проведение наблюдений метеорных событий в более широком диапазоне погодных условий. При телевизионном методе наблюдений (с частотой кадров порядка 25 (30) в секунду) возможны случаи метеорных регистраций с малым числом опорных звезд в кадре или даже при их отсутствии, например при наблюдениях сквозь слабую облачность, поэтому методы координатной обработки телевизионных кадров необходимо адаптировать к таким условиям.

2.1. Разработка метода определения координат метеоров по наблюдениям на широкоугольных телевизионных камерах

Математическое преобразование прямоугольных координат в кадр в систему небесных координат задается полиномиальной функцией тем большего порядка, чем выше требуемая точность измерений. Для расчета полиномов и редукций необходимо вычислить несколько десятков коэффициентов, которые характеризуют систему наблюдений и ее ориентацию. При вычислении этих коэффициентов необходимы измеренные координаты 10 – 15 звезд на кадре с известными небесными координатами [81, 87–89]. Как правило, широкоугольная (40° – 180°) светосильная метеорная камера, работающая в телевизионном режиме с малым временем накопления (с высоким разрешением по времени), регистрирует малое количество звезд в кадре. Для того чтобы увеличить число звезд в единичном кадре до 15 чешские астрономы предлагают суммировать несколько кадров за короткий промежуток времени (несколько секунд), снятых на одной all-sky камере, в результате чего на суммарном кадре число звезд увеличивается за счет возрастания эффективного времени накопления [84, 90, 91]. Далее координаты опорных звезд, полученных таким образом, используются для вычисления координат объекта, с помощью метода, основанного на математических редукциях прямоугольных координат кадра в экваториальные. Команда польской метеорной сети (PFN) предлагает увеличивать количество опорных звезд, используя их суточное смещение по полю зрения [78]. В течение продолжительного времени наблюдений (несколько часов) на неподвижной камере можно получить серию кадров, на которых одни и те же звезды занимают различное положение в поле зрения. Суммируя эти кадры, получается единичный кадр с большим количеством опорных точек с известными координатами. Далее для вычисления координат метеора используется классический метод Тернера [78]. Метод Тернера требует наличия не менее 6 звезд в кадре для получения связи между

прямоугольными координатами на снимке с небесными координатами. А для учета аббераций приходится увеличивать число определяемых коэффициентов, участвующих в полиномиальной модели кадра. При большом числе опорных звезд (как реальных на снимке, так и «виртуальных», накопленных в ночь наблюдений) коэффициенты Тернера определяются достаточно уверенно, но и в этом случае ошибки полиномиального приближения для редукции по методу Тернера также остаются.

Мы предлагаем отказаться от математических аппроксимаций очень сложных аббераций. Наше предложение сводится к получению прямой и строгой привязки прямоугольных координат в любой точке кадра неподвижной камеры к экваториальным координатам [92].

Суть подхода состоит в том, что в случае неподвижной телевизионной камеры каждая точка в кадре соответствует фиксированному положению направления на небе (t, δ) ; если в поле зрения камеры используется большой набор опорных точек, то методом интерполяции координат измеренного объекта по координатам ближайших опорных точек можно получить непосредственно положение объекта в системе небесных координат (t, δ) .

При суточном движении звезд, вследствие вращения Земли, меняется и их положение в кадре (x, y, UT) неподвижной камеры, но каждой звезде соответствуют свои небесные координаты (t, δ) . Каждое положение в кадре (x, y, UT) однозначно связано с положением звезды на небесной сфере (t, δ) и может быть легко вычислено по известным небесным координатам звезды, координатам места наблюдения и местному времени. Поэтому множество положений изображений звезд в кадре, полученных в разное время, можно использовать как полный аналог большого массива звезд в единичном кадре.

Данный подход обеспечивает жесткую связь между системой координат в кадре и небесной системой координат (t, δ) и может быть использован для получения значений (α, δ) точек метеорного трека и может

быть использован при обработке любых полученных камерой снимков, в том числе и тех, у которых в кадре недостаточно или совсем нет звезд (например, в условиях частичной облачности).

2.1.1. Определение экваториальных координат точек метеорного трека

Обычно метеорные наблюдения проводятся широкоугольными телевизионными камерами (см. параграф 1.2), которые жестко зафиксированы во время всего сеанса наблюдений и сохраняют свою ориентацию относительно сторон горизонта. Тем самым каждая точка кадра такой камеры с положением (x_i, y_i) однозначно проектируется оптикой камеры в точку на небесной сфере, имеющей горизонтальные координаты (A_i, h_i) . Важно отметить, что это соответствие координат $(x_i, y_i) \leftrightarrow (A_i, h_i)$ определяется свойствами камеры и ее оптики и находится в нашем подходе как *экспериментальная* связь независимо ни от каких действующих aberrаций. От прямоугольных координат опорных звезд в кадре можно легко перейти к экваториальным (t_i, δ_i) , зная координаты пункта наблюдения (λ, φ) и время (UT_i) . Переход (x_i, y_i) в (t_i, δ_i) позволяет вычислить координаты (t, δ) для любой точки кадра методом интерполяции.

Из полученного ряда кадров (полученных в течение длительного времени (одной ночи или нескольких ночей), если камера в течение этого времени жестко зафиксирована) можно выбрать кадры через различные интервалы времени, в течение которых яркие опорные звезды заметно смещаются по полю зрения (интервал времени может быть выбран любым). Экваториальные координаты (α_i, δ_i) для каждой опорной звезды определяются по каталогу (Hipparcos, USNO, Tycho-2 или др.) (Рис. 2.1), измеряются координаты этих звезд в кадре (x_i, y_i) на момент получения снимка UT (всемирное время).

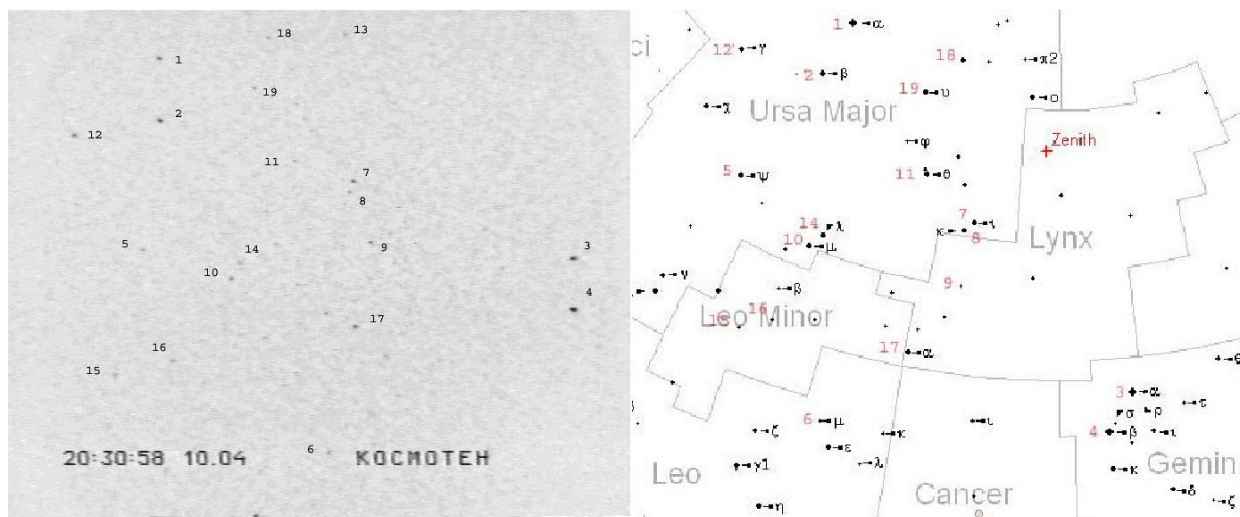


Рис. 2.1. Пример кадра, полученного на камере с промежуточным усилителем яркости PatrolCa – 1 (с полем зрения $50^\circ \times 40^\circ$ CCD 720 x 576 пиксель) (слева) и отождествленные опорные звезды по каталогу (справа)

Далее производим перевод координат опорных звезд из 1-й экваториальной системы координат (α_i, δ_i) во 2-ю (t_i, δ_i) для моментов получения обрабатываемых кадров (UT_i) и получаем таблицу связи между координатами кадра и экваториальными, пример которой представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Пример таблицы связи между координатами кадра и экваториальными

t (h)	δ ($^\circ$)	x (pix)	y (pix)
21.69	44.48	94	263
21.78	61.73	136	48
21.82	56.36	130	118
22.47	41.48	197	306
22.97	25.99	294	514
23.30	51.66	281	180
23.79	47.14	341	222
23.84	41.77	361	280
.....			

На рисунке 2. 2 показан пример поля нашей телевизионной камеры PatrolCa – 1 [76] с опорными звездами, а на рисунке 2.3 – то же поле, но с нанесенными опорными точками, полученными при суточном движении опорных звезд.

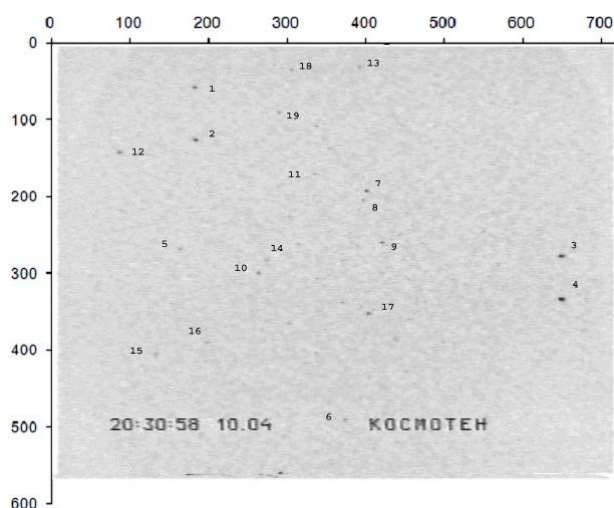


Рис. 2.2. Пример кадра с опорными звездами

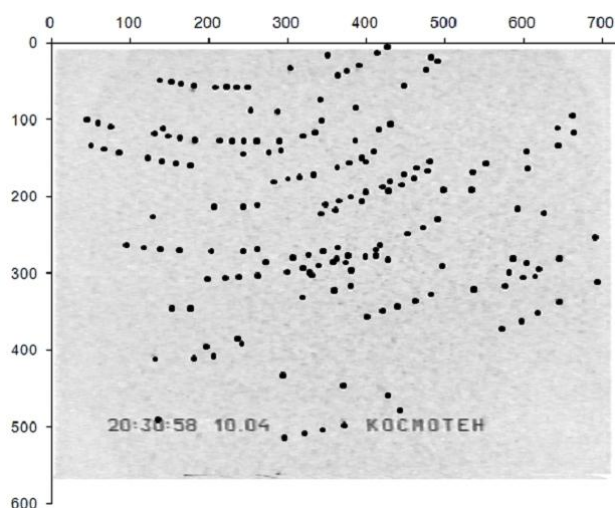


Рис. 2.3. Пример кадра с наложенной сеткой из опорных точек

Если камера жестко фиксирована в течение всего периода наблюдений, то полученная таблица связи сохраняется, и может быть использована для обработки любых кадров в этой серии регистраций. Вместе с тем, если положение камеры изменяется, то описанный переход может быть применен с использованием той же таблицы, только полученные координаты должны быть редуцированы за смещение нуля - пункта и ориентацию системы топоцентрических координат поля зрения камеры для ее нового положения. Таблицу можно дополнять данными измеренных опорных звезд, полученных в другие ясные ночи, (при условии стабильности положения камеры, или после редукции измерений в единую стабильную систему, если камера меняла положение) тем самым, повышая плотность опорных точек в таблице.

Для определения экваториальных координат объекта (точка 4), необходимо выбрать опорные точки вблизи объекта, как показано на рисунке 2.4.

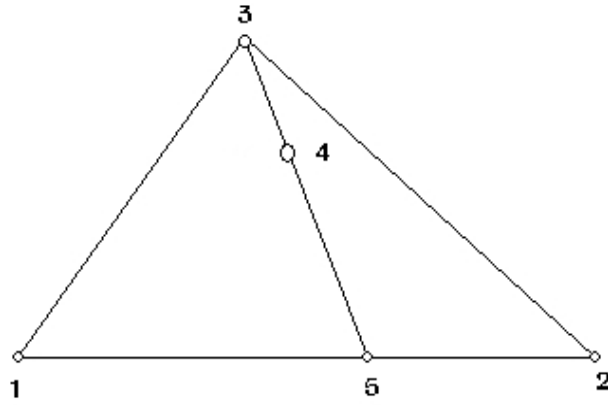


Рис. 2.4. Схематическое изображение положений опорных точек и объекта (точка 4) для интерполяции ее координат $(x_i, y_i) \rightarrow (t_i, \delta_i)$

Используя опорные точки с известными координатами (прямоугольными (x_i, y_i) и экваториальными (t_i, δ_i)), составляем следующую систему уравнений для вычисления экваториальных координат объекта:

$$t_m = t_5 + \frac{r_3}{r_5} (t_3 - t_5) = t_3 - \frac{r_4}{r_5} (t_3 - t_5) \quad (2.1)$$

$$\delta_m = \delta_5 + \frac{r_3}{r_5} (\delta_3 - \delta_5) = \delta_3 - \frac{r_4}{r_5} (\delta_3 - \delta_5)$$

где

t_m, δ_m - экваториальные координаты объекта

t_3, δ_3 - экваториальные координаты 3-й опорной точки,

r_3 - расстояние между 5-й опорной точкой и объектом,

r_4 - расстояние между 3-й опорной точкой и объектом,

r_5 - расстояние между 3-й опорной точкой и 5-й опорной точкой:

$$r_3 = \sqrt{(x_4 - x_5)^2 + (y_4 - y_5)^2} \quad (2.2)$$

$$r_4 = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2} \quad (2.3)$$

$$r_5 = \sqrt{(x_3 - x_5)^2 + (y_3 - y_5)^2} \quad (2.4)$$

t_5, δ_5 - экваториальные координаты 5-й точки:

$$t_5 = t_1 + \frac{r_1}{r} (t_2 - t_1) = t_2 - \frac{r_2}{r} (t_2 - t_1), \quad (2.5)$$

$$\delta_5 = \delta_1 + \frac{r_1}{r} (\delta_2 - \delta_1) = \delta_2 - \frac{r_2}{r} (\delta_2 - \delta_1).$$

где:

t_1, δ_1 - экваториальные координаты 1-й опорной точки,

t_2, δ_2 - экваториальные координаты 2-й опорной точки,

r – расстояние между 1-й опорной точкой и 2-й опорной точкой,

r_1 - расстояние между 1-й опорной точкой и 5-й точкой,

r_2 - расстояние между 2-й опорной точкой и 5-й точкой:

$$r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2.6)$$

$$r_1 = \sqrt{(x_5 - x_1)^2 + (y_5 - y_1)^2} \quad (2.7)$$

$$r_2 = \sqrt{(x_2 - x_5)^2 + (y_2 - y_5)^2} \quad (2.8)$$

Координаты 5 точки вычисляются следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{y_5 - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x_5 - x_1}{x_2 - x_1}, \\ \frac{y_5 - y_3}{y_m - y_3} = \frac{x_5 - x_3}{x_m - x_3} \end{cases} \quad (2.9)$$

где (x_i, y_i) координаты в кадре i -опорной точки, (x_m, y_m) координаты в кадре объекта (метеора).

В результате решения систем уравнений (2.1) – (2.9) получаем часовой угол и склонение (t_m, δ_m) измеряемой точки в изображении (объекта).

Необходимо перейти от часового угла к прямому восхождению. Для этого используется известная формула:

$$\alpha_m = s_m - t_m \quad (2.10)$$

где s_m – звездное время на момент наблюдения.

t_m, α_m – часовой угол и прямое восхождение объекта.

Таким образом, определяются в предложенном методе экваториальные координаты измеряемой точки в изображении (объекта) (α_m, δ_m). Чем ближе расположены опорные точки к измеряемой точке в изображении, тем выше точность вычисляемых ее координат (см. параграф 2.1.3).

2.1.2. Поправка за смещение камеры

Метод, описанный выше, может быть использован и в случае перенаведения камеры на другой участок неба. Для этого достаточно внести поправки в координаты, получаемые из таблицы связи (Таблица 2. 1). Поправки можно вычислить путем измерения положений в кадре двух опорных звезд (минимум) с известными экваториальными координатами (α_i, δ_i) для нового положения камеры.

Измеренные координаты эти двух опорных звезд позволят нам вычислить поправки к значениям экваториальных координат в таблице 2.1.

Система уравнений для экваториальных координат, выбранных для вычисления поправок, двух опорных звезд следующая:

$$\begin{cases} t_1^* = \Delta t^* + \bar{t}_1 \cos \theta - \bar{\delta}_1 \sin \theta \\ \delta_1^* = \Delta \delta^* + \bar{t}_1 \sin \theta + \bar{\delta}_1 \cos \theta \\ t_2^* = \Delta t^* + \bar{t}_2 \cos \theta - \bar{\delta}_2 \sin \theta \\ \delta_2^* = \Delta \delta^* + \bar{t}_2 \sin \theta + \bar{\delta}_2 \cos \theta \end{cases} \quad (2.11)$$

где t_i^*, δ_i^* - экваториальные координаты опорных звезд, которые получены на смещенной камере,

$\bar{t}_i, \bar{\delta}_i$ - экваториальные координаты (из Таблицы 2.1) тех же опорных звезд.

$\Delta t^*, \Delta \delta^*$ – поправка за смещение системы координат кадра

θ – угол поворота в смещенной экваториальной системе координат.

Решая систему уравнений (2.11) получаем:

$$\theta = \arcsin \left(\frac{(\bar{t}_1 - \bar{t}_2)(\delta_1^* - \delta_2^*) - (t_1^* - t_2^*)(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_2)}{(\bar{t}_1 - \bar{t}_2)^2 + (\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_2)^2} \right) \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} \Delta t^* = t_2^* - \bar{t}_2 \cos \theta + \bar{\delta}_2 \sin \theta \\ \Delta \delta^* = \delta_2^* - \bar{t}_2 \sin \theta - \bar{\delta}_2 \cos \theta \end{cases} \quad (2.13)$$

или

$$\begin{cases} \Delta t^* = t_1^* - \bar{t}_1 \cos \theta + \bar{\delta}_1 \sin \theta \\ \Delta \delta^* = \delta_1^* - \bar{t}_1 \sin \theta - \bar{\delta}_1 \cos \theta \end{cases} \quad (2.14)$$

Используя таблицу 2.1. и уравнения (2.1) - (2.9) вычисляем экваториальные координаты объекта (t_m, δ_m) . Затем вносим поправки $(\theta, \Delta t^*, \Delta \delta^*)$ в полученные координаты и получаем истинные экваториальные координаты объекта (t_m^*, δ_m^*) следующим образом:

$$\begin{cases} t_m^* = \Delta t^* + t_m \cos \theta - \delta_m \sin \theta \\ \delta_m^* = \Delta \delta^* + t_m \sin \theta + \delta_m \cos \theta \end{cases} \quad (2.15)$$

Прямое восхождение α_m^* вычисляется по формуле:

$$\alpha_m^* = s_m - t_m^* \quad (2.16)$$

2.1.3. Точность метода

Метеорные наблюдения проводятся различной наблюдательной техникой. Для определения координат объектов, полученных этой техникой используются методы, которые основаны на сопоставлении положений измеряемых точек в кадре относительно изображений звезд с известными координатами [9, 81, 82]. Поэтому точность определения координат объектов в значительной мере определяется разрешающей способностью приемника.

При метеорных наблюдениях фотографическими камерами, согласно работе [87] точность вычисления координат метеоров методом Тернера на неподвижных фотографических камерах получается для системы с короткофокусным объективом «Юпитер – 3» с ($F= 50 \text{ mm}$, $D:F = 1:1.5$) и размером кадра 352×288 пиксель (угловой размер 1 пикселя равен $4'$) - ошибка вычисления координат составляет $1.5' - 3.5'$. Катасев [9] приводит, для камер с объективами «Sonnar» ($F= 5.0 \text{ см}$, $D=3.3 \text{ см}$, светосила $1:1.5$), «Индустар – 7» ($F= 10.5 \text{ см}$, $D= 3.0 \text{ см}$, светосила $1:3.5$) и «Ksenon» ($F= 12.5 \text{ см}$, $D= 6.25 \text{ см}$, светосила $1:2$), величину ошибки $\pm 18''$. Используя метод Тернера для координатной обработки при телевизионных наблюдениях камерами типа all-sky Испанской метеорной и болидной сети (SPMN) с форматом матрицы 4096×4096 пиксель, точность вычислений составляет $\sim 2'$ (угловой размер 1 пикселя равен $\sim 2'$) [77].

Для определения точности вычисления координат предложенным методом мы использовали телевизионные регистрации, полученные с гибридной камерой «PatrolCa – 1» (абберации в телевизионных гибридных камерах с ЭОП всегда заметно выше, чем в телевизионных установках без электронной оптики). У этой камеры поле зрения $40^\circ \times 50^\circ$, 1 пиксель $\approx 4.2'$

(фотографический объектив «МИР» с $F = 20\text{мм}$ и светосилой 1:2) [76]. Таблица 2.1. была составлена по наблюдениям, полученным на данной камере. Из таблицы были выбраны тестовые звезды, с помощью которых проводилось определение точности данного метода. Для этого сравнивались вычисленные и каталожные значения экваториальных координат тестовых звезд.

Средняя ошибка наведения на концы метеорного трека составляет $\sim 1\text{-}2$ пикселя (на центр изображения звезды может быть несколько выше). Опорные точки были выбраны на различном расстоянии от тестируемой звезды: 10 пикселей ($\approx 42'$), 20 пикселей ($\approx 1^\circ 24'$) и также 120 пикселей ($\approx 8^\circ 24'$) (для PatrolCa – 1). Для оценки точности метода проводилось вычисление экваториальных координат звезд, зарегистрированных в кадре.

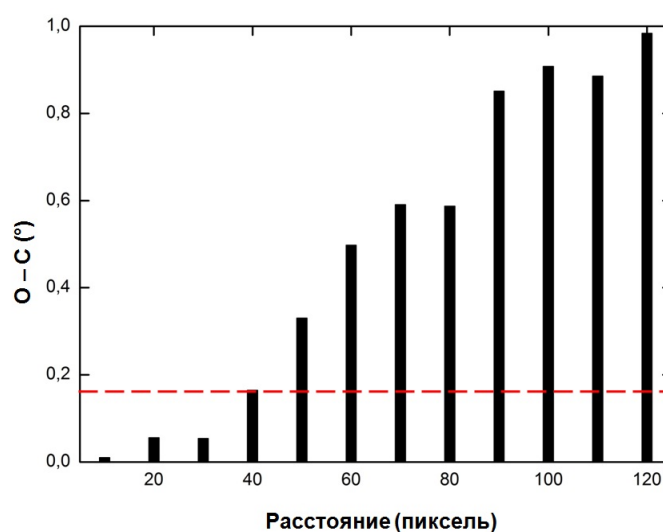


Рис. 2.5. Зависимость $O-C$ как функции расстояния между объектом и опорными точками

На рисунке 2.5 показано распределение значений разности вычисленных и истинных значений координат в зависимости от расстояния от тестируемой звезды до опорных точек.

Красной линией на рисунке 2. 5 отмечено значение 2 пикселя $\sim 8.4'$ (средняя ошибка наведения на концы метеорного трека для камеры PatrolCa –

1). Из рисунка 2. 5 видно, что при расположении опорных точек на кадре на расстоянии 40 пиксель, точность определения координат может достигать размера 2 пиксель. Таким образом, для достижения точности вычисления координат, равной угловому разрешению камеры, достаточно, чтобы опорные точки располагались на расстоянии 40 пиксель.

Точность предложенного метода в основном зависит от точности наведения на центр изображения объекта на кадре и плотности опорных звезд, которые используются для вычисления координат объекта. Точность координатных измерений точек на телевизионных снимках предложенным методом не зависит от места положения объекта в кадре (не имеет значения, где расположен объект в центре или по краям кадра).

При обработке наблюдений полученных в период 2012–2013 гг. на камерах типа PatrolCa (см. Глава 4) был применен описанный выше метод в тех случаях, когда звезд в кадре не было достаточно для применения автоматизированных методов [93].

2.2. Координатные измерения метеоров по наблюдениям телевизионной камерой FAVOR

Камера FAVOR (см. параграф 1.3.2) имеет поле зрения $18^\circ \times 20^\circ$ и обладает высокой проникающей способностью $+11^m$ по звездам [89].

На кадрах, полученных на камере FAVOR, нет проблемы с нехваткой опорных звезд (Рис. 2.6), и мы можем использовать опорные звезды, расположенные на минимальном расстоянии от метеорного трека. Поэтому мы можем выбирать методы обработки результатов наблюдений отработанные для фотографического метода.



Рис. 2.6. Пример кадра, полученного на камере FAVOR 7 ноября 2008 г. 23:05:39 (UT)

Программное обеспечение «FAVI» для координатной обработки кадров, полученных на камере FAVOR, было разработано сотрудником «Филиал «СОН Архыз» ОАО «НПК СПП» Карповым С. В. [94]. Метод, который используется в данной программе, заключается в следующем.

Для определения координат объекта необходимо знать координатное преобразование из измеренных координат кадра (x, y) в экваториальные (α, δ) . Данная процедура сводится к нахождению коэффициентов преобразования (a, b, c, d, e, f) , для которых необходимо отождествить опорные звезды (для них заранее известны небесные координаты (α, δ) из каталога) и измерить их координаты относительно кадра (x, y) .

Таким образом, используется линейное преобразование между тангенциальной проекцией небесных координат (α, δ) на картинную плоскость (ξ, η) и координатами на кадре (x, y) :

$$\xi = a + bx + cy \quad (2.16)$$

$$\eta = d + ex + fy \quad (2.17)$$

При задании приблизительного положения центра поля зрения (α_0, δ_0) координаты в проекции на картинную плоскость получаются как положение объекта в угловых координатах на кадре:

$$\xi = \frac{\cos \delta \sin \alpha - \alpha_0}{\sin \delta_0 \sin \delta - \sin \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0)} \quad (2.18)$$

$$\eta = \frac{\cos \delta_0 \sin \delta - \sin \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \sin \delta - \sin \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0)} \quad (2.19)$$

где (α_0, δ_0)- координаты центра поля зрения камеры,
 (α, δ) – экваториальные координаты опорной звезды
 (ξ, η) – идеальные координаты опорной звезды

Программное обеспечение «FAVI» основано на поиске среди опорных звезд (каталожных звезд) и объектов на кадре точек, формирующих подобные треугольники (т. к. подобие треугольников сохраняется при вращении, масштабировании и отражении поля зрения) [95, 96]. Для отождествления звезд в кадре используются данные каталога Tycho-2 [97].

Для минимизации ошибок, возникающих при обработке искаженных (из-за применения электронно–оптического преобразователя в камере и аббераций самой оптики) изображений, был выбран метод аналитической аппроксимации с достаточно малым числом коэффициентов.

Метод сводится к коррекции координат в картинной плоскости (ξ, η) на этапе, предшествующем линейному их преобразованию в координаты на кадре (x, y). Было выбрано следующее корректирующее преобразование:

$$\xi' = \sum_{0 < i+j \leq 3} C_{i,j} \xi^i \eta^j \quad (2.20)$$

$$\eta' = \sum_{0 < i+j \leq 3} D_{i,j} \xi^i \eta^j \quad (2.21)$$

Таким образом, алгоритм определения координатного преобразования, предложенный Карповым С.В., выглядит следующим образом [94]:

1. Определяется предварительное линейное координатное преобразование в картинной плоскости с использованием приблизительного положения центра поля зрения.
2. Вычисляются координаты центра поля зрения с использованием этого преобразования.
3. Если вычисленные координаты отличаются от предыдущих более чем на половину элемента разрешения, то необходимо перейти к этапу 1.
4. Производится отождествление наиболее ярких объектов на кадре с каталожными звездами и вычисляется их отклонение от предсказываемых полученным преобразованием.
5. Вычисляются коэффициенты корректирующего преобразования, с использованием найденных ранее отклонений в выбранных опорных точках.
6. Этапы 4 – 5 повторяются до тех пор, пока уменьшается среднеквадратичное остаточное уклонение аппроксимации в выбранных опорных точках.

В итоге мы получаем коэффициенты линейного преобразования и координаты центра кадра, коэффициенты полиномиальной коррекции, координаты объекта.

На рисунке 2.7 представлен пример окна программы «FAVI» с кадром, полученным на камере FAVOR, на который была наложена сетка звезд из каталога (синие точки). При обработке кадров с метеорами, сетка со звездами накладывалась таким образом, чтобы максимально точно были совмещены каталожные звезды и звезды на кадре, расположенные рядом с объектом (метеором). Далее указываются на кадре начало и конец метеора, т.е. определяются координаты этих точек на кадре. С помощью опорных звезд вычисляются экваториальные координаты начала и конца метеорного трека, выделяемые оператором (Рис. 2.7). Точность проводимых таким образом

измерений зависит не только от точного наложения сетки со звездами на кадр и преобразования координатной сетки, но и от точности наведения на начало и конец метеорного трека.

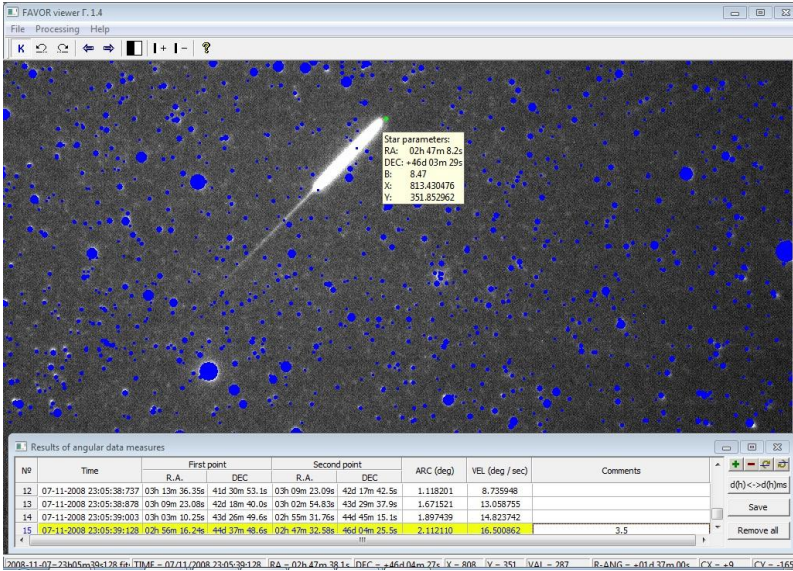


Рис. 2.7. Пример кадра с наложенной сеткой звезд из каталога на кадр с метеором, с помощью программы «FAVI»

С помощью программы «FAVI» были обработаны наблюдения, полученные на камере FAVOR в период 2006 – 2009 гг. (см. Глава 1 в Таблице 1.2 выделено жирным шрифтом).

Анализ полученных результатов подробно описан в Главе 3.

2.3. Заключение

В Главе 2 рассматриваются методы определения небесных координат метеоров полученных на разных типах широкоугольных камер.

Показано, что в случае большого количества опорных звезд в кадре (как в случае наблюдений на камере FAVOR) можно использовать методы, разработанные для обработки фотографических наблюдений.

В случае широкоугольных камер (с полем зрения более 20°) с недостаточным количеством опорных звезд в кадре, целесообразно

использовать разработанный автором метод (см. параграф 2.1). Предлагаемый метод не зависит от aberrаций оптики, поскольку он использует локальную интерполяцию положений объекта в проекции на небесную сферу с опорными звездами. Этот метод очень удобен для координатной обработки наблюдений с широкоугольными камерами, широко используемых для телевизионных метеорных наблюдений (см. Приложение А). Также предложенный метод может быть использован в тех случаях, когда другие методы не применимы – недостаточное количество опорных звезд, частичная облачность при наблюдениях и т.п.

Предложенный метод обладает высокой точностью координатных измерений. Она зависит от точности определения координат центра изображений опорных звезд и от плотности опорных точек, достигая уровня ошибок наведения на точку измерений при расстоянии между опорными точками 40 пиксель. Точность предложенного метода не уступает другим, применяемым в метеорной астрономии, методам.

ГЛАВА 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТЕОРНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Получение из видимого земными наблюдателями распределения метеоров по яркости, численности, скорости и т.д. характера истинного распределения метеорной материи в Солнечной системе является одной из основных задач метеорной астрономии. Задача эта весьма сложна вследствие того, что условия видимости метеоров зависят от целого ряда факторов, учесть влияние которых весьма трудно, в таких случаях используются модельные оценки характеристик метеорных потоков.

Тем не менее, измерения численности поточных и спорадических метеоров позволяют изучить структуру метеорных потоков и количественно оценить приток метеорного вещества на Землю, что является очень важной характеристикой условий, в которых работают космические аппараты.

Число метеоров, регистрируемых при наблюдениях, зависит не только от их пространственной плотности, но также от высоты радианта, от размеров и высоты над горизонтом наблюдаемого участка неба, от прозрачности атмосферы, яркости фона неба, от метода наблюдения и характеристик наблюдательной техники.

Измерение притока метеорного вещества на Землю имеет глубокое фундаментальное значение, так как он является индикатором космогонических процессов, происходящих в Солнечной системе, и позволяет исследовать их течение в прошлом. Кроме того, измерение потоков метеорного вещества через околоземное пространство имеет большое прикладное значение для космонавтики, поскольку позволяет

оценивать риски разрушения космических аппаратов в результате ударов по ним микрометеоритов и выбирать стратегию защиты от них.

3.1. Методы оценки метеорной активности

В настоящее время для оценки активности метеорных потоков применяется параметр, названный Зенитным Часовым Числом (ZHR) [98].

Наряду с этим параметром для вычисления притока метеорного вещества на Землю и, в частности, оценки метеорной активности был предложен Индекс Метеорной Активности (ИМА) [99, 100].

3.1. 1. Зенитное часовое число (ZHR)

В метеорной астрономии уже более ста лет для сравнительной характеристики наблюдаемой активности метеорных потоков принято при визуальных наблюдениях использовать величину ZHR (Zenith Hour Rate).

ZHR - зенитное часовое число, которое показывает, сколько метеоров мог бы увидеть наблюдатель, наблюдая за видимой (над всем горизонтом) частью неба, за час при высоте радианта в 90° (в зените) и в предположении, что он со 100% уверенностью замечает все метеоры яркостью до $+6.5^m$ [98].

ZHR - является удобной характеристикой активности метеорных потоков, позволяющей сравнивать их между собой и прогнозировать возможное число метеоров в ночь наблюдений на основе многолетних измерений. Его численное значение определяется числом зарегистрированных в зоне наблюдений метеоров с пределом по яркости 6.5^m и редуцируется на всю видимую полусферу по формуле:

$$ZHR = F \cdot r^{6.5-lm} \cos^{-1}(z) \cdot p \frac{n}{T_{eff}} \quad (3.1)$$

r – популяционный индекс,

l_m – предельная видимая звёздная величина замечаемых метеоров во время наблюдений,

z – зенитное расстояние радианта,

p – коэффициент замечаемости,

n – число замеченных метеоров,

T_{eff} – эффективное время наблюдения,

F – корректирующий фактор - «открытость» неба, который вносит поправки в случае облачности в период наблюдений.

Популяционный индекс r :

Этот индекс отражает отношение числа наблюдавшихся метеоров яркостью $(m+1)$, к числу метеоров яркостью m . Популяционный индекс может быть оценен из наблюдений для каждого потока (и для спорадического фона), и дать характеристику распределения метеорных тел в потоке как функции их яркости. Типичные оценки r , относящиеся к поточным метеорам, колеблются от 2.0 (для ярких метеоров) до 3.5 (для слабых метеоров). Зачастую этот показатель может отличаться для ярких и слабых метеоров разных потоков.

Обычно считается, что чем меньше r , тем старше поток. Это вытекает из естественного представления о том, что со временем большинство мелких метеороидов, которые могут стать причиной высоких r , покидают поток под действием на метеороидные частицы негравитационных сил. Таким образом, малые значения r указывают на то, что в потоке преобладают более яркие метеоры. Для спорадических метеоров r приблизительно равен 3, что, возможно, соответствует их принадлежности к самым старым, сильно рассеянными потокам.

Предельная звездная величина l_m :

В формуле для вычисления ZHR используется видимый предел звездной величины метеора, характеризующий качество атмосферы в момент наблюдения. Оно легко определяется по яркости предельно различимых в поле зрения звезд, и используется для оценки предельной величины доступных наблюдению метеоров. Но формула для вычисления ZHR была впервые применена для визуальных наблюдений, поэтому предел звездной величины не превышал 6.0^m . Для наблюдений слабых метеоров (телевизионным методом) необходимо либо ограничиваться 6.5^m , либо проводить редукцию для метеоров слабее 6.5^m .

Поправка за зенитное расстояние радианта z :

От высоты радианта зависит число метеоров, попадающих в поле зрения наблюдателя, то есть в ту наклоненную по отношению к направлению движения метеоров область атмосферы, в которой они наблюдаются. При этом следует обязательно учитывать тот факт, что радиант меняет свое положение в течение ночи вследствие вращения Земли вокруг своей оси.

Коэффициент замечаемости p :

Данный коэффициент характеризует долю замеченных метеоров определенной яркости из их полного числа.

Условная 100% замечаемость реализуется при визуальных наблюдениях только для самых ярких метеоров ($+3^m$ или ярче) непосредственно в поле зрения глаза, а более слабые метеоры замечаются реже. Метеоры $+6$ звездной величины замечаются в 1% случаев [10]. Но свойства глаза таковы, что часть метеоров замечается «боковым зрением», которому слабые метеоры недоступны. Поскольку при вычислении ZHR должно быть учтено полное число метеоров до $+6,5^m$, то оно вычисляется с помощью величины p . При этом не учитываются свойства глаза

(ограниченность поля зрения глаза, влияние свойств глаза на наблюдения слабых метеоров [10]). Оценить коэффициент замечаемости с высокой точностью невозможно при визуальных наблюдениях.

Корректирующий фактор F:

Значение **F** определяется как доля чистого неба в поле зрения в течение определенного периода времени (обычно 1 часа). Если в процессе наблюдений изменялась процентная доля незакрытой части поля зрения (например, из-за облачности), то наблюдатель должен внести эту поправку при вычислении ZHR.

F вычисляется следующим образом:

$$F = \frac{1}{(1 - k)} \quad (3.2)$$

k – доля закрытости наблюдаемой части неба (т.е. если при наблюдениях небо чистое, то **k** = 0, если 10% поля зрения покрывают облака, то **k** = 0.1 и т.п.).

ZHR применяется и для телевизионных наблюдений. При телевизионном методе наблюдений мы фиксируем все метеоры с яркостью выше установленного порога, попавшие в поле зрения телекамеры, поэтому коэффициент **p** считается равным 1 (т.е. 100%) для всех метеоров до этого порога.

ZHR был предложен для сопоставления относительной численности различных метеорных потоков, которые наблюдались визуальным методом. Соответственно, суточная метеорная активность в форме ZHR является формальной суммой активности метеорных потоков. А полный приток метеорного вещества вычисляется как суммарное число ZHR для всех известных метеорных потоков и спорадических метеоров. Из-за сильной неопределенности в оценках предела замечаемости при визуальных

наблюдениях, редукция наблюдаемой численности до $+6.5^m$, оказывается недостаточно обоснованной.

По традиции визуальных методов применение ZHR для оценки активности метеорных потоков до сих пор используется и при телевизионных методах. Необходимо заметить, что телевизионный метод регистрации является объективным, а предельная звездная величина регистрируемых метеоров однозначно определяется порогом чувствительности телевизионной аппаратуры, благодаря чему данные, полученные телевизионным методом, позволяют объективно и точно вычислить реальную плотность метеорных тел при их пересечении с Земной орбитой.

Обычно при визуальных наблюдениях область визирования ограничивается областью максимальной чувствительностью глаза (в круге радиусом 30 градусов) [10]. Справедливость экстраполяции таких наблюдений на остальную часть небосвода, в 5 раз большую по размерам, представляется слабой.

Также на краях поля зрения глаза замечаемость метеоров снижается, и их яркость определяется с большими ошибками [10], данные особенности при вычислении ZHR не учитываются. Телевизионные камеры обладают полями зрения от нескольких десятков градусов до 180 квадратных градусов (см. Приложение А). Камеры могут быть направлены в любую точку небесной сферы (либо в зенит, либо в радиант метеорного потока, либо в другой участок неба) и на высоте 100 км камеры будут иметь различные наблюдательные поля зрения. Поэтому важно при определении притока метеорного вещества учитывать условия регистрации метеоров. ZHR формально вычисляется для всего диапазона яркостей метеоров (до $+6.5^m$), хотя и невозможно оценить вклад в ZHR метеоров разной яркости.

Для определения притока метеорного вещества на Землю и оценки их опасности для космической деятельности важно знать направления прихода

частиц, их энергию и их пространственную плотность. Телевизионный метод позволяет получать объективные оценки численности метеоров, их распределения по звездным величинам, определять направления их прихода и орбиты. Для количественной оценки уровня притока метеорного вещества необходим подход, который будет использовать объективный анализ наблюдений без дополнительных редуций. Поэтому был предложен альтернативный метод, который описан в параграфе 3.1.2.

3.1.1.1. Значение ZHR по данным телевизионных наблюдений

В Главе 1 были описаны телевизионные метеорные системы, которые мы используем при метеорных наблюдениях.

По данным наблюдений на камере FAVOR было вычислено значение ZHR для метеорного потока Ориониды за 2006 г. На рисунке 3.1 показано распределение значений ZHR для потока Ориониды в 2006 г. по данным Международной метеорной организации (IMO) [8], Голландского метеорного сообщества (DMS) [20] и ИНАСАН. Для сравнения наших данных и других групп мы ограничились выборкой метеоров из наших регистраций до $+6.5^m$. Данные ZHR, опубликованные Международной метеорной организацией, были основаны в значительной степени на визуальных наблюдениях, т.е. с использованием упомянутых выше редуций. ZHR, полученный Голландской метеорной группой и ИНАСАН, основываются на телевизионных наблюдениях, т.е. на объективных регистрациях метеоров. Из рисунка 3.1 видно, что характер изменения активности метеорного потока со временем одинаков у всех наблюдателей (пик активности Орионид в 2006 г. наблюдался 21 октября). Но при этом сравнение оценок распределения ZHR для них провести не возможно, так как в публикациях не даны диапазоны ошибок измерений.

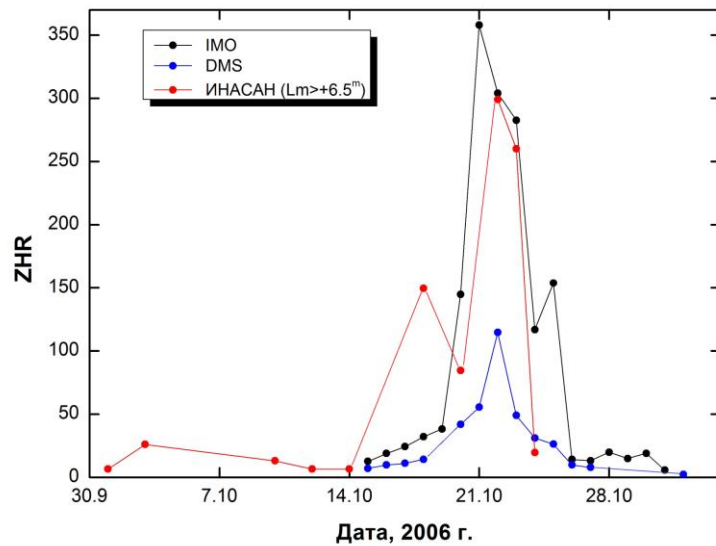


Рис. 3.1. Распределение ZHR для Орионид по наблюдениям 2006 г.

По результатам наблюдений на телевизионных камерах типа PatrolCa (см. Глава 1) в 2012 – 2013 гг., были вычислены значения ZHR для метеорного потока Персеиды. На рисунках 3.2 и 3.3 представлено распределение ZHR в 2012 и 2013 гг. по данным ИНАСАН (красные точки) и визуальным данным IMO (треугольники).

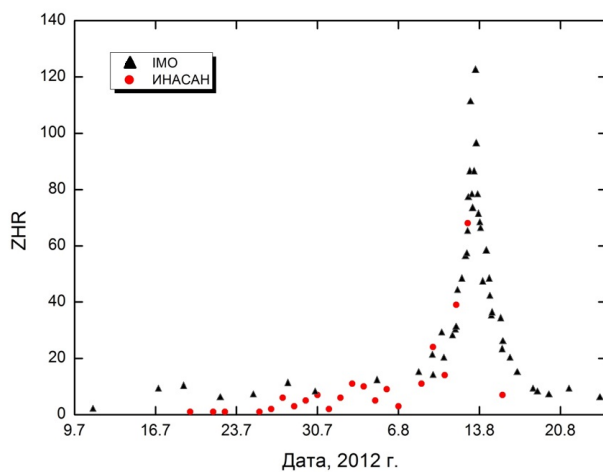


Рис. 3.2. Распределение ZHR для метеорного потока Персеиды в 2012г.

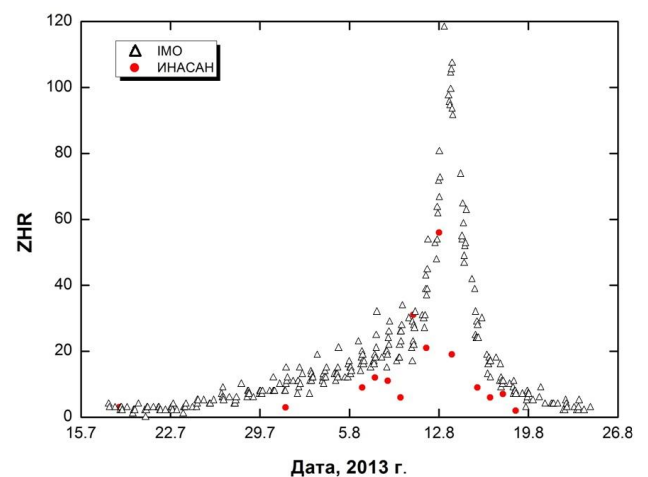


Рис. 3.3. Распределение ZHR для метеорного потока Персеиды в 2013г.

Из графиков (Рис. 3.2 - 3.3) видно совпадение характера активности, задаваемой в форме ZHR, по нашим данным (точки) и по данным IMO (треугольники).

В настоящее время с помощью визуального метода проводятся метеорные наблюдения только любителями. Данные о наблюдениях собираются Международной метеорной организацией. В то же время в последние годы количество метеорных наблюдений, проводимых с помощью телевизионной техники (в том числе и любителями), постоянно увеличивается. Метеорная астрономия накопила массив данных об активности метеорных потоков за десятки лет наблюдений. Преимущество текущих исследований с применением современной техники регистрации и накопленных сведений за прошлые десятилетия приходится обеспечивать путем вычисления ZHR и по данным телевизионных регистраций.

3.1.2. Индекс Метеорной Активности (ИМА)

Другим методом для исследования притока метеорного вещества на Землю является Индекс Метеорной Активности [99, 100]. Для оценки уровня притока метеорного вещества на Землю или потока метеорных частиц пересекающих КА (с условной площадью сечения 1 м^2) требуется знать число метеоров, проходящих за единичный временной интервал через единичную ортогональную площадку для выделенного направления. Для определения плотности потока метеорных частиц было предложено использовать Индекс Метеорной Активности (ИМА) [99].

Индекс Метеорной Активности (ИМА) - *это число частиц условного потока однородной пространственной плотности, пересекающих единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению прихода частицы за единичный интервал времени* [99].

В предложенном методе вычислений ИМА, каждый наблюдавшийся метеор предлагается рассматривать как элемент некоторого потока, состоящего из частиц одинаковой массы, в котором частицы имеют равномерную пространственную плотность, одинаковые скорости и общий радиант, который действует в течение одной наблюдательной ночи, и при этом плотность частиц в потоке такова, что за наблюдательную ночь от него регистрируется только один метеор. Поэтому каждый зарегистрированный метеор рассматривается как элемент условного потока с радиантом, совпадающим с радиантом самого метеора. Частоту регистрации метеоров с одного направления можно рассматривать как индикатор пространственной плотности составляющих реальный метеорный поток элементов. Данный подход соответствует классическому представлению о метеорных потоках как ансамблях метеорных частиц на общей орбите.

Спорадические метеоры, которые случайным образом распределены по времени и направлению полета, в соответствии с данным подходом, можно представить как индикаторы реально существующих потоков, но с низкой пространственной плотностью.

Формула для вычисления N_i (часового числа метеоров условного метеорного потока, проходящего через единичную площадку, ортогональную направлению прихода) (ИМА) выглядит следующим образом [99, 100]:

$$N_i = n_i \cdot k_i / Q_i \quad (3.3)$$

где индекс i указывает на рассматриваемый i -тый метеор,

$k_i = 1^h / T_i$ – коэффициент редукции числа наблюдавшихся метеоров за время наблюдений T_i к часовому интервалу,

T_i - продолжительность наблюдений в течение ночи (в часах),

n_i - наблюдаемое число метеоров с одинаковым радиантом. Так как мы рассчитываем ИМА для каждого условного потока, представленного одним зарегистрированным метеором, то $n_i=1$.

$$Q_i = \sin \Psi_i \cdot S_i^* \quad (3.4)$$

Q_i – площадь проекции площадки, выделяемой в атмосфере полем зрения камеры, на плоскость, перпендикулярную направлению прихода частицы, породившей метеор (направлению на его радиант),

Ψ_i - угол, равный элонгации метеора (расстоянию от точки радианта до точки начала метеора),

S_i^* - пространственная площадь площадки, в которой происходит наблюдение метеоров:

$$S_i^* = F_i \cdot h_i^2 \cdot \sin^2 a_i / \cos^2 Z_i \quad (3.5)$$

где h_i – высота площадки (области атмосферы, в которой происходят метеорные явления), от поверхности Земли в км (мы принимали $h=100$ км),

a_i – угловой размер поля зрения, в котором ведутся наблюдения метеоров; метеор считается пересекающий площадку, если он начинается в ней.

Z_i - зенитное расстояние центра поля зрения, в котором наблюдается метеор,

F_i - корректирующий фактор, учитывающий свободную от облачности часть поля зрения:

$$F_i = 1 / (1 - l_i) \quad (3.6)$$

где l_i – доля затемнения в поле зрения (доля поля зрения, которая закрыта облаками). Для наших телевизионных наблюдений, проводившихся в ясную погоду, мы принимали $F_i=1$.

Для метеорных наблюдений используют «коэффициент замечаемости» p , который характеризует долю замеченных метеоров из общего числа.

Тогда часовое число метеоров условного метеорного потока (ИМА) выглядит следующим образом:

$$N_i^* = N_i / p \quad (3.7)$$

Как видно из приведенных формул, ИМА учитывает условия наблюдений (погоду), и направления движения метеора. Для телевизионных наблюдений коэффициент замечаемости принимается равным 1 (для всех метеоров с яркостью выше порога чувствительности регистратора).

При существовании метеоров с близкими направлениями (радиантами) условных метеорных потоков могут быть выявлены кластеры, охватывающие тесные области. Если выделяемая область не превышает $3^\circ \div 5^\circ$, то ее можно рассматривать как радиант реального метеорного потока, для которого часовое число метеоров равно $\sum N_i$ из всей области кластера радиантов.

Те метеоры, которые не удается связать с реальными метеорными потоками, относятся к спорадическим. За одну ночь наблюдений невозможно выявить характер распределения по направлению прихода спорадических метеоров, но оно может быть определено из анализа большого массива наблюдений метеоров.

На рисунке 3.4 показано распределение спорадических метеоров по положению их индивидуальных радиантов (вычисленных из базисных телевизионных регистраций) [11]. Распределение представлено для двухгодичного периода (2007 – 2008 гг.), поэтому не дает представления о его характере с изменением солнечной долготы. Тем не менее, можно сделать вывод о том, что спорадическая составляющая метеорных явлений практически изотропна, а возможные кластеры их радиантов могут

представлять собой радианты еще не выявленных (или пока не подтвержденных) малых метеорных потоков.

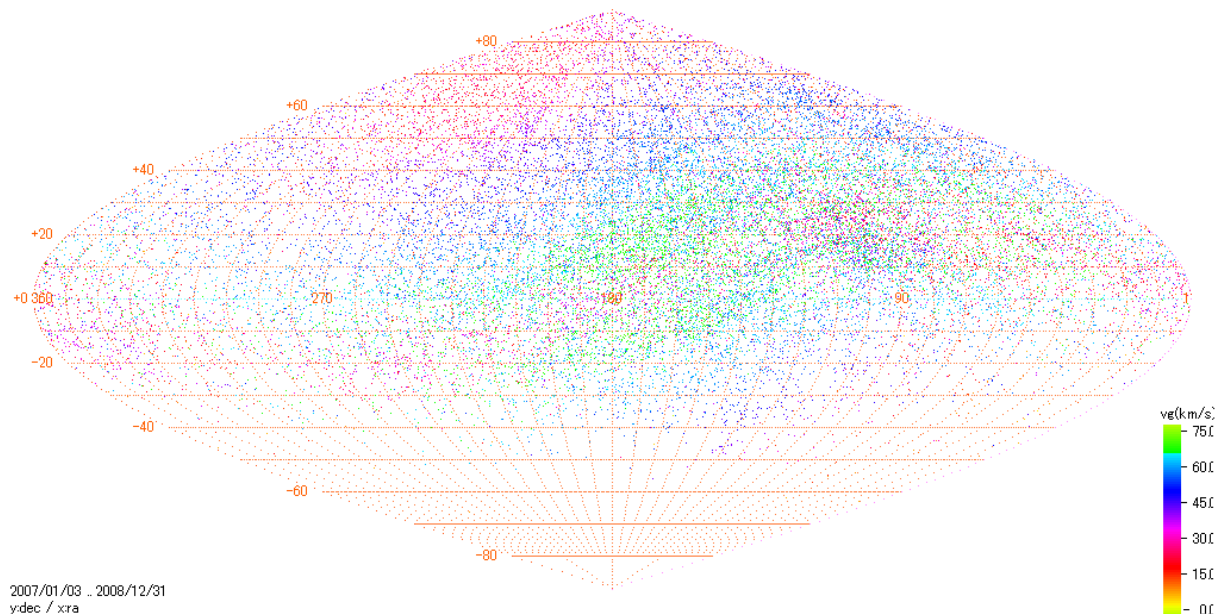


Рис. 3.4. Распределение радиантов спорадических метеоров по данным базисных телевизионных наблюдений 2007 – 2008 гг. [11]

Приток метеорного вещества (ИМА) на всю Землю в единичный интервал времени (со стороны наблюдаемого полушария) вычисляется следующим образом [99]:

$$N_{\oplus} = \pi \cdot R_{\oplus}^2 \cdot \Sigma N_i^* \quad (3.8)$$

где $\pi \cdot R_{\oplus}^2$ – площадь поперечного сечения Земли приведенная в тех же единицах, что и Q_i .

Для характеристики притока вещества как функции масс частиц (яркости метеоров m) необходимо измерить N_i^* для каждой звездной величины. Наблюдаемая яркость метеора $m_{i,z}$ на зенитном расстоянии z_i связана с его яркостью в зените $m_{i,z=0}$ [10]:

$$m_{i,z=0} = m_{i,z} + 5 \lg(\cos z_i) \quad (3.9)$$

Тогда приток метеорных частиц (ИМА), порождающих метеоры яркостью m , на всю Землю в единичный интервал времени (со стороны наблюдаемого полушария) [99]:

$$N_{\oplus}(m) = \pi \cdot R_{\oplus}^2 \cdot \sum N_i^*(m) \quad (3.10)$$

где суммирование ведется по i для каждого значения яркости метеора m в течение единичного интервала времени.

Поскольку метеоры принципиально не наблюдаемы при удалении от радианта на 90° и более, а вблизи предельной элонгации вероятность прохождения метеорной частицы через зону наблюдений очень мала, ИМА может рассматриваться как уверенный индикатор притока метеоров из области неба с радиусом до 70° от центра поля зрения (при больших элонгациях размер области индикации метеоров нельзя считать репрезентативным). В наших исследованиях все определения ИМА основаны на регистрациях метеоров в зенитной области (PatrolCa (см. Глава 4)) или при наклонном положении поля зрения (FAVOR), то есть метеоров с радиантами в северном полушарии.

3.1.2.1. ИМА по наблюдениям на камере FAVOR в августе – декабре 2006 г.

Наблюдения на телевизионной камере FAVOR проводились в период с 2006 по 2009 гг. [28, 89] на Северном Кавказе в филиале «СОН Архыз» ОАО «НПК СПП» (см. Главу 1).

Порог чувствительности данной системы позволяет регистрировать метеорные явления с яркостью, сопоставимой с предельной звездной величиной, т.е. на уровне $+10^m \dots +11^m$. Однако самые слабые метеоры регистрируются на единичных кадрах, что не позволяет вычислить угловую скорость и определить направление движения частицы. Поэтому для

автоматической выборки метеоров был установлен порог яркости, при котором метеор фиксируется как минимум на двух кадрах. Этот порог составил $+9.0^m$, что существенно выше порога чувствительности программного селектора метеорных явлений, и это дает нам основание уверенно считать, что регистрировались все метеоры, попадающие в поле зрения и имеющие яркость выше порогового значения $+9.0^m$. Таким образом, наблюдения на камере FAVOR позволяют регистрировать метеоры, которые представляют опасность для полетов КА (свыше 10^{-6} г) (см. Глава 1). Для того чтобы оценить вклад метеоров, принадлежащих к потокам и спорадических, в приток вещества был выбран массив наблюдения с август по декабрь 2006 г. В течение этого периода было зарегистрировано 3734 метеоров (Таблица 3.1).

Таблица 3.1. Результаты наблюдений на камере FAVOR в период с августа по декабрь 2006 г.

Месяц/ 2006 г.	Продолжительность наблюдений, час	Общее количество метеоров	Число поточных метеоров
Август	47.7	911	309
Сентябрь	49.3	671	329
Октябрь	102.8	1131	658
Ноябрь	49.3	486	131
Декабрь	66.8	525	201
Всего:	315.8	3734	1628

Все метеорные регистрации прошли координатную обработку. Наблюдения на камере FAVOR проводятся в режиме односторонних наблюдений, поэтому мы не всегда можем вычислить индивидуальные радианты для каждого метеора (как в случае базисных наблюдений). Но для

метеоров, зарегистрированных на нескольких телевизионных кадрах, могут быть определены радианты метеоров с помощью геометрического метода [101]. Отождествление метеоров с потоками проводилось следующим образом. Вычислялось расстояние от большого круга с метеорным треком до радианта проверяемого потока, далее накладывалось условие, что данное расстояние не должно превышать 2° . Для «длинных» метеоров применялось дополнительное условие: элонгация метеора не должна быть меньше его длины. В пределах поля зрения камеры угловая скорость метеоров одного потока не должна отличаться более чем на 10%. В процессе отождествления использовалось несколько каталогов радиантов метеорных потоков [2, 102, 103].

На каждую дату наблюдений Индекс Метеорной Активности отдельных потоков определялся как сумма значений $N_{\oplus}$ (уравнение 3.8) для всех метеоров, отождествленных с исследуемым потоком и наблюдавшихся в данную ночь.

В отношении спорадических метеоров, чья принадлежность к потокам не установлена, для вычисления ИМА использовалась экстраполяция. Она основана на предположении:

- радианты спорадических метеоров равномерно распределены по небу (Рис. 3.4), поэтому полный ИМА должен быть увеличен пропорционально количеству зафиксированных спорадических метеоров в области наблюдений, т.е. для всей наблюдаемой полусферы (с северного полушария);
- наблюдаемые метеоры в одном видимом полушарии не должны по параметру численности отличаться от метеоров в другом (невидимом) полушарии, поэтому при вычислении полного ИМА можно удвоить полученный из наблюдений результат притока метеорного вещества на Землю.

Таким образом, ИМА может быть использован, как для характеристики метеорных потоков с известным направлением прихода частиц, так и для определения общей характеристики всего притока метеорного вещества независимо от направления. Во втором случае спорадическую составляющую следует считать относящейся ко всей наблюдаемой полусфере, а ее полный вклад в ИМА удвоить за счет ненаблюдаемого полушария.

На рисунках 3.5 – 3.6 представлены значения ИМА в период наблюдений с августа по декабрь 2006 г. по результатам наблюдений на камере FAVOR [104]. Черные колонки показывают значения ИМА для поточных метеоров, белые колонки – ИМА для спорадических метеоров. Отсутствие значений ИМА в некоторые даты на рисунках 3.5 – 3.6 означают, что для этих дат ИМА не вычислялось, так как не велись наблюдения. На рисунках 3.5 – 3.6 представлены расчеты ИМА, вычисленные для Земли (левая шкала) и для космического аппарата (КА – сфера с площадью поперечного сечения 1 м^2) (правая шкала).

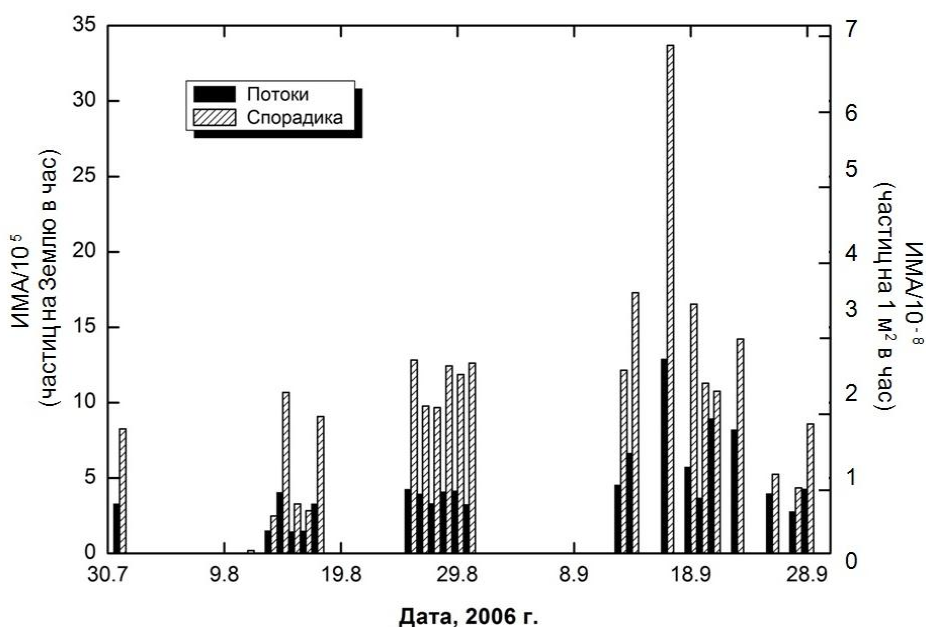


Рис. 3.5. Распределение ИМА в период август - сентябрь 2006 г.

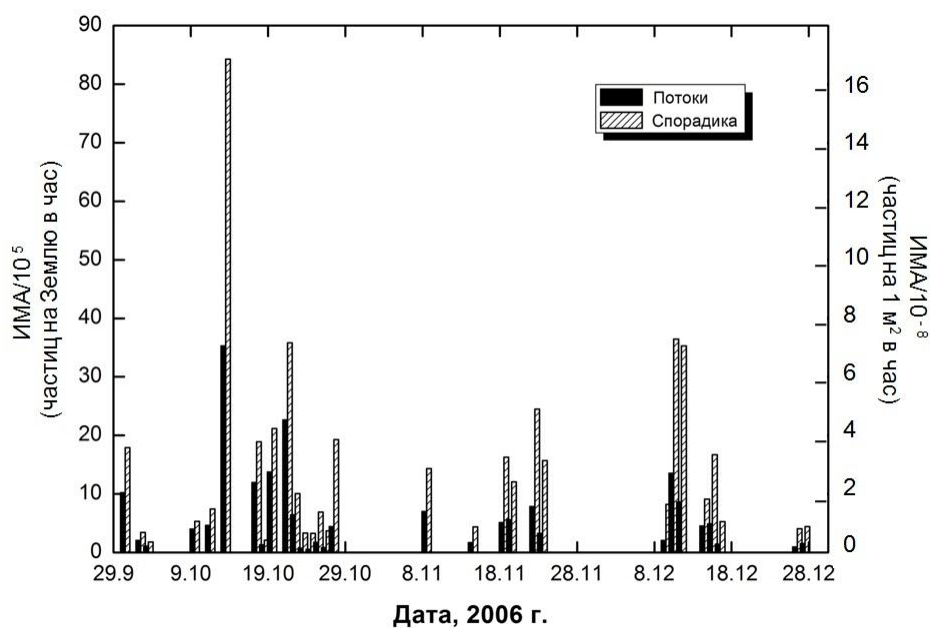


Рис. 3.6. Распределение ИМА в период октябрь – декабрь 2006 г.

ИМА принимал значение от $84 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^5$ (частиц в час на всю Землю) в течение наблюдаемого периода. Разброс значений ИМА вызван не только неоднородностью самих потоков, но и условиями наблюдений (например, эти потоки наблюдались нами при разных элонгациях поля зрения от их радиантов – от $\Psi=3^\circ$ до $\Psi=80^\circ$). Необходимо подчеркнуть, что все вычисленные значения ИМА основаны на массиве наблюдений по большей части слабых метеоров, которые могут наблюдаться лишь при малых элонгациях; это обстоятельство приводит к трудно определяемому диапазону углов прихода спорадических метеоров, и к завышению спорадической составляющей ИМА.

Просуммировав значение ИМА по месяцам в 2006 г., мы получили значения, показанные в таблице 3.2.

По данным из таблицы 3.2 видно, что ИМА, полученное для октября, больше чем в другие месяцы. Это связано не только с тем, что в октябре действует сильный метеорный поток Ориониды, но и с тем, что в 2006 г. наблюдался всплеск активности данного потока. Анализ результатов наблюдений метеорного потока Ориониды описан в параграфе 3.2.

Таблица 3.2. Значение ИМА за период с августа по декабрь 2006 г.

Месяц/2006 г.	Общее значение ИМА ИМА /10 ⁵ (частиц на Землю в час)	Значение ИМА от потоков ИМА /10 ⁵ (частиц на Землю в час)
Август	144	38
Сентябрь	196	62
Октябрь	367	122
Ноябрь	118	31
Декабрь	157	38

В течение ночи камера FAVOR была направлена в область наблюдений космического телескопа HETE-2 (High Energy Transient Explorer) [105]. Такое расположение камеры повлияло на количество зарегистрированных метеоров из различных потоков. Поэтому в таблице 3.2. значение ИМА в августе и декабре сравнительно невысокое, хотя сильный вклад в приток метеорного вещества должны вносить действующие в эти периоды метеорные потоки Персеиды и Геминиды. Но тогда камера располагалась далеко от радиантов этих потоков (и элонгации обоих сильных потоков (Персеиды и Геминиды) оказывались близки к 90 градусам). Приведенные значения ИМА следует рассматривать как его нижний предел.

3.2. Индекс Метеорной Активности сильных метеорных потоков

Для оценки притока метеорного вещества на Землю от потоков (в виде ИМА) были рассмотрены несколько ежегодных метеорных потоков: Ориониды, Северные и Южные Тауриды. Исследования для данных потоков были проведены за трехлетний период наблюдений с 2006 по 2008 гг.

Как было сказано выше, все метеоры, зафиксированные на камере FAVOR, прошли этап отождествления с известными метеорными потоками.

В результате за время действия потоков Северные и Южные Тауриды 25.09 – 25.11 (одновременно с этими потоками с 02.10 по 07.11 действовал поток Ориониды) за 3 года наблюдений было зафиксировано 4667 метеоров [106, 107]. Количество отождествленных метеоров с исследуемыми потоками представлено в таблицах 3.3 и 3.4. Таблица 3.3 подтверждает репрезентативность полученного наблюдательного материала для анализа этих потоков.

Таблица 3.3. Результаты наблюдений метеорных потоков Ориониды, Северных и Южных Таурид в 2006 – 2008 гг.

Год наблюдений	Время наблюдений (25.09 -25.11), час	Количество Орионид	Количество Северных Таурид	Количество Южных Таурид
2006	152.5	194	96	101
2007	143.8	83	47	58
2008	219.4	172	96	111

Таблица 3.4. Результаты наблюдений метеорных потоков Ориониды, Северных и Южных Таурид в 2006 – 2008 гг.

Год наблюдений	Общее количество метеоров (25.09 - 25.11)	Доля числа Орионид от общего числа метеоров, %	Доля числа Северных Таурид от общего числа метеоров, %	Доля числа Южных Таурид от общего числа метеоров, %
2006	1788	17	6	6
2007	897	10	5.3	6.5
2008	1982	10	5	6

3.2.1. Метеорный поток Ориониды 2006 – 2008 гг.

Ориониды (ORI) - это относительно сильный метеорный поток. Период действия потока с 2 октября по 7 ноября, максимум активности приходится на 21 октября [108]. Радиант потока в период максимума активности

расположен в области $\alpha = 95^\circ$ и $\delta = +16^\circ$. Суточный дрейф радианта составляет: $\Delta\alpha = +1.2^\circ$, $\Delta\delta = +0.1^\circ$ [8]. Скорость входа метеоров данного потока в атмосферу Земли около 66 км/с. Родительским телом метеорного потока Ориониды является комета Галлея (1P/Halley).

В период действия потока в 2006 – 2008 гг. было зафиксировано 449 метеоров принадлежащих потоку Ориониды (Рис. 3.8, Таблицы 3.3 – 3.4).

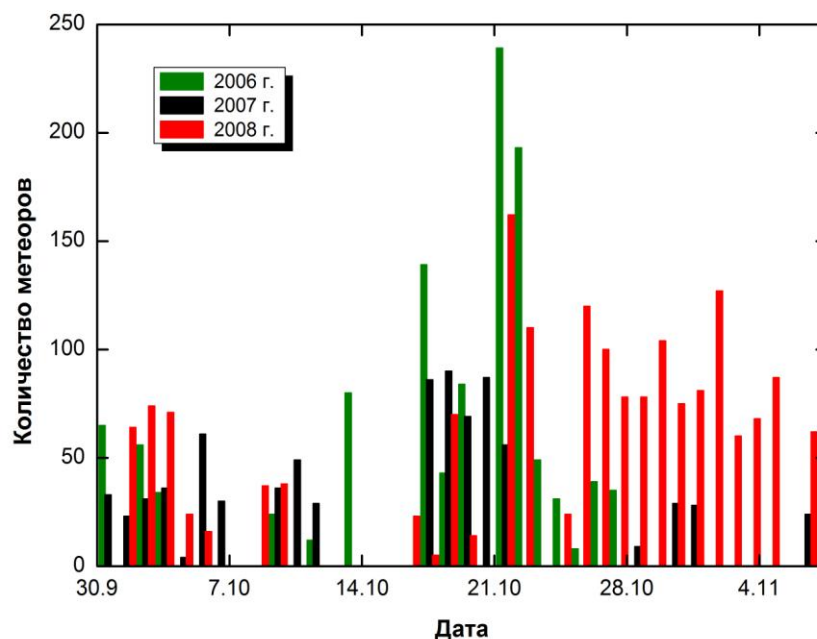


Рис. 3.7. Распределение количества зарегистрированных метеоров потока Ориониды в 2006 – 2008 гг.

Из таблиц 3.3–3.4 и рисунка 3.7 видно, что численность Орионид в 2006 г. сильно отличается от их численности в 2007 и 2008 гг., это связано со всплеском активности Орионид в этом году. Наблюдения потока Ориониды проводились и другими авторами, которые также отметили повышенную активность в 2006 г. [109–111].

В 2009 г. телевизионные [112] и радарные [113] наблюдения Орионид также показали всплеск активности, что подтверждает неоднородность потока и результаты его моделирования [114].

3.2.1.1. Распределение Орионид по яркости в 2006 – 2008 гг.

Звездная величина оценивалась в максимуме яркости метеорного трека путем визуального сравнения с яркостью звезд вблизи метеора. Т.е. определялась видимая звездная величина метеора по методике, принятой для анализа визуальных наблюдений. Ошибка такой оценки, как правило, составляет $\pm 0.5^m$, но может достигать $\pm 1.0^m$. Эти ошибки связаны с тем, что для сравнения яркостей используются изображения звезд различных спектральных классов, которые при регистрации в широкой полосе без светофильтров могут давать сильные различия с яркостями, измеренными для полосы V.

Примененный метод не позволяет измерить общий интегральный блеск метеора и его изменения вдоль трека. Но так как все эти ошибки и отличия носят систематический характер и одинаковы для метеоров одного потока, полученные относительные распределения метеоров по яркостям сохраняют свой реальный вид и могут быть использованы для анализа. В Главе 4 рассмотрен другой метод определения звездной величины.

На рисунке 3.8 представлено распределение по яркости числа метеоров потока Ориониды за 3 года наблюдений. Число метеоров определенной звездной величины рассчитывалось как число метеоров каждой звездной величины с шагом 0.5^m , зарегистрированных камерой (за ночь) за весь период действия потока.

Как видно из рисунка 3.8 основную часть потока составляют метеорные частицы со звездной величиной от $+4.5^m$ до $+7.0^m$. Полученный характер спада количества слабых метеоров в районе $+7.5^m$ на рисунке 3.8 может не соответствовать действительному распределению частиц по яркости в данной области, несмотря на превышение их яркости порога обнаружения регистратора. В области метеоров с яркостью менее $+8.0^m$ полученное распределение может быть искажено селекционным эффектом,

который обусловлен влиянием ошибок наблюдательной аппаратуры и использованного метода определения яркости метеора.

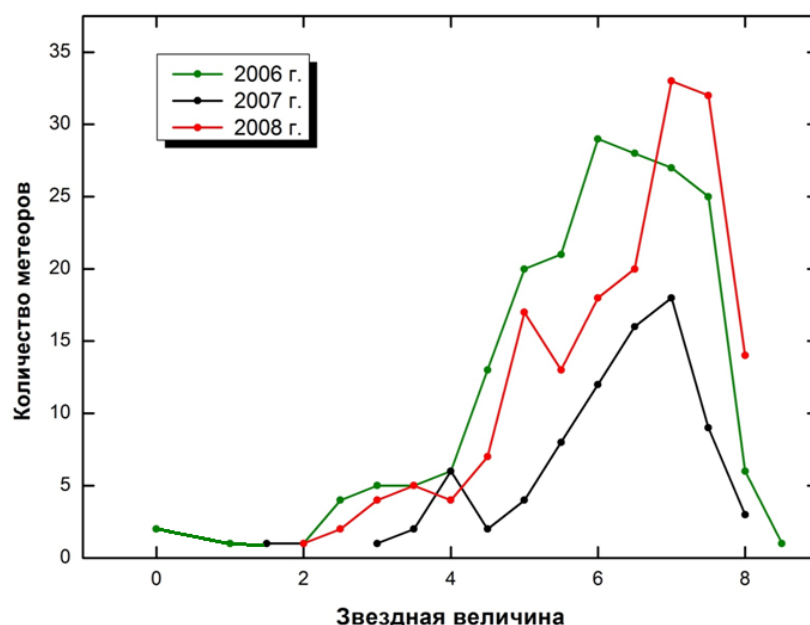


Рис. 3.8. Распределения Орионид по звездной величине в 2006 – 2008 гг. по регистрациям на камере FAVOR [106]

3.2.1.2. ИМА Орионид в 2006 – 2008 гг.

Индекс Метеорной Активности метеоров, принадлежащих исследуемому потоку, вычислялся на каждую ночь наблюдений в 2006 – 2008 гг. для всего диапазона яркостей. Распределение ИМА Орионид за 3 года наблюдений представлено на рисунке 3.9 [106].

Так как метеорные частицы могут представлять угрозу для работы КА, то важно знать уровень метеорной опасности. Поэтому ИМА был рассчитан для КА (т.е. для сферы радиусом 1м). На шкале слева представлены данные ИМА, рассчитанные для всей Земли (Рис. 3.9), на правой шкале – ИМА, рассчитанный для условного космического аппарата (Рис. 3.9).

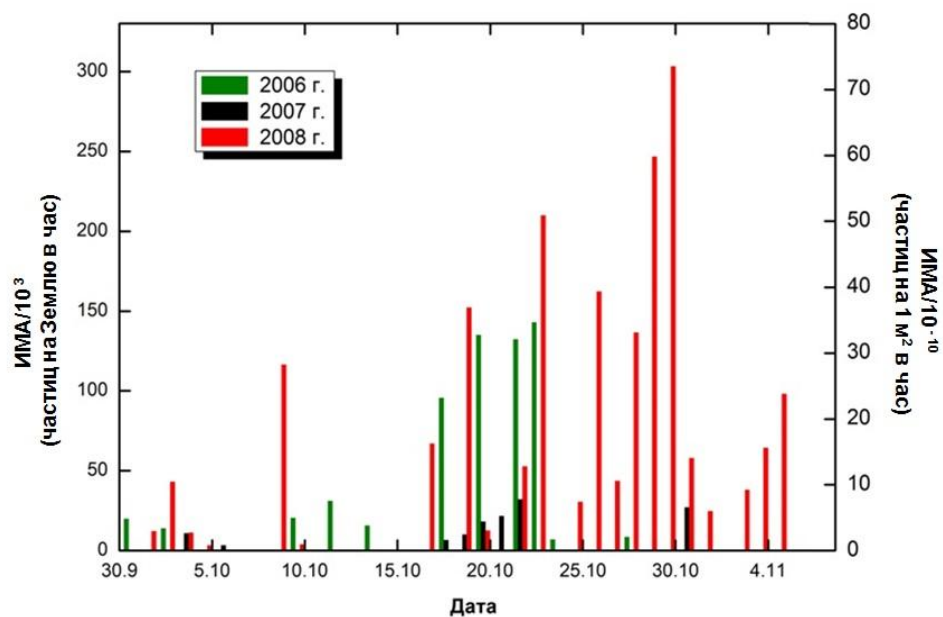


Рис. 3.9. Распределение ИМА Орионид в 2006 – 2008 гг.

В 2006 г. значение ИМА Орионид изменялось от $7 \cdot 10^3$ (частиц на Землю в час) и до $143 \cdot 10^3$ (частиц на Землю в час). В 2007 г. ИМА имело значения от $0.3 \cdot 10^3$ (частиц на Землю в час) до $32 \cdot 10^3$ (частиц на Землю в час). В 2008 г. – от $3.2 \cdot 10^3$ (частиц на Землю в час) до $303 \cdot 10^3$ (частиц на Землю в час) [106].

В период действия потока Ориониды значение ИМА, вычисленное для КА (1 м^2), изменялось: от $1.7 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час) до $35.4 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час) в 2006 г., от $0.1 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час) до $8 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час) в 2007 г. и от $3.3 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час) до $75 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час) в 2008 г [106].

Разброс значений ИМА может быть вызван как неоднородностью самого потока, так и ошибками интерпретации наблюдений двух типов. Так как камера FAVOR направлялась в разные участки неба и ее поле зрения могла быть удалено от радианта исследуемого потока, поэтому возможна переоценка реального потока метеоров за счет большой величины $\sin \Psi$ в уравнении 3.4 (например, этот поток наблюдался нами при разных элонгациях от $\Psi = 3^\circ$ до $\Psi = 80^\circ$).

Для определения притока на Землю метеорных частиц различной яркости (а значит, и различной массы), был вычислен ИМА потока для каждой звездной величины для всего периода наблюдений Орионид. Т.е. в уравнении 3.10 суммирование велось для всех метеоров одной и той же звездной величины.

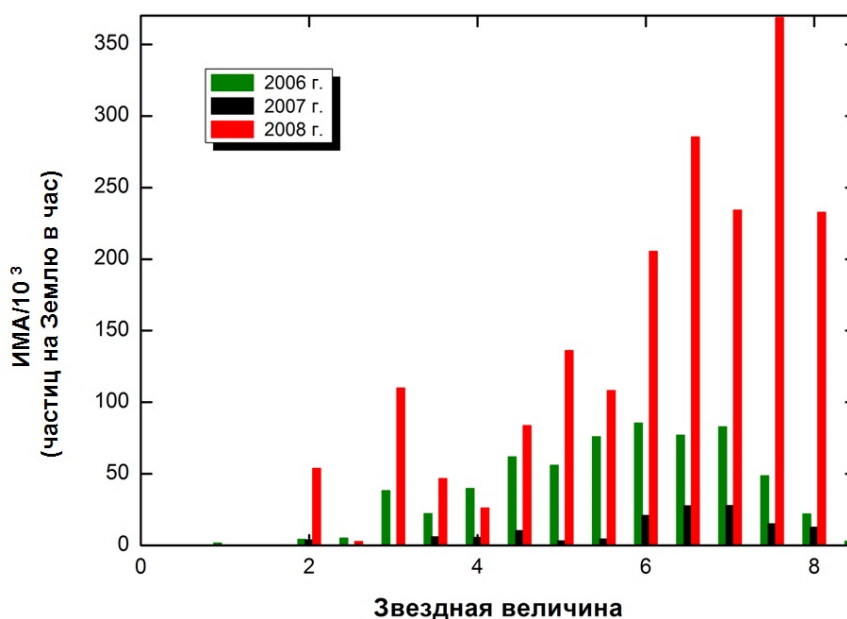


Рис. 3.10. Распределение ИМА Орионид по звездной величине 2006 – 2008 гг.

На рисунке 3.10 видно, что значение ИМА Орионид с уменьшением яркости увеличивается. Особенно это заметно для данных 2008 г., для 2006 и 2007 гг. этот эффект заметен значительно меньше.

3.2.2. Метеорные потоки Северные и Южные Тауриды 2006 – 2008 гг.

Тауриды являются очень старым метеорным потоком. Он состоит из двух ветвей, активных в течение длительного времени в осенние месяцы (или весенние в южном полушарии). Северные Тауриды (NTA) действуют с 25 сентября по 25 ноября [8]. Максимум активности приходится на 12 ноября со средним радиантом $\alpha=58^\circ$, $\delta=+22^\circ$. Суточный дрейф радианта составляет

$+0.8^\circ$ по прямому восхождению и $+0.3^\circ$ по склонению. Ветвь Южные Тауриды (STA) действуют с 25 сентября по 27 ноября [8]. Максимум активности – 5 ноября со средним радиантом $\alpha = 52^\circ$, $\delta = +15^\circ$. Суточный дрейф этого радианта составляет $+0.9^\circ$ по прямому восхождению и $+0.1^\circ$ по склонению [8]. Родительским телом данного потока (обеих ветвей потока Тауриды) является комета Энке (P1/Encke).

В период действия потоков Северные и Южные Тауриды с 2006 по 2008 гг. было зафиксировано 4419 метеоров. За данный период наблюдений было зафиксировано 239 метеоров из потока Северные Тауриды и 270 – из Южные Тауриды [107]. В таблицах 3.3 – 3.4 представлены результаты наблюдений. На рисунках 3.11 и 3.12 показано распределение числа метеорных частиц из данных потоков за весь наблюдаемый период.

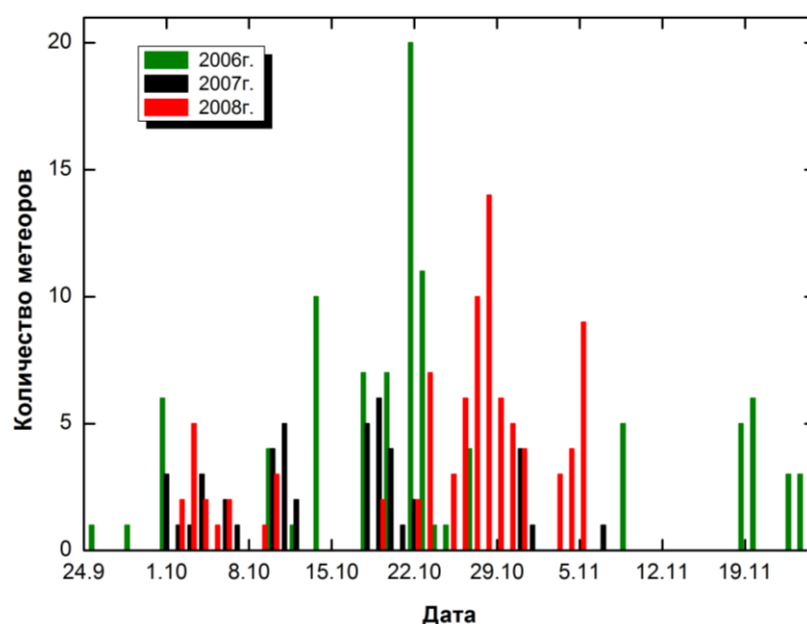


Рис. 3.11. Распределение количества зарегистрированных метеоров потока Северные Тауриды 2006 – 2008 гг.

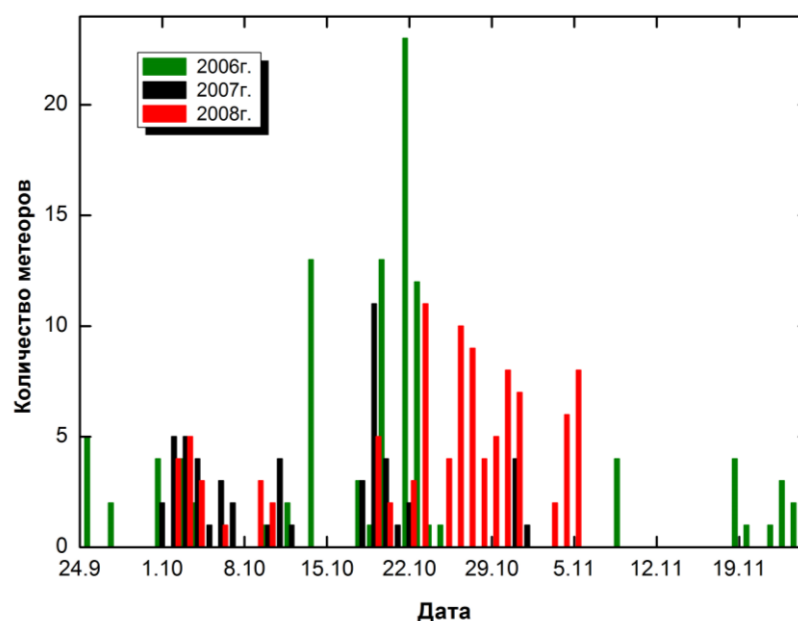


Рис. 3.12. Распределение количества зарегистрированных метеоров потока Южные Тауриды 2006 – 2008 гг.

3.2.2.1. Распределение Северных и Южных Таурид по яркости 2006 – 2008 гг.

Звездная величина для Северных и Южных Таурид, как и для Орионид, оценивалась в максимуме яркости метеорного трека путем визуального сравнения с яркостью звезд вблизи этого трека в том же кадре.

На рисунках 3.13 – 3.14 представлено распределение метеорных частиц потоков Северные и Южные Тауриды по яркости в период с 2006 по 2008 гг.

Из графиков видно, что преобладающее количество метеоров в этих потоках обладают яркостью в диапазоне $+4.5^m \div +7.0^m$ [107].

Как было сказано ранее (см. параграф 3.2.1.1), распределение метеоров слабее $+7.5^m$ подвержено влиянию различных ошибок и поэтому отмеченное падение численности в области частиц слабее $+7.5^m$ требует дополнительного анализа.

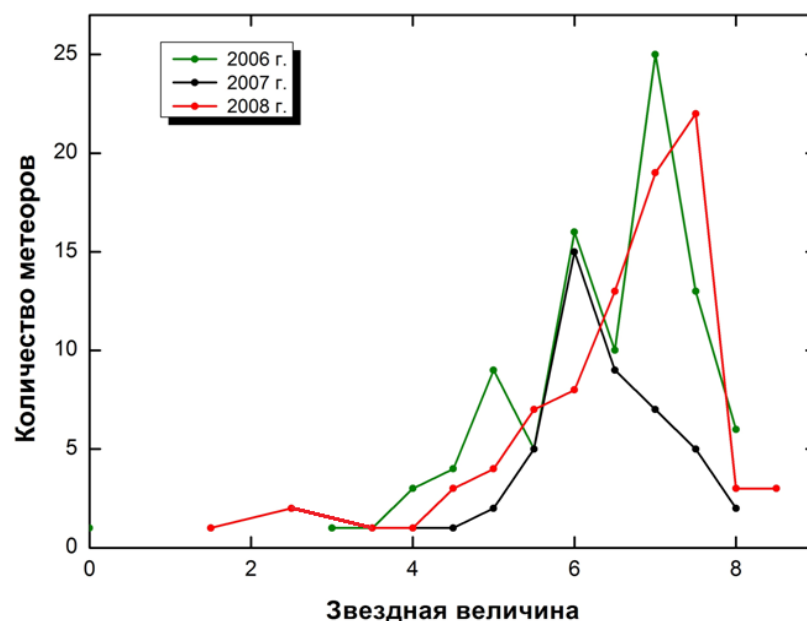


Рис. 3.13. Распределение Северных Таурид по звездной величине в 2006 – 2008гг.

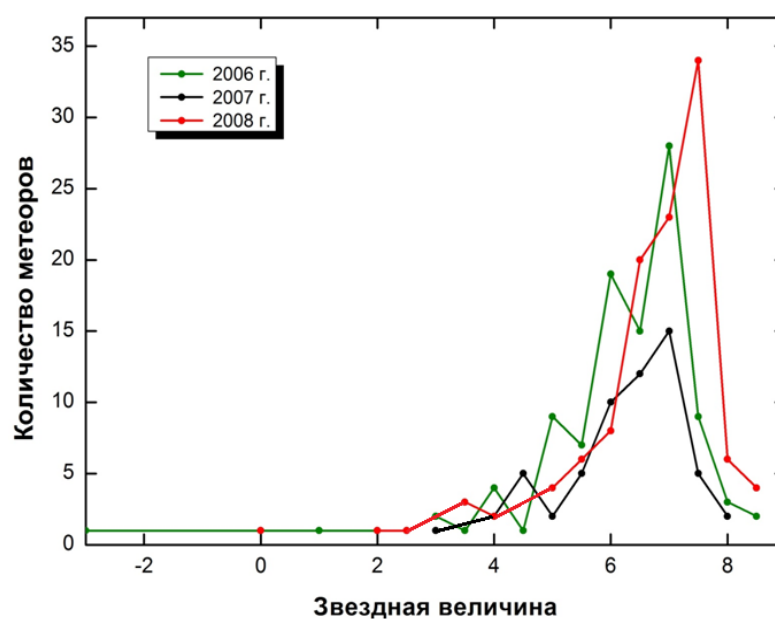


Рис. 3.14. Распределение Южных Таурид по звездной величине в 2006 – 2008гг.

3.2.2.2. ИМА Северных и Южных Таурид в 2006 – 2008 гг.

Для метеоров потоков Северные и Южные Тауриды, было вычислено значение ИМА по формуле 3.8. Распределение ИМА, рассчитанные для всей

Земли, на правой шкале – ИМА, рассчитанный для условного КА (т.е. для сферы радиусом 1 м).

Значения ИМА Северных и Южных Таурид в период наблюдений с 2006 по 2008 гг. представлены на рисунках 3.15 – 3.16.

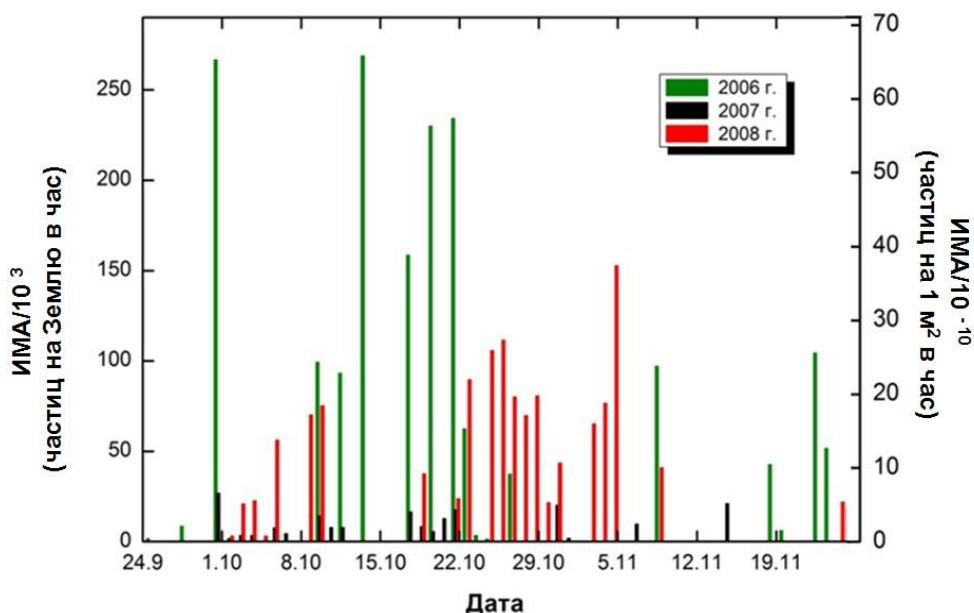


Рис. 3.15. Распределение ИМА Северных Таурид в 2006 – 2008 гг.

Таким образом, значение ИМА Северных Таурид в 2006 г. изменялось от $1 \cdot 10^3$ (частиц на поверхность Земли в час) ($0.3 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час)) 25 октября и до $268 \cdot 10^3$ (частиц на поверхность Земли в час) ($66 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час)) 14 октября. В 2007 г. ИМА имело значения от $1 \cdot 10^3$ (частиц на поверхность Земли в час) ($0.3 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час)) 2 октября до $27 \cdot 10^3$ (частиц на поверхность Земли в час) ($6.7 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час)) 1 октября. В 2008 г. - от $3 \cdot 10^3$ (частиц на поверхность Земли в час) ($0.7 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час)) 5 октября до $152 \cdot 10^3$ (частиц на поверхность Земли в час) ($37.6 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час)) 5 ноября [107].

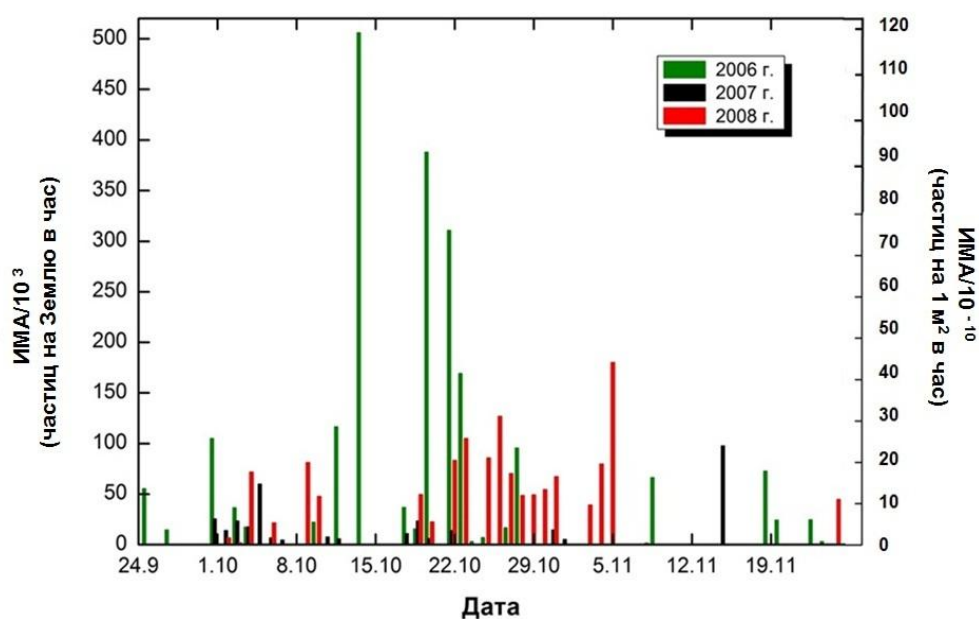


Рис. 3.16. Распределение ИМА Южных Таурид в 2006 – 2008 гг.

ИМА Южных Таурид в 2006 г. имело минимальное значение $3 \cdot 10^3$ (частиц на поверхность Земли в час) ($0.7 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час)) 24 октября и максимальное – $506 \cdot 10^3$ (частиц на поверхность Земли в час) ($125 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час)) 14 октября. В 2007 г. изменялось от $4 \cdot 10^3$ (частиц на поверхность Земли в час) ($1 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час)) 7 октября до $60 \cdot 10^3$ (частиц на поверхность Земли в час) ($1.7 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час)) 5 октября. В 2008 г. – от $1 \cdot 10^3$ (частиц на поверхность Земли в час) ($0.3 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час)) 3 октября до $180 \cdot 10^3$ (частиц на поверхность Земли в час) ($45 \cdot 10^{-10}$ (частиц на 1 м^2 в час)) – 5 ноября [107].

Индекс Метеорной Активности определялся по всему ансамблю метеоров зарегистрированной яркости и может быть представлен в виде распределения по звездной величине (Рис. 3.17 – 3.18).

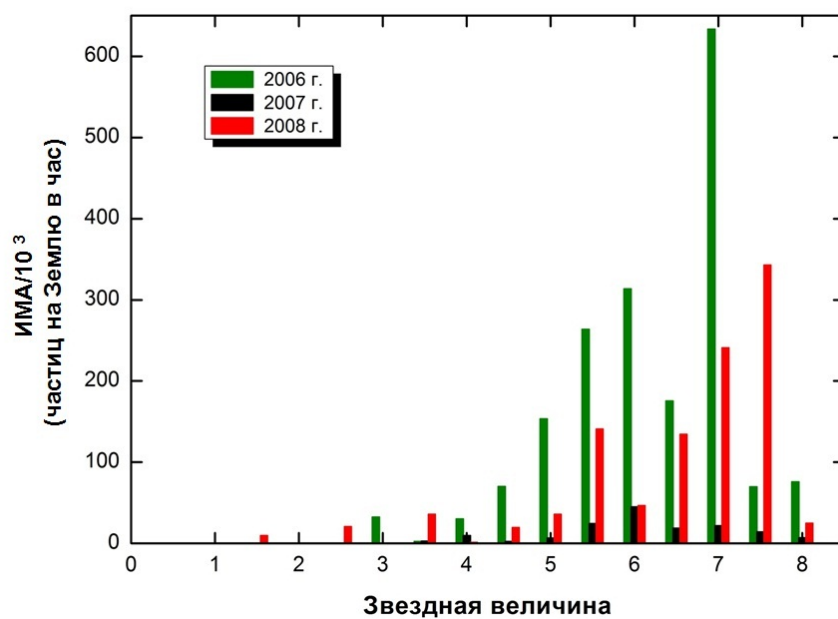


Рис. 3.17. Распределение ИМА Северных Таурид по звездной величине 2006 – 2008гг.

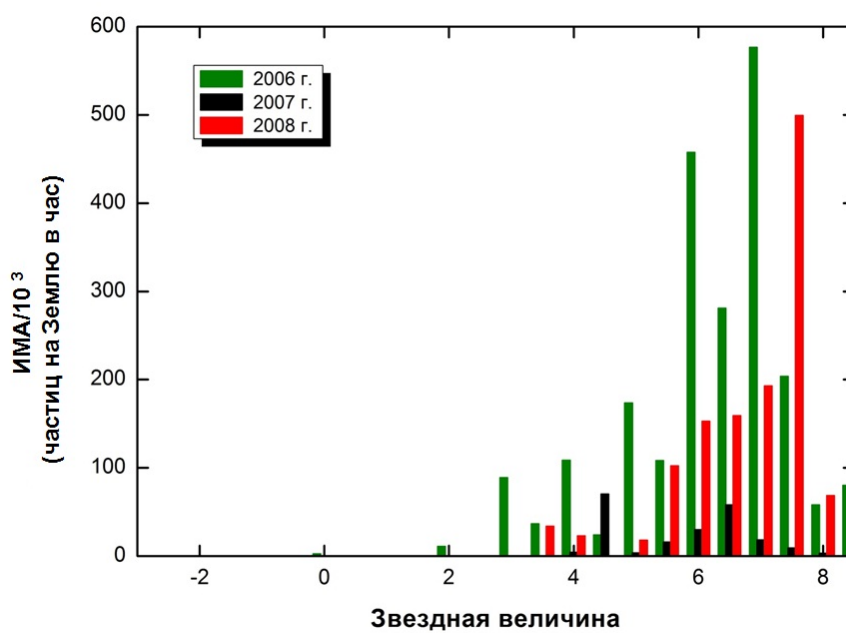


Рис. 3.18. Распределение ИМА Южных Таурид по звездной величине 2006 – 2008гг.

3. 3. Заключение

В Главе 3 рассмотрено два подхода оценки метеорной активности: Зенитное часовое число (ZHR) и Индекс Метеорной Активности (ИМА).

Сопоставление подходов определения распределения метеоров в форме Зенитное часовое число (ZHR) и Индекс Метеорной Активности (ИМА) показывает:

ZHR основан на многочисленных редукция, параметры которых слабо обоснованы. Индекс ZHR может использоваться для сравнения относительной активности метеорных потоков, но он недостаточен для количественного определения потока метеорных частиц через околоземное космическое пространство.

ИМА является объективной характеристикой наблюдаемых потоков метеорных частиц в окрестностях линии визирования наблюдательной аппаратуры. При малых элонгациях (менее 70°), ИМА полученные из наблюдений, уверенно определяет интенсивность притока частиц исследуемых потоков. Поскольку индивидуальные радианты спорадических метеоров равномерно распределены, то определенные из наблюдений ИМА могут быть высокой степени достоверности экстраполированы на всю небесную сферу.

Впервые были получены метеорные наблюдения в малоизученном диапазоне звездных величин (слабее $+5^m$). Наблюдения слабых метеоров редки или эпизодичны в мировой практике [8, 115], поэтому проведенные исследования метеорных потоков Ориониды, Северных и Южных Таурид являются уникальными. Впервые был представлен анализ распределения слабых частиц в метеорных потоках на основе наблюдений, без редукций. Распределение частиц внутри потоков имеет сложный характер, зависит от эволюции и свойств самого потока и это приводит к необходимости многолетних исследований динамики таких изменений.

В Главе 3 был проведен анализ притока метеорного вещества в виде ИМА для полугодового периода наблюдений и для трех летних наблюдений сильных метеорных потоков (Ориониды, Северные и Южные Тауриды) на камере FAVOR. Впервые было получено распределение ИМА для метеоров слабее +5 звездной величины.

Проведенные наблюдения расширили диапазон масс наблюдаемых метеорных частиц вплоть до 8.0^m ($\sim 10^{-6}$ г), которые могут быть опасными для работы КА (см. параграф 1.3).

ГЛАВА 4

БАЗИСНЫЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ МЕТЕОРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Базисный метод наблюдения – это метод наблюдения одного и того же объекта (в данном случае метеора) из двух и более отдаленных друг от друга пунктов. Базисный метод наблюдений дает возможность получать траекторные параметры наблюдаемого метеора (расстояния до точек метеора от пунктов наблюдений, высоту, геоцентрическую скорость, радиант и параметры орбиты). Камеры, которые используются при базисных метеорных наблюдениях, должны быть расположены таким образом, чтобы их поля зрения перекрывались друг с другом на высотах где происходит метеорные события (обычно для расчета ориентации камер берется высота 100 км) при этом учитывается размер поля зрения, разрешающая способность и проникающая сила камер. Также должно учитываться расстояние между пунктами наблюдений (базис), так как при малом базисе теряется точность измерений дальности до метеора, при большом - возрастает риск не зарегистрировать метеор из-за потери его яркости на больших зенитных расстояниях.

4.1. Базисные наблюдения в ИНАСАН

Метеорные наблюдения в Институте астрономии РАН, проводятся из двух пунктов, расположенных на расстоянии 20 км (пункт 1- Звенигородская обсерватория ИНАСАН (ЗО ИНАСАН), пункт 2 – наблюдательный пункт «ИСТРА» (нп «ИСТРА»)) (Таблица 4.1)). Наблюдения ведутся круглогодично в режиме мониторинга [30].

Таблица 4.1. Координаты пунктов наблюдения

Пункт	Широта	Долгота	Высота
ЗО ИНАСАН	55° 42.0' С	36° 46.2' В	192 м
нп «ИСТРА»	55° 52.2' С	36° 49.8' В	207 м

Камера, расположенная на ЗО ИНАСАН, направлена в зенит; камера на нп «ИСТРА», является камерой «базисной поддержки» и направлена таким образом, чтобы ее поле зрения перекрывало поле зрения первой камеры на высоте метеорных событий (в нашем случае поля зрения перекрываются на 90% на высоте 100 км). Геодезические координаты обоих пунктов, измеренные GPS-приемником (Таблица 4.1), позволяют вычислить направление линии визирования камеры поддержки. Центр поля зрения первой камеры: $A = 178.9^\circ$, $h = 87.1^\circ$, а второй: $A = 150.7^\circ$, $h = 80.2^\circ$.

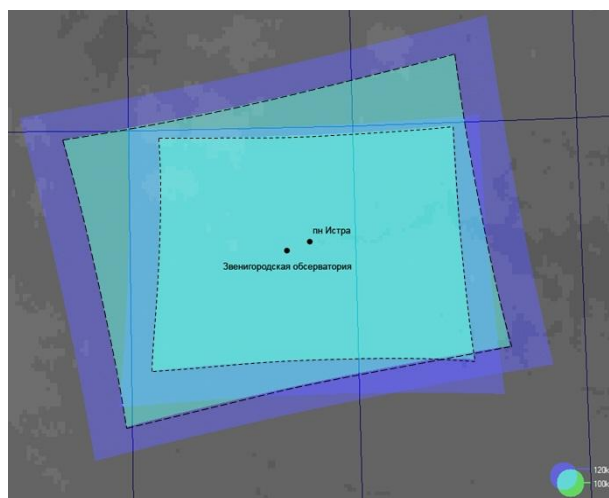


Рис. 4.1. Перекрытия полей зрения на высоте 100 км (бирюзовое поле) и 120 км (фиолетовое поле) камер из пунктов ЗО ИНАСАН и нп «ИСТРА»

4.1.1. Оборудование и программы для обработки телевизионных метеорных наблюдений

В наших метеорных наблюдениях мы используем широкоугольные телевизионные системы типа PatrolCa (см. параграф 1.2.1.2).

Телевизионные метеорные камеры, которые мы используем при наблюдениях в режиме мониторинга устанавливаются неподвижно относительно сторон горизонта поле зрения. Такие камеры, которые сохраняют свою ориентацию месяцами и годами, мы называем «Патрульные камеры» – «PatrolCa» (Таблица 4.2). Камеры, которые мы используем в качестве камер поддержки (камеры могут изменять ориентацию поля зрения) при базисных наблюдениях, выполнены в облегченном «Мобильном» исполнении - «MobilCa» (Таблица 4.2). Камеры «MobilCa» при необходимости можно устанавливать в произвольных точках местности для получения оптимально ориентированного базиса во время исследования отдельного метеорного потока. Обе метеорные системы по техническим характеристикам абсолютно идентичны (Таблица 4.2) и различаются только монтажками.

Таблица 4.2. Характеристики телевизионных метеорных систем

	«PatrolCa», «MobilCa»
Тип камеры	CCD 1/2" Watec LCL-902H Ultimate
Размер CCD (pixel)	720×576
Частота кадров (кадр/сек)	25
Поле зрения	50°×40°
Угловое разрешение	4.2'
Предел звездной величины (по метеорам) *	≈ +4.5 ^m
* В безлунное время	

Камеры адаптированы к российскому климату: встроен подогрев и помещены в специальный кожух для всепогодного использования (Рис. 4.2 - 4.3). Камеры имеют электромеханическое управление защитной крышкой (Рис. 4.2 - 4.3). Работа камер автоматизирована, управление камерой происходит автоматически с помощью программы «Meteor», разработанной сотрудником ИНАСАН Крючковым С. В. [116], которая позволяет запускать камеру (открывает крышку кожуха и включает камеру) по расписанию (в нашем случае, начала и конца сумерек).



Рис. 4.2. Камера «PatrolCa» на
ЗО ИНАСАН



Рис. 4.3. Камера «PatrolCa» на
нп «ИСТРА»

Во время наблюдений метеоры автоматически выделяются в потоке видеок кадров и сохраняются в компьютере с помощью широко используемой метеорными наблюдателями программы UFOCapture V2 [42]. Данная программа позволяет в течение наблюдательного периода в реальном времени автоматически выявлять метеорные события в поле зрения камеры, фиксировать и записывать информацию о метеорах, необходимую для последующей обработки.

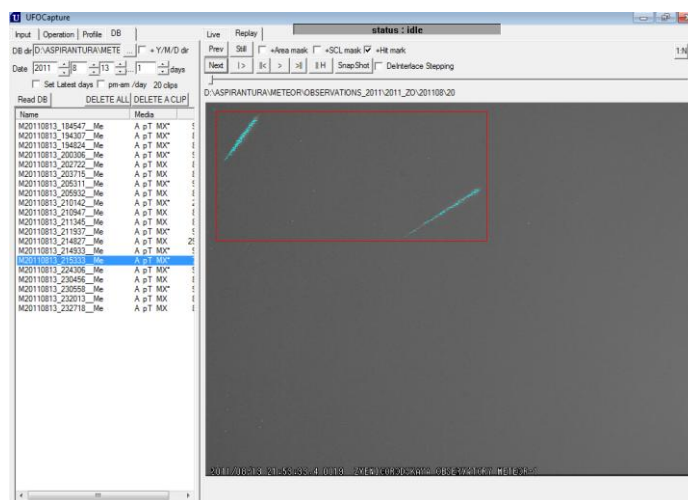


Рис. 4.4. Пример окна программы UFOCapture V2 с двумя метеорами, зарегистрированными 13.08.2011 UT = 21:53:33

Пример окна программы UFOCapture, в котором показан стоп кадр с последовательными метеорами, зафиксированными 13 августа 2011, показан на рисунке 4.4.

Наблюдения проводятся каждую ясную (или малооблачную) ночь. На рисунке 4.5 показан метеор, зафиксированный камерами из двух пунктов (базисно).

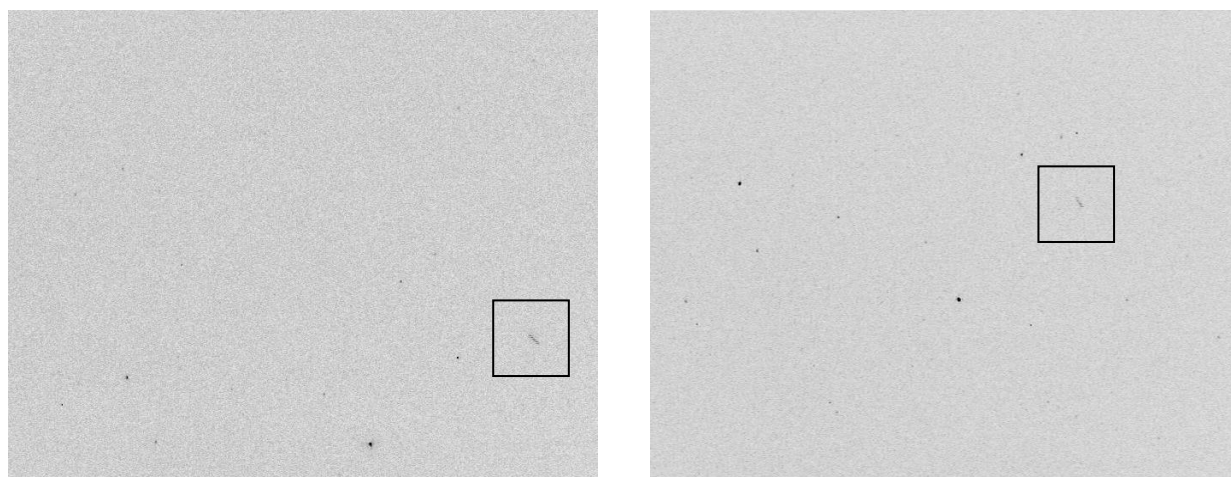


Рис. 4.5. Пример кадра с базисным метеором, зарегистрированным на камерах «PatrolCa» на ЗО ИНАСАН (слева), на нп «ИСТРА» (справа)

В результате наблюдений мы получаем набор файлов с записями метеоров, зафиксированными за период наблюдений, в формате *.avi.

Для зафиксированных метеоров вычисляются: экваториальные координаты (α , δ) начала и конца метеорного трека, звездная величина метеора, его угловая скорость, длина и определяется условная принадлежность к известному метеорному потоку. Данные параметры метеоров вычисляются с помощью программы UFOAnalyzer V2 [93] (Рис.4.6) или в случае недостаточного количества опорных звезд, с помощью метода (и программ), описанного в Главе 2.

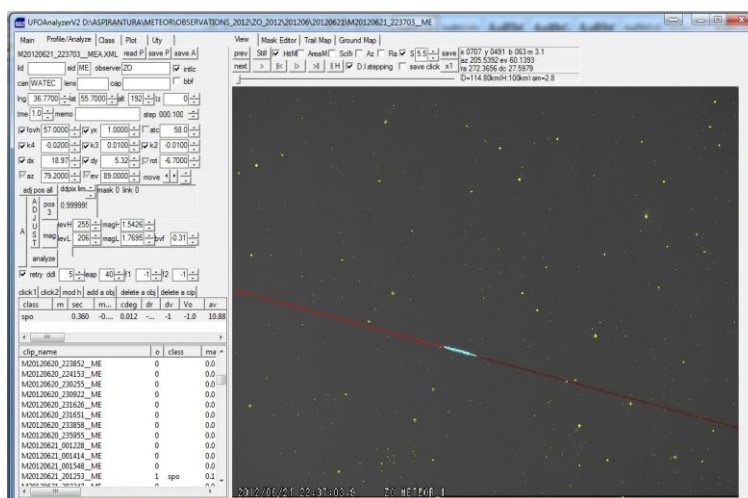


Рис. 4.6. Пример окна программы UFOAnalyzer V2 с обработанным метеором 21.06.2012 UT= 22:37:03

4.1.2. Результаты базисных наблюдений в 2012 – 2013 гг.

Камера, установленная на Звенигородской обсерватории ИНАСАН, начала работать в режиме мониторинга с февраля 2012 г. Через несколько месяцев, в июле 2012 г., была запущена камера на наблюдательном пункте «ИСТРА» [30]. Результаты наблюдений, полученные из двух пунктов, в 2012 – 2013 гг. показаны в таблице 4.3 (и см. параграф 1.2.1.2).

Таблица 4.3. Результаты метеорных наблюдений в 2012 – 2013 гг. на ЗО ИНАСАН и нп «ИСТРА»

	ЗО ИНАСАН		нп «ИСТРА»	
	2012 г.	2013 г.	2012 г.	2013 г.
Время наблюдений (час)	408	940	39	98.7
Количество метеоров (шт.)	918	884	228	408

В итоге за 2012 – 2013 гг. наблюдений на ЗО ИНАСАН было зафиксировано 1802 метеоров, на нп «ИСТРА» – 636 метеора. Распределение количества метеоров, зафиксированных на двух пунктах, показано на рисунках 1.10 и 1.11 [117]. Небольшое количество метеоров, зафиксированных на второй станции, связано с тем, что камера поддержки на нп «ИСТРА» работала только в период наблюдений летних метеорных потоков (в основном во время действия сильного метеорного потока Персеиды (17 июля – 24 августа)). В этот период наблюдений обе камеры зафиксировали практически одинаковое количество метеоров.

Хотя расстояние между камерами составляет 20 км, но даже на таком расстоянии погодные условия могут влиять на наблюдения. Поэтому в период, когда работали обе камеры (с учетом 90% перекрытия полей зрения камер) наблюдается различие в количестве зафиксированных метеоров.

4.2. Результаты базисных наблюдений метеорного потока Персеиды в 2012 – 2013 гг.

Персеиды (PER) - это сильный метеорный поток (~100 метеоров в час). Период действия данного потока с 17 июля по 24 августа, максимум активности приходится на 12 Августа [8] . Радиант потока в период максимума активности расположен в области $\alpha = 48^\circ$ и $\delta = +58^\circ$. Суточный дрейф радианта составляет: $\Delta\alpha = +1.2^\circ$, $\Delta\delta = +0.2^\circ$. Скорость входа метеоров

данного потока в атмосферу Земли около 59 км/с [8]. Родительским телом Персеид является комета 109P/Swift-Tuttle [2].

В период активности метеорного потока Персеиды в 2012 и 2013 гг. нами проводились базисные телевизионные наблюдения. В результате наблюдений за 2012 и 2013 гг. было получено 891 метеоров на ЗО ИНАСАН и 547 метеоров на нп «ИСТРА» (Таблица 4.4). Базисными из них оказалось 120 в 2012 г. и 129 в 2013 г. Из них 43 (2012 г.) и 48 (2013 г.) были Персеидами [118].

Доля числа зарегистрированных Персеид от общего количества метеоров составила 47 % и 49 % в 2012 и 2013 гг. соответственно (Таблица 4.4).

Таблица 4.4. Результаты телевизионных метеорных наблюдений

	ЗО ИНАСАН		нп «ИСТРА»	
17 Июля - 24 Августа	2012 г.	2013 г.	2012 г.	2013 г.
Общее время наблюдений (ч)	119.3	131.3	42	54.75
Количество метеоров (шт.)	495	396	200	347
Количество метеоров потока Персеиды (шт.)	233	195	93	166
Количество метеоров потока Персеиды (%)	47	49	46.5	47.8

На рисунках 4.7 – 4.8 представлены результаты наблюдений Персеид в 2012 и 2013 гг. из пунктов ЗО ИНАСАН (черные столбцы) и нп «ИСТРА» (заштрихованные столбцы).

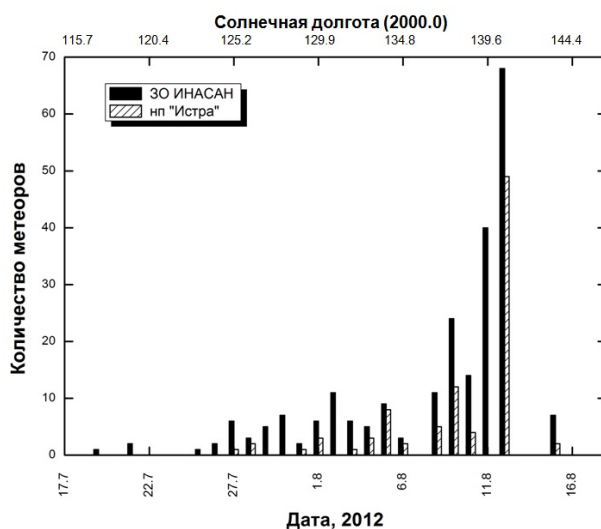


Рис. 4.7. Распределение количества зарегистрированных Персеид по датам и Солнечной долготе в 2012 г.

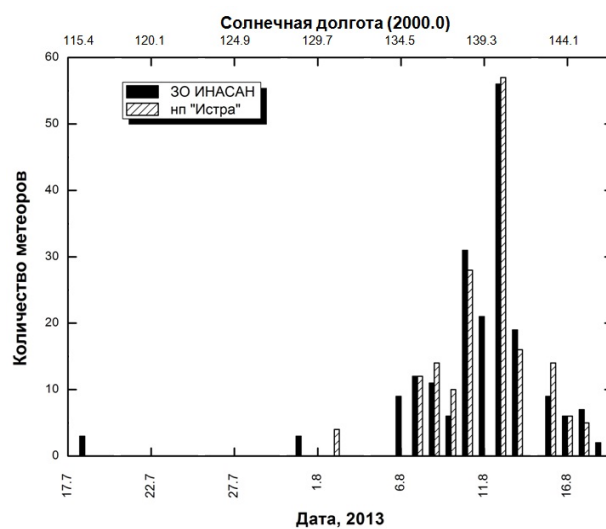


Рис. 4.8. Распределение количества зарегистрированных Персеид по датам и Солнечной долготе в 2013 г.

Как видно из рисунков 4.7 – 4.8 максимальное количество Персеид было зафиксировано 12 августа в момент максимальной активности данного метеорного потока.

4.2.1. Распределение Персеид по звездной величине

Фотометрическая обработка наблюдений проводилась с помощью программы UFOAnalyzer V2 [93]. Для отождествления звезд использовался каталог SKY2000 Master Catalog, Version 4 [119]. Данный каталог содержит информацию о 300 000 звездах ярче $+8.0^m$ в системе Джонсона UBVRI.

После отождествления звезд с их каталожным значением строится калибровочная кривая, которая является функцией звездной величины от логарифма интенсивности излучения. Данная функция описывается как линейная:

$$y = ax + b \quad (4.1)$$

где x – логарифм интенсивности излучения звезды, y – звездная величина опорной звезды по каталогу, b вычисляется методом интерполяции, а

параметр a задается с помощью уравнения Погсона Н. Р. [120] (уравнение 4.2.):

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{I_1}{I_2} \quad (4.2)$$

где m_1 и m_2 – звездные величины двух звезд, I_1/I_2 – отношение интенсивности излучения двух звезд.

Далее определяется значение интенсивности метеорного трека на каждом кадре с помощью опорных звезд (для которых была получена зависимость звездной величины от логарифма интенсивности излучения) определяется звездная величина метеора на каждом кадре. Таким образом, мы получаем изменение значения звездной величины по всему треку метеора. Пример кривой блеска метеора M20130812_205737 представлен на рисунке 4.9.

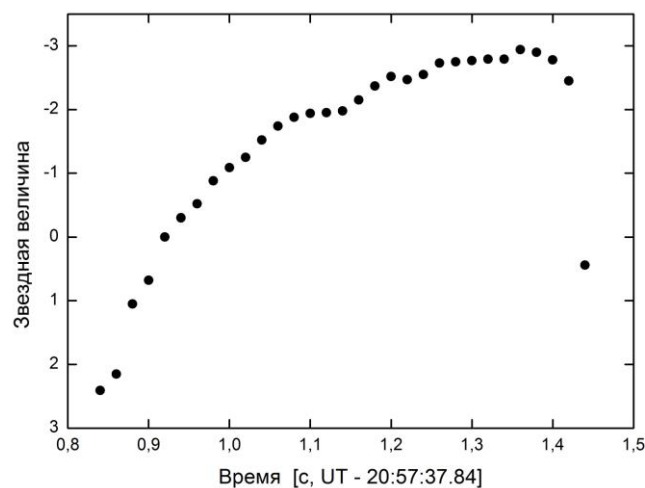


Рис. 4.9. Кривая блеска метеора M20130812_205737, наблюдавшегося 12 августа 2013 г.

С помощью базисного метода наблюдений мы можем вычислить расстояние до метеора r и тем самым определить его абсолютную звездную величину. Звездной величиной метеора m считается логарифмическая

характеристика той мгновенной освещенности E (в момент максимального загорания метеора), которую метеор силой света I на расстоянии до него r создает в точке наблюдения на плоскости, перпендикулярной к лучу зрения [10]. А звездную величину метеора, отнесенную к стандартному расстоянию $r = 100$ км и наблюдаемому в зените, называют *абсолютной звездной величиной метеора* m_0 . Таким образом, ее можно определить, используя следующее уравнение:

$$m_0 = m + 10 - 5 \lg r \quad (4.3)$$

На рисунке 4.10. представлено распределение количества базисных метеоров потока Персеиды по абсолютной звездной величине в 2012 – 2013 гг.

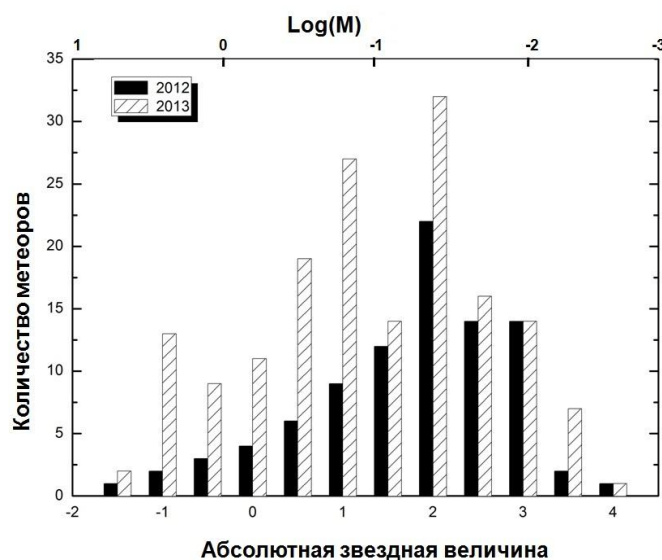


Рис. 4.10. Распределение зарегистрированных Персеид по абсолютной звездной величине в 2012 (черные столбцы) и 2013 гг. (заштрихованные столбцы)

Для оценки массы наблюдаемых частиц была использована формула F. Verniani [121]:

$$m_0 = 63.71 - 10 \lg(Vg) - 2.5 \lg(M) - 2.5 \lg(\cos Z_R) \quad (4.4)$$

где m_0 – абсолютная звездная величина, Vg - геоцентрическая скорость в см/с (для Персеид она равняется $59 \cdot 10^5$ см/с), M - внеатмосферная масса (в граммах), Z_R – угол входа метеороида в атмосферу (в градусах) (для оценки было принято среднее значение равное 45°).

Из рисунка 4.10 видно, что большинство метеоров потока Персеиды имеют абсолютную звездную величину около 2^m . Масса таких частиц (из формулы 4.4) составляет $\sim 10^{-3}$ г. Точность определения масс метеорных частиц на сегодняшний день невелика, и ошибки могут достигать порядка величины.

4.2.2. Радиант метеорного потока Персеиды

С помощью программы UFOOrbit [122] были вычислены индивидуальные радианты (α_R , δ_R) базисных метеоров потока Персеиды (Рис. 4.11) в период наблюдений 2012 – 2013 гг.

Как видно из рисунка 4.11 площадь радиации потока Персеиды (в пик активности потока) составляет в 2012 г. от $\alpha = 40^\circ$ до $\alpha = 54^\circ$ и от $\delta = +55^\circ$ до $\delta = +61.6^\circ$ и в 2013 г. от $\alpha = 37.79^\circ$ до $\alpha = 57^\circ$ и от $\delta = +53.6^\circ$ до $\delta = +61.6^\circ$. В 2012 и 2013 гг. область радиации Персеид приблизительно совпадает.

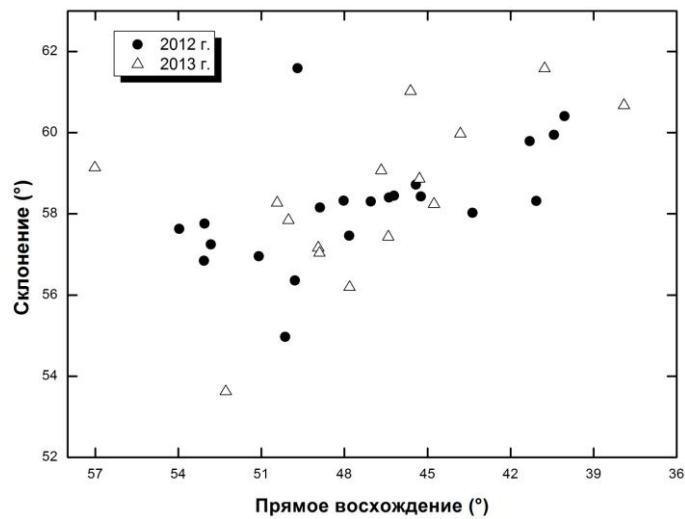


Рис. 4.11. Область радиации метеорного потока Персеиды в 2012 г. (черные точки) и в 2013 г. (белые треугольники) в пик активности потока

В течение периода наблюдений из – за вращения Земли видимый радиант Персеид смещался. На рисунках 4.12 и 4.14 показаны изменения значений прямого восхождения радианта Персеид в 2012 и 2013 гг., на рисунках 4.13 и 4.15 – изменения склонения радианта Персеид в период 2012 – 2013гг.

Положение радианта Персеид в зависимости от долготы Солнца в 2012г. составляет:

$$\alpha = 1.01 \lambda_{\odot} - 94.7^{\circ} \quad (4.5)$$

$$\delta = 0.20 \lambda_{\odot} + 29.9^{\circ} \quad (4.6)$$

в 2013г.:

$$\alpha = 1.45 \lambda_{\odot} - 155.9^{\circ} \quad (4.7)$$

$$\delta = 0.37 \lambda_{\odot} + 6.1^{\circ} \quad (4.8)$$

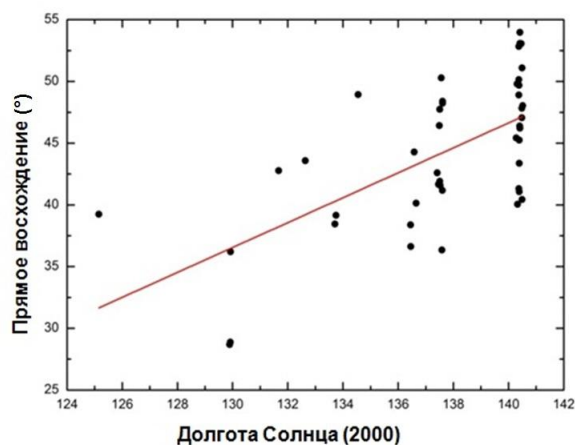


Рис. 4.12. Изменение прямого восхождения радианта Персеид в 2012 г.

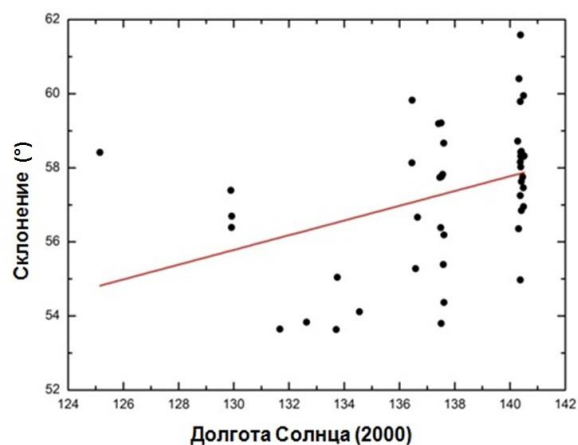


Рис. 4.13. Изменение склонения радианта Персеид в 2012 г.

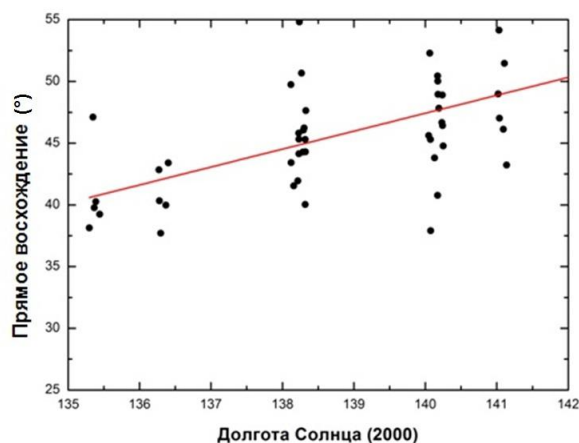


Рис. 4.14. Изменение прямого восхождения радианта Персеид в 2013 г.

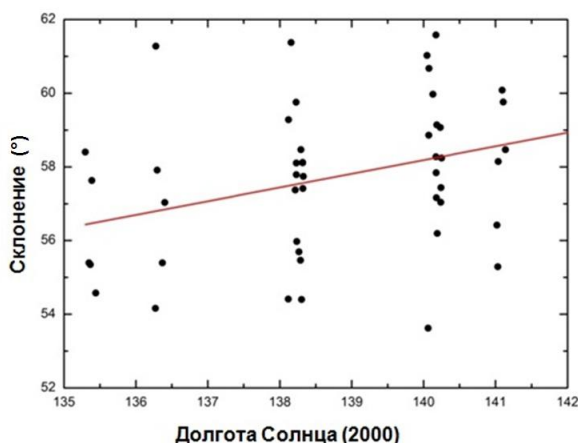


Рис. 4.15. Изменение склонения радианта Персеид в 2013 г.

Следовательно, суточный дрейф радианта данного метеорного потока в 2012 г. был равен $\Delta\alpha = 1.01^\circ$; $\Delta\delta = 0.20$, а в 2013 году он составил $\Delta\alpha = 1.45^\circ$; $\Delta\delta = 0.37^\circ$ [118].

По данным расчетов Lunsford R. дрейф радианта для Персеид составил: $\Delta\alpha = +1.3^\circ$, $\Delta\delta = +0.2^\circ$ [108]. По данным Kresák L'. и Porubčan V. он был $\Delta\alpha = +1.38^\circ$, $\Delta\delta = +0.18^\circ$ [123]. По наблюдениям, полученным в 2012 г. на Английской видео метеорной сети NEMETODE [124] суточный дрейф радианта составил: $\Delta\alpha = +1.29^\circ$, $\Delta\delta = +0.21^\circ$. В своей работе Arlt исследовал

дрейф радианта Персеид по визуальным и телевизионным наблюдениям, он получил суточный дрейф радианта: $\Delta\alpha = +1.46^\circ$, $\Delta\delta = +0.29^\circ$ [125].

Таким образом, полученное нами значение суточного дрейфа радианта Персеид подобны значениям других наблюдателей.

В таблице 4.5 представлены средние значения радианта и геоцентрической скорости Персеид в период максимума активности 12 – 13 августа в 2012 – 2013 гг. по данным телевизионных регистраций метеоров, полученных диссертантом. Также приведены значения радианта Персеид по данным других наблюдений.

Таблица 4.5. Средние значения радианта и геоцентрической скорости Персеид в период максимума активности

	$\lambda_{\odot}$ (°)	α_R (°)	δ_R (°)	V_g (км/с)
ЗО ИНАСАН – НП «ИСТРА» (2012 г.) [118]	140.3 – 140.5	47.52	+58.13	59.14
ЗО ИНАСАН – НП «ИСТРА» (2013 г.) [118]	140.0 – 140.2	48.31	+58.05	63.4
IAU MDC [20]	140.19	48.33	+57.96	59.38
IAU MDC [123]	140.19	46.8	+57.7	49.49
IMO [8]	140.0—140.1	48.00	+58.00	59.00
NEMETODE [124]	140.0	48.30	+57.90	57.90

где

$\lambda_{\odot}$ – долгота Солнца

α_R – прямое восхождение радианта

δ_R – склонение радианта

V_g – геоцентрическая скорость

Из таблицы 4.5 видно, что средние значения радианта метеорного потока Персеиды, полученные нами, практически совпадают с радиантами, полученными по другим авторами. Наблюдения Персеид проводились на сети NEMETODE с 11 июля по 12 сентября 2012 г. на широкоугольных камерах, подобных нашим метеорным камерам [124].

В таблицах 4.6 и 4.7 приведены примеры координат радианта, геоцентрической скорости и абсолютной звездной величины для нескольких метеоров потока Персеиды в 2012–2013 гг.

Таблица 4.6. Примеры, координат радианта, геоцентрической скорости и абсолютной звездной величины Персеид, полученные по наблюдениям 2012г.

№	Наименование	$\lambda_{\odot}$	M_a	α_R	δ_R	V_g
		°		°	°	км/с
1	20120801_234607	129.93	-0.44	36.195	56.695	58.55
2	20120809_214605	137.51	0.90	47.737	53.792	58.03
3	20120809_230113	137.56	0.52	50.281	57.825	56.21
4	20120810_000914	137.61	0.44	48.224	54.365	61.04
5	20120810_001133	137.61	-0.39	48.387	56.188	60.15
6	20120812_212211	140.37	0.76	48.898	58.153	58.09
7	20120812_212522	140.38	1.14	50.141	54.969	55.73
8	20120812_222451	140.42	1.98	53.085	56.843	52.06
9	20120812_232903	140.46	2.08	53.059	57.754	54.10
10	20120813_001440	140.49	1.09	51.100	56.954	56.54
11	20120813_005039	140.51	-1.31	48.029	58.319	58.94

Таблица 4.7. Примеры, координат радианта, геоцентрической скорости и абсолютной звездной величины Персеид, полученные по наблюдениям 2013г.

№	Наименование	$\lambda_{\odot}$	M_a	α_R	δ_R	Vg
		°		°	°	км/с
1	20130808_205152	136.27	1.65	42.847	54.160	56.19
2	20130809_000849	136.40	0.41	43.409	57.032	58.85
3	20130810_220143	138.24	1.18	54.805	55.971	59.55
4	20130810_224624	138.27	1.51	50.671	55.690	54.34
5	20130810_232820	138.29	-1.31	46.047	58.469	58.04
6	20130811_001742	138.33	0.64	47.632	57.740	59.30
7	20130812_222425	140.17	1.67	50.437	58.272	59.36
8	20130813_000915	140.24	1.11	46.414	57.436	59.73
9	20130815_204842	142.99	1.41	48.730	61.361	56.29
10	20130815_235935	143.12	1.90	52.681	56.585	56.17

где

M_a – абсолютная звездная величина метеора

4.2.3. Высоты метеоров потока Персеиды

Одной из важнейших задач базисных наблюдений является определение истинной траектории метеора в атмосфере. Первым этапом ее решения является определение высот метеора. Знание высот загорания и погасания непосредственно связано с оценкой абсолютной звездной величины, следовательно, и с определением массы метеорного тела, его торможением, а также ряда других физико-химических свойств.

По результатам наблюдения 2012 - 2013 гг. была вычислена высота (загорания и потухания) для метеоров из потока Персеиды.

На рисунках 4.16 - 4.17 показаны изменения начальной и конечной скоростей метеоров. Начальная высота (h_1) обозначена черными точками, а конечная высота (h_2) – белыми треугольниками.

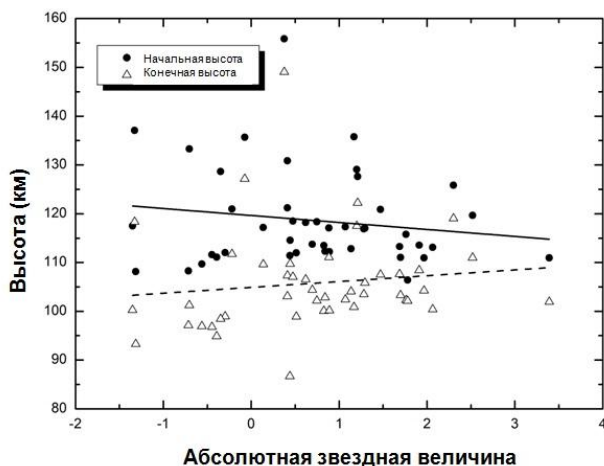


Рис. 4.16. Изменение начальной и конечной высот Персеид в 2012 г.

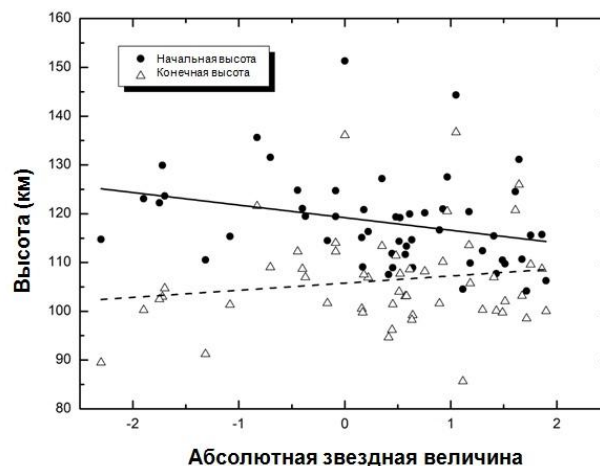


Рис. 4.17. Изменение начальной и конечной высот Персеид в 2013 г.

Методом наименьших квадратов определялась линейная зависимость высот (загорания и погасания) от абсолютной звездной величины метеоров. Уравнения прямых следующие:

$$h_1 = -1.43 m_0 + 119.65 \quad (4.9)$$

$$h_2 = 1.19 m_0 + 104.89$$

$$h_1 = -2.58 m_0 + 119.20 \quad (4.10)$$

$$h_2 = 1.46 m_0 + 105.76$$

где h_1 – начальная и h_2 – конечная высота метеора, m_0 – абсолютная звездная величина метеора.

Таким образом, средняя высота в 2012 г. получается, равна: $h_1 = 119.65$ км и $h_2 = 104.89$ км, а в 2013 г.: $h_1 = 119.20$ км и $h_2 = 105.76$ км.

По взаимодействию метеоров с атмосферой (начальной и конечной высот как функции абсолютной звездной величины (массы) метеоров) можно исследовать физико–химические характеристики метеоров. Согласно рисункам 4.16 – 4.17 начальные высоты метеоров потока Персеиды уменьшаются с увеличением абсолютной звездной величиной (с уменьшением массы). Подобная зависимость наблюдалась и другими авторами. В своей работе Koten [126] объясняет это тем, что абляция метеороидов кометного происхождения (таких как в метеорном потоке Персеиды) начинается до того, как их можно обнаружить. На самом деле процесс взаимодействия метеорной частицы с атмосферой на много более сложный, но для качественного анализа наблюдаемого процесса вторжения метеорной частицы в атмосферу в режиме свободно – молекулярного обтекания требуется получение большого массива более точных регистраций.

4.2.4. Индекс Метеорной Активности Персеид в 2012 – 2013 гг.

Индекс Метеорной Активности (ИМА) был вычислен по методу, описанному в Главе 3 [99,100], для всех Персеид в периоды наблюдений в 2012 и 2013 гг.

На рисунке 4.18 показано распределение значений ИМА, рассчитанные для всей Земли (левая шкала) Персеид в 2012 г. (черные столбцы) и 2013 г. (заштрихованные столбцы) и ИМА рассчитанное для условного космического аппарата (правая шкала). В период максимума активности потока 12 августа значение ИМА (Рис. 4.18) было $192 \cdot 10^3$ в 2012 г. ($\lambda=140.4^\circ$) и $122 \cdot 10^3$ в 2013 г. ($\lambda=140.2^\circ$) (частиц на Землю в час). Значение ИМА, вычисленное для КА (1 м^2) в этот период было $39 \cdot 10^{-10}$ в 2012 г. ($\lambda=140.4^\circ$) и $26 \cdot 10^{-10}$ в 2013 г. ($\lambda=140.2^\circ$) (частиц на 1 м^2 в час).

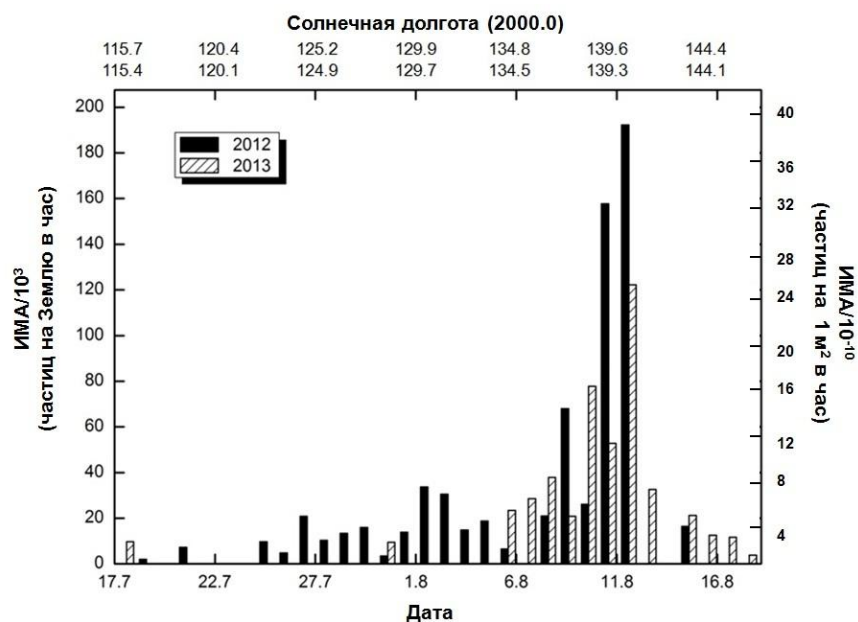


Рис. 4.18. Распределение ИМА Персеид в 2012–2013 гг.

Индекс Метеорной Активности определяется для каждого метеора с его индивидуальным радиантом. Это позволяет вычислить ИМА для всего потока как функцию яркости метеоров (масс входящих в него частиц) (Рис. 4.19).

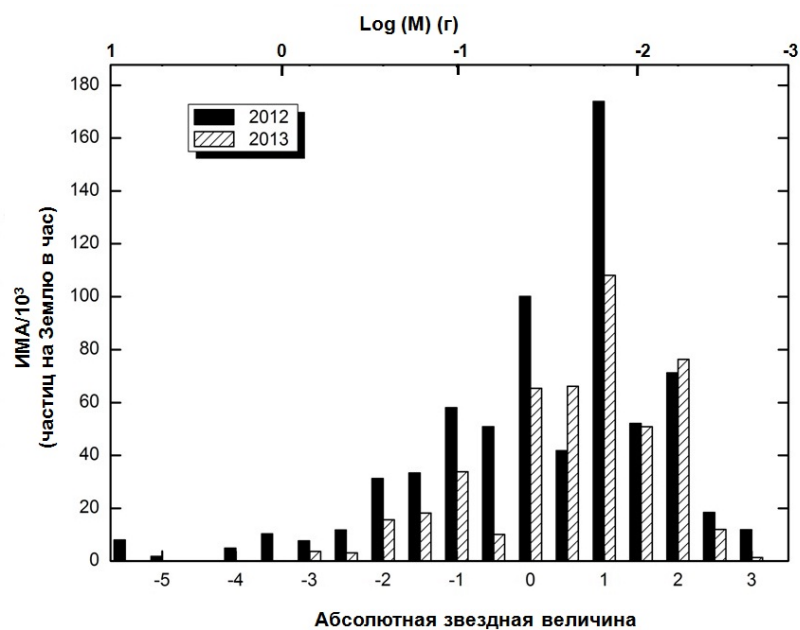


Рис. 4.19. Распределение ИМА Персеид по абсолютной звездной величине и массе в 2012–2013 гг.

Определив ИМА по звездной величине, мы также можем оценить приток частиц по массе, используя формулу 4.4, с учетом характеристик потока. По нашим данным основная часть метеоров, которую мы зафиксировали (наши камеры позволяют фиксировать лишь яркие метеоры до $+4.5^m$), имеет абсолютную звездную величину (массу) примерно $+1^m$ (0.02г).

4.2.5. Орбитальные параметры метеорных частиц потока Персеиды

Базисные наблюдения позволяют получить индивидуальные орбиты метеоров. В результате наших наблюдений, в период действия метеорного потока Персеиды, было зафиксировано из двух пунктов 695 метеоров в 2012г. и 747 метеоров в 2013 г. К потоку Персеиды относится $\approx 50\%$ от общего числа зарегистрированных в это время метеоров (базисным методом получено регистрация 91 события).

Вычисление параметров индивидуальных орбит Персеид проводилось с помощью программы UFOOrbit [122].

В результате была получена 91 индивидуальная орбита Персеид за 2012 – 2013 гг. В таблице 4.8 представлено среднее значение полученных орбит.

Таблица 4.8. Средние орбитальные параметры Персеид 2012–2013гг.

	a (a.e.)	q (a.e.)	e	ω (°)	Ω (°)	i (°)
ИНАСАН 2012 г. [118]	37.2	0.93	0.97	153.8	140.4	115.7
ИНАСАН 2013 г. [118]	24.1	0.94	0.97	150.95	140.2	113.7
A. Cook [127]	28.0	0.95	0.97	151.5	139.0	113.8
NEMETODE [124]	17.2	0.95	0.93	150.5	138.4	113.1
IAU MDC [20]	71.40	0.953	-	151.30	140.19	113.22
IAU MDC [123]	24.00	0.949	0.960	150.40	139.70	113.00
109P/Swift-Tuttle [128]	26.47	0.958	0.963	-	139.61	113.41

где

a – большая полуось

q – перигелийное расстояние

e – эксцентриситет

ω – аргумент перицентра

Ω – долгота восходящего узла

i – наклонение

Для сравнения в таблице 4.8 представлены расчеты орбит потока Персеиды, полученные другими авторами. Результаты английской метеорной сети NEMETODE [124] были получены по наблюдениям в тот же период с 11 июля по 12 сентября 2012 г.

Таким образом, мы можем сравнить орбитальные характеристики данного потока наблюдавшегося в 2012 г. подобными системами, но с разных участков Земного шара.

4.3. Заключение

Базисные телевизионные наблюдения, проводимые в ИНАСАН, позволили получить детальные характеристики метеорного потока Персеиды.

Наблюдения показали, что активность Персеид в 2012 – 2013 гг. была типична для данного потока. Максимум активности наблюдался 12 августа. По данным базисных наблюдений был вычислен суточный дрейф радианта потока: $\Delta\alpha = 1.01^\circ$; $\Delta\delta = 0.20^\circ$ в 2012 г. и $\Delta\alpha = 1.45^\circ$; $\Delta\delta = 0.37^\circ$ в 2013 г. Представленный результат был подтвержден другими авторами. Полученные наблюдения позволили определить значение радианта метеорного потока Персеиды в пик активности: $\alpha = 47.52^\circ$, $\delta = +58.13^\circ$ в 2012 г. и $\alpha = 48.31^\circ$, $\delta = +58.05^\circ$ в 2013 г. Значение радианта, вычисленного по нашим наблюдениям, подтверждаются наблюдениями, сделанными на Английской

метеорной сети в 2012 г. [124], а также результатами наблюдений, проведенными фотографическим методом.

Были определены орбитальные параметры Персеид по нашим наблюдениям и сопоставлены с орбитами, полученными по наблюдениям другими наблюдателями. Было показано, что орбитальные параметры всех метеоров, отождествленных с метеорным потоком Персеиды, близки к орбите кометы 109P/Swift-Tuttle, что в пределах ошибок наблюдений подтверждает их родственную связь.

По полученным наблюдениям измерен вклад потока Персеиды в ИМА. Результаты вычислений показали, что максимальное значение ИМА равно $192 \cdot 10^3$ в 2012 г. ($\lambda=140.4^\circ$) и $122 \cdot 10^3$ в 2013 г. ($\lambda=140.2^\circ$) (частиц на Землю в час) (ИМА вычисленное для КА (1 м^2) равно $39 \cdot 10^{-10}$ в 2012 г. ($\lambda=140.4^\circ$) и $26 \cdot 10^{-10}$ в 2013 г. ($\lambda=140.2^\circ$) (частиц на 1 м^2 в час)) было получено в максимуме активности потока (12 августа). Используя формулу связи звездной величины и массы (уравнение 4.4), было получено распределение ИМА Персеид по абсолютной звездной величине (массе) для метеорных частиц до $+3^m$ (до 10^{-3} г).

Проведенный анализ базисных метеорных наблюдений показал, что по сравнительно небольшому числу метеорных регистраций (91 – базисный метеор из метеорного потока Персеиды) мы получили основные характеристики исследуемого потока, которые подтвердили ранее полученные результаты, в том числе и кометное происхождение данного потока, и его связь с кометой 109P/Swift-Tuttle.

ГЛАВА 5

АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА ПО ВИДЕОРЕГИСТРАЦИЯМ И ОПРОСУ ОЧЕВИДЦЕВ

Утром 15 февраля 3:20 UT над Челябинской областью в атмосферу Земли вошло космическое тело размером 19.8 м ($1.3 \cdot 10^7$ кг) [72]. Вход Челябинского метеороида (так было решено называть это тело) в атмосферу был виден на обширной территории, свидетелями данного события стали жители Челябинской, Свердловской, Курганской и Тюменской областей, а также Республик Башкортостан и Казахстана [129].

Тела размером менее 20 м (подобных Челябинскому метеороиду) на больших расстояниях сложно обнаружить из-за ограничений на проникающую способность современных обзорных телескопов. На малых расстояниях трудность обнаружения обусловлена слишком коротким временем, имеющимся в распоряжении для обнаружения объекта. В истории есть лишь один случай, когда метеороид наблюдался относительно задолго (за 20 ч) до его входа в атмосферу Земли [130]. Метеороид получил астероидное обозначение 2008 TC₃ был размером 3–5 м, он был обнаружен случайно, хотя и в рамках системного обзора.

События подобные Челябинскому были зафиксированы и ранее: в районе островов Принца Эдуарда, Южная Африка, 3 августа 1963 года, болид Маршаловых островов - 1 февраля 1994 и индонезийский болид - 8 октября 2009 г. На территории России последний раз похожее явление наблюдалось в 2002 году (Витимский болид 24.09.2002). Но уникальность данного события состоит в том, что оно было хорошо задокументировано. Были получены многочисленные видео- и фото- регистрации, спутниковые регистрации, зафиксированы инфразвуковые сигналы, был зафиксирован болидный след в атмосфере. Жители Челябинской области стали очевидцами

не только пролета суперболида (т.е. метеор яркостью более -17^m), но и различных эффектов, вызванных движением метеороида в атмосфере (приход ударной волны, вызвавшей разрушения зданий и повлекший травмы у людей, тепловые, звуковые и т. д.) [72, 131]. Это событие выделяется из общего ряда метеорных явлений своими масштабами и возникновением обширной зоны разрушения. За медицинской помощью обратилось 1 613 человек, большинство из них пострадало от выбитых стекол. Двое пострадавших получили серьезные травмы и были помещены в реанимацию. На большой территории были найдены многочисленные фрагменты метеорита, самый большой из них весит ~ 570 кг [132].

С 9 по 26 марта 2013 г. была организована сотрудниками ИДГ РАН, ИНАСАН при участии сотрудников SETI Institute, ЮрФУ, ЧелГУ и УрФУ комплексная экспедиция к месту события. В течение экспедиции были собрана различная информация о Челябинском событии [72, 131]. В результате опроса очевидцев (во время экспедиции и Интернет – опроса) было собрано более 2000 показаний очевидцев, которые содержат информацию о субъективных ощущениях случайных наблюдателей (тепло, запах, звук, возникновение солнечных ожогов, и т. д.) [133-135]. Все собранные данные были проанализированы и получены различные параметры Челябинского метеороида.

5.1. Анализ эффектов, зафиксированных при пролете Челябинского метеороида

Данные о некоторых эффектах, вызванных входом метеороида в атмосферу, (например, электрофонных звуках и т. п.) в принципе могли бы быть получены инструментальным образом, если бы соответствующая аппаратура была установлена в районе события. В ее отсутствии интересующие нас данные могут быть собраны только методом опроса. В ходе экспедиции были опрошены очевидцы из 59 населенных пунктов и

собраны Интернет – анкеты с информацией об ощущениях более 2000 очевидцев. Эти данные позволили определить области, в которых наблюдались различные эффекты, сопровождавшие пролет Челябинского метеороида (запахи, связанные с пролетом болида; электрофонные звуки), области, в которых люди получили те или иные травмы и недомогания [72, 131, 135].

Хотя небесное тело, взорвавшееся в небе над Челябинской областью, и не классифицируется как опасное в рамках проблемы астероидно – кометной опасности (АКО) [4], тем не менее, достаточно заметное число жителей было вынуждено обратиться за медицинской помощью. С точки зрения проблемы астероидной опасности важно понимать, какого рода травмы возникают в таких ситуациях. Травмы были различного характера, большую часть из них составляли порезы от разбитых стекол. На рисунке 5.1 показано расположение, относительно траектории метеороид, а населенных пунктов, в которых были пострадавшие.

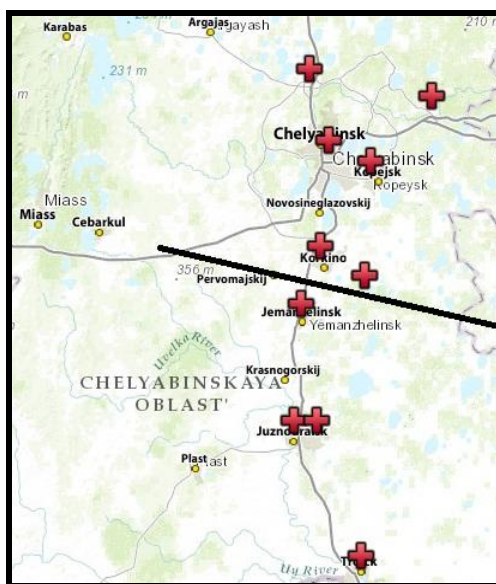


Рис. 5.1. Расположение населенных пунктов с пострадавшими относительно траектории метеороида (черная линия)

Доля жителей, получивших травмы, требовавшие медицинской помощи, достигала 0.16–0.11% в наиболее заселенных и близко

расположенных к траектории районах [72]. Далеко не все обратились за медицинской помощью. Из 500 опрошенных по телефону респондентов в Челябинске 1% сообщил, что получил повреждения (испытал недомогания), еще 1% сообщил, что повреждения/недомогания были у него самого и у его ближайших родственников, 7% сообщили о тех или иных травмах у ближайших родственников [133-134]. Поэтому можно предполагать, что хотя бы минимальные повреждения или небольшие недомогания получили несколько тысяч человек.

Челябинское событие стало тем редким случаем, когда полет болида характеризовался различными звуковыми эффектами. Прежде всего, огромное впечатление на очевидцев оказала ударная волна. Звук от нее был зафиксирован, по словам очевидцев, на расстояниях до ~ 150 км от траектории полета. Кроме того, во время полета Челябинского метеороида были зафиксированы звуковые эффекты до прихода ударной волны (по описаниям очевидцев), т.е. он являлся так называемым электрофонным. Многочисленные очевидцы из населенных пунктов (на расстоянии около 50 км от места основного энерговыделения) рассказывали о звуках подобных свисту, треску, шипению, бенгальским огням (Таблица 5.1, Рис.5.2).

Таблица 5.1. Данные Интернет опроса об электрофонных эффектах

Тип звукового эффекта	Число очевидцев
Шипение или свист, подобный запуску петард	76
Звук подобный бенгальскому огню	13
Свист	26
Писк	2
Треск	25
Шелест, шорох	6
Гул	19
Гул самолета	31

По результатам Интернет опроса 131 опрошенных из 1800 сообщили о звуках, которые они слышали до прихода ударной волны, во время пролета суперболида.

На рисунках 5.2 и 5.3 изображены населенные пункты, где находились очевидцы, сообщившие об электрофонных эффектах. Область, из которой пришли сообщения об электрофонных эффектах, достигает 115 км с запада на восток и 142 км с севера на юг.

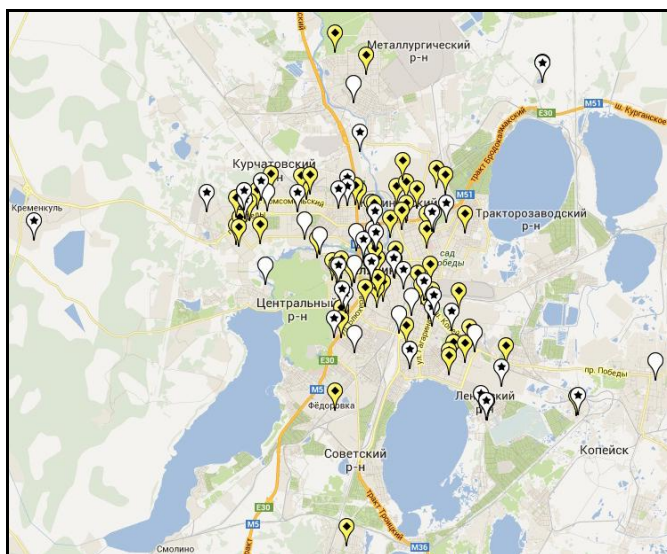


Рис. 5.2. Распределение электрофонных звуков в Челябинске. Желтые – шипение, белые – свист, белые со звездочкой – треск

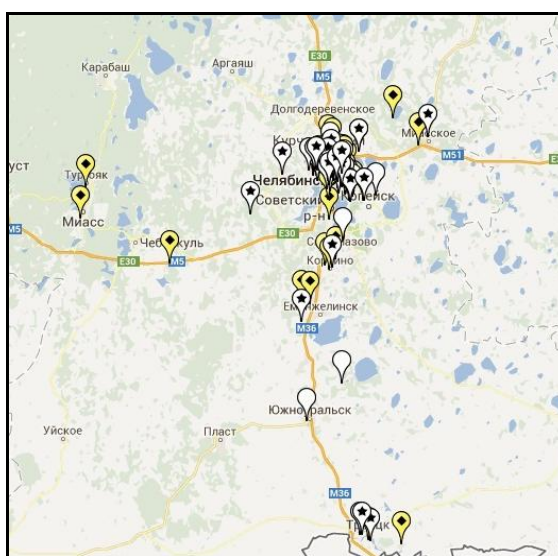


Рис. 5.3. Населенные пункты, из которых были сообщения об электрофоне эффекте. Желтые – шипение, белые – свист, белые со звездочкой – треск

Данные, полученные из устного опроса очевидцев, позволили уточнить картину входа Челябинского метеороида в атмосферу Земли и оценить последствия, вызванные пролетом тела такого размера. В дальнейшем это позволит составить более точный прогноз поражающих эффектов от падения космических тел.

5.2. Анализ записей с видео регистраторов

Для определения траектории, орбиты и других параметров Челябинского тела было собрано более 400 различных регистраций события. На рисунке 5.4 показаны места, где были сделаны собранные записи (видеорегистраторами, фото, мобильными телефонами).

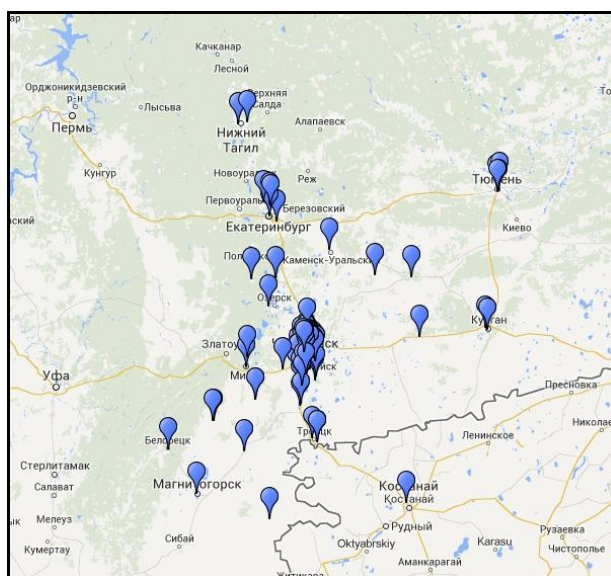


Рис. 5.4. Расположение мест, в которых были сделаны записи

Так как Челябинское событие произошло в утреннее время, то напрямую, т.е. с использованием опорных звезд, измерить координаты трека метеороида было невозможно. Поэтому для определения координат трека метеороида необходимо было получить кадры (калибровочные кадры) с опорными звездами на пунктах, где были сделаны записи (Рис. 5.4).

Из нескольких сотен регистраций с пролетом метеороида были выбраны те, которые можно было использовать для вычисления траектории, орбиты, высоты разрушения болидного тела, определения световой кривой и оценки последствий данного события. Т.е. записи, сделанные неподвижными камерами, в которых был зарегистрирован пролет суперболида, расположение камер должны были быть доступными для проведения астрономической съемки (т.е. записи должны были быть сделаны не на дорогах, не из квартир, не с охраняемой территории и т.п.). Записи пролета суперболида проводились различными видеорегистраторами с неизвестными свойствами, поэтому определить параметры искажений полей зрения данных камер было невозможно. Координаты пунктов, где были сделаны записи, не были известны (только их адрес). По деталям видеозаписей участники экспедиции провели уточнение мест съемки.

В течение экспедиции, с 9 по 26 марта 2013 г., была проведена астрометрическая съемка (были сделаны кадры со звездами) с нескольких мест, где были сделаны записи пролета суперболида (Рис. 5.5).

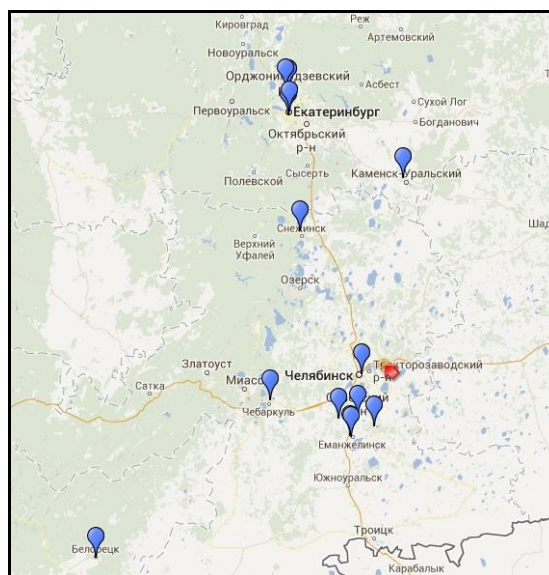


Рис. 5.5. Расположение пунктов, где была проведена астрономическая съемка

Всего в течение экспедиции были сделаны калибровочные кадры из 14 различных пунктов в Челябинской, Свердловской областях и Республике Башкортостан (Таблица 5.2). В силу погодных условий и ограничения временем экспедиции не было возможности провести съемку с большего числа пунктов.

Таблица 5.2. Пункты, где была проведена астрометрическая съемка

№ пп	Пункт	Широта (°)	Долгота (°)	Высота (м)
1	Первомайский	54.87	61.17	275
2	Коркино	54.89	61.39	249
3	Белорецк	53.95	58.41	537
4	Снежинск	56.07	60.74	267
5	Каменск- Уральский	56.41	61.91	170
6	Челябинск	55.16	61.44	223
7	Чебаркуль	54.99	60.40	345
8	Еманжелинск	54.75	61.30	227
9	Еманжелинск	54.75	61.31	240
10	Еткуль	54.82	61.58	234
11	Верхняя Пышма	56.97	60.57	274
12	Верхняя Пышма	56.96	60.60	280
13	Екатеринбург	56.80	60.60	254
14	Екатеринбург	56.83	60.61	247

Для того чтобы учесть искажения оригинальных видеозаписей во время астрометрической съемки использовались фотоаппараты с известными характеристиками. На пунктах, где проводилась съемка, были измерены их географические координаты. Мы проводили съемку фотоаппаратами Nikon D 5100 с широкоугольным объективом 10 мм f 3.5 с GPS привязкой и Canon EOS 40D с объективом 10мм f 3.5. Время экспозиции было 5-30 секунд в

зависимости от освещенности местности. Время фотографирования синхронизировалось с точным временем до и после съемки (для определения точного времени использовался сайт <http://time.is/London>). Средняя ошибка (О - С) привязки по звездам была $< 1.3'$.

Видео, записанное в г. Челябинск на ул. Савина было сделано из неподвижного (припаркованного) автомобиля, видеорегистратор был направлен на юг и метеороид вошел в верхнюю часть поля зрения, двигаясь слева направо (Рис. 5.6). Для определения координат метеорного трека по записи с видеорегистратора были сделаны кадры со звездами (Рис. 5.7) с привязкой к местности.



Рис. 5.6. Кадр, полученный с видеорегистратора в г. Челябинск ул. Савина (видео: А. Якушенкова)



Рис. 5.7. Калибровочный кадр, сделанный 14.03.2015г. в г. Челябинск ул. Савина

На основании сравнения деталей на этих кадрах, кадры с видеорегистратора были исправлены за геометрические искажения (Рис. 5.8) и, используя опорные объекты, были привязаны к калибровочному кадру с помощью программы Photoshop (Рис. 5.8).



Рис. 5.8. Уровень геометрических искажений на кадрах видеорегистратора, которые удалось исправить с помощью астрономической съемки (г.Челябинск)

В данном случае (Рис. 5.8) кадр содержит много опорных объектов, точность трансформирования - 2 пикселя. Видеозапись велась с временной привязкой, но данный видеорегистратор не был синхронизирован с точным временем. Чтобы исправить ошибку по времени было определено время главной вспышки (т.е. время вспышек использовалось как репер для дальнейшей синхронизации по времени) по часам регистратора как 9:42:13.20 по местному времени.

Другим пунктом, где был зафиксирован пролет метеороида, был г.Белорецк, расположенный на юге от траектории метеороида на расстоянии 219 км. Так как место, с которого была сделана запись, было удалено на большое расстояние от траектории, то на записи был виден весь пролет метеороида (Рис. 5.9).

На рисунке 5.9 приведен пример кадра, полученного с видео регистратора в г. Белорецк, на рисунке 5.10 - пример калибровочного кадра.



Рис. 5.9. Кадр, полученный с видео регистратора, г. Белорецк (видео Павла Гридневского)



Рис. 5.10. Калибровочный кадр, г.Белорецк 17.03.2013г.

На снимке, сделанном в г. Белорецк, на заднем плане расположен горный хребет, также опорными объектами являлись дома, столб ЛЭП, забор (Рис. 5.10). Кадр с метеороидом калибровался относительно всех выбранных опорных объектов (Рис. 5.11). Для координатных измерений были выбраны кадры с 09:20:27 по 09:20:42 (включая время главной вспышки 09:20:37.8) по местному времени с интервалом 1 секунда.

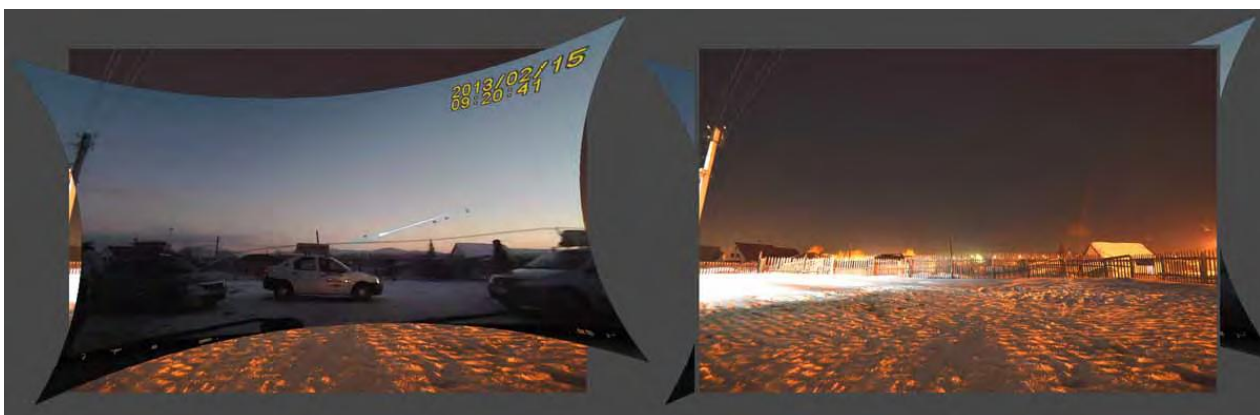


Рис. 5.11. Пример трансформированных кадров, полученных с видео регистратора и при астрономической съемке (г. Белорецк)

Таким образом, нами были получены трансформированные кадры, записей с видеорегистраторов относительно калибровочных кадров, с 14 пунктов (Таблица 5.2, Рис. 5.5).

Пролет метеороида был зафиксирован различными средствами, в частности камерами наружного наблюдения в г. Челябинск. Данные камеры постоянно синхронизируются с всемирным временем с высокой точностью. Поэтому время пролета метеороида мы определили, используя камеры наружного наблюдения (Таблица 5.3). Точность, с которой вычислены времена событий пролета, составляет ± 0.1 сек.

Таблица 5.3. Время и координаты основных событий по анализу данных видеозаписей [72]

	Время UT (с)	Широта (°)	Долгота (°)	Высота (км)	Скорость (км/с)
начало регистрации	3:20:20.8	54.445	64.565	97.1	19.16
первая вспышка	3:20:29.8	54.764	62.109	43.9	19.2
главная вспышка	3:20:32.2	54.845	61.412	29.7	19.2
вторая фрагментация	3:20:33.4	54.876	61.128	23.9	16.8
третья фрагментация	3:20:34.7	54.905	60.865	18.5	12.1
конец регистрации	3:20:36.8	54.931	60.625	13.6	4.9

Таким образом, было определено время входа метеороида - 3:20:20.8UT, первая вспышка произошла в 3:20:29.8UT, самая яркая вспышка произошла в 3:20:32.2UT (Таблица 5.3) [72].

Используя полученные данные (Таблица 5.3) (используя время вспышек как опорное), все записи, сделанные видео регистраторами, были откалиброваны по времени.

5.3. Траектория и орбита Челябинского метеороида

Для определения координат трека Челябинского метеороида были использованы откалиброванные по времени и трансформированные нами кадры с 10 пунктов (Таблица 5.2).

Астрометрическая обработка была проведена с помощью программы, разработанной для CAMS (Cameras for Allsky Meteor Surveillance) [136]. Данная программа использует опорные звезды для вычисления небесных координат точек метеорного трека. Для опорных звезд определяется их положение в системе координат кадра и их небесные координаты с помощью звездного каталога. В данной программе используется каталог SKY2000 Master Catalog, Version 4 (каталог 300 000 звезд ярче $+8.0^m$ в системе Джонсона UBVRI) [119]. Вычисление координат точек трека метеороида проводилось с помощью опорных звезд, используя кубический полином.

В результате нами были вычислены экваториальные координаты (α, δ) точек метеорного трека по видеозаписям из 10 различных пунктов [72]. Используя комбинации пунктов (анализируя изображения попарно выбирая пункты) были получены траектория, скорость, радиант, угол входа, высоты (Таблицы 5.4) и параметры орбиты Челябинского метеороида (Таблица 5.6).

Таблица 5.4. Параметры (координаты радианта (α_R, δ_R), скорость входа (V_∞), траектория ($\lambda_b, \varphi_b; \lambda_e, \varphi_e$) и высота загорания (H_b) и максимальной яркости (H_e)) Челябинского метеороида, полученные для различных комбинаций данных (пунктов)

Пункт	α_R (°)	δ_R (°)	V_∞ (км/с)	H_b (км)	λ_b (°)	φ_b (°)	H_e (км)	λ_e (°)	φ_e (°)
PE-BE	328.15	7.65	18.75	90.7	54.48	64.28	29.7	54.84	61.43
KO-KU	327.82	7.52	19.23	89.8	54.47	64.24	25.2	54.85	61.23
PE-SN	328.06	7.86	19.31	92.4	54.48	64.33	25.3	54.86	61.22
PE-KU	328.08	7.88	19.13	90.8	54.48	64.28	25.1	54.86	61.23
KO-SN	327.77	7.47	19.38	91.0	54.46	64.28	25.6	54.86	61.23
KO-BE	327.98	7.17	18.54	88.8	54.47	64.22	29.8	54.84	61.41
SN-CS	328.06	6.97	19.37	54.3	54.68	62.63	26.3	54.85	61.23
BE-CS	328.10	7.23	18.47	84.6	54.49	64.03	29.4	54.83	61.38
KU-CS	327.84	7.20	19.36	65.7	54.61	63.17	25.6	54.85	61.22
PE-LE	328.31	7.56	19.19	93.5	54.47	64.37	25.1	54.87	61.12
KO-LE	328.65	6.98	20.07	93.1	54.45	64.38	26.8	54.86	61.11
SN-LE	329.72	7.64	18.34	52.2	54.73	62.57	24.4	54.87	61.13
CS-LE	328.82	6.24	19.87	59.6	54.65	62.83	27.6	54.85	61.11
BE-LE	328.50	7.35	18.90	86.8	54.51	64.14	24.7	54.88	61.13
KU-LE	330.08	7.53	18.64	63.5	54.66	63.14	25.0	54.87	61.12
PE-CS	330.31	5.25	9.38	57.0	54.63	63.17	24.5	54.85	61.23

PE-KO	328.49	6.64	13.67	66.8	54.58	63.55	39.2	54.75	62.18
KU-SN	331.30	9.43	19.34	66.5	54.62	63.18	26.7	54.77	61.21
BE-SN	328.48	7.74	19.05	87.5	54.51	64.16	25.7	54.86	61.23
KO-CS	332.48	3.70	9.98	57.3	54.62	63.29	32.7	54.81	61.51
BE-KU	330.00	8.66	19.51	85.4	54.51	64.04	26.7	54.79	61.21

Используя полученные данные (Таблица 5.4) мы вычислили угол входа метеороида, его радиант, геоцентрическую скорость и высоты загорания и потухания (Таблица 5.5).

Таблица 5.5. Параметры (координаты радианта (α_R , δ_R), геоцентрическая скорость V_g , высота загорания (H_b), максимальной яркости (H_{max}) и потухания (H_e) Челябинского метеороида [72]

Угол входа	$18.3 \pm 0.4^\circ$
H_b	97.1 км
H_{max}	29.7 ± 1.4 км
H_e	13.6 ± 1.6 км
Азимут	$\sim 103.2 \pm 0.4^\circ$
α_R	$333.2 \pm 1.0^\circ$
δ_R	$+0.3 \pm 1.1^\circ$
V_g	15.3 ± 0.2 км/с

По полученным параметрам с помощью программы CAMS [136] были рассчитаны орбитальные параметры Челябинского метеороида (Таблица 5.6).

Таблица 5.6. Параметры орбиты Челябинского метеороида

	q(a.e.)	a(a.e.)	e	i(°)	w (°)	Ω(°)
Popova, Jenniskens, Emel'yanenko, Kartashova et al. [72]	0.739 ± 0.012	1.763	0.581 ± 0.011	4.93 ± 0.27	108.3 ± 2.3	326.4422 ± 0.0015
Borovička et al [137]	0.738 ± 0.002	1.72 ± 0.02	0.571 ± 0.006	4.98 ± 0.12	107.67 ± 0.17	326.459 ± 0.001

где

a – большая полуось

q – Перигелийное расстояние

e - Эксцентриситет

ω – Аргумент перицентра

Ω – Долгота восходящего узла

i – Наклонение

Одновременно с нами, используя собственные калибровочные кадры, группой во главе с Vorovička [137] были рассчитаны орбитальные параметры Челябинского метеороида (Таблица 5.6). Как видно из таблицы 5.6 все данные хорошо согласуются.

С помощью данных, собранных коллективом (с участием автора) во время экспедиции и в сети Интернет, были определены не только его траектория, параметры полета и орбита, но и его диаметр 19.8 м, абсолютная яркость -27.3^m , химический состав найденных метеоритов и другие параметры [72].

5.4. Заключение

Для исследования события, произошедшего 15 февраля 2013 г. был собран различный материал, в том числе многочисленные видеозаписи пролета Челябинского метеороида. Для координатных измерений траектории суперболида, была проведена дополнительная астрометрическая съемка. Также были получены дополнительные сведения из опроса очевидцев события. На основе полученного материала были рассчитаны радиант, скорость, траектория и орбита Челябинского метеороида.

В результате комплексного анализа собранных данных о пролете суперболида были получены физические характеристики тела Челябинского метеороида: диаметр 19.8 м, его абсолютная яркость -27.3^m , скорость входа

в атмосферу 19.16 км/с под углом 18.3°. Диапазон оценок энергии Челябинского события 570 ± 150 кт ТНТ [72].

Наблюдения Челябинского суперболида с точки зрения методов наблюдения являются наблюдением редкого и крупного метеорного события, результаты нашего диссертационного исследования расширили диапазон масс малых тел Солнечной системы от 10^{-6} г до $1.3 \cdot 10^7$ кг. Таким образом, исследование Челябинского события еще раз подчеркивает необходимость изучения малоразмерных тел Солнечной системы для решения задач обеспечения астероидно–кометной безопасности планеты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы

Диссертация посвящена исследованию потока метеорного вещества через околоземное пространство по данным телевизионных наблюдений.

В результате проведенной работы была решена задача измерения координат объектов по телевизионным регистрациям. В частности, был разработан метод получения экваториальных координат из измерений прямоугольных координат в кадре, не зависящий от характера и величины aberrаций оптики. Также предложенный метод может быть использован в тех случаях, когда другие методы не применимы.

В работе был использован Индекс Метеорной Активности, как объективная оценка притока метеорного вещества на Землю.

Приведенная в диссертационной работе обработка наблюдений, полученных на камере FAVOR, позволила расширить область наблюдений на 2–3 звездные величины в сторону более слабых метеоров, что было сделано впервые в мире. По этим наблюдениям были определены приток метеорного вещества (в форме ИМА) для полугодового периода наблюдений и для сильных метеорных потоков Ориониды, Северные и Южные Тауриды за трехлетний интервал наблюдений, а также распределение количества метеоров по яркости для этих потоков.

Разработанные в диссертации методы и подходы позволили детально проанализировать уникальное Челябинское событие.

Перспективы дальнейших исследований

С помощью введенных в работу телевизионных метеорных камер будут продолжены оптические наблюдения метеорных явлений. Количество

станций будет увеличено с двух до пяти (и более) пунктов, разнесенных по долготе, что позволит определить наличие или отсутствие сезонных вариаций притока метеорного вещества на территории России и сопоставить эти данные с данными наблюдений в Европе и Америке.

Поскольку большинство метеорных частиц не достигают поверхности Земли, то их свойства (масса, размер, плотность и т. д.) оцениваются по наблюдательным данным, основываясь на тех или иных предположениях и принятых на данный момент моделях взаимодействия метеоров с атмосферой. Детали этого взаимодействия известны плохо, поэтому параметры метеорных частиц определяются с большими погрешностями. Одновременная регистрация метеоров различными методами дает возможность получить наблюдательный материал, анализ которого впоследствии позволит уточнить как их параметры, так и модели взаимодействия частиц с атмосферой. Поэтому планируется одновременно с оптическими наблюдениями проводить акустические и спектральные наблюдения.

Проводимые в ИНАСАН метеорные наблюдения, в том числе, рассмотренные в диссертации, будут использованы для построения новой модели распределения метеорного вещества в околоземном пространстве. Это позволит обновить ГОСТ метеорного вещества, что не делалось в России с 1985 года.

Личный вклад

Все результаты представленные в диссертации получены при личном участии автора.

Весь наблюдательный материал (в том числе и базисные наблюдения) использованный в диссертации был получен при личном участии автора.

Автор принимал личное участие в проведении обработки имеющегося наблюдательного материала.

Для проведения координатных измерений автором разработан метод вычисления небесных координат метеоров зарегистрированных патрульными метеорными камерами.

Все результаты оценки притока метеорного вещества в форме ИМА получены лично автором.

Автору принадлежит основной вклад в исследовании активности метеорных потоков Ориониды, Северных и Южных Таурид в период 2006–2008гг. на основе уникальных регистраций с камеры FAVOR.

Автор лично принимал участие в экспедиции в Челябинскую и соседние области, обработке и анализе данных с Челябинским событием.

Благодарности

В заключении автор выражает глубокую признательность научному руководителю д. ф.-м.н. Багрову А.В. за поддержку и внимание к работе, а также сотрудникам “Филиал “СОН Архыз” ОАО “НПК СПП” Бондарю С.Ф., Катковой Е. В., Терентеву Д. А., Карпову С. В. за помощь при наблюдениях и обработке данных, полученных на камере FAVOR, Yu. Toth сотруднику Братиславского университета им. Я. А. Коменского и Р. Koten сотруднику Астрономического института Чешской академии наук за ценные рекомендации в процессе работы, сотрудникам ИНАСАН Болговой Г. Т., Емельяненко В. В., Кильпио Е. Ю., Кайгородову П. В., Курбатову Е. П., Павлюченкову Я. Н., Крючкову С. В., сотрудникам ИДГ РАН Поповой О. П. и Глазачеву Д. О. и соавторам за помощь и плодотворное сотрудничество. Родным и друзьям за поддержку и всевозможную помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ловелл Б. Метеорная астрономия. — М.: Физ-Мат. Лит., 1958. — 490 С.
2. The IAU Meteor Data Center (MDC).
URL: <http://www.astro.amu.edu.pl/~jopek/MDC2007>. Дата обращения: 14.03.2014.
3. Модель космоса. Том II. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред.: Панасюк М., Новиков Л. — Москва: КДУ, 2007. — 1144 С.
4. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. Под ред.: Шустов Б. М., Рыхловой Л. В. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 384 С.
5. ГОСТ 25645.112-84. Вещество метеорное. Термины, определения и буквенные обозначения. — Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984. — 8 С.
6. Бронштэн В. А. Метеоры, метеориты, метеороиды. — Москва: Наука, 1987. — 173 С.
7. Астапович И. С. Основной каталог метеорных радиантов XIX века. — Ашхабад: Издательство Академии наук Туркменской ССР, 1956. — 106с.
8. International Meteor Organization (IMO). URL: www.imo.net
Дата обращения: 14.03.2016.
9. Катасев Л. А. Исследование метеоров в атмосфере Земли фотографическим методом. — Л., 1966. — 332 С.
10. Астапович И.С. Метеорные явления в атмосфере Земли. — М.: Физматгиз, 1958. — 640 С.
11. SonotaCo. A meteor shower catalog based on video observations in 2007-2008// WGN. — 2009. — 37: 2. — P. 55-62.
12. Центральная европейская метеорная сеть. URL: <http://cement.fireball.sk/>
Дата обращения: 14.03.2016.
13. Венгерская метеорная сеть. URL: <http://www.videometeor.hu/>

Дата обращения: 14.03.2016.

14. Итальянская метеор - транзиентная сеть.

URL: <http://meteore.forumattivo.com/> Дата обращения: 14.03.2016.

15. Польская метеорная сеть. URL: <http://www.pkim.org/> Дата обращения: 14.03.2016.

16. Хорватская метеорная сеть. URL: <http://cmn.rgn.hr/> Дата обращения: 14.03.2016.

17. Европейская болидная сеть.

URL: http://www.dlr.de/pf/en/desktopdefault.aspx/tabid-170/226_read-397/

Дата обращения: 14.03.2016.

18. Испанская метеорная и болидная сеть. URL: <http://www.spmn.uji.es/>

Дата обращения: 14.03.2016.

19. Японская болидная сеть. URL: <http://www3.cnet.ne.jp/c-shimo/index-e.html> Дата обращения: 14.03.2016.

20. Голландская метеорная группа. URL: <http://www.dmsweb.org/> Дата обращения: 14.03.2016.

21. Метеорная сеть Великобритании. URL: <http://ukmeteornetwork.co.uk/> Дата обращения: 14.03.2016.

22. Французская метеорная сеть. URL: http://www.boam.fr/carte_boam.htm Дата обращения: 14.03.2016.

23. Arbeitskreis Meteore e.v. (АКМ) (Германия).

URL: <http://www.meteoros.de/> Дата обращения: 14.03.2016.

24. Американское метеорное общество. URL: <http://www.amsmeteors.org/> Дата обращения: 14.03.2016.

25. Северо-Американская метеорная сеть.

URL: <http://www.namnmeteors.org/> Дата обращения: 14.03.2016.

26. NMSU All Sky Camera Network. URL: <http://skysentinel.nmsu.edu/allsky/> Дата обращения: 14.03.2016.

27. Виртуальная метеорная обсерватория (VMO). URL: <http://vmo.imo.net/>
Дата обращения: 10.03.2016.
28. Багров А.В., Бескин Г.М., Бирюков А.В. и др. Широкоугольная высокоскоростная оптическая камера для обнаружения вспыхивающих и движущихся объектов //Тр. Конф. «Околоземная Астрономия – 2003». — СПб.: ВВМ, 2003. — С. 101–106.
29. Карташова А. П. Метеорные наблюдения на Звенигородской обсерватории ИНАСАН в 2011г//Труды международной студенческой конференции «Физика космоса». — Екатеринбург, 2012. — С. 242.
30. Kartashova A. Television meteor observations in INASAN//Proceedings of the International Meteor Conference 2012, Eds.: Gyssens M. and Roggemans P. — IMO, 2013. — P. 174 – 177.
31. Федынский В. В. Метеоры. — М., 1956. —112 С.
32. Watanabe J., Kasuga T., Terai T. et al. Faint meteor observation by large-format CMOS sensor with 1.05-m Kiso schmidt telescope// Proceedings of the conference «Meteoroids 2013». Eds.: Jopek T.J., Rietmeijer F.J.M., Watanabe J., Williams I.P. — A. M. University Press, 2014. — P. 325 – 328.
33. Video Meteor Database. URL: <http://www.imonet.org/database.html#3>
Дата обращения: 14.02.2016.
34. NASA's All Sky Fireball Network. URL: <http://fireballs.ndc.nasa.gov/>
Дата обращения: 14.03.2016.
35. Ceplecha Z. Multiple fall of Příbram meteorites photographed //BAICz. – 1961. — Vol. 12. — P. 21 – 46.
36. Ceplecha Z. Luminous efficiencies based on photographic observations of Lost-City fireball and implications to the influx of interplanetary bodies onto Earth // Astron. Astrophys. — 1996. — Vol. 311. — P. 329 – 332.
37. Halliday I., Griffin A. A., Blackwell A. T. The Innisfree meteorite fall: a photographic analysis of fragmentation, dynamics and luminosity // Meteoritics. — 1981. — Vol. 16, N. 2. — P. 153–170.

38. Spurný P., Oberst J., Heinlein D. Photographic observations of Neuschwanstein, a second meteorite from the orbit of the Pribram chondrite // *Nature*. – 2003. — Vol. 423. — P. 151–153.
39. ReVelle D.O., Brown P.G., Spurný P. Entry dynamics and acoustics/infrasonic/seismic analysis for the Neuschwanstein meteorite fall // *Meteoritics and Planetary Science*. — 2004. — Vol. 39, N. 10. — P. 1605–1626.
40. Spurný P., Bland P. A., Shrbený L. et al. The Bunburra Rockhole meteorite fall in SW Australia: fireball trajectory, luminosity, dynamics, orbit, and impact position from photographic and photoelectric records// *Meteoritics & Planetary Science*. – 2012. — Vol. 47, Issue 2. — P. 163–185.
41. Watec Inc. URL: http://www.wateccameras.com/products.php?prod_id=194.
Дата обращения: 14.03.2015.
42. SonotaCo. UFOCapture V2. User Manual. — 2005. — 38 P.
43. Kartashova A., Bolgova G. Double-station meteor observations by INASAN // *Proceedings of the International Meteor Conference 2015*, Eds.: Rault J.-L. and Roggemans P. — IMO, 2015. — P. 147–148.
44. Beskin G., Bad'in V., Biryukov A. et al. FAVOR (FASt Variability Optical Registration) — A two-telescope complex for detection and investigation of short optical transients// *Nuovo Cimento*. — 2005. — Vol. 28. — P. 751–754.
45. Natural Environment and Physical Standards for the Apollo Program. — NASA Office of Manned Space Flight, M-DE 8020.008B. – April, 1965.
46. Burbank P.V., Cour-Palais B. S. and McAllum W. E. A Meteoroid Environment for Near-Earth, Cislunar and Near-Lunar Operations. — NASA TN D-2747. — April, 1965. — P. 21.
47. Dohnanyi J. S. Model distribution of Photographic Meteors. — Bellcomm Inc. Report TR-66-34-1. — 1966.
48. Naumann R. J. The Near-Earth Meteoroid Environment. — NASA TN D-3717. — November, 1966.

49. NASA SP-8013. Meteoroid Environment Model-1969. Near Earth to Lunar surface. — National Aeronautics and Space administration. — 1969.
50. NASA SP-8038. Meteoroid Engineering Model -1970. Interplanetary and planetary. — National Aeronautics and Space administration. — 1970.
51. Jones J. et al. Meteoroid Engineering Model – Final Report, Space Environments and Effects Program SEE/CR-2004-400. — NASA Marshall Space Flight Center. — 2004.
52. McNamara H., Jones J., Kauffman B. et al. Meteoroid Engineering Model (MEM): A Meteoroid Model for the Inner Solar System// Earth, Moon, and Planets, 2004. — Vol.95, Issue 1–4. — P.123–139.
53. Grün E., Zook H. A., Fechtig H. and Giese R. H. Collisional Balance of the Meteoritic Complex// Icarus, 1985. — Vol. 62 — P. 244–272.
54. Drolshagen G. and Borde J. ESABASE/Debris Meteoroid/Debris Impact Analysis. Technical Description. — 1992. – Issue 1 for ESABASE version 90.1.
55. Lemcke C., Scheifele G., Maag M. C. Enhanced debris/micrometeoroid environment models and 3D software tools. Technical Description of ESTEC. — Contract No. 11540/95/NL/JG. — 1998.
56. Lemcke C. Enhanced debris/micrometeoroid environment models and 3D software tools. Final Report of ESTEC. — Contract No. 11540/95/NL/JG. — 1998.
57. Bendisch J., Bunte K., Klinkrad H. et al. The MASTER-2001 model//Advances in Space Research. — 2004. — Vol. 34, Issue 5. — P. 959–968.
58. Oswald M., Stabroth S., Wegener P. et al. Upgrade of the MASTER Model. Final Report of ESA. – Contract 18014/03/D/HK(SC), M05/MAS-FR. – 2006.
59. Flegel S., Gelhaus J., Mockel M. et al. Maintenance of the ESA MASTER Model, Final Report of ESA. — Contract 21705/08/D/HK, M09/MAS-FR. — June, 2011.
60. Dikarev V., Gruen E., Baggaley J. et al. The new ESA meteoroid model. Advances in Space Research. — 2005 — Vol. 35, Issue 7. — P. 1282–1289.

61. Dikarev V., Gruen E., Baggaley J. et al. Modeling the sporadic meteoroid background cloud// *Earth Moon Planets*. — 2005. — Vol. 95. — P. 109–122.
62. Gruen E., Srama R., Horanyi M., Kruger H. Comparative Analysis of the ESA and NASA Interplanetary Meteoroid Environment Models// *Proceedings of the 6th European Conference on Space Debris*, Ed.: Ouwehand L. — ESA SP-723. — 2013. — ISBN 978-92-9221-287-2, ID. 36.
63. ГОСТ 25645.128 – 85. Вещество метеорное. Модель пространственного распределения. — Москва: Государственный комитет СССР по стандартам. — 1985. — 24 С.
64. Ceplecha Z. Influx of interplanetary bodies onto earth//*Astronomy and Astrophysics*. — 1992. — Vol. 263, N. 1–2. — P. 361–366.
65. Ceplecha Z., Borovicka J., Elford W.G. et al. Meteor phenomena and bodies // *Space Sci. Rev.* — 1998. — Vol. 84. — P. 327 – 471.
66. Divine N. Five Populations of Interplanetary Meteoroids// *Journal of Geophysical Research*, 1993. — Vol. 98, Issue E9. — P. 17029 - 17048.
67. Staubach P., Grün E., Jehn R. The Meteoroid Environment near Earth// *Advances in Space Research*. — 1997. — Vol. 19, Issue 2. — P. 301-308.
68. Drolshagen G., Dikarev V., Landgraf M. et al. Comparison of Meteoroid Flux Models for Near Earth Space//*Earth Moon Planets*. — 2008. — Vol. 102. Issue 1-4. — P. 191–197.
69. NEO Program. URL: <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/> Дата обращения: 18.03.2016.
70. Binzel R. P. The Torino Impact Hazard Scale// *Planetary and Space Science*. — 2000. — Vol. 48, Issue 4. — P. 297–303.
71. Bolide Events 1994-2013. URL: <http://neo.jpl.nasa.gov/news/news186.html> Дата обращения: 14.03.2016.
72. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization// *Science* 342. — 2013. — Vol. 342, Issue 6162. — P.1069–1073.

73. Багров А.В., Болгова Г.Т., Микиша А.М. и др. Программа наблюдений крупных тел в метеорных и болидных потоках // Тезисы докладов на Всероссийской конференции "Программа наблюдений высокоорбитальных спутников Земли и небесных тел Солнечной системы". — 1994. — С.17–18.
74. Барабанов С.И., Болгова Г.Т., Микиша А.М., Смирнов М.А. Обнаружение крупных тел в метеорных потоках за пределами земной атмосферы// Письма в астроном. журн. — 1996. — Т. 22. — С. 945–949.
75. Багров А.В., Выгон В.Г. Попытки поиска крупных метеороидов в радиантах и антирадиантах известных метеорных потоков. // Сборник материалов к международной конференции "Космическая защита Земли - 2000". — Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. — 2000.— С. 96–97.
76. Багров А. В., Выгон В. Г., Бондарь С. Ф. и др. Гибридная телевизионная система для наблюдения слабых космических объектов//Сборник научных трудов конференции «Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы». — М. Космосинформ, 2000. — С. 334–346.
77. Trigo-Rodriguez J.M., Castro-Tirado A.J., Llorca J. et al. The development of the Spanish fireball network using a new all-sky CCD system// Earth Moon Planets. — 2004. — Vol. 95. — P. 553–567.
78. Olech A., Zoladek P., Wisniewski M. et al. Polish fireball network// Proceedings of International Meteor Conference. — 2005. — P. 53–62.
79. Toth J., Kornoš L., Gajdoš Š., Kalmančok D. et al. TV Meteor Observations from Modra// Earth Moon Planets. — 2007. — Vol. 102. — P. 257–261.
80. Atreya P. and Christou A. The Armagh Observatory Meteor Camera Cluster: Overview and Status// Earth Moon Planets. — 2008. — Vol. 102. — P. 263–267.
81. Дейч А. Н. К вопросу о редукции фотографических положений при произвольном оптическом центре// Астрономический вестник. — 1965. — Т. 42, N. 5. — С. 1114–1116.

82. Koten P. Software for processing of meteor video records// *Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002)*. — 2002. — P. 197–200.
83. Бугославская Е. Я. Фотографическая астрометрия. — М.: ОГИЗ, 1947.— 296 С.
84. Ceplecha Z. Geometric, dynamic, orbital and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks//*Bull. Astron. Inst. Czechosl.* — 1987. — Vol. 38. — P. 222–234.
85. Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И., Боровичка И., Спурны П. Фотографические наблюдения болидов в Таджикистане // *Астрономический вестник*. — 2009. — Т. 43, N. 4. — С. 367–376.
86. Куликов К. А. Курс сферической астрономии. — М. 1961. — 216 С.
87. Kozak P. Analysis of the methods and precision of determination of the equatorial coordinates in digital reducing of TV observations of meteors// *Kinematics and Physics of celestial bodies*. — 2002. — Vol. 18. — P. 471–480.
88. Горбанев Ю.М. и др. Методика позиционных измерений телевизионных изображений телескопических метеоров // *Астрономический вестник*. — 2008. — Т. 42, N. 1. — С. 37–53.
89. Karpov S. et al. FAVOR (FAst Variability Optical Registration) – two-telescope complex for detection and investigation of short optical transients// *Astronomische Nachrichten*. — 2004. — Vol. 325, N. 6–8. — P. 677.
90. Borovicka J. Astrometry with All-Sky Cameras// *Publ. Astron. Inst. Czech. Acad. Sci.* — 1992. — Vol. 79.
91. Borovicka J., Spurny P. and Kecklikova J. A new positional astrometry method for all-sky cameras// *Astron. Astrophys.* — 1995. — Vol. 112. — P. 173–178.
92. Kartashova A. P. The method of measurements of celestial coordinates in wide-field TV-frames// *Earth, Moon and Planets*. — 2012. — Vol. 108. — P.165–173.
93. SonotaCo, UFOAnalyzer. User Manual. — 2007. — 57 P.

94. Карпов С. В. Наблюдательные проявления быстропеременных релятивистских объектов// Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук. САО РАН. Нижний Архыз. — 2007. —180 С.
95. Groth E. J. A pattern-matching algorithm for two-dimensional coordinate lists// *Astronomical Journal*. — 1986. — P. 1244-1248.
96. Valdes F. G., Campusano L. E., Velasquez J. D. FOCAS Automatic Catalog Matching Algorithms// *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 1995. — Vol. 107. — P. 1119.
97. Hog E. et al. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars// *Astronomy and Astrophysics*. — 2000. — Vol. 355. — P. L27–L30.
98. Brown P. On the Cause and Nature of error in Zenithal Hourly Rates//*WGN*. — 1990. — Vol. 18. — P. 141–145.
99. Багров А.В., Леонов В.А., Масленникова Е.С. Определение темпа поступления метеорного вещества на Землю по измерениям с одного пункта патрульной телевизионной установкой // *Астрон. вестн.* — 2007. —Т. 41, N.6. — С.537–544.
100. Kartashova A. Determination of meteor influx (Index of meteor activity) to the Earth// *Proceedings of IMC – 2010*. — IMO, 2011. — P. 32–36.
101. Леонов В.А. Определение принадлежности метеоров к потокам методом односторонних наблюдений// *Астрон. вестн.* — 2010. — Т. 44, N. 2. — С.135–149.
102. Терентьева А.К. Малые метеорные рои //Исследование метеоров. Результаты исследований по международным геофизическим годам. — 1966. — N. 1. — С. 62–132.
103. Kronk G. W. *Meteor Showers: A Descriptive Catalog*// Enslow Pub Inc. — 1988. — 290 P.
104. Kartashova A.P., Bagrov A.V., Bolgova G.T., Leonov V.A. The half-year monitoring of meteoroid influx to the near-earth space by TV-observations// *Odessa Astronomical Publications*. — 2007. — Vol. 20, N. 2. — P. 46–49.

105. Pozanenko A., Chernenko A., Beskin G. et al. Synchronous Observations by Ground Based Optical and X-ray Space Born Telescopes//Astronomical Data Analysis Software and Systems XII ASP Conference Series, Eds. H. E. Payne, R. I. Jedrzejewski, and R. N. Hook. — 2003. — Vol. 295 — P.457-460.
106. Карташова А. П. , Болгова Г. Т. Исследование метеорного потока Ориониды по телевизионным наблюдениям в 2006-2008 гг.//Астрономический вестник. — 2013. — Т. 47, N. 3. — С. 213–218.
107. Карташова А. , Болгова Г. Результаты наблюдений метеорного потока Тауриды в период с 2006 по 2008 год// Вестник СибГАО. — 2011. — Т.6, N. 39. — С. 105-108.
108. Lunsford R. Meteors and how to observe them. — Springer, Science + Business Media, LLC. — 2009. — 192 P.
109. Johannink C., Miskotte K. Orioniden spektakel 2006! //eRadiant. — 2006. — Jaarg. 2, N. 5. — P. 115–119.
110. Rendtel J. Three days of enhanced Orionid activity in 2006 – Meteoroids from a resonance region? // WGN. — 2007. — Vol. 35, N. 2. — P. 41–45.
111. Rendtel J. The orionid meteor shower observed over 70Years // Earth, Moon, and Planet. — 2008. — Vol. 102. — P. 103–110.
112. Molau S., Kac J. Results of the IMO Video Meteor Network – October 2009 // WGN. — 2009. — Vol. 37, N. 6. — P. 188–190.
113. Kero J., Szasz C., Nakamura T. et al. First results from the 2009–2010 MU radar head echo observation programme for sporadic and shower meteors: The Orionids 2009 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 2011. — Vol. 416. — P.2550–2559.
114. Sato M., Watanabe J. I. Origin of the 2006 Orionid outburst //Publ. Astron. Soc. Japan. — 2007. — Vol. 59, N. 4. — P. L21–L24.
115. Weryk R. J., Campbell - Brown M., Wiegert P. A. et al. The Canadian Automated Meteor Observatory (CAMO): System overview// Icarus. — 2013. — Vol. 225, Issue 1. — P. 614–622.

116. Крючков С. В., Мазуров В. А. Автоматизированная камера для наблюдений метеоров//Тезисы Международной конференции «Околоземная астрономия – 2015». — 2015. — С. 116.
117. Kartashova A., Meteor television observations in Russia//Proceedings of the International Meteor Conference 2014. Eds.: Gyssens M. and Roggemans P. — IMO, 2014. — P.101–103.
118. Kartashova A. P., Bolgova G. T. TV observations of the Perseid meteor shower in 2012–2013// Planetary and Space Science. — 2015. — Vol. 118C — P.120–126.
119. Myers J.R., Sande C.B., Miller A.C., Warren Jr. W.H., Tracewell D.A. Goddard Space Flight Center, Flight Dynamics Division. — 2002.
120. Pogson N. Magnitudes of Thirty-six of the Minor Planets for the first day of each month of the year 1857// Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1856. — Vol. 17. — P.12–15.
121. Verniani F. An Analysis of the PhysicalParameters of 5759 Faint Radio Meteors// Journal of Geophysical Research. — 1973. — Vol. 78. — P. 8429–8462.
122. SonotaCo, UFOOrbit. User Manual. — 2007. — 25 P.
123. Kresák L'. and Porubcan V. The dispersion of meteors in meteor streams. I. The size of the radiant areas// Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia. — 1970. — Vol. 21. — P.153.
124. Stewart W., Pratt A.R., Entwisle L. NEMETODE: The network for meteor triangulation and orbit determination. System overview and initial results from a UK video meteor network// WGN. — 2013. — Vol. 41, N. 3. — P. 84-91.
125. Arlt R. Radiant ephemeris for the Perseid meteor shower// WGN. — 2003. — Vol.31, N. 1. — P. 19–28.
126. Koten P. et. al. Atmospheric trajectories and light curves of shower meteors// Astronomy and Astrophysics. — 2004. — Vol. 428. — P. 683–690.
127. Cook A. F., A working list of meteor streams// In Evolutionary and Physical Properties of Meteoroids. — NASA SP–319, 1973. — P.183–191.

128. The IAU Minor Planet Center (MPC). URL: <http://www.minorplanetcenter.net/iau/mpc.html> Дата обращения: 10.08.2014.
129. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н. и др. Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 г.// Астрономический вестник. — 2013. — Т. 47, N. 4. — С. 262–277.
130. Jenniskens P., Shaddad M.H., Numan D., et al. The impact and recovery of asteroid 2008 TC3 // Nature. — 2009. — Vol. 458. — P. 485–488.
131. Карташова А.П., Попова О.П., Дженнискенс П., Короткий С. и др. Челябинское событие: опрос очевидцев// Динамические процессы в геосферах. — Выпуск 5: сборник научных трудов ИДГ РАН, Москва, ГЕОС. — 2014. — С.146–155.
132. Попова О.П., Шувалов В.В., Рыбнов Ю.С. и др. Параметры челябинского метеороида: анализ данных// Динамические процессы в геосферах. — Выпуск 4: сборник научных трудов ИДГ РАН. Москва, ГЕОС. — 2013. — С.10–21.
133. Kartashova A., Popova O., Jenniskens P. et al. A field study of the Chelyabinsk airburst event// Proceedings of the International Meteor Conference 2013. Eds.: Gyssens M. and Roggemans P. — IMO, 2014. — P. 161–165.
134. Kartashova A., Popova O., Jenniskens P. et al. Eye-witness interviews on the Chelyabinsk airburst//Proceedings of the International Meteor Conference 2013. Eds.: Gyssens M. and Roggemans P. — IMO, 2014. — P.189–192.
135. Popova O., Jenniskens P., Shuvalov V. et al. Chelyabinsk meteoroid entry and airburst damage// Proceedings of Meteoroids 2013 conference. Eds. Jopek T., Rietmeijer F., Watanabe J.,Williams I. — AM University press, 2014.— P. 3–9.
136. Jenniskens P., Gural P. S., Dynneson L. et al. CAMS: Cameras for allsky meteor surveillance to establish minor meteor showers// Icarus. — 2001. — Vol. 216. — P. 40–61.
137. Borovička J., Spurný P., Brown P. et al. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. — 2013. — V.503.—P. 235–237.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1. Характеристики метеорных телевизионных камер

Камера	Работает		Оператор	Страна	Параметры		Наблюдения	
Название	с	по			FOV	LM	Ночи	Метеоры
ICC*	03/00	-	D. Koschny	Netherlands	10°	7	722	12914
TIMES4	07/00	-	O. Benitez Sanchez	Spain	49°	3	748	11554
OND1	08/01	-	R. Stork	Czech Rep.	47°	6	148	16225
KUN1	08/01	-	R. Stork	Czech Rep.	44°	6	93	8783
KAYAK1	06/02	-	S. Slavec	Slovenia	25°	6	1415	17725
MINCAM1	07/02	-	S. Molau	Germany	38°	5	2254	36716
MINCAM2	07/02	-	J. Strunk	Germany	49°	5	2093	23405
MINCAM3	06/03	-	J. Strunk	Germany	27°	6	1238	19683
FINEXCAM	12/03	-	I. Yrjölä	Finland	48°	5	1255	25845
METKA	12/03	-	J. Kac	Slovenia	37°	4	1367	19933
AVIS2	08/04	-	S. Molau	Germany	42°	7	1285	90072
MINCAM4	08/04	-	J. Strunk	Germany	100°	3	204	1438
MIN38	08/05	-	E. Stomeo	Italy	75°	4	1370	52932
MET38	08/05	-	M. Eltri	Italy	75°	4	899	27604
BMH1	12/05	-	F. Castellani	Italy	49°	4	1527	24945
REZIKA	01/06	-	J. Kac	Slovenia	48°	5	935	33568
SRAKA	01/06	-	M. Triglav-Cekada	Slovenia	47°	5	1188	18345
REMO1	06/06	-	S. Molau	Germany	38°	6	1673	33458
MINCAM5	07/06	-	J. Strunk	Germany	48°	5	1058	21800
FIAMENE	10/06	-	B. Roberto	Italy	80°	3	294	5320
HERMINE	11/06	-	B. Brinkmann	Germany	49°	4	1448	22707
ORION1	05/07	-	J. Kac	Slovenia	38°	5	1241	19345
STG38	08/07	-	S. Crivello	Italy	75°	4	949	33806
ARMEFA	08/07	-	E. Rothenberg	Germany	49°	5	808	12338
BMH2	02/08	-	F. Castellani	Italy	65°	4	1153	21377
REMO2	02/08	-	S. Molau	Germany	38°	6	1079	17833
TEMPLAR1	02/08	-	R. Goncalves	Portugal	47°	5	1143	36380
TEMPLAR2	08/08	-	R. Goncalves	Portugal	47°	5	1012	23673
C3P8	08/08	-	S. Crivello	Italy	75°	4	1119	32481
ALBIANO	08/08	-	P. Ochner	Italy	68°	3	567	7982
ORION2	08/08	-	J. Kac	Slovenia	38°	6	893	21051
STEFKA	09/08	-	J. Kac	Slovenia	74°	4	521	13055
SCO38	03/09	-	E. Stomeo	Italy	75°	4	954	44473
HUHOD	04/09	-	A. Igaz	Hungary	75°	4	696	13359
NOA38	05/09	-	E. Stomeo	Italy	75°	4	873	30350
HUMOB	07/09	-	I. Tepliczky	Hungary	48°	5	679	19375

DORAEMON	08/09	-	H. Schremmer	Germany	74°	3	823	11493
HUBAJ	11/09	-	A. Igaz	Hungary	75°	4	690	12207
GOCAM1	01/10	-	S. Kerr	Australia	73°	5	647	33971
HUFUL	02/10	-	J. Morvai	Hungary	50°	4	595	8915
ORIE1	02/10	-	M. Otte	USA	62°	3	701	13826
LIC4	03/10	-	D. Koschny	Netherlands	45°	5	450	9300
HUPOL	04/10	-	A. Igaz	Hungary	63°	4	475	4023
HUBEC	06/10	-	Z. Perko	Hungary	74°	3	652	23570
SALSA3	08/10	-	C. Hergenrother	USA	66°	4	376	7616
HULUD2	08/10	-	E. Berko	Hungary	80°	4	519	9503
HULUD1	10/10	-	E. Berko	Hungary	80°	4	506	17862
HUVCSE01	11/10	-	S. Csizmadia	Hungary	49°	4	477	6249
HUSOR	12/10	-	J. Karoly	Hungary	73°	4	501	8112
KLEMOI	01/11	-	B. Brinkmann	Germany	48°	5	488	8939
HULUD3	04/11	-	E. Berko	Hungary	48°	4	387	5620
TACKA	04/11	-	G. Kladnik	Slovenia	27°	5	64	1668
HUSOP	05/11	-	A. Igaz	Hungary	48°	4	374	9594
HUVCSE02	05/11	-	Z. Zelko	Hungary	40°	4	88	1281
MBB3	05/11	-	M. Breukers	Belgium	48°	4	267	4552
RO1	06/11	-	C. Saraiva	Portugal	48°	4	430	7442
RO2	06/11	-	C. Saraiva	Portugal	48°	4	419	7594
PAV35	07/11	-	M. Maciejewski	Poland	66°	2	336	3633
PAV36	07/11	-	M. Maciejewski	Poland	69°	2	363	6016
PAV43	07/11	-	M. Maciejewski	Poland	50°	2	334	3491
SAPHIRA	07/11	-	A. Leroy	France	48°	3	255	1676
TEMPLAR3	07/11	-	R. Goncalves	Portugal	38°	4	441	9390
URANIA1	07/11	-	L. Bastiaens	Belgium	75°	2	75	354
HUDEB	08/11	-	A. Igaz	Hungary	75°	3	377	8310
LEO	08/11	-	L. Scarpa	Italy	47°	4	380	8636
MBB4	08/11	-	M. Breukers	Belgium	38°	5	247	3738
CVETKA	09/11	-	J. Kac	Slovenia	75°	4	224	7558
HUVCSE03	09/11	-	Z. Zelko	Hungary	47°	4	69	1047
ICC7	09/11		D. Koschny	Netherlands	27°	6	234	12627
LOOMECOM	09/11	-	G. Maravelias	Greece	26°	6	273	7268
ACR	10/11	-	W. Hinz	Germany	24°	7	166	7437
BILBO	10/11	-	S. Crivello	Italy	75°	4	363	13593
HUSUL	11/11	-	S. Kiss	Hungary	65°	4	300	2077
SOFIA	11/11	-	C. Saraiva	Portugal	27°	5	309	4127
HUAGO	11/11	-	S. Biro	Hungary	49°	4	287	5037
MARIO	12/11	-	M. Bombardini	Italy	76°	3	203	5670
ORION3	12/11	-	M. Govedic	Slovenia	40°	3	241	3422
ORION4	12/11	-	M. Govedic	Slovenia	40°	4	262	4165
MOBCAM1	01/12	-	R. Pucer	Slovenia	49°	5	272	6231

FOGCAM	02/12	-	F. Ocana Gonzales	Spain	43°	4	174	1218
LUDWIG1	04/12	-	R. Arlt	Germany	39°	5	68	413
TEMPLAR4	04/12	-	R. Goncalves	Portugal	67°	3	85	2252
REMO3	10/12	-	S. Molau	Germany	38°	5	36	529

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

CAMS – Cameras for Allsky Meteor Surveillance

ESA – Europe Space Agency – Европейское космическое агентство

FAVOR – FAsT Variability Optical Registrator

HETE – High Energy Transient Explorer

IAU MDC – The International Astronomical Union Meteor Data Center

IMEM –Interplanetary Meteoroid Engineering Model

IMO – International meteor organization

MEM – Meteoroid Engineering Model

MPC – Minor Planetary Center

NASA – National Aeronautics and Space Administration – Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства

NEMETODE –The network for meteor triangulation and orbit determination

PatrolCa – Патрульная камера

UT – Universal time – Всемирное время

ZHR - Zenith Hour Rate – Зенитное часовое число

АКО - астероидно - кометная опасность

БД – База данных

ГОСТ – государственный стандарт

ЗО ИНАСАН – Звенигородская обсерватория Института астрономии РАН

ИМА – Индекс Метеорной Активности

ИНАСАН – Институт астрономии Российской академии наук

КА – космический аппарат

нп – наблюдательный пункт

ОКП – околоземное пространство

ОСЗ – Объекты сближающиеся с Землей

ПЗС – прибор с зарядовой связью

ЭОП – электронно – оптический преобразователь