

УДК 523.68:519.2

РЕТРОСПЕКТИВА ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА. Ч. 2. МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ МЕТЕОРНОЙ АСТРОНОМИИ

© 2021 г. В. В. Миронов¹*, А. К. Муртазов²

¹Рязанский государственный радиотехнический университет, г. Рязань, Россия

²Рязанский государственный университет, г. Рязань, Россия

**mironov1.v.v@rsreu.ru*

Поступила в редакцию 13.10.2019 г.

После доработки 13.10.2019 г.

Принята к публикации 16.01.2020 г.

Проведен обзор публикаций по проблемам мониторинга засорения околоземного космического пространства естественным космическим мусором, в том числе опасными метеороидами методами оптической метеорной астрономии. Анализируются как методы наблюдения, так и методы оценки опасности от естественного космического мусора для космических аппаратов.

DOI: 10.31857/S0023420621010064

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования содержания тел естественного происхождения в околоземном космическом пространстве (ОКП) и метеорных потоках в последнее время приобрели актуальность в связи с проблемой экологической опасности от космических тел [1]. Кроме того, исследования распределения риска соударения метеороидов размерами более 1 мм с космической техникой исключительно важны для долгосрочного прогноза развития космических исследований с точки зрения безопасности космонавтов и сохранности космической техники, а также проблем экологии околоземного пространства [2]. Наблюдения метеоров координируются Международным метеорным обществом (ИМО – International Meteor Organization), которое недавно отметило свое 30-летие. Одним из методов мониторинга естественного загрязнения околоземного пространства является оптический метод метеорной астрономии.

Настоящая обзорная статья вобрала в себя анализ большого числа работ, в ней представлена ретроспектива методик мониторинга опасных метеороидов в метеорных потоках в околоземном пространстве оптическими средствами. Проанализированы параметры широкоугольной оптической ПЗС-системы для проведения мониторинга опасных метеороидов, искусственных спутников Земли и различных явлений на низких околозем-

ных орбитах, анализируются экспериментальные оценки средней пространственной плотности опасных метеороидов в метеорном потоке Персеиды в период действия этого потока на протяжении длительного промежутка времени, оценены метеороидные риски основных метеорных потоков по данным их 10-летнего мониторинга, разработаны модели оценки риска опасных соударений космической техники с метеороидами в околоземном пространстве, разработаны оригинальные методики расчета средних значений метеороидного риска для КА с различными параметрами орбиты и решены другие актуальные вопросы.

Все обозначения стандартны для рассматриваемых задач, при необходимости их описание можно найти в фундаментальных работах [3, 4].

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗАСОРЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

В астрономической обсерватории Рязанского госуниверситета имени С.А. Есенина при математическом сопровождении Лаборатории системного анализа Рязанского государственного радиотехнического университета разработаны широкоугольная оптическая система для мониторинга засорения ОКП космическим мусором естественного и техногенного происхождения на

основе ПЗС-камеры в качестве приемника излучения и математические методы обработки информации [3–8].

Цель исследований: мониторинг метеороидной опасности, контроль потоков естественных и техногенных тел в околоземном пространстве для оценки их опасности для космической техники и экологического состояния ОКП.

Задачи исследований: – мониторинг метеорных потоков, ИСЗ и космического мусора в ОКП оптическими средствами; – учет источников засорений в базах данных, сбор, обработка, обобщение и хранение в базах данных информации об экологической обстановке в ОКП; – моделирование и на основе этого прогноз экологической обстановки и метеороидного риска в ОКП.

Базовая камера для метеорных исследований. Наиболее доступной на настоящий момент оказалась система, основанная на черно-белой телевизионной камере КРС-650ВН фирмы “КТ&С” (Корея), снабженной 1.3" матрицей SONY ICX-249AL EX-View, и камере Wat-902Н с 1.2" матрицей того же типа. Подобные недорогие камеры фирмы Watec с электронными матрицами ICX-249AL нашли широкое применение в системах метеорного мониторинга во всем мире.

В работе [7, 9] в качестве приемника излучения использована оптическая система для мониторинга засорения ОКП космическим мусором естественного и техногенного происхождения на основе ПЗС-камеры Watec-902. Комбинация камер Watec с различными объективами позволяет решать различные задачи. Системы с широкоугольными объективами позволяют проводить all-sky-мониторинг нестационарных явлений на небесной сфере. Системы с полями зрения 50° – 60° используются нами для базисных наблюдений метеоров.

Комбинация камеры Watec с объективом Helios-40 ($F = 85$ мм, $1 : 1.5$) дает небольшое поле зрения с хорошей проникающей способностью (до 11 – 12^m в режиме сложения кадров), что позволяет использовать ее для наблюдений ярких астероидов [8].

Приведем результаты исследования параметров этих камер в условиях регистрации предельно малых световых потоков применительно к мониторингу объектов в околоземном пространстве.

Спектральные характеристики. Максимум спектральной чувствительности черно-белых камер SONY находится в желто-зеленой области спектра, а полоса чувствительности близка к визуальной полосе V системы Джонсона.

Сводные характеристики [10] показывают, что полоса пропускания ПЗС-камер SONY значительно шире, нежели V. В работе произведены измерения спектральной чувствительности системы, состоящей из камеры КРС-960ВН с матрицей ICX-249AL, объективов SSE0612NI F1.2, T2314 и набора абсорбционных стеклянных фильтров. Для фильтров СС-4, ЗС-8, ОС-14 получены кривые, наиболее близкие к кривым реакции системы BVR.

Объективы. Размер ПЗС-ячеек является основным параметром, определяющим требование к разрешающей способности объектива. Другим таким параметром может явиться требование по обеспечению работы матрицы в условии световой перегрузки, которое будет рассмотрено ниже. Для 1.2 дюймовой матрицы SONY размер пиксела составляет 8.6×8.3 мкм (типичное значение для 1.2 дюймовых матриц – 8.5×8.5 мкм).

Следовательно, объектив должен иметь разрешение лучше, чем $1/8.3 \cdot 10^{-3} = 120$ линий (60 пар) на мм. Для объективов, сделанных под 1.3-дюймовые матрицы, это значение должно быть еще выше. Отсюда следует, что объективы для матриц меньшего размера не подходят к большим матрицам из-за существенно ухудшающихся характеристик на краях больших матриц. В то же время объективы для больших матриц могут ограничить разрешение изображений, получаемых с меньших матриц.

Следует отметить, что чем широкоугольней система, тем более реальные результаты получаются для ярких метеоров ввиду неравномерности их распределения в пространстве.

Объектив ПЗС-камеры собирает изображение объекта на небесной сфере с координатами (α, δ) на ПЗС-матрице в точке P с координатами (X, Y) .

Соотношения между (α, δ) и (X, Y) представляются как

$$\begin{aligned} p \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0) &= F \cos \delta_0 - FY \sin \delta_0, \\ p \cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0) &= -FX, \\ p \sin \delta &= F \sin \delta_0 - FY \cos \delta_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$p = F / \cos \varphi = F / \cos \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0). \quad (2)$$

Здесь F – фокусное расстояние объектива камеры, φ – угловое расстояние объекта от луча зрения (оси объектива), (α_0, δ_0) – координаты центра матрицы.

Решение (1), (2) для сферических координат объекта имеет вид

$$\alpha = \alpha_0 + \operatorname{arctg} \left\{ \frac{-X}{\cos \delta_0 - Y \sin \delta_0} \right\},$$

$$\delta = \operatorname{arcsin} \left\{ \frac{\sin \delta_0 + Y \cos \delta_0}{\sqrt{1 + X^2 + Y^2}} \right\}. \quad (3)$$

Обратное преобразование, получаемое из этих выражений, имеет вид

$$X = -\frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\cos \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0) + \sin \delta_0 \sin \delta},$$

$$Y = -\frac{\sin \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0) - \cos \delta_0 \sin \delta}{\cos \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0) + \sin \delta_0 \sin \delta}. \quad (4)$$

Все широкоугольные объективы в той или иной степени имеют, главным образом, отрицательную (подушкообразную), причем с уменьшением фокусного расстояния объектива искажения возрастают. Приемлемую дисторсию для 1.3" и 1.2" матриц имеют объективы с фокусными расстояниями больше 6–12 мм.

В работе [2] в качестве приемника излучения приведены результаты определения дисторсии для системы с широкоугольным 12-мм объективом и для сравнения показана дисторсия для 6-мм объектива. Одним из основных в данной системе явился объектив для охранных камер Computar T2314FICS-3 с фокусным расстоянием 2.3 мм и отверстием 1 : 1.4. Он предназначен для работы именно с камерами 1.3 дюйма с CS-mount, имеет поле зрения 113.3 · 86.3 градуса (137.9 по диагонали). При этом диаметр апертуры у него 22.8 мм.

Общие фотометрические характеристики системы. Учет атмосферной экстинкции представлен в работе [10]. Для решения задачи необходимо:

- наличие вторичных фотометрических стандартов в системе BVR;
- измерение большого числа звезд-стандартов при хороших фотометрических условиях;
- решение системы условных уравнений относительно искомым коэффициентов связи систем и одновременно коэффициентов экстинкции;
- для низкоорбитальных ИСЗ есть возможность использовать для этих целей фотометрический каталог ГАИШ, адаптированный НАТО в SKY2000, измеряя стандарты непосредственно в процессе сопровождения ИСЗ и используя их для вычисления экстинкции; – ошибки измерения блеска составляют в этом случае 0.1–0.2^m в полосе *V*.

Для случая широкополосной фотометрии с малым количеством стандартных звезд экстинк-

ция определялась непосредственно на каждом измеряемом кадре путем сравнения яркости наблюдаемых звезд с ожидаемой вычисленной яркостью для случая отсутствия поглощения.

В этом случае одновременно учитывается неравномерность попиксельной чувствительности матрицы по ее площади

Методика ПЗС-фотометрии. В работе [4] представлена зависимость “блеск-диаметр изображения звезд” для объектива *F* = 200 мм с камерой Wat-902H. Аппроксимация зависимости “блеск-диаметр” дает предельные величины при диаметре изображения 1 пиксел для звезд класса А – 12.75^m (при стандартном отклонении 0.25^m), *F* – 11.8^m (0.14^m); К – 12.0^m (0.24^m); В – 14.8^m (отклонение 0.24^m).

Сопоставимые результаты для различных фотографических объективов с матрицами других классов получены на астрономической обсерватории Одесского университета [6, 12]. Здесь же представлены средние значения предельных величин звезд для композитных изображений, полученные для различных объективов.

В [4] представлены также результаты измерения распределения яркости изображений звезд различного блеска на единичных фреймах, выбранных из avi-файлов, полученных системой ПЗС-камера КРС-650BH с объективом SSE0612NI F1.2 в сравнении с распределением фона.

Размеры изображений ярких звезд намного меньше, чем для 200-мм объектива, распределение яркости близко к гауссову и уверенно аппроксимируется полиномами (относительная дисперсия колеблется в пределах 3%, коэффициент корреляции достаточно близок к 1).

Сложение кадров. Наиболее слабые объекты выделяются сложением отдельных кадров. В этом режиме колебания изображений звезд и фона, вызванные дрожанием атмосферного, теплового, технического (сотрясения) и электронного (работа передающих антенн сотовой связи) происхождения, сглажены.

При определенных условиях появляется возможность зарегистрировать более слабые объекты. Полный относительный поток от каждой звезды находится из

$$I = I_{з+ф} - I_{ф}, \quad (5)$$

где $I_{з+ф}$ – поток от площадки со звездой, $I_{ф}$ – поток от рядом расположенной фоновой площадки без звезды вычисляются как

$$I = \int_0^d I(r) dr. \quad (6)$$

Таким образом, получив характеристическую кривую зависимости “яркость–блеск” для звезд с известным блеском на каждом единичном кадре, по формуле Погсона можно определить блеск наблюдаемого объекта.

В работе [4] проведена характеристическая кривая зависимости “яркость–блеск” для звезд с известным блеском на каждом единичном кадре, по формуле Погсона можно определить блеск наблюдаемого объекта.

Исследования системы UFO SonotaCo, применяемой при наблюдениях метеоров, показали, что на единичных кадрах при малых отношениях сигнал-шум (signal-noise-ratio, SNR) она отображает световые потоки от слабых, находящихся на пределе обнаружения звезд сравнения, нелинейно [43]. Там же показано, что отношение “световой поток – SNR”, полученное для звезд сравнения на сложном фрейме, становится линейным.

Эти исследования дали возможность проводить фотометрию метеоров по данным широкоугольных ПЗС-наблюдений, поскольку ввиду большой дисторсии и малой разрешающей способности для fish-eye-объектива точные позиционные наблюдения на этой системе невозможны. Поэтому целью подобного мониторинга являлось обнаружение, счет метеоров и оценка их блеска.

В соответствии с общей формулой ПЗС-фотометрии, за время экспозиции τ в каждом пикселе регистрируется сигнал [31]

$$S = I(t)kAQ\tau + I_{TT}\tau + I_{сч}, \quad (7)$$

где $I(t)$ – общий (полезный плюс фон) сигнал от объекта; k – коэффициент пропускания фильтра; A – коэффициент виньетирования пиксела; Q – квантовая эффективность пиксела; I_{TT} – темновой ток, $I_{сч}$ – ток считывания. Для получения сигнала $I(t)$ учитывалось плоское поле – производилось деление на kAQ , а также темновой ток I_{TT} и ток считывания $I_{сч}$ – вычитались темновые кадры. Все эти операции проводились для каждого полезного кадра ($\tau = 0.04$ с) с изображениями метеоров из avi-файлов, полученных при наблюдениях. Фотометрия метеоров на них проводилась в пакете IRIS с использованием круговой диафрагмы. Инструментальная звездная величина калибровочных звезд и изображения метеора на единичном фрейме определялась как [11]

$$m_{инстр} = -2.5 \lg \left[I(t) - \frac{n}{n_{\phi}} \cdot I_{\phi} \right], \quad (8)$$

где $I(t)$ – суммарная яркость звезды с фоном по n пикселям внутри заданной апертуры диафрагмы,

I_{ϕ} – яркость фона по n_{ϕ} пикселям. При введении двух диафрагм IRIS сразу выдает отсчет $\left[I(t) - \frac{n}{n_{\phi}} \cdot I_{\phi} \right]$.

Поправка за апертуру при проведении фотометрирования не вводилась. Ввиду использования в наших наблюдениях широкоугольной оптики профиль яркости звезд (функция распределения яркости пикселей) близок к гауссову и мало зависит от яркости изображений звезд и их координат на фрейме. В этом случае среднее значение измеренного блеска совпадает с медианой и модой распределения.

Атмосферная экстинкция учитывалась для каждого рабочего кадра по измерениям блеска звезд, имеющих различные зенитные расстояния.

Блеск метеоров по звездам сравнения определялся на единичном кадре в момент их максимальной яркости. Соседние кадры использовались для определения точности измерений. Эта процедура одновременно учитывает неравномерность чувствительности матрицы по площади.

Вариации яркости звезд от фрейма к фрейму зависят от целого ряда причин (статистические флуктуации квантового потока, турбулентность атмосферы, внутренние шумы камеры, шумы граббера и т.д.).

Ошибка измерений, обусловленная этими причинами, случайна и полностью не исключается [11]. В этом случае точность определения блеска метеора связана с точностью определения блеска звезд сравнения на каждом фрейме, особенно для слабых звезд. В итоге точность кадровых измерений блеска метеоров может ухудшаться до 40%.

Для выделения слабых объектов при отсутствии в данных камерах систем накопления сигнала чаще всего используется сложение отдельных кадров (в системах Registax и IRIS), к примеру, для увеличения проникающей звездной величины при сложении кадров в системе Wat-902H+HG0808 [3, 4]. Но в метеорной астрономии сложение кадров неприменимо.

Трек метеора на композитном кадре получается прерывистым ввиду чересстрочной развертки изображения камеры Watec. Это помогает при расчете угловой скорости метеора, развертка играет в данном случае роль обтюратора с угловой скоростью 0.02 с^{-1} , а также при обработке базисных наблюдений.

Основная масса наблюдений метеоров в мире проводится с использованием автоматических систем захвата метеоров как движущихся объектов и дальнейшего определения координат нача-

ла и конца следа и в дальнейшем радианта наблюдаемого потока.

Попутно определяется и блеск метеора в момент его максимума (априори считается, что в момент вспышки сгорает основная масса метеорного тела). Подобные автоматические системы, включающие в себя программы обработки базисных наблюдений, позволяют в дальнейшем определять высоту пролета метеора, оценить его массу и рассчитать параметры орбиты.

Наиболее распространены два программных комплекса: MetRec, разработанный S. Molau в Германии, и чаще всего используемый европейцами, и UFO (SonotaCo, Japan), который все больше завоевывает популярность в мире.

Таким образом, анализ публикаций и проведенные исследования показывают, что широкоугольная ПЗС-система, базирующаяся на камере Watec-902H, отвечает требованиям оптического мониторинга объектов в околоземном пространстве: максимальная чувствительность находится в видимой области спектра вблизи 500–600 нм; высокая чувствительность по световому потоку (предельная чувствительность близка к чувствительности человеческого глаза 6m при использовании объектива с диаметром объектива, близким к диаметру зрачка глаза); достаточно широкий динамический диапазон яркости наблюдаемых объектов; предельное отношение сигнал-шум, при котором возможно обнаружение объекта, 0.1 дБ (отношение сигнал-шум порядка 1.01); приемлемая дисторсия для широкоугольной оптики; высокое временное разрешение (0.02 с), позволяющее проводить мониторинг быстропротекающих процессов; наличие современных компьютерных систем поиска, захвата и обработки ПЗС-изображений объектов, позволяющих проводить мониторинг в реальном времени; малые габариты, обеспечивающие мобильность системы.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАСОРЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА ТЕЛАМИ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ. ФОНОВЫЙ МОНИТОРИНГ МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ

Задача мониторинга засорения околоземного космического пространства ОКП метеорным веществом является актуальной и экологически значимой.

Важной задачей является мониторинг яркой составляющей метеорных потоков. С одной стороны, метеоры ярче 0^m являются достаточно крупными и уже представляют опасность для космической техники в ОКП. С другой распреде-

ление метеороидов размерами более 1 мм в метеорных потоках тесно связано с происхождением тел Солнечной системы [9, 12, 13].

По описанной методике на проведены исследования засорения ОКП в период действия потока Персеиды 2007–2009 гг. [14–16].

Следует отметить, что работ, связанных с подробными исследованиями распределения опасных (крупных) частиц в метеорных потоках, в том числе даже в наиболее изученном потоке Персеиды, немного. Систематические исследования распределения тел миллиметрового размера в этом потоке (как и в других) практически отсутствуют.

Всплески активности Персеид в 90-е гг. были связаны с прохождением перигелия родительской кометы Персеид 109P/Свифта-Туттля в 1992 г. прошлого века (первичный максимум при долготе Солнца составлял 139.5°). Орбитальный период кометы составляет около 130 лет, в настоящее время она движется к периферии Солнечной системы.

Активность метеорного потока в настоящее время должна слабеть по мере увеличения расстояния между ядром кометы и Солнцем, хотя иногда наблюдаются сгущения метеороидов и вдали от остатков ядра (например, резкое увеличение плотности потока метеоров, в том числе опасных, наблюдалось в 2002 г.).

Кроме этого, согласно современным теоретическим представлениям, с течением времени после образования метеорного потока количество метеороидов микронной фракции в нем уменьшается под действием *YORP-эффекта* (Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack effect).

Все это свидетельствует о том, что с течением времени относительное количество более крупных метеороидов в потоках должно возрастать. Соотношение мелкой и крупной фракций позволяет в таком случае судить о возрасте потока. Усредненные данные Всемирной метеорной организации за 2000–2005 гг. показывают, что суммарные числа ZHR метеоров в период максимума потока достаточно велики, а максимум размазан на протяжении 30^h, что соответствует изменению долготы λ Солнца на $\approx 1.24^\circ$.

Для потока Персеид, имеющего относительно Земли скорость $v = 60$ км/с, масса метеороида, порождающего метеор нулевой звездной величины, составляет $M_0 \approx 2 \cdot 10^{-2}$ г (соответственно, радиус около 1 мм). Это позволяет причислить яркие Персеиды к естественному космическому мусору достаточно заметных размеров, как представляющему реальную опасность для КА, так и имеюще-

му достаточную массу для заметной ионизации верхней атмосферы [2].

Связь между массой m и звездной величиной M для ярких приходящих со стороны зенита метеоров определяется как $M = m - 5 \lg R - K$, где R – расстояние до метеора, K – поправка на поглощение в атмосфере (редукция к зениту) [17].

Отсюда можно получить соотношение между массой и скоростью метеоров определенного блеска. В работе [2] представлены результаты таких расчетов. Приводятся графики, ограничивающие зону визуальных метеоров, которая является границей чувствительности камеры КРС-650ВН с объективом SSE0612NI F1.2, а также зону ярких метеороидов и болидов.

К примеру, для потока Персеиды, имеющего относительно Земли скорость $v = 60$ км/с, масса метеороида, порождающего метеор нулевой звездной величины, составляет $M_0 \approx 2 \cdot 10^{-2}$ г и соответственно радиус около 1 мм. Здесь плотность вещества метеороидов принята равной 2500 кг/м³ (астероиды класса S). Чтобы разгореться до нулевой звездной величины, метеороид, влетающий в ОКП со скоростью $v = 11.2$ км/с, должен иметь массу $M_0 = 15.9$ г и, соответственно, больший размер.

Таким образом, метеоры потока Персеиды видимой звездной величиной, меньшей 0, имеют размеры от 1 мм и выше. Это позволяет причислить их к естественному космическому мусору достаточно заметных размеров, представляющему опасность для космической техники и космонавтов.

В 2002 г. были проведены визуальные и фотографические наблюдения яркой составляющей Персеид для оценки пространственной плотности опасных частиц естественного мусора [5]. Результаты этих наблюдений показали, что частицы в рое распределены весьма неравномерно, то есть рой состоит из большого числа мелких потоков, имеющих разную плотность. Для примера была приведена структура потока ярких метеороидов по фотографическим наблюдениям 2002 г. и иллюстрировались данные о часовых числах ярких Персеид в ночи 11–12.VIII.2002 и 12–13.VIII.2002.

Это вопрос о зенитном часовом числе – ZHR (zenital hour rate) – расчетной величине, характеризующей активность потока и показывающей, сколько метеоров в час смог бы увидеть наблюдатель, если бы его предельная видимая звездная величина равнялась теоретической для звезд (6.5^m), при расположении радианта потока в зените.

Очевидно, что расчет ZHR справедлив лишь в том случае, когда метеороиды в потоке распределены равномерно. Для ярких метеороидов поня-

тие зенитного часового числа теряет смысл и учитывать можно только количество ярких метеоров в поле зрения камеры. Различного рода усреднения здесь невозможны.

Результаты наблюдений в 2002 г. дали для максимальных часовых чисел метеоров: плотность потока $\Phi = 8-18 \cdot 10^{-7}$ км⁻² с⁻¹, пространственную плотность $D = 1.3-3 \cdot 10^{-8}$ км⁻³. Если объем околоземного космического пространства составляет величину порядка 10^{15} км³, то общее число в нем опасных метеорных частиц из потока Персеиды размерами более 1 мм в период максимума 2002 г. составило приблизительно $8 \cdot 10^7$, то есть почти на два порядка превосходило средние показатели.

С июля–августа 2007–2008 гг. в рамках аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)” Минобразования РФ был начат и проводится вплоть до настоящего времени по плану работы астрономической обсерватории РГУ имени С.А. Есенина мониторинг фоновое естественного (яркие метеоры) засорения околоземного пространства с целью оценки метеороидной опасности.

Аппаратура: – камера КРС-650ВН + объектив SSE0612NI F1.2, поле зрения 50×40 градусов; – камера КРС-650ВН + объектив Computar T2314FICS, поле зрения 113.3×86.3 градуса; – камера Wat-902Н + объектив SSE0612NI F1.2, поле зрения 60×45 градусов; – камера Wat-902Н + объектив Computar T2314FICS, поле зрения 129×99 градусов.

Поправка за апертуру при проведении фотометрирования не вводилась. Ввиду использования в наших наблюдениях широкоугольной оптики профиль яркости звезд (функция распределения яркости пикселей) близок к гауссову профилю и мало зависит от яркости изображений звезд и их координат на фрейме. В этом случае среднее значение измеренного блеска совпадает с медианой и модой распределения.

Внеатмосферные величины метеоров по звездам сравнения определялись для каждого фрейма. Эта процедура одновременно учитывала неравномерность чувствительности матрицы по площади. Вариации яркости звезд от фрейма к фрейму зависят от целого ряда причин (статистические флуктуации квантового потока, турбулентность атмосферы, внутренние шумы камеры, шумы граббера и т.д.).

Ошибка измерений, обусловленная этими причинами, случайна и полностью не исключается [11]. В этом случае точность определения блес-

ка метеора связана с точностью определения звезд сравнения на каждом фрейме. Как показано выше, в наших наблюдениях точность покадровых измерений блеска звезд сравнения составила величину 5–10%. Учет атмосферного поглощения и фотометрических ошибок наблюдений проводился покадрово для каждого метеорного следа.

Распределение блеска для метеороидов 2007 г. было опубликовано в работах [18, 19] обобщено в работах [3, 4].

Данные наблюдений 2007–2009 гг. относительно долготы Солнца приведены в работах [14, 19]. Здесь в отличие от наблюдений 2002 г. результаты не приведены к часовым числам, а отражают конкретное число ярких метеоров, зарегистрированных в поле зрения электронной оптической системы. Все результаты приведены к нормальному падению метеороидов. Это достигается редуцированием за высоту радианта и является аналогом приведения часовых чисел метеоров к зениту при обработке визуальных наблюдений.

Результаты мониторинга показывают, что распределение ярких метеоров по времени весьма неравномерно, максимум потока по ним остался достаточно широким. Увеличение потока вблизи максимума происходит достаточно быстро, поскольку 8–9.VIII.2002 число Персеид было чуть выше общего фона в конце июля, а доля ярких метеоров, не принадлежащих Персеидам, составила: 11–12.VIII.2002 11.5%, 13–14.VIII.2002 13.8% от общего числа зарегистрированных.

Средние за наблюдательную ночь значения пространственной плотности ярких метеороидов в период июль–август 2007 г. представлены в работах [2, 16]. Обращает на себя внимание тот факт, что в июле средняя пространственная плотность крупных метеороидов в ОКП мало отличалась от общей фоновой. Здесь следует отметить, что средняя пространственная плотность всего потока Персеиды составляет $15 \cdot 10^{-9} \text{ км}^{-3}$.

В работе [20] представлено сравнение полученных нами средних значений плотности потока ярких Персеид и всего потока по визуальным данным ИМО в 2007–2013 гг. Распределение ярких метеоров оказалось статистически близко к распределению всех метеоров потока Персеиды.

Нормированные результаты мониторинга ярких Персеид в 2007–2013 гг. приведены в работе [3, 4] в сравнении с данными ИМО и работы [21]. Здесь показаны числа, характеризующие активность потока для фотографических и ТВ-наблюдений (SonotoCo), а также модельные расчеты (estimates), полученные в работе [21]. В этой же шкале в вышеуказанной работе приведены наши

усредненные результаты (bright Perseids) за 2007–2013 гг. и усредненные данные Международной метеорной организации (ИМО) по визуальным наблюдениям Персеид в этот же период.

Многолетний широкоугольный ПЗС-мониторинг яркой составляющей метеорного потока Персеиды впервые дал возможность оценить содержание опасных метеороидов в рое: число метеоров в потоке ярче 0m составляет 0.051 ± 0.008 от общего количества; максимальное значение средней плотности потока ярких Персеид относительно всех метеоров составляет 0.076; в период максимума Персеид поток опасных частиц достигал мгновенного значения $F = (3.8 \pm 1.1) \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-2} \text{ с}^{-1}$; среднее значение плотности потока опасных метеороидов Персеид в максимуме близко к потоку спорадических метеороидов подобных размеров.

Эти результаты и анализ данных Международного метеорного общества дали возможность оценить ударный риск в околоземном пространстве в периоды действия основных метеорных потоков. Используя данные ИМО об активности ночных и дневных потоков и усредненные данные о содержании в них опасных метеороидов, мы попытались дать оценку метеорной опасности в околоземном пространстве в течение года. Относительное содержание ярких метеоров в наиболее активных потоках можно с некоторыми оговорками принять близким к 5% (хотя иногда бывают всплески активности метеорных потоков). Таким образом, риски соударения опасных метеороидов с техникой в околоземном пространстве относительно невелики.

Следует отметить, что примерно такую же величину можно получить для потока спорадических метеороидов, имеющих соизмеримые с опасными метеороидами в Персеидах размерами. Согласно Европейскому стандарту (ECSS standard on space environment ECSS-E-ST-10-04C) поток спорадических частиц диаметром более 2 мм составляет $0.3 \text{ км}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, то есть превосходит поток опасных Персеид. Однако: 1) энергия соударения спорадических метеороидов меньше энергии опасных метеороидов Персеид (их скорость $20 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$); 2) опасными метеороидами могут быть спорадические метеороиды, создающие метеоры, более чем на 1^{m} яркие, чем опасные Персеиды.

Проведенный анализ публикаций показывает, что риск соударения космической техники с опасными метеороидами метеорных потоков при современном уровне активности последних невысок, а метеороиды, в общем, не являются главным фактором опасности для космической техники и человека в околоземном пространстве.

Однако существует ряд метеорных потоков, пространственная плотность частиц в которых выше, чем в Персеидах. Кроме того, средние значения значительно отличаются от риска соударений в периоды максимумов потоков. Поэтому был также определен риск в периоды пиковой активности основных метеорных потоков Квадрантиды, эта-Акварида, Персеиды и Геминиды, основанный на визуальной базе данных Международной метеорной организации за 2006–2017 гг. [22, 23].

Период максимальной активности потоков разбивался на интервалы $\Delta\lambda = 0.100^\circ$, что соответствует 8640 средних солнечных секунд. Внутри этих интервалов суммировались по годам пространственные плотности D , (км^{-3}) ярких метеоров.

Плотность потока F ($\text{км}^{-2} \text{с}^{-1}$) ярких метеоров равна $F_\lambda = vD$, где v ($\text{км} \cdot \text{с}^{-1}$) – геоцентрическая скорость потока.

Риск R определялся общим количеством соударений N (км^{-2}) опасных метеороидов в интервале максимальной активности потока (λ_1, λ_2):

$$R = N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda \approx \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_i \Delta\lambda.$$

работка производилась в программе Statistica-5.

Расчеты показали, что метеороидный риск в околоземном пространстве невелик. Его величина для наиболее активных метеорных потоков не превышает $5 \cdot 10^{-6} \text{м}^{-2}$ в периоды их пиковой активности. Однако, величина индивидуального метеороидного риска достаточно близка к значению предельного допустимого риска $R_{\text{Lim}} = 10^{-6}$.

Кроме того, общая площадь околоземной популяции ИСЗ достаточно велика, что значительно увеличивает для нее коллективный метеороидный риск. Соответственно, метеороидная опасность в околоземном пространстве требует постоянного учета.

Кроме того, во время метеорных дождей поток опасных метеороидов в ближнем космосе увеличивается на несколько порядков. Определенным фактором опасности обладают также не привязанные к определенному времени года спорадические потоки, пространственная плотность опасных частиц в которых может оказаться весьма высокой, а плотность вещества их метеороидов значительно превышать плотность вещества в метеороидах регулярных потоков. Анализ данных *ИМО* по распределению частиц в метеорных потоках позволили оценить риск соударения Международной космической станции с опасными метеороидами в 2007–2012 гг. [24]. Это дополняет

имеющиеся модели метеорного вещества в окрестностях Земли оценкой опасности от метеороидов, больших 1 мм, а также учитывает данные о распределении их в потоках в настоящее время.

4. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МЕТЕОРОИДНОГО РИСКА В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Проблема космической опасности, то есть опасности из космоса для человека, природы или техники, традиционно подразделяется по критерию происхождения на две части: это опасность, исходящая от техногенного космического мусора, и опасность от естественных метеорных тел. В свою очередь каждая из этих угроз подразделяется также на две части: опасность для биосферы Земли от падений достаточно крупных (от нескольких метров) космических тел и опасность для космической техники и людей в околоземном пространстве, исходящая от микрометеороидов или космического мусора размерами от 0.1 мм до десятков см. При этом потоки частиц мелкого мусора (от 0.1 мм до 1 см) были и остаются трудно контролируемы современными техническими средствами [25].

Методы изучения космической микрометеороидной опасности инструментально подразделяются на бортовые (функционирующие на борту КА) и наземные [26, 27].

Метеороидный риск. Метеороидный риск может быть определен различными способами. В данной работе метеороидный риск как частота реализации опасности для космической техники в околоземном пространстве определяется частотой соударений КА с опасными метеороидами, способными оказать разрушающее воздействие на их поверхность [9, 13, 28–30].

Известно, что частота соударений метеороидов с КА возрастает с увеличением активности метеорного потока [9, 13]. Поскольку пространственная плотность частиц в метеорном потоке, как известно, невелика, то считается, что их распределение имеет в данном случае пуассоновский характер [31].

В работах [3, 4] представлена модель метеороидного риска, которая включает в себя следующие составляющие ее компоненты: 1) классификацию опасных метеороидов; 2) опасные направления, то есть распределение метеорных потоков и спорадических метеоров в пространстве; 3) распределение метеорных потоков по временам года и внутри этих времен по продолжительности действия; 4) распределение метеорных потоков по

скоростям и массам метеоров; 5) пространственное распределение метеорных частиц внутри самого потока; 6) эффект гравитационного притяжения метеорных частиц Землей; 7) эффект затенения метеороидов Землей от наблюдателя; 8) ориентацию всего КА, а также элементов его конструкций относительно направления прилета метеороидов; 9) время пребывания КА на орбите и время действия метеорного потока на КА.

Как известно, степень воздействия метеороида на поверхность КО определяется его кинетической энергией, а также прочностными характеристиками оболочки КО. Согласно исследованиям работы Ф. Уиппла [19] метеороид с энергией E создает на поверхности кратер с диаметром, пропорциональным $\sqrt[3]{E}$. Кроме того, ударное воздействие метеороида определяется прочностными характеристиками материала самого метеороида и поверхности, на которую он падает. В связи с этим метеороиды с более высокой пористостью являются более рыхлыми и оказывают меньшее ударное воздействие на космическую технику.

По результатам фотографического метеорного мониторинга в институте астрофизики Таджикистана [32] представлены данные определения плотности метеороидов основных метеорных роев. Самую большую среднюю объемную плотность 2.9 г см^{-3} имеют метеороиды Геминид, связанные с астероидом, сближающимся с Землей 3200 Фаэтоном. Самую низкую объемную плотность, в среднем равную 0.3 г см^{-3} , имеют метеороиды Драконид, связанные с кометой 21P/Джакобини–Циннера. Средняя объемная плотность метеороидов остальных восьми потоков заключена в пределах от 0.4 до 2.4 г см^{-3} , а для спорадического фона равна 1.8 г см^{-3} . Наименьшую пористость имеют метеороиды потока Геминид, а наиболее пористыми (83%) являются метеороиды потока Драконид и Леонид.

Направления прихода спорадических метеоров в эклиптической системе координат представлены в работе [33]. Средняя за год плотность потока спорадических метеоров в околоземном пространстве $N(m)$ массой больше m вычисляется согласно действующему до сего времени ГОСТ 25645.128-85 (1985).

Спорадические метеороиды с опасными для космической техники размерами 10^{-2} – 1 см могут в отсутствии регулярных потоков доминировать в околоземном пространстве, как показано в работе [34].

В работе [29] показано, что наибольшую опасность для КА могут представлять метровые тела,

входящие в метеорные потоки кометного происхождения.

Содержание тел миллиметрового (и меньшего) размера в потоках определяется, как правило, теоретически, с учетом эмпирического коэффициента популяции данного потока, рассчитанного исходя из предположения о равномерном распределении метеороидов в потоке. В реальности неравномерность потока метеороидов в метеорном рое растет с их размерами и описывается классическим распределением Пуассона [29].

Распределение метеорных потоков по геоцентрической скорости имеет большое значение с точки зрения опасности входящих в их состав метеороидов для КА. Разброс данных по скоростям здесь достаточно велики: от 20 км/с для догоняющих потоков до 60 – 72 км/с для встречных потоков. При этом энергия частиц, во многом определяющая опасность метеороида, различается в рассматриваемых потоках более чем на порядок.

В работе [27] представлены данные по распределению масс метеороидов астероидного, кометного и межзвездного происхождения в сравнении с Meteoroid Environment Model (1969) и данными по эрозии лунного реголита и экспериментов по пассивному сейсмическому зондированию Луны из работы [35].

Сравнительный анализ показывает, что до земной орбиты частицы межзвездной пыли массой более 10^{-8} г практически не доходят. Основной компонентой вещества вблизи Земли является пыль кометного происхождения, принесенная сюда метеорными потоками.

Сравнительный анализ показывает, что хорошо совпадают распределения для частиц массой 10^{-5} – 10^{-1} г . Они принадлежат визуальным метеорам, для которых закон распределения по яркости достаточно надежно установлен. Сравнительный анализ показывает также, что значительное расхождение существует в данных для частиц массой от 0.01 до 1 г . Эти частицы как раз и создают яркие метеоры, начинающие представлять опасность для космической техники. Более массивные частицы создают уже болиды.

Расчет показывает, что для ИСЗ с площадью миделя 10 м^2 риск в периоды действия метеорных потоков составляет $R = (1-5) \cdot 10^{-7}$. Это представляет заметную опасность, если учесть, что предельный допустимый риск определяется как $R_{\text{пред}} = 10^{-6}$, и такая опасность нуждается в учете. Коллективный метеороидный риск для всей орбитальной группировки, таким образом, представляет собой весьма заметную величину.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ публикации показал, что широкоугольная ПЗС-система, базирующаяся на камере Watec-902H, отвечает требованиям оптического мониторинга естественных и техногенных объектов в околоземном пространстве.

Многолетний широкоугольный ПЗС-мониторинг яркой составляющей метеорного потока Персеиды впервые дал возможность оценить содержание опасных метеороидов в рое.

Эти результаты и анализ данных Международного метеорного общества дают возможность оценить ударный риск в околоземном пространстве в периоды действия основных метеорных потоков.

Ограниченные рамки журнальной статьи авторы, в силу своих профессиональных интересов и профессиональной принадлежности, проанализировали проблему в одном из возможных направлений мониторинга космического мусора в ОКП — мониторинга оптическими системами, в дополнение к уже проведенной первой части анализа. Детализация или фрагментация проблемы возможна и необходима.

Одновременно в заключительной части работы авторы предлагают короткую библиографию “альтернативного” взгляда на проблему космического мусора в рамках рассмотренного или смежных направлений [25, 36, 38–54, 56–63].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Энеев Т.М.* К вопросу об астероидной опасности // Компьютерные инструменты. 2003. Вып. 2. С. 13–19.
2. *Муртазов А.К., Воскресенский А.В., Колосов Д.В., Титов П.В.* Экологический мониторинг загрязнения околоземного пространства оптическими средствами // Экологические системы и приборы. 2007. № 3. С. 24–26.
3. *Миронов В.В., Муртазов А.К., Усовик И.В.* Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. Рязань: Book Jet, 2017.
4. *Миронов В.В., Муртазов А.К., Усовик И.В.* Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. Рязань: Book Jet, 2018.
5. *Муртазов А.К.* Экология околоземного космического пространства. М.: Физматлит, 2004.
6. *Муртазов А.К.* Перспективы развития исследований в области экологического мониторинга космоса // Российский научный журнал. 2007. № 1. С. 153–156.
7. *Муртазов А.К.* Организация системы оптического мониторинга загрязнения околоземного пространства // Экологические системы и приборы. 2009. № 1. С. 28–32.
8. *Murtazov A.K., Efimov A.V., Titov P.V.* Double-Station Meteor Observations in Ryazan, Russia // Proceedings of the International Meteor Conference. La Palma, Canary Islands, Spain, 20–23.IX. 2012. International Meteor Organization, Mattheessensstraat, 60, 2540 Hove, Belgium. 2013. P. 192–196.
9. *Муртазов А.К.* Естественное загрязнение околоземного пространства как экологический фактор // Экологические системы и приборы. 2011. № 8. С. 8–13.
10. *Кошкин Н.И., Бурлак Н.Р., Мотрич В.Д. и др.* Стандартизация и калибровка фотометрических измерений околоземных космических объектов // II Международная научная конференция “Наблюдение околоземных космических объектов”. Звенигород, 22–24 января 2008.
11. *Козак П.Н.* О внутренней точности цифровой фотометрии метеоров по телевизионным наблюдениям // Кинематика и физика небесных тел. 1998. Т. 14. № 6. С. 553–563.
12. *Муртазов А.К.* Исследования возможностей камеры КРС-650ВН для мониторинга околоземного пространства // II Международная научная конференция “Наблюдение околоземных космических объектов”. Звенигород, 22–24 января 2008.
13. *Муртазов А.К.* Организация комплексных телевизионных метеорных наблюдений в астрономической обсерватории Рязанского госуниверситета // Вестник СибГАУ. 2011. № 6(39). С. 109–113.
14. *Муртазов А.К., Ефимов А.В., Жабин В.С.* Опасные метеороиды в потоке Персеиды // Околоземная астрономия-2009: сб. трудов. 2010. С. 251–257.
15. *Муртазов А.К.* Загрязнение околоземного пространства метеорными телами потока Персеиды в 2007–2009 гг. // Экологические системы и приборы. 2010. № 11. С. 8–13.
16. *Murtazov A.K., Efimov A.V., Kolosov D.V.* Bright Perseids in 2007 // J. International Meteor Organization. 2008. V. 36. № 4. P. 77–78.
17. *Бабаджанов П.Б.* Метеоры и их наблюдение. М.: Наука, 1987.
18. *Муртазов А.К.* Мониторинг естественного загрязнения околоземного пространства опасными метеорными телами // Экологические системы и приборы. 2008. № 6. С. 8–10.
19. *Whipple F.* Of meteoroids and penetration // J. Geophysical Research. 1963. V.68. Issue 17.
20. *Murtazov A.K.* Bright Perseids 2007–2013 and Artificial Earth Satellites Collision Risk Assessment // J. International Meteor Organization. 2014. V. 42. № 2. P. 65–67.
21. *Koseki M.* A simple model of spatial structure of meteoroid streams // J. International Meteor Organization. 2012. V. 40. № 5. P. 162–165.
22. *Муртазов А.К.* Оценка метеороидного риска в околоземном пространстве // Тезисы докладов Международной конференции “VI Бредихинские чтения”. Заволжск, Ивановская обл. 4–8.IX.2017 г.
23. *Murtazov A.K.* Assessing the meteoroid risk in near earth space // Open Astronomy. 2018. V. 27. Issue 1. P. 144–149.

24. *Murtazov A.K.* Bright Perseids 2007–2013 statistics. Estimation of collision risk in circumterrestrial space // In European Planetary Science Congress 2013. London, UK, EPSC Abstracts. V. 8. EPSC2013-346-1.
25. *Gural P.* CAMS System and Software Development Progress and Meteor Camera Trade Study: IMC 2010. September 17, 2010.
26. *Миронов В.В.* Методика оценки плотности космического мусора по данным бортовых регистрирующих систем // Космич. исслед. 2003. Т. 41. № 2. С. 220–224.
27. *Муртазов А.К., Багров А.В.* Модели естественного загрязнения околоземного пространства // Экологические системы и приборы. 2013. № 1. С. 28–34.
28. *Волков О.В., Горбенко А.В., Шевченко И.В.* Защита российских модулей Международной космической станции от техногенных частиц // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1. С. 480–482.
29. *Beech M., Brown P., Jones J., Webster A.R.* The danger to satellites from meteor storm. *Adv. Space Res.* 1997. V. 20. P. 1509–1512.
30. *Foschini L.* The meteoroid hazard for space navigation: Second National Meeting of Planetary Sciences. Italy, 1998.
31. Space Debris. A Report of ESA. Paris, 1988. № SP 1109.
32. *Кохирова Г.И.* Исследование физических характеристик метеороидов и связь метеороидов с околоземными объектами: дис. докт. физ.-мат. наук. СПб., 2012.
33. *Feller W.* An Introduction to Probability Theory and its Application. V. 1, 2. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1971.
34. *Wiegert P., Vaubaillon J.* The Sporadic Meteoroid Complex and Spacecraft Risk. In: Proceedings of the 9th International Conference “Protection of Materials and Structured from Space Environment” / Ed. Kleiman J.I. American Institute of Physics, 2009. P. 567–571.
35. *Бусарев В.В., Шевченко В.В., Сурдин В.Г.* Физические условия вблизи Луны и планет Солнечной системы // Модель космоса. Т. 1 / под ред. Панасюка М.И. М.: КДУ, 2007. С. 794–861.
36. *Клюшников В.Ю., Шатров Я.Т.* Обеспечение безопасности космических полетов за счет функциональной избыточности бортовых агрегатов и систем // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 2(101). С. 114–124.
37. *Клюшников В.Ю. и др.* Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду. М.: ГЕОС, 2016 г.
38. *Колесниченко Г.Н., Миронов А.В., Васюнин А.А., Логунов С.В.* Применение многоспектральных фотометрических данных в задаче распознавания космических объектов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 5. С. 86–91.
39. *Логунов С.В., Рогов Д.А., Чистяков С.В.* Критериальные условия возможности наблюдения геостационарных спутников связи наземными оптическими средствами // Вестник воздушно-космической обороны. 2017. № 1. С. 44–48.
40. *Миронов А.В., Колесниченко Г.Н., Мартышин А.В., Логунов С.В.* Моделирование процесса фотометрирования космических объектов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7. № 5. С. 101–107.
41. *Нароенков С.А., Шустов Б.М., Медведев Ю.Д. и др.* О концепции российского информационно-аналитического центра по проблеме астероидно-кометной опасности // *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы.* 2014. Т. 48. № 6. С. 473–481.
42. *Шугаров А.С., Шустов Б.М., Мартынов М.Б. и др.* О концепции экономичной космической системы обнаружения опасных небесных тел // *Космич. исслед.* 2015. Т. 53. № 2. С. 95–105.
43. *Круглый Ю.Н.* Задачи ПЗС-фотометрии астероидов, сближающихся с Землей, в рамках проекта ПулКОН // Рабочая встреча в Андрушивке 6–9 ноября 2009 г.
44. *Миронов В.В., Муртазов А.К.* Модели метеорного риска в околоземном пространстве // *Космич. исслед.* 2015. Т. 53. № 6. С. 469–475.
45. *Миронов В.В., Муртазов А.К.* Методы контроля ближнего космоса. Учебное пособие. Рязань: Book Jet, 2017.
46. *Муртазов А.К.* Мониторинг околоземного пространства оптическими средствами: монография. Рязань: РГУ имени С.А. Есенина, 2010.
47. *Муртазов А.К.* Мониторинг загрязнений околоземного пространства оптическими средствами // *Вестник РУДН. Экология и безопасность жизнедеятельности.* 2010. № 5. С. 23–28.
48. *Муртазов А.К.* Метеорные исследования как метод оценки экологического состояния околоземного пространства // *Российский научный журнал.* 2010. № 6(19). С. 238–247.
49. *Муртазов А.К., Ефимов А.В., Титов П.В.* Статистика широкоугольных ПЗС-наблюдений ярких Персеид в 2007–2013 гг. // Сб. трудов международной конференции “V Бредихинские чтения” / под ред.: Сачкова М.Е., Карташовой А.П., Емельяненко В.В. М.: Изд. Янус-К, 2014.
50. *Муртазов А.К.* Оценка риска соударений в околоземном пространстве с опасными Персеидами в 2007–2013 гг. // Сб. трудов международной конференции “V Бредихинские чтения” / Под ред.: Сачкова М.Е., Карташовой А.П., Емельяненко В.В. М.: Изд. Янус-К, 2014.
51. *Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Пияков А.В., Пияков И.В.* Регистрация космической пыли искусственного и естественного происхождения // *Прикладная физика.* 2009. № 1. С. 86–102.
52. *Сухов П.П., Волков С.К., Карпенко Г.И. и др.* О применении отечественных широкоугольных объективов для задач ККП (На основе пробных наблю-

- дений, проведенных в Одесской АО) // Материалы Международной научной конференции “Наблюдение околоземных космических объектов”. Звенигород: 23–25 января 2007.
53. *Сухов П.П., Волков С.К., Карпенко Г.Ф.* Использование широкопольных линзовых объективов для контроля космического пространства // Космічна наука і технологія. 2010. Т. 16. № 3. С. 55–58.
54. *Asher D., Barentsen G. et al.* European Video Network: IMC 2010. September 17, 2010.
55. *Harris A.W.* Evaluation of CCD systems for Near-Earth-Object surveys. Report of Near-Earth Object Survey Working Group (Ed. E. M. Shoemaker), appendix III. 1995.
56. *Багров А.В.* Метеорные исследования в первой четверти XXI века // Околоземная астрономия-2009: сб. трудов. М.: Геос, 2010. С. 222–228.
57. *Margonis A.* Results from the 2010 Perseids meteor campaign using the SPOSH cameras: IMC 2010. September 17, 2010.
58. *Mironov V.V., Murtafov A.K.* Model of meteoroid risk in near-Earth space // *Cosmic Research*. 2015. V. 53. № 6. P. 430–436.
59. *Murtafov A.K.* Wide-Angle TV-Observations of Bright Perseids in 2007–2009: International Meteor Conference 2010. September 16–19, Armagh. Northern Ireland (UK).
60. *Murtafov A.* Assessing risk from dangerous meteoroids in main meteor showers. In: Proceedings of the International Meteor Conference Mistelbach, Austria, 27–30.VIII.2015. International Meteor Organization. / Ed. Jean-Louis Rault, Paul Roggemans. P. 155–156.
61. *Murtafov A.* Analysis of meteoroid risk in circumterrestrial space. European Planetary Science Congress 2017. 17–22.IX.2017. Riga. Latvia. EPSC Abstracts. V. 11. EPSC2017-18.
62. *Peterson C.* Cloudbait Observatory Research Associate, DMNS. The Colorado Allsky Camera Network: IMC 2010. 17.IX.2010.
63. Meteor video camera. www.kolumbus.fi/oh5iy/astro/Ccd.html. Nov.2003