



Детектирование изображений метеоров с помощью широкоугольного телескопа ШОС400 в обсерватории Ассы-Тургень

И.С. Измайлов^{1,2*}, М.Ю. Ховричев^{1,2}, А.Л. Толстой²,
С.Р. Павлов², Д.А. Биккулова¹, М.А. Кругов³, С.М. Ситтыкова³

¹ ГАО РАН, ²ИПА РАН, ³АФИФ (Казахстан)

Поступила в редакцию 16 сентября 2024 / Принята к публикации 25 ноября 2024

Аннотация

Анализ данных космических миссий (таких как LDEF) показал, что наибольшее число метеорных частиц приходится на интервал масс «микрограмм – миллиграмм». Этот диапазон соответствует абсолютным звездным величинам от 5^m - 6^m до 10^m - 11^m для порождаемых данными частицами метеорных явлений. Анализ данных наиболее успешных сетей, ведущих мониторинг метеоров (например, GMN), и массивов данных, собранных с помощью отдельных установок (систем широкоугольного оптического мониторинга) таких как MMT, GWAC, показывает неполноту выборки детектируемых метеоров в указанном диапазоне блеска. То есть текущие системы мониторинга систематически теряют слабые метеоры. Поэтому естественным развитием данных установок и сетей может стать использование телескопов с апертурой 40 см - 50 см и относительным отверстием близким к 1:1. Такие системы характеризуются приемлемыми размерами рабочего поля в десятки квадратных градусов. Обработка изображений должна вестись в реальном времени (или почти в реальном времени) из-за многократного превышения потока данных над возможностями систем хранения данных. Существующие программные пакеты на данный момент обладают ограничениями как в эффективности детектирования, так и в скорости обработки данных. В данной работе описан подход к детектированию метеорных явлений, развиваемый для системы ШОС400 ($D/F = 400/551$ мм). Этот телескоп разработан специалистами Астрофизического института им. В. Г. Фесенкова (АФИФ) Национального Центра Космических Исследований и Технологий при Аэрокосмическом Комитете Республики Казахстан и установлен в обсерватории Ассы-Тургень. В настоящее время ШОС400 активно используется для решения широкого класса астрономических задач, включая мониторинг метеорных явлений. Предложенная схема выявления метеоров включает в себя три этапа: 1) выявление множества точечных источников излучения в каждом кадре серии; 2) применение преобразования Хафа к множеству отобранных точек для обнаружения треков; 3) выделение пиков отсчетов на множестве диаграмм в пространстве Хафа для подтверждения детектирования. В тексте статьи доказывается высокая эффективность предложенного алгоритма.

ключевые слова: метеоры, компьютерное зрение, детектирование и мониторинг метеорных явлений

Введение

На протяжении последних лет прослеживается устойчивый рост интереса астрономического общества к мониторингу метеорных явлений. Тому есть много причин. Часть из них связана с чисто прикладными задачами: лавинообразно растет количество космических аппаратов, большую роль начинают играть многочисленные спутниковые группировки, соответственно растет и

*e-mail: i_izmailov@mail.ru

количество коллизий, обусловленных столкновениями с метеорными частицами. Возникает потребность в оценке таких рисков, прогнозе метеорной активности в околоземном космическом пространстве. С другой стороны актуальность мониторинга метеорной активности обусловлена потребностями фундаментальных исследований: изучение пылевой фракции Солнечной системы (включая космогонический аспект), построение динамических моделей движения метеороидов и пыли под воздействием различных эффектов и многое другое.

Наблюдательной основой для решения представленных выше задач кроме прочих методов являются массовые наземные наблюдения метеоров в оптическом диапазоне посредством широкоугольных (и сверхширокоугольных) оптических систем с высоким временным разрешением. То есть речь идет об астрономических камерах, оснащенных объективами, позволяющими получить размеры рабочих полей от десятка до нескольких сотен квадратных градусов и вести съемку с временным разрешением порядка десяти кадров в секунду.

Приведем примеры уже существующих и весьма эффективных систем мониторинга метеорных явлений. Относительно яркие метеоры (до 6.0^m при частоте кадров 25 FPS) активно наблюдаются сетями типа [Global Meteor Network](#), покрывающими значительные площади в Европе и Северной Америке благодаря использованию очень доступных («охранных») видеокамер (Vida и др., 2021). Более слабые события фиксируются системами широкоугольных камер типа Mini-MegaTORTORA (КФУ, САО РАН) (Каргов и др., 2019). При временном разрешении 10 кадров в секунду полнота обзора достигается для метеоров до $6^m - 8^m$. Более слабые метеоры до 10^m , порожденные метеороидами в диапазоне масс микрограмм-миллиграмм, наблюдаются в рамках отдельных научных программ. Эта маломассивная фракция наименее изучена. Космические эксперименты (например, LDEF) показали, что в этот диапазон масс попадает большинство метеороидов (Carrillo-Sánchez и др., 2015), и они способны вызывать ударную ионизацию в корпусах космических аппаратов, выводя из строя оборудование.

Для наблюдения таких метеоров с высоким временным разрешением наиболее эффективны широкоугольные оптические системы с относительно большими диаметрами объективов. Примером такой системы телескопов является GWAC (Ground-based Wide-Angle Cameras), созданная в обсерватории Синглонг (КНР, Xinglong Observatory of the National Astronomical Observatories of China) (Ху и др., 2021). Здесь делается ставка на камеры с апертурой 18 см и рабочим полем 150 квадратных градусов. Правда, время накопления в 10-15 секунд оставляет на ПЗС-кадрах только треки метеоров и не позволяет вести полноценный мониторинг развития метеорных явлений.

Стоит отметить, что ни Mini-MegaTORTORA, ни GWAC не являются специализированными системами для мониторинга метеоров. Главная задача этих проектов - детектирование астрофизических транзиентов. Но, с точки зрения анализа изображений метеорное явление можно интерпретировать как разновидность транзиента. То есть детектирование изображений метеоров в рамках указанных проектов является дополнительной задачей для рассмотренных систем мониторинга. Но тут дело в том, что при относительно больших диаметрах объективов ($\approx 10 - 20$ см), нецелесообразно специализировать систему только под изучение метеорных явлений, так как становятся доступными более слабые явления с амплитудой до 10^m и даже слабее.

Понятно, что увеличение диаметра объектива при сохранении светосилы близкой к 1:1 влечет за собой пропорциональное увеличение фокусного расстояния системы и уменьшение рабочего поля. В этой связи большой интерес представляют собой возможности мониторинга метеорных явлений с помощью оптических систем с $D=40$ см и фокусным расстоянием порядка 40 - 60 см. Дело в том, что такие инструменты сочетают весьма высокое проникание при требуемом временном разрешении: около $13^m - 14^m$ при съемке с частотой 10 кадров в секунду. Размеры рабочего поля, естественно, зависят от размеров светочувствительной поверхности детектора. Для типичных CMOS-камер рабочее поле может составлять от нескольких квадратных градусов. Для более крупных датчиков (6 - 9 см) это уже поля порядка нескольких десятков квадратных градусов.

В вопросе об оптимальной частоте кадров разные команды специалистов отдают предпочтение разным стратегиям. Для нашей ситуации (относительно большие диаметры объективов - относительно большие размеры датчиков) чаще всего выбирается минимально возможная частота

та кадров, обеспечиваемая камерами и системами обработки и хранения данных. Например, для Mini-MegaTORTORA это 10 кадров в секунду.

В данной работе представлен вариант методики детектирования метеорных явлений для серий снимков, полученных с помощью широкоугольной оптической системы, созданной в обсерватории Ассы-Тургень Астрофизического института им. В. Г. Фесенкова (АФИФ) Национального Центра Космических Исследований и Технологий при Аэрокосмическом Комитете Республики Казахстан. Обсуждаемый инструмент известен как ШОС400 (SSA400) и имеет параметры: $D/F = 400/551$ мм, рабочее поле (FOV) составляет 3.7×2.5 градуса (9.25 квадратного градуса), масштаб – 5.6 угловых секунд на пиксель при биннинге 4×4 с камерой QHY600MPCIE. То есть ШОС400 как раз относится к классу перспективных оптических систем для задач метеорной астрономии, что мотивировало авторов провести обзор окрестностей радиантов нескольких метеорных потоков с целью набрать достаточно данных для разработки и отладки методики детектирования.

Нередко столь малые рабочие поля (менее 10 квадратных градусов) рассматривают как непреодолимое препятствие для использования камер, подобных ШОС400, для метеорных задач. В качестве обоснования представляется отсутствие соответствующих публикаций в научной периодике. Здесь стоит сказать, что использование инструментов подобного класса имеют место быть. Речь идет об обзорах небольших областей неба вблизи радиантов для высокоточного определения их положений, структуры и динамики (дрейфа и изменения структуры). Примером такого исследования является работа Yanagisawa и др., 2003, посвященная обзору радианта метеорного потока Леониды. Здесь рабочее поле несильно превосходит один квадратный градус, да и нет никакой необходимости отслеживать весь трек. Вполне достаточно измерять ориентации треков в рабочем поле телескопа. Системы камер типа GMN имеют рабочие поля до тысячи квадратных градусов и более. При этом масштабы порядка минут на пиксель сильно ограничивают точность определения координат начала и конца трека (десятки угловых секунд). Поэтому орбиты метеороидов, получаемые из анализа базисных измерений, характеризуются низкой точностью орбитальных параметров (например, для больших полуосей в наилучших случаях это тысячные и сотые доли астрономической единицы). Это весьма затрудняет, например, попытки идентификации родительских тел, проверку моделей эволюции метеорного роя во времени. Для систем типа ШОС400 с масштабами порядка нескольких секунд дуги на пиксель, точность астрометрической привязки будет лучше угловой секунды. В перспективе при организации базисных измерений это даст значимое улучшение точности определения орбитальных элементов метеороидов, породивших зафиксированные явления.

Представленный в работе алгоритм детектирования метеорных треков и соответствующий код не привязаны к конкретному инструменту, хотя тестировался именно для ШОС400.

1 Процедура поиска метеорных явлений для системы ШОС400

Метеорные явления протекают весьма быстро. Скорость видимого движения метеора сильно зависит от физических параметров метеороида и скорости его движения при входе в атмосферу. Но чаще всего явление метеора длится порядка десятой доли секунды. За это время при накоплении 0.1 секунды в рабочем поле получается трек метеора, который может быть весьма длинным относительно размера рабочего поля или выходить за его пределы. Для ШОС400 при физических размерах текущего датчика появление одного и того же метеора на нескольких кадрах происходит весьма редко. Эти обстоятельства мы учитывали при разработке нашего алгоритма поиска метеорных событий.

Еще ряд ограничений связан с технической стороной вопроса. При многочасовом мониторинге с указанным временным разрешением объем получаемых данных быстро превышает возможности имеющихся хранилищ данных, поэтому необходимо вести обработку почти в реальном времени, например, сразу после накопления серии в 1000 кадров. Желательно вообще иметь возможность получать данные прямо в процессе съемки, сохраняя на диск только кадры, представляющие дальнейший интерес. При этом для анализа снимков крайне желательно использовать

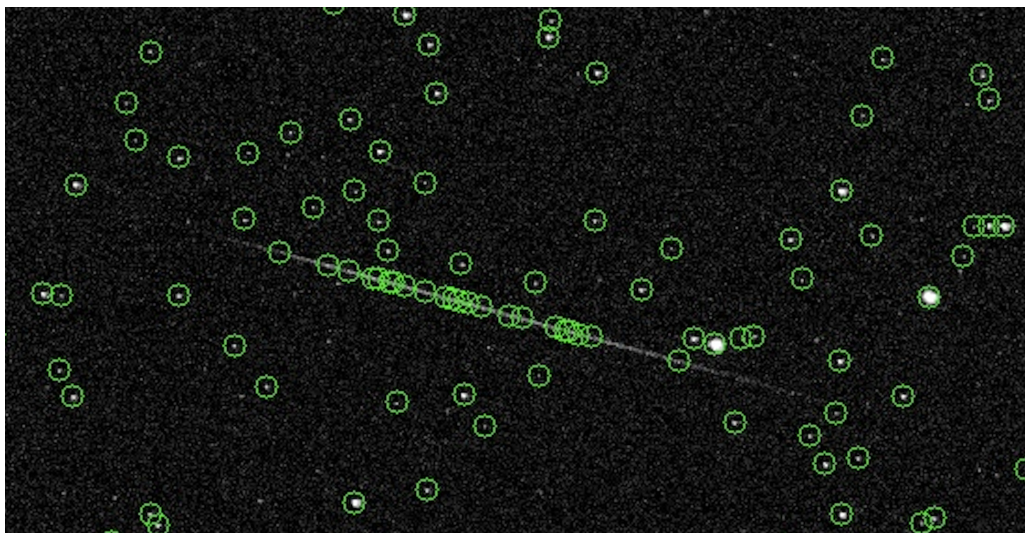


Рис. 1: Пример «распада» метеорного трека в виде множества отдельных источников.

сравнительно недорогие вычислительные системы, которые не требуют специального обслуживания и настройки.

Описанные условия ограничивают нас в применении широко используемых подходов к детектированию метеорных треков. Например, в GWAC преобразование Хафа (Duda и Hart, 1972) применяют к большим изображениям сразу после выравнивания фона и использования бинарного фильтра. Эта процедура требует значимых ресурсов (как вычислительных, так и временных). Применение бинарного фильтра невозможно без подбора порогового значения сигнала, при котором все более низкие значения отбрасываются из дальнейшего анализа. При этом легко потерять события, характеризующиеся низкими значениями отношения сигнала к шуму изображения. Исходя из этого, мы прибегли к следующей схеме:

1. Поиск всех возможных источников света на каждом отдельно взятом кадре. Алгоритмы, решающие такие задачи хорошо известны, например, широко используемый SExtractor (Bertin и Arnouts, 1996). Однако, ввиду наложенных ограничений на скорость вычислений, нам потребовалось разработать свой код, для того чтобы избежать вызовов сторонних приложений.

Наш вариант алгоритма поиска изображений источников основан на медианной фильтрации и последующей аппроксимации изображений с использованием линейной модели (то есть за одну итерацию, избегая последовательных приближений типа градиентного спуска). В итоге мы получили возможность измерять длину трека, если изображение выглядит как трек. Данные об источниках, имеющих ненулевые длины треков, сохраняются в буфере в оперативной памяти.

2. При детектировании сравнительно слабых метеоров в рамках первого шага алгоритма характерен «распад» изображений трека метеора на множество отдельных источников, расположенных вдоль линии трека (смотрите Рис. 1). Далее мы применяем преобразование Хафа, но не к растровому изображению, а к набору точек, выделенных в рамках первого шага. Даже если на кадре обнаружено несколько десятков тысяч источников, это несильно снижает скорость вычислений. При этом в буфере сохраняются локальные максимумы образа изображения в пространстве Хафа.
3. Завершающий этап состоит в выделении метеорных событий из множества кадров серии. У нас есть массивы длин треков и массивы локальных максимумов отображений Хафа. Далее несложно либо по всему ансамблю кадров, либо по серии из нескольких десятков кадров вычислить медианные значения длин треков и величин максимумов отображений

Хафа. Медианная фильтрация этих массивов дает характерные пики, отвечающие событию: быстро движущемуся объекту, характеризующемуся сравнительно длинным треком (то есть метеору или ИСЗ). Нередко такие пики отвечают смежным кадрам, подтверждая адекватность детектирования.

Ниже данная последовательность шагов будет описана более подробно. Вышеприведенный текст нужен для того, чтобы сложилось общее представление о предложенной процедуре детектирования метеорных событий.

Программное обеспечение, созданное для решения рассматриваемой задачи, доступно на [GitHub](#).

1.1 Детектирование изображений астрономических источников на отдельных кадрах

Естественная логика решения задачи детектирования изображений астрономических источников состоит в том, чтобы оценить значение сигнала, соответствующего уровню фона, затем отобразить пиксели, для которых сигнал значимо больше фонового. Совершенно необязательно, что выделенные таким образом пиксели, будут соответствовать изображениям астрономических источников. Потребуется дополнительный анализ окрестностей таких пикселей, чтобы, опираясь на некие признаки, прийти к более обоснованному выводу.

Пожалуй самые большие неопределенности в реализации вышеописанного подхода связаны в определением уровня фона изображения. Некорректные оценки этой величины приводят к ложным детектированиям или «потере» источников. Альтернативное решение состоит в том, чтобы определить все локальные максимумы изображения с ядром размером в несколько пикселей (выполнить Max Pooling изображения). Тогда зависимость от неопределенности в оценке уровня фона и его стандартной ошибки значимо снижается. Вся тяжесть вычислений в этом случае ложится на анализ областей вблизи выделенных локальных максимумов. Соответствующие им пиксели, естественно, не обязаны принадлежать изображениям астрономических источников. Большинство выделенных таким образом локальных максимумов будут принадлежать локальным флуктуациям шума изображения. В этом случае большая часть вычислительных ресурсов уйдет на длительный анализ областей снимка, где изображения астрономических источников отсутствуют. Как оказалось, весьма эффективным решением проблемы является задание максимально возможной доли площади снимка, которую могут занимать астрономические источники. Если уровень фона изображения не имеет больших градиентов, то можно отсортировать локальные максимумы по уровню сигнала и для дальнейшего анализа брать только те, которые заполняют указанную долю площади изображения, начиная от самых высоких уровней сигнала.

Именно эту стратегию мы попробовали реализовать. В сильно упрощенном виде алгоритм решения данной задачи можно представить в виде следующей последовательности шагов:

1. Производится медианная фильтрация всего кадра с ядром фильтра в 7 пикселей для выравнивания фона на всем изображении.
2. Заранее задается, какая часть площади кадра f может принадлежать изображениям источников. По умолчанию принято значение $f = 2 \cdot 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-4}$.
3. Производится выделение локальных максимумов изображения, их сортировка по величине сигнала, начиная с самых «ярких» и далее по убыванию сигнала до тех пор, пока занятая ими площадь $\geq f$. Значение f выбирается таким образом чтобы большинство детектируемых объектов было обусловлено флуктуациями шума.
4. Соседние локальные максимумы с взаимными расстояниями меньше двух пикселей рассматриваются как один источник.
5. Изображения «источников» (выборка из окрестностей локального максимума) аппроксимируются моделью вида $I(x, y) = A(x - x_0)^2 + B(y - y_0)^2 + C(x - x_0)(y - y_0)$, где A, B, C –

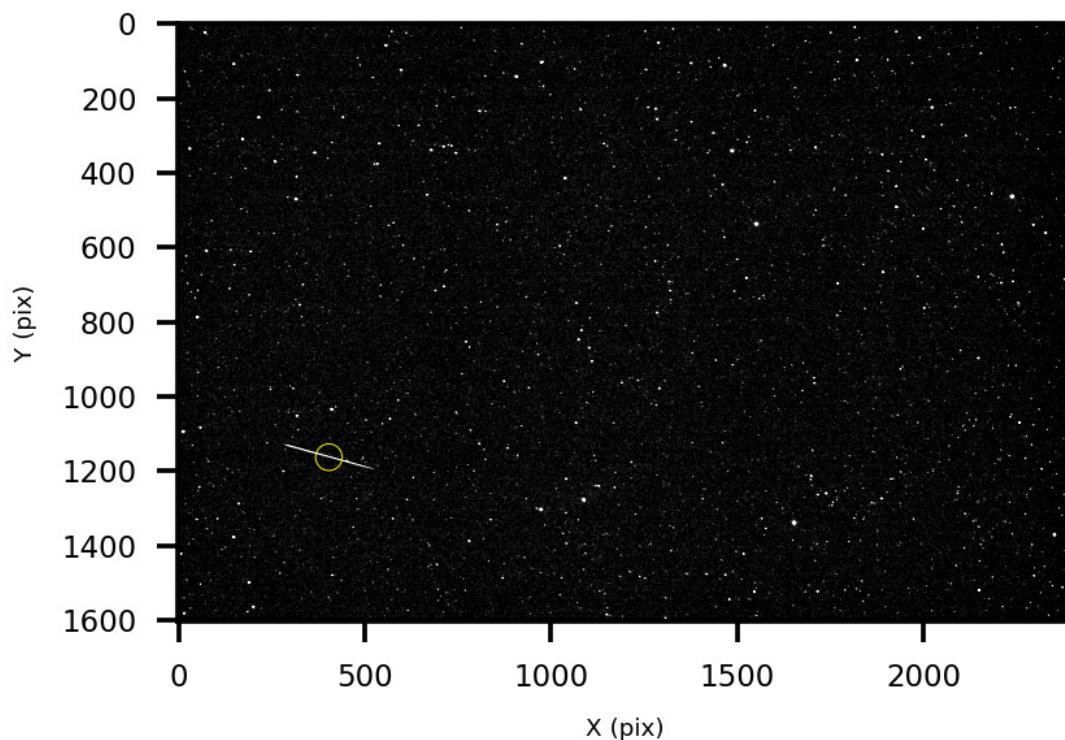


Рис. 2: Пример детектирования трека быстро движущегося объекта в результате аппроксимации изображения источника квадратичной формой.

параметры модели, x_0, y_0 – положение фотоцентра («центра яркости») изображения. Понятно, что это довольно грубая оценка x_0, y_0 , но для решения задачи детектирования она вполне достаточна. Параметр C описывает «вытянутость» изображения и позволяет грубо оценить длину трека. Большое значения длины трека относительно медианного по данному кадру указывает на то, что с большой вероятностью изображение принадлежит быстро движущемуся объекту. На Рис. 2 приведен наглядный пример.

6. В ходе вычисления x_0, y_0 возможны ситуации, когда данная точка лежит вне области локализации пикселей, принадлежащих тестируемому изображению астрономического источника. Это рассматривается как ложное детектирование, но для выявления слабых треков такие «ложные» изображения могут представлять интерес. Чтобы все же ограничить число таких случаев и избежать перенасыщения набора точек шумом, установлен некоторый порог N_f . То есть вычисления прерываются, если, например, $N_f \geq 5000$. Значение N_f можно подбирать эмпирически для массива снимков, получаемых с помощью конкретной системы (телескоп+камера).

Резюмируя данный раздел заметим, что разработанный алгоритм нацелен на выявление всех локальных максимумов, с большой вероятностью принадлежащих астрономическим источникам. Важно отметить, что данная процедура реализована на C++. Исполнение такого кода даже на «весьма средних» машинах происходит весьма эффективно. Обработка кадра в 1605×2400 пикселей (почти 3.8 мегапикселя) на AMD Ryzen 7 7700X происходит за 40 мс. То есть обработка потока кадров при временном разрешении, необходимом для метеорных наблюдений, может выполняться в реальном времени.

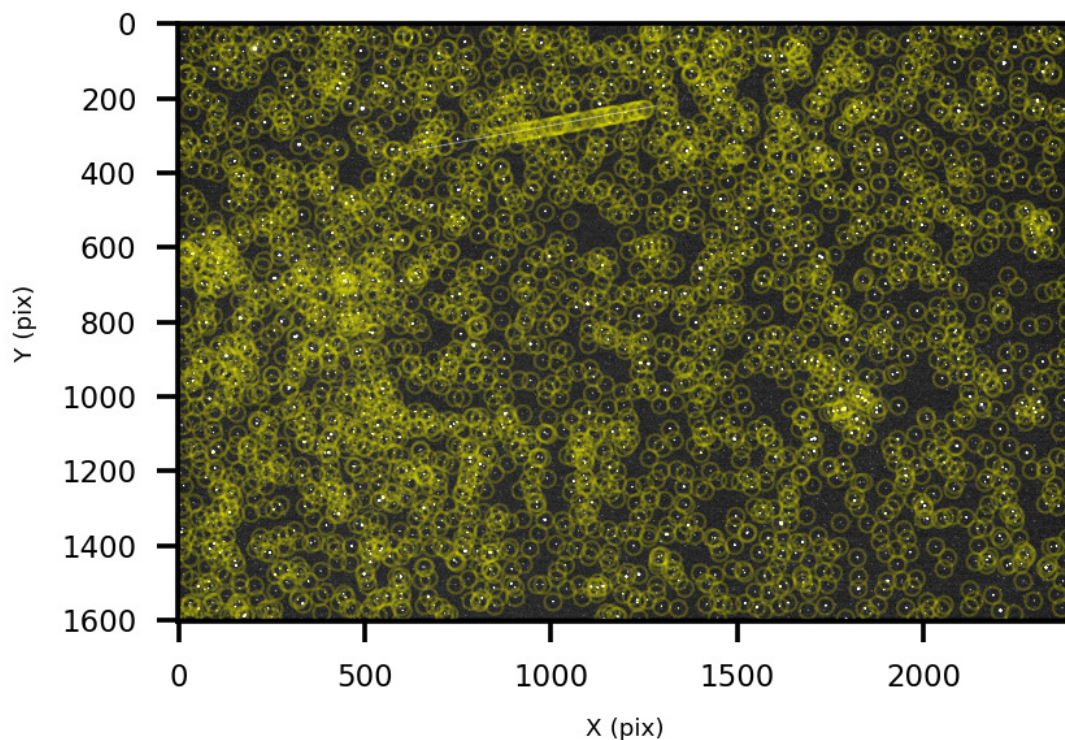


Рис. 3: Типичный пример распределения выделенных «источников» в поле кадра ШОС400.

1.2 Использование преобразования Хафа для поиска треков слабых метеорных явлений

Как указывалось выше, принятый подход к выделению астрономически значимых изображений при небольших отношениях сигнала к шуму может приводить к «распаду» изображения трека метеора на множество отдельных точек, как показано в примере на рис. 1. Тем не менее, так как эти точки сосредоточены вдоль линии трека, можно выделить эту группу точек из числа прочих. Среди алгоритмов компьютерного зрения данную задачу позволяет решить применение преобразования Хафа (Hough transform) к имеющемуся набору точек. Так называемая $(\rho-\theta)$ -реализация этого преобразования широко используется в наши дни и описана в статье Дуды и Харта (Duda и Hart, 1972).

Последовательность шагов на данном этапе выглядит следующим образом:

1. После применения к кадру алгоритма детектирования изображений астрономических источников, описание которого приводится в подразделе 1.1, получается множество точек, представляющих собой локальные максимумы яркости и с большой вероятностью отвечающих реальным источникам (звездам, ИСЗ, фрагментам трека метеора и т.п.). Часто встречающийся случай распределения выделенных источников в рабочем поле показан на Рис. 3.
2. Далее к полученному набору точек применяется преобразование Хафа, строящее отображение имеющегося множества точек из плоскости $(x-y)$ в множество синусоид в плоскости $(\rho-\theta)$. Величина ρ – это расстояние от прямой до начала координат, угол θ отсчитывается от оси абсцисс до перпендикуляра, опущенного из начала координат на соответствующую прямую. Данная процедура в нашей реализации выполняется с помощью средств numpy (Naglis и др., 2020). Отображение набора точек, показанных на Рис. 3, в пространство $(\rho-\theta)$ выглядит как показано на Рис. 4. Теперь задача отыскания трека метеора сводится к поиску точки

с максимальным количеством пересекающихся синусоид в пространстве Хафа (локального максимума на Рис. 4). В показанном примере значимое отличие от фона (медианного значения по всей диаграмме) демонстрирует только одна точка, выделенная желтой окружностью. Она однозначно определяет положение прямой на Рис. 3, вдоль которой наблюдался трек.

3. На Рис. 5 зеленой полупрозрачной полосой выделен трек метеора, выявленный посредством описанных процедур. Однако, для надежного подтверждения того, что обнаруженный трек действительно представляет собой метеорное явление, требуется дальнейшая проверка. Мы исходим из того, что трек метеора должен быть достаточно протяженным. Это можно проверить, анализируя профиль распределения яркости исходного снимка вдоль прямой, выявленной при преобразовании Хафа. Для рассматриваемого примера профиль распределения яркости показан на Рис. 6. В данном случае легко заметить увеличение интенсивности примерно от 500-го до 1300-го пикселей.

1.3 Верификация детектирования изображения метеора на основе анализа набора кадров

Как было показано выше, анализ изображения отдельного кадра, в целом, позволяет детектировать метеорные треки для оптических систем, подобных ШОС400. Действительно, для каждого кадра можно выполнить преобразование Хафа. Характерное время вычислений в рамках этой процедуры на кадрах ШОС составляет 20 – 40 мс в зависимости от числа источников. Однако выделение локальных максимумов в $(\rho-\theta)$ -пространстве может дать ложные детектирования. Ведь несколько таких значимых относительно фона максимумов точно есть на каждом кадре.

Существенно повысить надежность детектирования треков метеоров можно сопоставляя хотя бы несколько смежных кадров. Для больших серий данный анализ еще более эффективен. На Рис. 7 показано выделение пика отсчетов в $(\rho-\theta)$ -пространстве для серии из 1000 кадров, полученных в окрестности радианта метеорного потока Персеиды. Для построения представленной диаграммы была вычислена последовательность максимальных отсчетов в пространстве Хафа для серии из 1000 кадров. Далее к полученной последовательности был применен медианный фильтр с шагом в 10 кадров, в результате чего была получена вторая последовательность. Диаграмма на Рис. 7 представляет собой разность этих двух последовательностей. Для этой разности несложно получить оценку дисперсии σ^2 и использовать порог $5\text{-}\sigma$ для уверенного выделения пика.

Обрабатывать кадры серии по описанной методике удобно по мере появления fits-кадров в папке носителя, на который происходит запись данных. Как только серия завершается, несложно произвести описанную в этом пункте процедуру и оставить на диске только один или несколько кадров для проведения дальнейших измерений параметров метеорного трека.

Чтобы получить представление об эффективности детектирования были взяты фрагменты серий, в которых изображения метеорного трека получились на нескольких смежных кадрах но с разным отношением сигнала к шуму (от $SNR = 3$ до $SNR = 10$) для самого «яркого» пикселя трека. В качестве переменной использовался параметр f (рассмотренная выше доля площади снимка, занятая изображениями астрономических источников). Величина f дискретно менялась от $1.0 \cdot 10^{-4}$ до $3.5 \cdot 10^{-4}$ с шагом $0.5 \cdot 10^{-4}$. Успешные детектирования начинались с $f = 2.0 \cdot 10^{-4}$. При этом эффективность составила $0.2 \div 0.25$. То есть метеор регистрировался на одном кадре из четырех-пяти, явно содержащих изображение метеорного трека. При $f = 2.5 \cdot 10^{-4}$ эффективность увеличивалась до ≈ 0.5 . Начиная с $f = 3.0 \cdot 10^{-4}$ фиксировались почти все изображения метеоров (эффективность достигала почти 0.95). Здесь надо сказать, что наблюдения велись в хороших условиях (отсутствие облачности). Никаких облаков или иных явлений, приводящих к большим градиентам фона не наблюдалось.

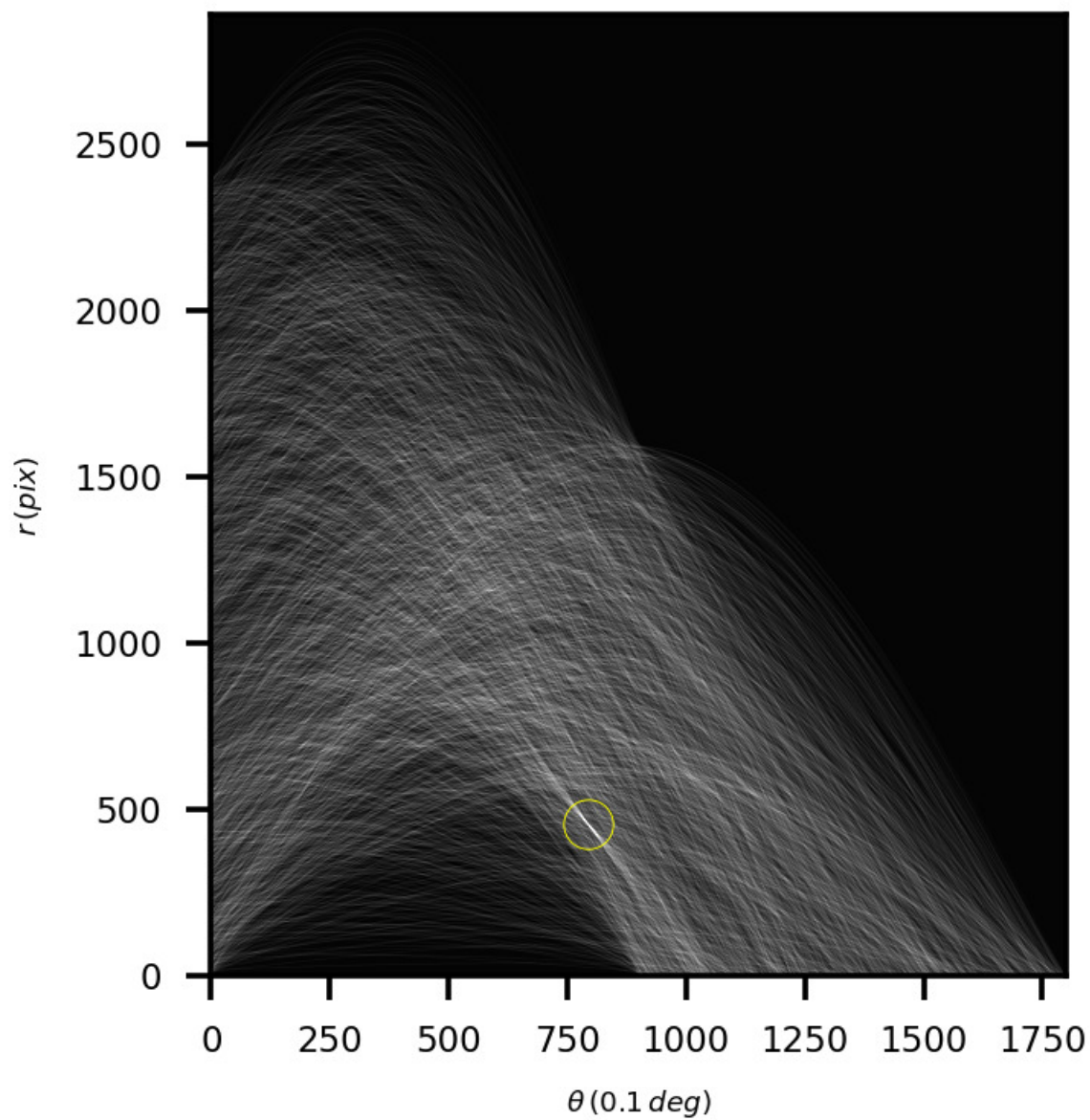


Рис. 4: Результат применения преобразования Хафа к данным Рис. 3. Желтая окружность выделяет точку максимума отсчетов в пространстве $(\rho-\theta)$, отвечающей прямой, вдоль которой расположены точки трека исходного снимка, с большой вероятностью представляющего собой изображение следа метеора.

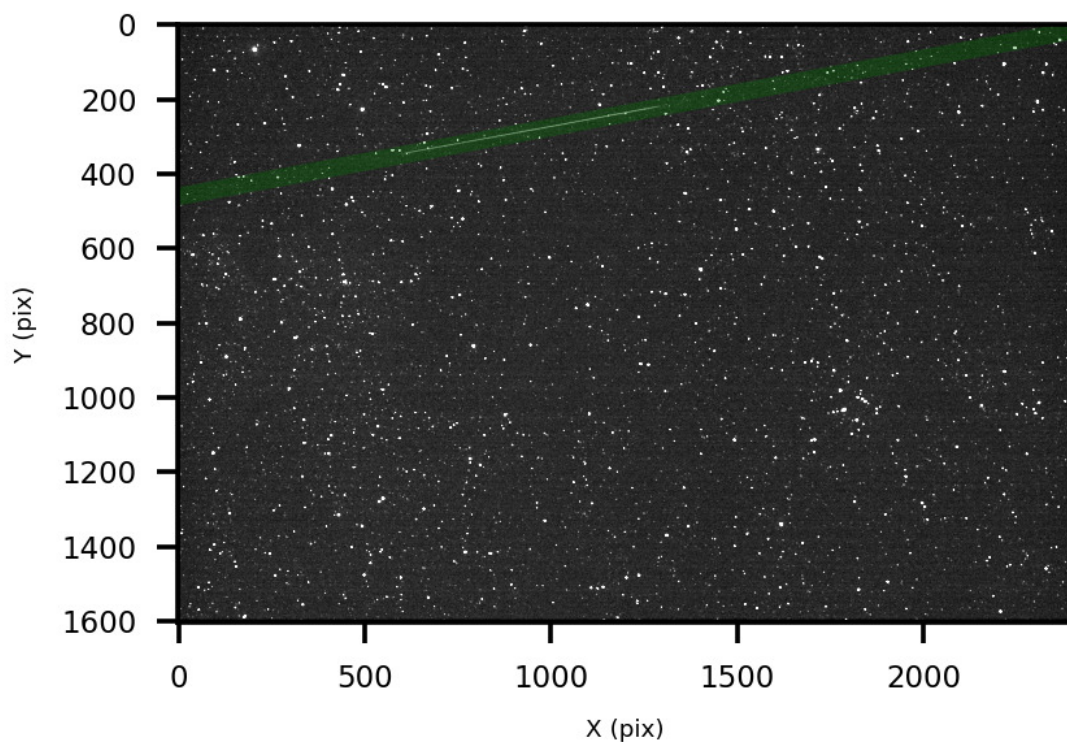


Рис. 5: Пример выделения трека метеора, детектированного вышеописанным алгоритмом. Зеленая полоса обозначает положение прямой, соответствующей точке с максимальными отсчетами в пространстве Хафа Рис. 4.

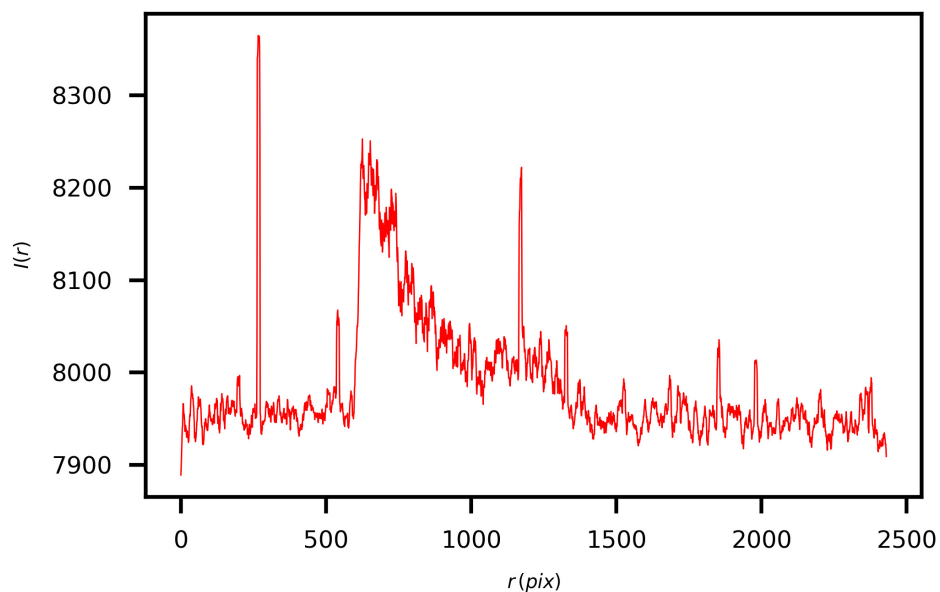


Рис. 6: Профиль изображения исходного снимка вдоль прямой, обозначенной на Рис. 5 зеленой полосой.

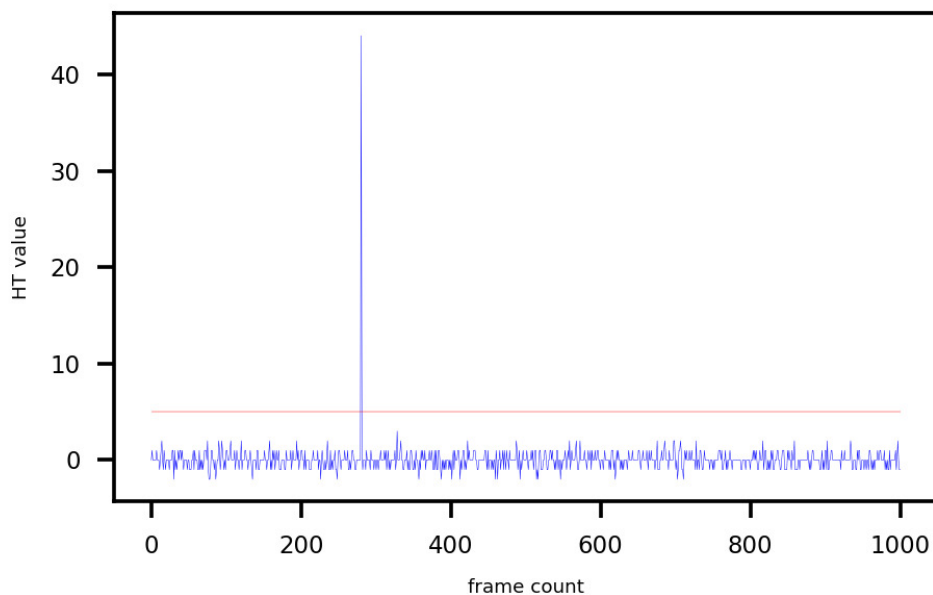


Рис. 7: Выделение кадра (кадров) с пиковыми значениями максимумов отсчетов в пространстве Хафа на основе анализа серии из 1000 кадров с ШОС400. В данном случае пик соответствует кадру, подлежащему анализу в подразделах 1.1 и 1.2.

2 Выводы

Во Введении²² к данной работе была отмечена тенденция к увеличению апертуры астрономических камер, используемых для мониторинга метеорной активности. По-видимому, оптимальным окажется диаметр объектива порядка 40 см - 50 см, так как при этом значение фокусного расстояния для камер со светосилой близкой к 1:1 на современных CMOS-детекторах и устройствах ближайшего будущего можно будет получить приемлемые для решения задач метеорной астрономии величины рабочих полей (десятки квадратных градусов). Перспективным является обзор значительных участков неба с помощью системы из нескольких таких телескопов.

В данной работе был продемонстрирован пример анализа наблюдательных данных, полученных с помощью системы ШОС400 ($D/F = 400/551$ мм, рабочее поле (FOV) – 3.7×2.5 градуса), разработанной специалистами Астрофизического института им. В. Г. Фесенкова (АФИФ) Национального Центра Космических Исследований и Технологий при Аэрокосмическом Комитете Республики Казахстан. Эта разработка вполне укладывается в отмеченную тенденцию построения систем наблюдений за метеорными явлениями в оптическом диапазоне.

Требование оперативной обработки получаемых кадров (практически в реальном времени) потребовало разработки и реализации оригинального алгоритма, представленного в виде трех основных шагов: 1) выделение источников света на снимке; 2) применение алгоритма Хафа для поиска треков; 3) выделение пиков в последовательности максимальных отсчетов в пространстве Хафа для наборов кадров с серии или всей серии в целом.

Показано, что треки метеоров выявляются весьма уверенно. Грубые оценки показывают, что большинство треков имеют пиковую яркость около 10^m , что соответствует предположению о том, что в существующих системах мониторинга метеорной активности сильно недооценена маломассивная фракция метеороидов.

Вопросы, связанные с астрометрическим и фотометрическим измерением треков метеоров, будут вынесены в следующую статью, которую также планируется посвятить анализу данных, полученных в ходе обзора окрестностей радиантов метеорных потоков, выполненного с помощью

системы ШОС400 обсерватории Ассы-Тургень в июле-августе 2024 года.

Финансирование

Настоящее исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 24-22-20044, <https://rscf.ru/project/24-22-20044/>. Участие АФИФ в данном исследовании было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992759).

Благодарности

Авторы выражают свою признательность коллегам из Астрофизического института им. В. Г. Фесенкова (АФИФ) Национального Центра Космических Исследований и Технологий при Аэро-космическом Комитете Республики Казахстан за помощь в ходе проведения наблюдений.

Список литературы

- Vida, Denis и др. (2021). [The Global Meteor Network - Methodology and first results](#). MNRAS 506.4, с. 5046–5074.
- Karpov, S. и др. (2019). [Two-station Meteor Observations with Mini-MegaTORTORA and FAVOR Wide-Field Monitoring Systems](#). В: *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. Т. 51. Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, с. 127–130.
- Carrillo-Sánchez, J. D., J. M. C. Plane, W. Feng, D. Nesvorný и D. Janches (2015). [On the size and velocity distribution of cosmic dust particles entering the atmosphere](#). Geophys. Res. Lett. 42.15, с. 6518–6525.
- Ху, У. и др. (2021). [The GWAC Data Processing and Management System](#). В: *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. Т. 53. Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, с. 174–179.
- Yanagisawa, Toshifumi и др. (2003). [High-Precision Radiant Analysis of the 2001 Leonids Using Telescopic Optics](#). PASJ 55, с. 553–557.
- Duda, Richard O и Peter E Hart (1972). [Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures](#). *Communications of the ACM* 15.1, с. 11–15.
- Bertin, E. и S. Arnouts (1996). [SExtractor: Software for source extraction](#). A&AS 117, с. 393–404.
- Harris, Charles R. и др. (2020). [Array programming with NumPy](#). *Nature* 585.7825, с. 357–362.

Detection of meteor event images using the SSA400 telescope at the Assy-Turgen Observatory

I. Izmailov^{1,2}, M. Khovrichev^{1,2}, A. Tolstoy², S. Pavlov², D. Bikulova¹,
M. Krugov³, S. Sittykova³

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo, ²IAA RAS, ³Fesenkov Astrophysical Institute, Aerospace Committee of the Ministry of Digital Development, Innovations and Aerospace Industry of the Republic of Kazakhstan

Received 16 September 2024 / Accepted 25 November 2024

Abstract

The analysis of space mission data, such as LDEF, reveals that most meteor particles fall within the microgram to milligram range. This range corresponds to meteor event absolute magnitudes from 5-6 mag to 10-11 mag. The data processing based on the results of the most successful meteor monitoring networks (e.g. GMN) and wide-field survey systems like MMT or GWAC demonstrates incompleteness of the detected event number in this magnitude range. As we can see, present-day monitoring systems have lost faint meteors. Hence, developing a telescope with a 40-50cm aperture, a focal ratio of approximately 1:1, and a field of view of several tens of square degrees is a natural progression for the evolution of meteor event monitoring systems. Real-time data processing is necessary for telescopes and cameras due to the significant excess of data compared to typical storage volumes. Therefore, improving the meteor detection algorithms is relevant for separate images and a set of frames. This paper describes our method for detecting meteor events using the SSA400 system (D/F = 400/551 mm). The telescope was developed by astronomers of the Fesenkov Astrophysical Institute of the Aerospace Committee of the Ministry of Digital Development, Innovations and Aerospace Industry of the Republic of Kazakhstan and installed in the Assy-Turgen Observatory. For now, the telescope is used in a wide range of astronomical programs, including monitoring meteor events. The proposed algorithm consists of three stages: 1) Extracting all possible source images in each frame. 2) Applying the Hough transform to this set of sources to detect meteor tracks. 3) Performing peak detection on the set of maximum counts from diagrams in Hough's space to confirm the detection. The paper proves the high efficiency of the proposed approach.

key words: meteor event: image detection; computer vision