

УДК 523.53

МЕТОДИКА ПОЗИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ МЕТЕОРОВ

© 2008 г. Ю. М. Горбанев, А. В. Голубаев, В. В. Жуков, И. И. Кимаковская,
С. Р. Кимаковский, Е. Ф. Князькова, С. В. Подлесняк, Л. А. Сарест,
И. А. Стогнеева, В. А. Шестопалов

Астрономическая обсерватория Одесского национального университета, Украина

Поступила в редакцию 01.03.2007 г.

Представлены результаты позиционной обработки наблюдательного материала, полученного с помощью метеорного патруля на базе телескопа системы Шмидта и телевизионного ПЗС-приемника. За три года метеорного патрулирования зафиксировано более 1000 телескопических метеоров. Описана методика каталогизации и позиционной обработки 3050 телевизионных снимков с метеорными изображениями. Разработана методика измерений изображений опорных звезд для получения прямоугольных координат в системе снимка. Обсуждается получаемая точность определения экваториальных координат опорных и контрольных звезд методом Тернера (порядка угловых секунд). Создано программное обеспечение, которое позволяет после обработки изображения метеора вычислять прямоугольные координаты точек метеорной траектории. Данные координаты используются для определения экваториальных координат полюсов больших кругов метеорных траекторий (угловая длина не менее $15'$) с точностью не хуже $4'$.

Рассматривается возможность применения метода Станюковича для определения экваториальных координат радиантов для небазисных наблюдений метеоров. Проведена оценка точности определенных координат радиантов, которая составляет $4'$ – $5'$.

Обсуждаются перспективы получения кинематических характеристик метеорных частиц.

PACS: 96.30.Za; 91.65.Sn; 94.20.Xa; 91.67.gn-in

ВВЕДЕНИЕ

Многие задачи метеорной астрономии для определения кинематических и физических характеристик метеорных явлений требуют точных позиционных измерений. Позиционные измерения проводятся по наблюдениям, полученным различными методами: визуальным, фотографическим, телевизионным или радиолокационным. Они в своей совокупности охватывают широкий диапазон масс и скоростей регистрируемых метеорных частиц. Точности определения при этом могут отличаться на несколько порядков в зависимости от физических свойств фиксируемых метеорных явлений, условий регистрации и возможностей метода наблюдений.

Одной из задач исследования пространственного распределения метеорных частиц, порождающих метеоры, является определение их радиантов.

Как утверждается в работе (Мартыненко и др., 1978), точность определения радиантов метеоров при визуальных наблюдениях составляет 0.2° – 0.5° . Такие результаты могут получить только группы опытных наблюдателей, тщательно соблюдающие строгую методику наблюдений, в противном случае точность будет не лучше 1° .

В работе (Кашеев, Лебединец, 1961) делается вывод о том, что радиолокационные определения

координат радиантов индивидуальных метеоров могут быть выполнены с точностью $\pm 2.5^\circ$.

Для определения координат радиантов при использовании фотографического или телевизионного метода проводятся измерения точек изображения метеорной траекторий, а затем вычисляются соответствующие им координаты полюсов больших кругов. Точность измерения отдельных точек метеорной траектории будет определять точность определения координат полюсов и радианта.

В работе (Козак, 2002) проводится анализ методов и точности определения экваториальных координат при цифровой обработке телевизионных наблюдений метеоров. Для установки с короткофокусным объективом “Юпитер-3” ($F = 50$ мм, $D : F = 1 : 1.5$) и размере изображения 352×288 пикселей угловой размер одного пикселя составляет около $4'$, минимально возможная погрешность определения экваториальных координат точек метеорного изображения составляет $1.5' - 3.5'$.

Точность измерения точки на фотографическом снимке, полученном с помощью короткофокусных объективов типа “Зонар”, “Индустар-7”, “Ксенон”, при средней ошибке измерения 5×10^{-3} мм в угловой мере составляет $\pm 18''$ (Катасев, 1966).

Согласно (Симакина, 1968) координаты точек на фотографическом изображении метеора определялись в среднем с ошибкой порядка $\pm 5''$ – $8''$ (Одесса), $\pm 10''$ – $20''$ (Душанбе), $\pm 10''$ – $20''$ (Гарвард). Секундная точность обусловлена тем, что при метеорном патрулировании использовались астрокамеры с фокусным расстоянием не менее 250 мм, а в качестве приемника излучения служила фотографическая эмульсия.

При планировании и создании метеорного патруля возникает дилемма, которая заключается в том, что для повышения точности измерений метеорных снимков требуется увеличение фокусного расстояния астрокамеры или телескопа. Это влечет за собой уменьшение рабочего поля, что негативно сказывается на статистике количества наблюдаемых метеоров и длине метеорной траектории, которая фиксируется приемником излучения.

Поэтому существует большое разнообразие в комплектации метеорных патрулей в зависимости от задач, решаемых с помощью разработанного прибора.

При создании метеорного патруля мы ориентировались на изучение слабых метеорных явлений, до сих пор наблюдавшихся только телескопическим и радиолокационным методами. Скомбинировав телескопический метод с использованием в качестве регистратора панорамного телевизионного приемника, мы получили возможность фиксировать изображения слабых метеоров с высоким пространственным разрешением. Такие метеоры до сих пор фиксировались случайно на снимках, полученных на телескопах при длительных экспозициях в виде штрихов, пересекающих снимок от края до края. Временная привязка момента пролета метеора была возможна только с точностью, равной длительности экспозиции.

Метеорный патруль на наблюдательной станции Крыжановка Одесской астрономической обсерватории описан в работе авторов (Горбанев и др., 2006). Патруль установлен на экваториальной монтировке "АПШ-4" и укомплектован телескопом системы Шмидта (диаметр коррекционной пластины – 170 мм, диаметр зеркала – 300 мм). Фокусное расстояние телескопа 534 мм. В качестве приемника излучения используется высокочувствительная видеокамера Watec LCL-902K, работающая в телевизионном стандарте PAL (25 кадров в секунду). Данная видеокамера с указанными характеристиками телескопа позволяет выделить участок небесной сферы размером $36' \times 48'$, а размер отдельного пиксела изображения в угловой мере порядка $3.87''$. При физическом размере пиксела согласно паспортным данным 8.3–8.6 мкм эквивалентное фокусное расстояние телескопической системы составляет 44–45 см. В фокусе телескопа можно регистрировать звезды до $+12.8^m$ в фотометрической полосе V.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ. МЕТЕОРНАЯ БАЗА ДАННЫХ

После ночи метеорного патрулирования, методика которого изложена в работе (Горбанев и др., 2006), в базу данных поступают фильмы, состоящие из 50 кадров до и после метеорного явления и кадров с изображением собственно метеора. Такая процедура выполняется при помощи созданного авторами программного обеспечения AVICutter 1.02, которое непосредственно из фильма вырезает кадры с метеорным изображением, а также создает изображения для четных и нечетных строк кадра.

Отметим, что здесь и далее мы будем обозначать программное обеспечение, разработанное авторами, курсивом для удобства восприятия. Также будем называть четным полукадром изображение, составленное из четных строк кадра, а нечетным полукадром – из нечетных строк соответственно.

Дополнительно проводится суммирование 50 кадров до метеорного явления: для каждой точки просчитывается среднее значение интенсивности по значениям интенсивности для той же точки по всем 50 кадрам. Полученное таким образом изображение обозначим как суммированный кадр. Напомним, что суммирование кадров позволяет повысить проникающую способность примерно на одну–две звездные величины. Подробнее об обосновании использования 50 кадров фильма (2 с) для суммирования приводится в работе (Горбанев и др., 2006). Созданные таким образом суммированные изображения служат в дальнейшем для позиционных и фотометрических определений, хотя для этого пригодны и отдельные кадры фильма с экспозициями 20 или 40 мс.

Отдельно для каждого пиксела изображения вычисляется среднее значение интенсивности и среднеквадратичное отклонение по всему ряду из 50 кадров, предвещающих метеорное явление. В дальнейшем эти данные используются для вычисления значений фона в точках, где зафиксировано метеорное изображение. Назовем файлы с данными по интенсивностям фона картами фона.

Каждый фильм с изображением объекта идентифицируется по следующим данным в имени: номер объекта в сеансе 15-минутного патрулирования за ночь наблюдений, тип объекта (метеор, комета, ИСЗ и т.д.), дата в формате день, месяц, год и номер самого 15-минутного сеанса. Такая идентификация позволяет быстро проводить поиск метеоров в базе данных. Характерный вид отдельного кадра с изображением метеора представлен на рис. 1а, размер рабочего поля составляет, как было указано выше, $36' \times 48'$.

Каждый метеор заносится в каталог, где ему присваивается порядковый номер. Кроме того, в каталог вносится дата наблюдения, название AVI-фильма, код наблюдателя, время начала записи фильма

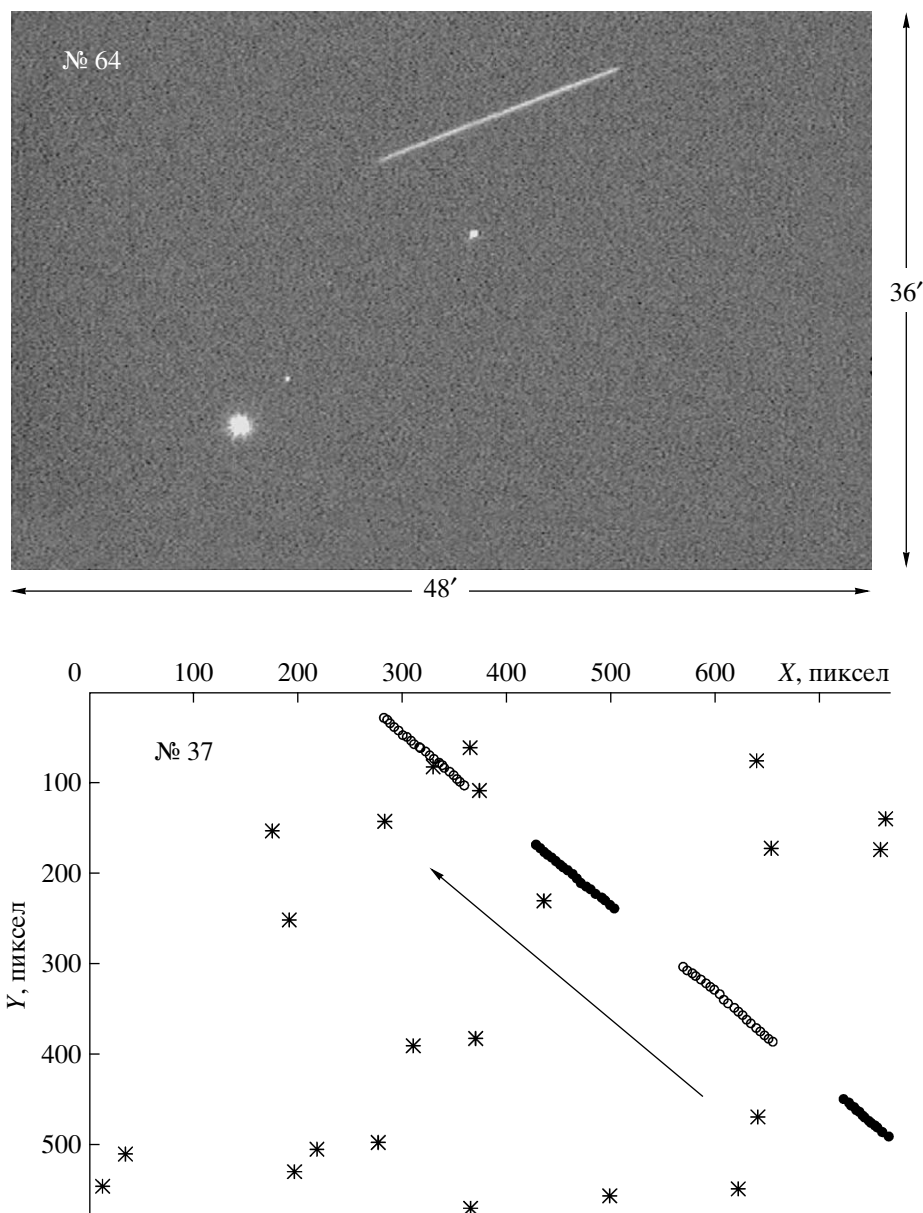


Рис. 1. Типичный снимок метеора и карточка обработки из картотеки базы данных.

(UTC), звезда гидирования по опорному каталогу (SAO, Tycho-2, Hipparcos или USNO-A2), экваториальные координаты центра изображения.

Затем проводится первичная обработка наблюдательного материала: из фильма отбираются кадры с метеорными изображениями, и формируется каталог метеорных снимков с нумерацией единичных кадров для каждого явления. Пополняется суммированными кадрами и каталог звездных полей.

Все звезды на снимках отождествляются и нумеруются, а далее вносятся в сводный каталог: название звездного каталога, экваториальные координаты, звездные величины, показатели цвета,

спектральный класс и др. Созданные каталоги позволяют в дальнейшем использовать эти данные для определения экваториальных координат и видимых звездных величин метеоров.

Первоначально отождествление снимков выполнялось с помощью известных программных средств, но из-за специфики нашего наблюдательного материала на это затрачивалось много времени. В настоящее время завершена разработка программного обеспечения *PSF 1.01*, которое позволяет по номеру звезды гидирования в подключаемом звездном каталоге проводить оперативное отождествление за несколько секунд.

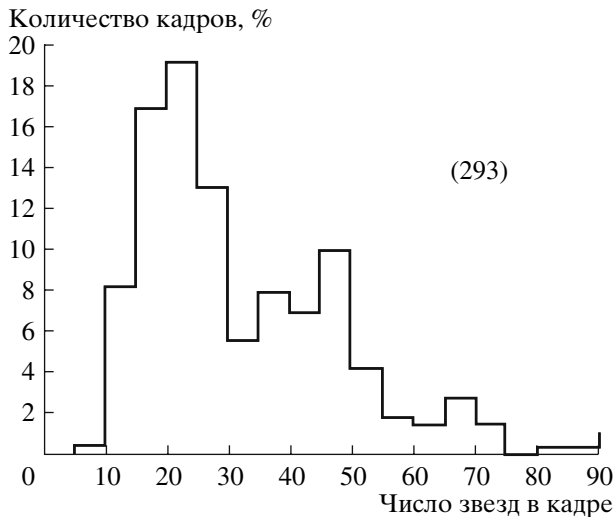


Рис. 2. Гистограмма распределения количества опорных звезд на снимках.

Предварительные измерения заносятся в базу данных, где хранятся измеренные величины метеоров и опорных звезд, а также создается рабочая карта с прямоугольными координатами звезд в системе снимка, все штрихи метеорного изображения, направление полета и т.п. (рис. 1б). Обработанные изображения метеоров накапливаются в фотометрической базе данных. К марту 2007 г. при общем времени метеорного патрулирования около 2000 часов зафиксировано более 1000 метеоров. Общее число отдельных снимков с метеорными изображениями составляет 3050.

ПОЗИЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЗВЕЗД

Для позиционных определений используются опорные звезды с известными экваториальными координатами. Точность определения координат изображения метеорной траектории зависит от количества звезд на изображении. На рис. 2 представлена гистограмма распределения количества опорных звезд на снимках, полученных с помощью метеорного патруля, минимальное количество опорных звезд – 10, максимум распределения приходится на диапазон 20–25, максимальное количество – 88. Для метода Тернера такое распределение количества опорных звезд вполне приемлемо (Михайлов, 1967).

Одним из этапов позиционной обработки метеорных изображений является измерение прямоугольных координат опорных звезд в системе координат снимка. Существует множество программных средств для таких измерений, но, принимая во внимание, что они используются в большинстве случаев для измерений звездных изображений, а нам нужно измерять кроме звезд и метеорные

изображения, мы разработали свое программное обеспечение для этих целей.

Для контроля методики измерений и правильности работы нашего программного обеспечения мы провели параллельную обработку с помощью программы IRIS (разработчик Christian Buil <http://www.astrosurf.com/buil>, условия распространения: свободные). Данная программа позволяет проводить астрометрические и фотометрические измерения, используя принципы апертурной фотометрии. Результаты обработки звездных изображений с помощью программного обеспечения IRIS представлены в работе (Behrend и др., 2002).

Согласно нашей методике, при измерении звездного изображения на первом этапе происходит анализ изображения и отбор точек, принадлежащих звездному изображению. Для этого используются значения интенсивности пикселей фона вокруг изображения звезды и все точки, которые имеют значения интенсивности больше 3σ от уровня фона, относят к звездному изображению.

Затем проводится поиск фотометрического центра изображения по формулам:

$$X = \frac{\sum (X_i I_i)}{\sum I_i}; \quad Y = \frac{\sum (Y_i I_i)}{\sum I_i}, \quad (1)$$

где X_i , Y_i – прямоугольные координаты рабочего пикселя, а I_i – интенсивность сигнала в относительных единицах. Таким образом, значения прямоугольных координат в системе снимка являются дробными и возникает вопрос: с какой точностью (в пикселях) мы можем измерить звездное изображение? Проверку точности измерений можно провести, многократно измеряя звездные изображения, но если в методике существует систематическая ошибка, то такие измерения не позволят выявить недостатки. Для выявления возможных систематических ошибок нами была проведена обработка одних и тех же снимков с помощью нашего программного обеспечения и программы IRIS. На рис. 3 представлены результаты сравнения измерений. Разность значений координаты X (Δx) (рис. 3а), координаты Y (Δy) (рис. 3б) и расстояние Δ между точками (рис. 3в) для измерений, проведенных с помощью двух программ, показывают предельные значения возможных систематических ошибок. Стандартное отклонение для координаты X составляет 0.2, а для координаты Y – 0.26. Среднее значение для Δ составляет 0.28 при стандартном отклонении 0.18 пикселя.

При фотографических позиционных измерениях используют понятие уравнения блеска, которое определяется как относительное смещение положений звезд с изображениями разного размера на пластинке, вызванное различной структурой этих изображений и особенностями их измерений. Для телевизионных изображений с ПЗС-приемником

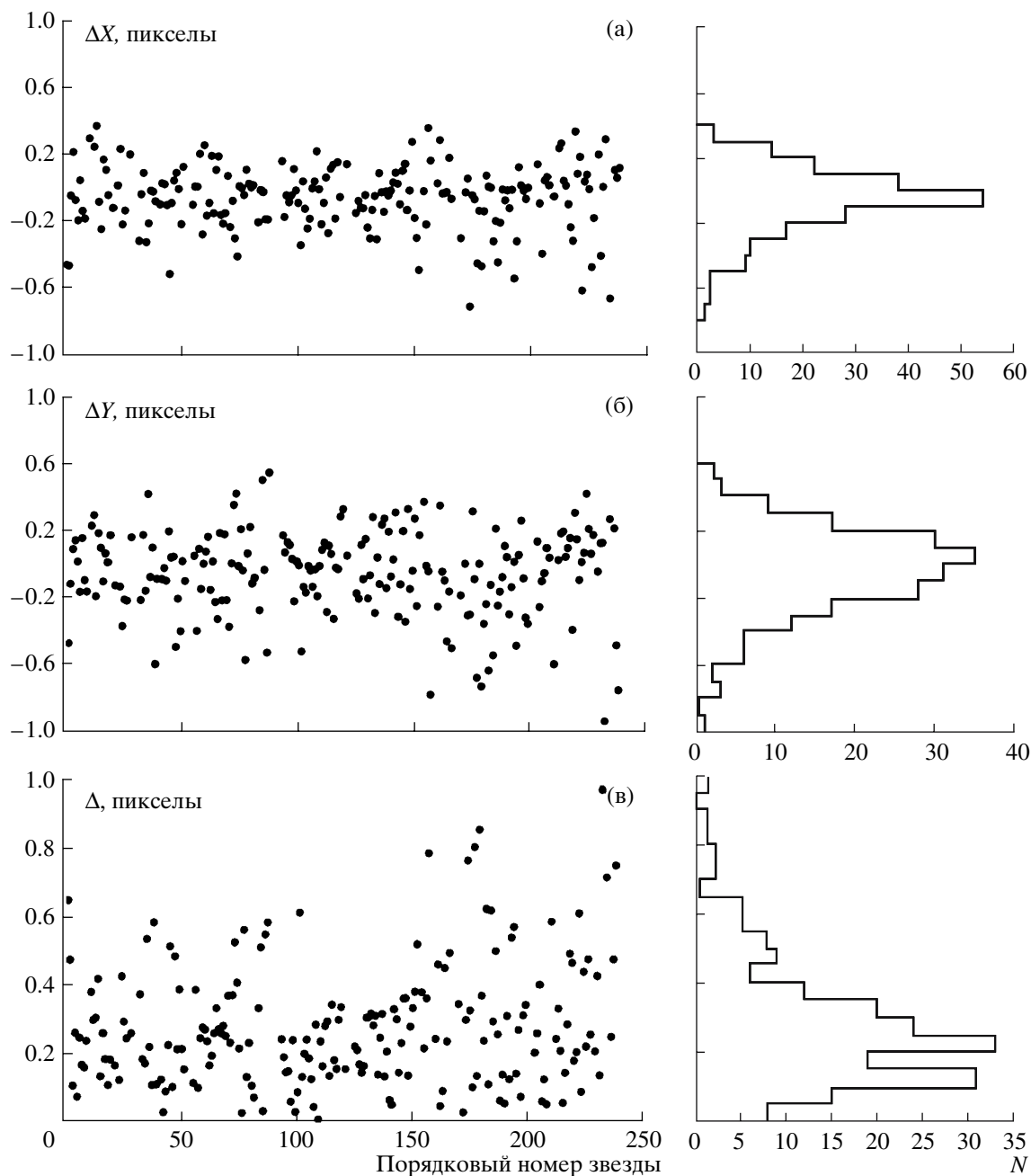


Рис. 3. Сравнение результатов измерений прямоугольных координат звездных изображений. Разность значений в прямоугольных координатах, полученных программным обеспечением авторов (см. текст) и программой IRIS: (а) – по координате X ; (б) – по координате Y ; (в) – общее расстояние между соответствующими точками. На гистограммах представлены распределения разностей для каждого графика.

также существуют измерения, для которых отклонения достигают значений 0.5–1 пиксел, и связано это с влиянием на точность измерений яркости звездных изображений. Проиллюстрируем это рис. 4а, на котором представлена зависимость точности определения координат контрольных звезд от их звездных величин. Эти данные получены после обработки ряда снимков с отождествленными опорными звездами методом Тернера

(Михайлов, 1967; Крамер, Шестака, 1989; Gehrels и др., 1986; Codina и др., 1992) с использованием 6 или 12 постоянных и затем просчитаны невязки для контрольных звезд различной звездной величины (использовались величины в системе V). Как видно из рисунка, для ярких звезд точность определения экваториальных координат зависит от звездной величины. Звезды ярче 6^m являются очень ненадежными для определения координат – это связа-

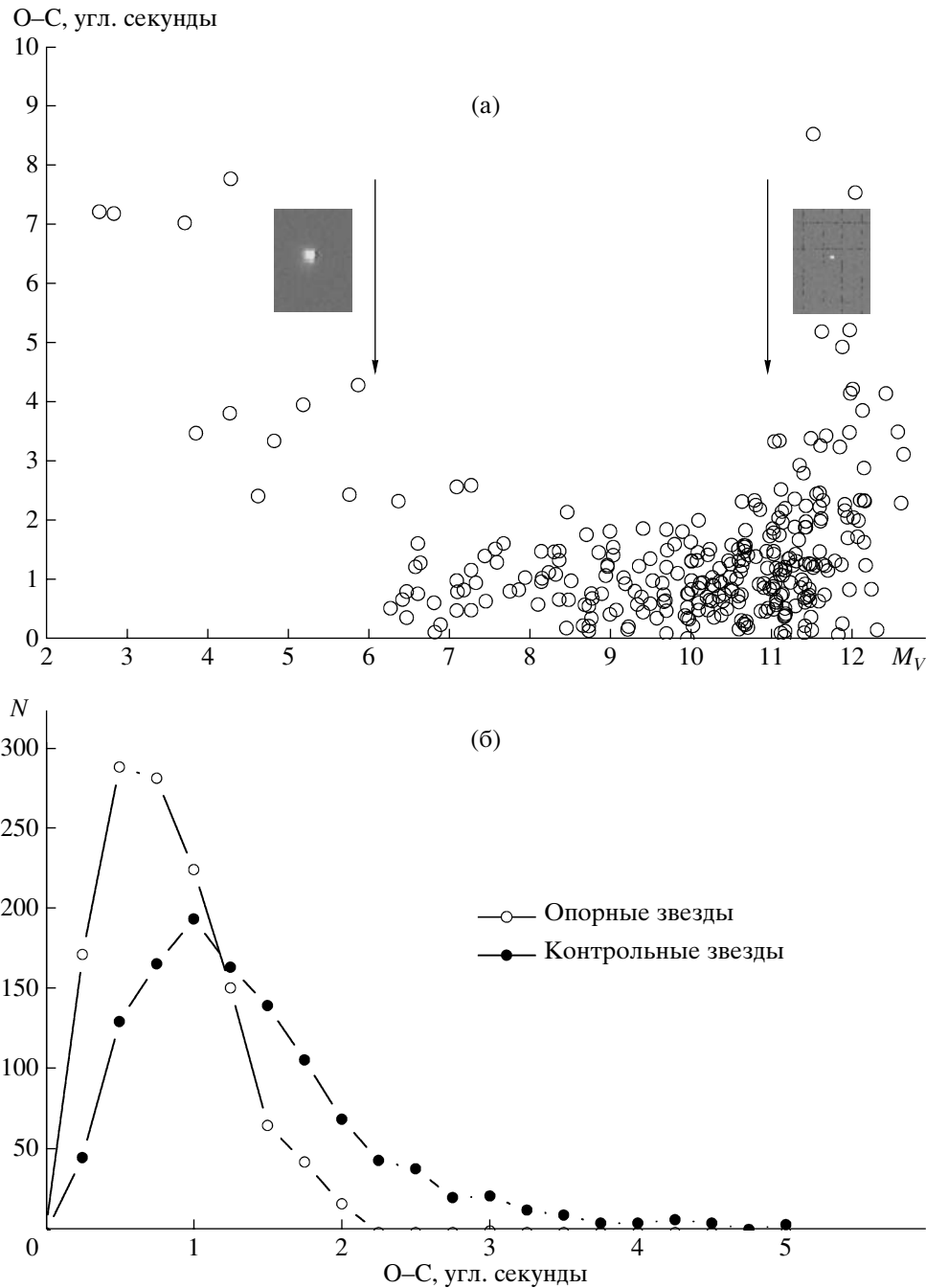


Рис. 4. Графики зависимости точности позиционных измерений от яркости звезд (а) и полигон распределения невязок для опорных и контрольных звезд (б).

но с большим размером изображения звезды; на интервале $6^m - 11^m$ точность определения координат не хуже $2''$. Для трети звезд слабее 11^m ошибка определения координат увеличивается, что связано с малым размером изображения таких звезд и существенными искажениями, возникающими на пикселах матрицы. Флуктуации фона также приводят к ухудшению точности измерений изображений звезд слабее 11^m .

Поэтому при выборе опорных звезд при позиционных измерениях изображений, выполненных на нашем инструменте, следует исключать звезды ярче 6^m и выборочно использовать звезды слабее 11^m .

Для оценки точности наших позиционных измерений следует использовать не опорные звезды, невязки которых характеризуют внутреннюю точность метода Тернера для данной выборки, а применять контрольные звезды. Такой подход позволяет

определить внешнюю точность позиционных измерений. Для того, чтобы получить точность для реального изображения метеора, который фиксируется в определенной части кадра (иногда в углу снимка), мы используем контрольные звезды в этой же области. На рис. 4б представлены полигоны распределений ошибок для выборки опорных и контрольных звезд по 86 снимкам (выборка 1259 звезд). Для опорных звезд ошибки не превышают $2.0''$ и имеют максимум распределения $0.7''-0.8''$. Максимум распределения ошибок для контрольных звезд смещен и составляет более $1.0''$, а диапазон значений увеличивается до $5''$. Таким образом, для каждого телевизионного снимка ошибка измерений вычисляется по контрольным звездам вблизи изображения метеора и дает представление о точности позиционной привязки.

МЕТОДИКА ПОЗИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТЕОРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Метеорные изображения на телевизионных снимках принципиально отличаются от звездных изображений с точки зрения обработки измерений. В отличие от звездного, метеорное изображение является штрихом определенной длины. Точность измерения координат точки на метеорной траектории зависит от блеска метеора, диффузности явления и ширины изображения. Задачу измерения точек изображения метеорной траектории можно разделить на два основных этапа: измерение координат точек траектории и координат концов метеорных штрихов. С меньшей точностью будут измеряться концы метеорных штрихов по причине несимметричности метеорного изображения.

Для позиционных измерений метеорных изображений были использованы три независимые методики, разработанные авторами.

Первая из методик аналогична методике измерений фотографических негативов на измерительном приборе. Оператор при наведении на измеряемую точку использует либо только фотометрические возможности глаза, либо вспомогательные горизонтальные и вертикальные сканы для коррекции установки измерительного маркера. Особенно трудоемки измерения концов метеорных штрихов, на рис. 5а приведен пример таких измерений. Величина ошибки при этом может достигать до 3 пикселей в зависимости от вида изображения (рис. 5б). Особые трудности возникают при измерениях метеорного изображения с «хвостом», в этом случае погрешность измерений увеличивается в 2–3 раза. Такой метод мы используем только как предварительный.

Вторая методика используется в автоматизированном измерительном комплексе, который предполагает следующие процедуры: последова-

тельная загрузка изображений метеора (рис. 6а, стрелкой указано направление полета), определение значений интенсивности фона и затем выделение пикселей метеорного изображения (рис. 6б). И, наконец, заключительный этап – определение точек метеорной траектории (рис. 6в).

Опишем метод получения продольного профиля изображения метеорной траектории. Мы опробовали три альтернативных варианта расчета профилей метеорных изображений: профиль вдоль координаты X (в дальнейшем X -скан); профиль вдоль координаты Y (в дальнейшем Y -скан); профиль вдоль прямой, определяющей направление метеорной траектории (в дальнейшем L -скан, прямая – ось метеорного изображения). Для получения X -скана делим все изображение по X -координате на N секторов шириной dx .

$$N = \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{dx}. \quad (2)$$

В пределах каждого такого сектора вычисляется координата Y путем средневзвешенного Y -координат всех точек изображения, попадающих в заданный интервал по координате X :

$$\langle Y_i \rangle = \frac{\sum (Y_i I_i)}{\sum I_i}. \quad (3)$$

Таким образом, результирующий профиль представляет собой набор точек $(X_i, \langle Y_i \rangle)$. Аналогичным образом определяется Y -скан – $(\langle X_i \rangle, Y_i)$.

Ось метеорного изображения представляет собой среднюю аппроксимационную прямую, которой можно представить траекторию метеора. Она получается путем итерационных приближений. Суть метода заключается в том, что на каждом шаге считается дисперсия для всех участвующих в расчете прямой точек метеорного изображения, которая на следующем шаге используется как критерий отсекаения случайно выпадающих точек. Задавая уровень отсекаения (обычно это 3σ – стандартное отклонение), можно менять степень вклада шума в расчет прямой. Процесс происходит до того момента, пока стандартное отклонение по всему рабочему ряду не станет отличаться от предыдущего на заданный процент (1%, как правило). При расчетах заметно, что окончательная прямая меньше искажена влиянием случайных точек. Изменение коэффициентов прямой в течение итерации имеет вид сходящегося процесса.

Расчет L -профиля происходит вдоль оси изображения метеорной траектории с заданным шагом (dl), что позволяет разбить все изображение вдоль метеорной оси на

$$N = \frac{(L_{\max} - L_{\min})}{dl}, \quad (4)$$

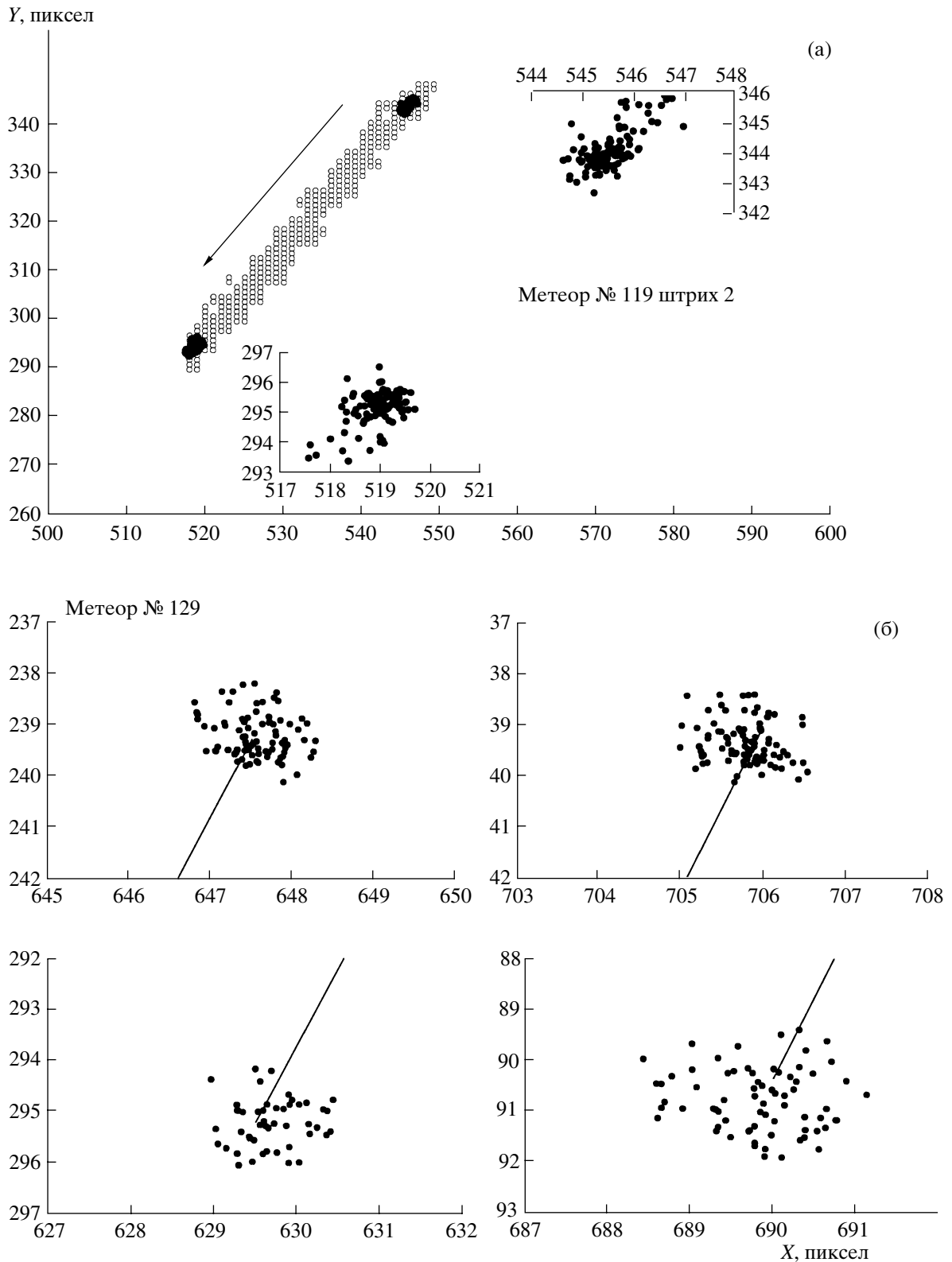


Рис. 5. Точность измерений изображений метеорных штрихов (на осях указаны прямоугольные координаты в системе снимка; стрелками указано направления полета метеорной частицы): (а) – типичный пример ручного измерения концов изображения метеорного штриха; (б) – примеры ручных измерений концов изображений различных метеорных штрихов одного метеора.

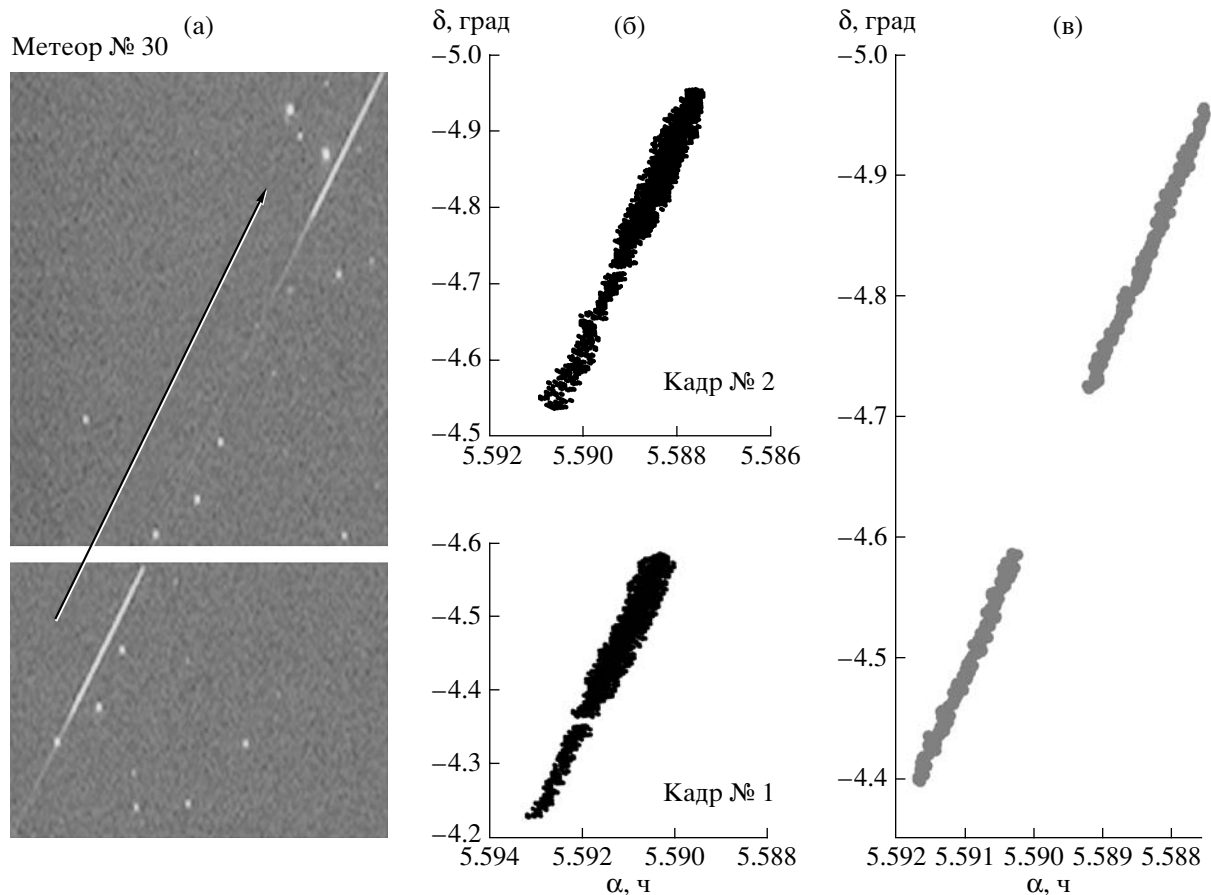


Рис. 6. Основные этапы обработки метеорного изображения: (а) – изображения метеорных штрихов метеора № 30 (стрелкой указано направление полета метеорной частицы); (б) – этап выделения пикселей метеорного изображения и вычисление их экваториальных координат; (в) – определение точек метеорной траектории.

секторов шириной dI . В пределах каждого такого сектора находится координата D_i как средневзвешенное D -расстояний всех точек от оси изображения метеорной траектории, попадающих в заданный интервал по координате D :

$$\langle D_i \rangle = \frac{\sum (D_i I_i)}{\sum I_i}. \quad (5)$$

Таким образом, результирующий профиль представляет собой набор точек $(L_i, \langle D_i \rangle)$, которые путем перевода из системы координат оси метеорного изображения можно превратить в пару координат системы снимка (X_i, Y_i) .

По измеренным прямоугольным координатам точек метеорной траектории методом Тернера вычисляются соответствующие сферические координаты.

На рис. 6в представлены результаты обработки метеорного изображения по описанной методике.

В третьей методике (программное обеспечение *PicScan 1.03*) были опробованы два подхода для определения точек изображения, принадле-

жащих метеорному штриху. Первый основан на том, что мы определяем фоновые значения, используя интенсивность пикселей изображения до пролета метеора, а затем все точки, которые имеют большую интенсивность, считаем принадлежащими метеорному изображению. Как правило, при фотометрии звездных изображений для выбора фоновых значений используют участок вблизи звезды. Специфика метеорной фотометрии заключается в том, что всегда есть возможность, используя карты фона, определить фоновые значения в тех пикселях, в которых зафиксировано изображение метеора.

Такая методика позволяет однозначно выделять изображение ярких метеоров, но для слабых объектов проявляется «клочковатость» штриха, и выделенное изображение зависит от локальных колебаний фона снимка. Избежать таких проблем позволяет альтернативный подход, который основан на том, что предварительно требуется перейти к системе координат, связанной с продольной осью изображения метеорного штриха (рис. 7а).

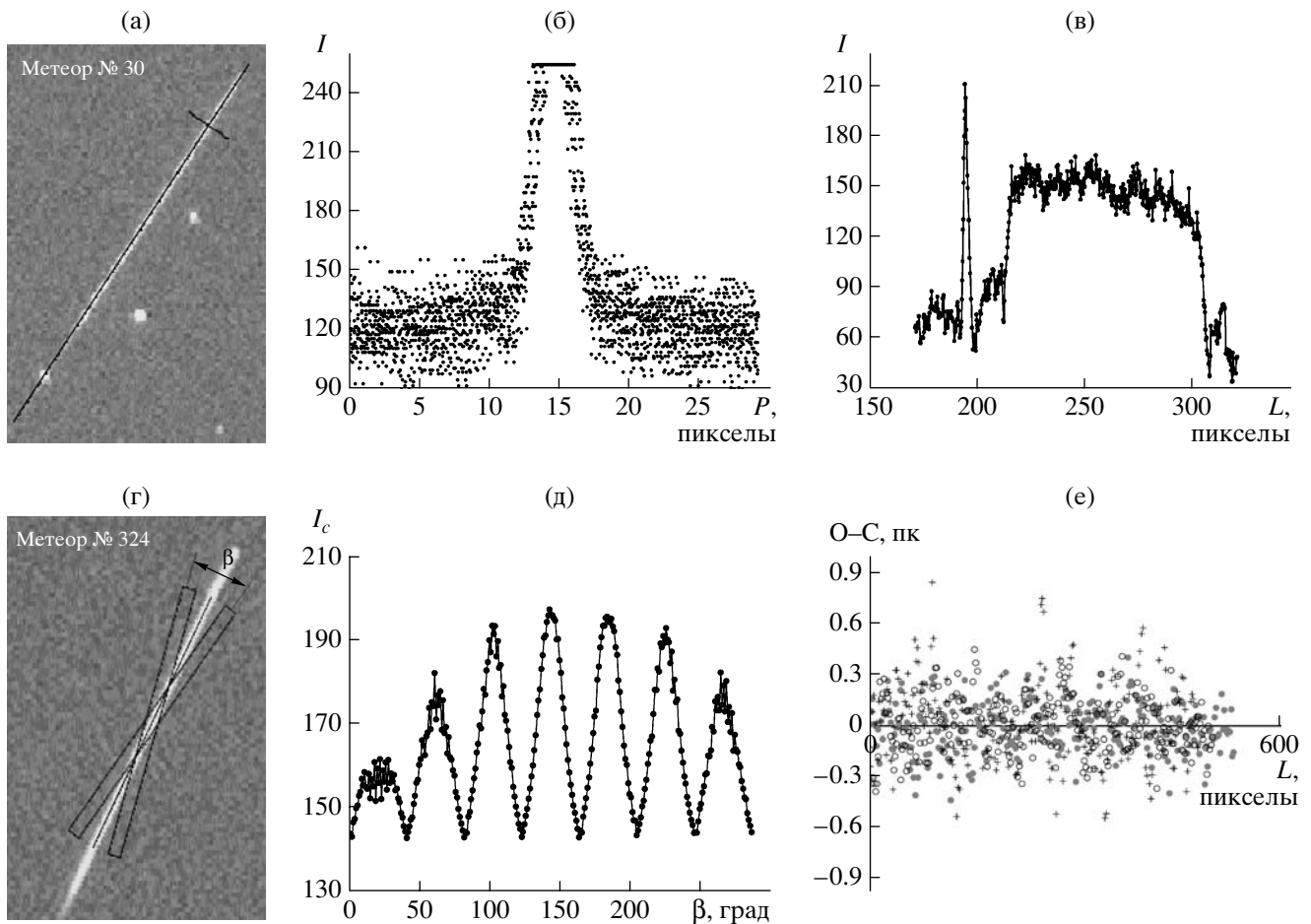


Рис. 7. Методика измерений метеорных изображений: (а) – ручное проведение продольной оси метеорного изображения и рабочей области (первое приближение); (б) – вычисление интегрального поперечного скана; (в) – вычисление продольного скана. Выброс в виде пика в левой части скана принадлежит изображению звезды (см. рис. 7а); (г) – процесс определения продольной оси в полуавтоматическом режиме. Переход в систему координат, связанную с продольной осью; (д) – зависимость среднего значения интенсивности (I_c) в рабочем окне от угла поворота (β) рабочей области относительно продольной оси и дискретных смещений данного окна в направлении, перпендикулярном продольной оси. Максимум соответствует большему числу пикселей в рабочей области, принадлежащих метеорному изображению; (е) – отклонение многократно измеренных точек от оси.

Для того, чтобы определить положение продольной оси метеорного изображения, в нулевом приближении мы задаем положение и рабочую область вручную. Затем проводится вычисление интегрального поперечного скана в заданной рабочей области (рис. 7б). Под интегральным поперечным сканом подразумевается массив точек метеорного изображения, спроектированных на перпендикулярную к траектории ось. Чтобы уточнить положение продольной оси, нам нужно провести дополнительную фотометрию рабочей области. Для этого по интегральному поперечному скану мы задаем границы области по координате, перпендикулярной продольной оси.

Будем считать все точки в пределах рабочей области принадлежащими метеорному изображению и околосметеорному фону. Такая методика позволяет выделять изображения как ярких, так и

наиболее слабых метеоров. Затем уточненная продольная ось вычисляется по рабочей области по методике средневзвешенных фотометрических центров, аналогично формуле (1). Влияние на положение оси фоновых значений в рабочей области такая методика сводит к минимуму.

Кроме возможности строить поперечные сканы метеорного изображения, по такой методике есть возможность построения продольных сканов (рис. 7в), что позволяет измерить прямоугольные координаты концов метеорных штрихов. Большой процент метеоров имеет “хвосты”, а у ярких метеоров и “голова” имеет сложную структуру, что влечет за собой неопределенность в измерениях. Анализ уровня яркости сигнала для продольных сканов позволяет преодолеть неоднозначность в измерениях прямоугольных координат концов изображений метеорных штрихов и “хвостов”. Если изображение

метеора попадает на изображение звезды (рис. 7в), искажение координат продольной оси будут максимальными и поэтому рабочую область выбирают таким образом, чтобы изображения звезд в рабочую область не попадали.

Процесс определения продольной оси изображения метеорного штриха можно выполнять и в полуавтоматическом режиме. При обработке на изображении метеорного штриха в нулевом приближении задается предварительная ось и ширина рабочего окна. Для удобства расчетов перейдем в систему координат продольной оси (P, β). Затем в рабочей области перпендикулярно оси с некоторым шагом ΔP осуществляется дискретное перемещение. Для каждой такой точки P_i рабочее окно делает поворот (относительно данной точки) в некотором заданном секторе с угловым шагом $\Delta \beta$ (рис. 7г). Для каждой точки P_i вычисляется среднее значение интенсивности I_c всех пикселей, попавших в рабочее окно, и получаем зависимость I_c от угла поворота β (рис. 7д). Зависимость имеет максимум в том случае, когда в рабочее окно попадает большее число пикселей, принадлежащих изображению метеора. Существует такое значение P_i , когда метеорное изображение целиком попадает в рабочее окно и пара значений (P_i, β_{\max}) будет соответствовать искомым значениям.

По этим значениям вычисляются параметры оси, которые будут первым приближением. Затем, используя новую ось, осуществляем перемещение с некоторым шагом вдоль оси и для каждой такой точки вычисляем по формулам (1) фотометрический центр заданной окрестности метеорного изображения. Полученный массив измерений изображения метеорного штриха используется для вычисления параметров оси изображения для второго приближения. Второго приближения достаточно для определения оси со среднеквадратичным отклонением измеренных точек от оси порядка 0.1 пиксела. Но эта величина является внутренней ошибкой метода, и для того, чтобы определить реальную ошибку измерений, следует многократно промерить изображение метеорного штриха с различными вариациями размеров рабочего окна, величин ΔP и $\Delta \beta$.

Кроме методики сканирования в программном обеспечении *PicScan 1.03* разработана независимая методика корректировки положения измерительного окна и вычисления положения продольной оси метеорного изображения. Основное измерительное окно включает в себя два дополнительных, в каждом из которых определяется поперечный скан изображения метеорной траектории на краях штриха. Измеритель, оперируя величиной дополнительных окон, смещением и поворотом оси изображения, добивается совпадения максимумов поперечных сканов метеорного

штриха. Измерения изображений метеорных траекторий с использованием двух независимых методов отличаются на величину менее 0.2 пиксела.

Если вблизи изображения метеорного штриха присутствует “горячий пиксел” или изображение звезды (рис. 7а и рис. 7в), тогда из массива измерений исключаются близлежащие точки, так как такие изображения искажают фотометрическую информацию о метеорном штрихе.

Многочисленные тестовые измерения показали, что для наших снимков среднеквадратичное отклонение измеренных точек от оси возрастает до 0.2 пиксела (рис. 7е) и соответствует точности, с которой определяются прямоугольные координаты звездных изображений (рис. 3).

Величина ошибки угла наклона оси метеорного изображения для ярких длинных метеоров составляет 0.5° , а для слабых, едва различимых метеоров достигает значения 1.5° .

Точность измерений зависит от длины метеорного штриха на снимке, и поэтому многокадровые изображения подвергаются процедуре комбинирования единичных снимков. Программное обеспечение *Combo 1.02* создает на основе N кадров один комбинированный снимок, состоящий из фрагментов с изображениями метеора в единой системе координат, которые выбираются либо визуальным оператором, либо путем полуавтоматического анализа профилей метеорных изображений на единичных кадрах. Таким образом, получается изображение единой метеорной траектории, которое и подвергается обработке.

Все описанные методики при измерениях метеорных штрихов используются в зависимости от яркости метеора и качества изображения. Для каждого снимка определяется индивидуальная ошибка измерений.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПОЛЮСОВ БОЛЬШИХ КРУГОВ МЕТЕОРНЫХ ТРАЕКТОРИЙ

После обработки метеорного изображения, используя вычисленные экваториальные координаты отдельных точек на траектории, получаем координаты полюса большого круга метеорной траектории. При вычислении точности определения сферических координат полюса большого круга метеорной траектории будем придерживаться точки зрения (Катасев, 1966), согласно которой ошибка σ_p определяется следующим выражением

$$\sigma_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sigma_m}{\sin \gamma}, \quad (6)$$

где γ – угловая длина метеорного изображения, $\sigma_m = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_I^2}$ – ошибка измерений координат то-

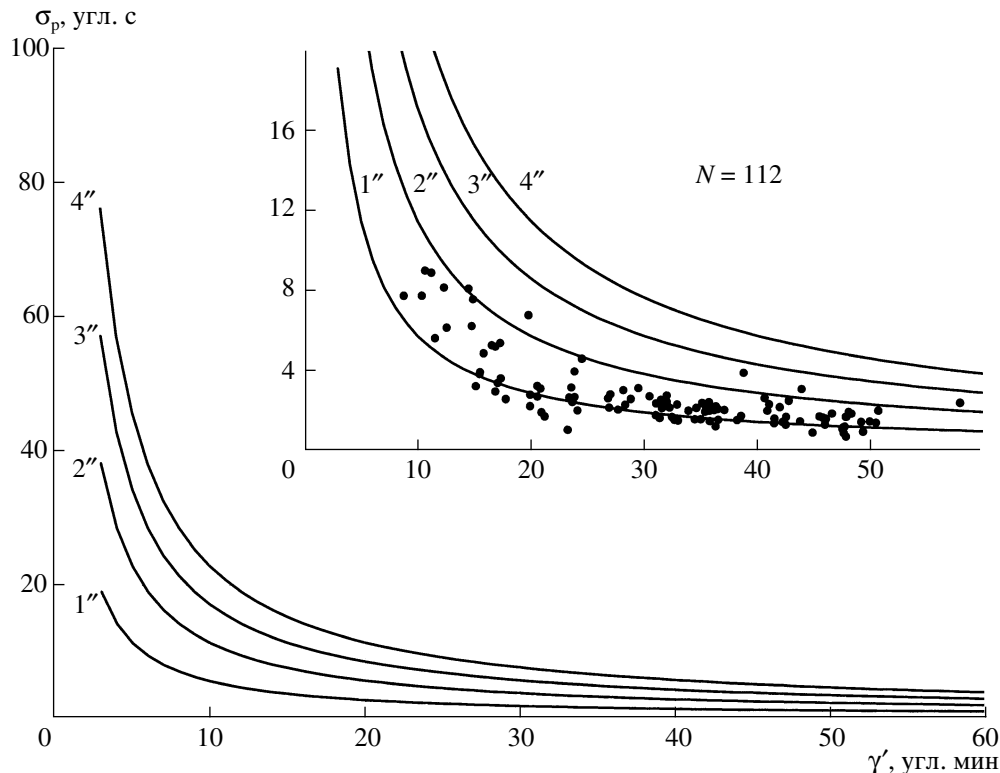


Рис. 8. Точность определения полюсов метеорных траекторий (σ) в зависимости от длины дуги (γ) и ошибок измерений (числа возле теоретических линий графика, рассчитанных по формуле (6)). Точками на врезке показаны реальные значения точности определения полюсов метеорных траекторий для случайно выбранных 112 метеоров.

чек изображения метеорной траектории. Ошибка измерений в нашем случае определяется, во-первых, точностью измерений методом Тернера звездных изображений σ_T , во-вторых, точностью измерения изображения метеорной траектории σ_i .

На рис. 8 представлены зависимости величины ошибки определения координат полюса большого круга метеорной траектории от угловой длины ее наблюдаемого фрагмента (обе величины в угловых минутах). Каждая зависимость просчитана для определенной величины σ_m , величина которой в дуговых секундах представлена возле соответствующей кривой. Как видно из рис. 8, основным фактором, влияющим на точность определения координат полюса, является величина длины метеорной траектории. Для коротких траекторий (меньше $10'$) точность определения составляет более $20'$ при точности измерений траектории в $4''$. Метеорные изображения, которые на телевизионных снимках зафиксированы в углах кадров и поэтому имеют малые угловые длины, для целей определения координат полюсов мало пригодны.

Каждая из этих компонент σ_T и σ_i ошибки может варьировать в некотором диапазоне и формировать ошибку для измерений каждого метеорного изображения. На врезке рис. 8, кроме теоретических кривых, при фиксированных значениях σ_m ,

приведены точки, вычисленные для реальных метеорных изображений по выборке из 112 метеоров. Этот рисунок дает представление о распределении ошибок измерений σ_m , вычисленные значения которых лежат в пределах $1''$ – $3''$, а в некоторых удачных случаях могут принимать значения меньше $1''$. Как видно на врезке рис. 8, если использовать для вычислений координат полюсов измерения изображений метеорных траекторий длиной не менее $15'$, то для наблюдаемых метеоров ошибка определения координат полюса σ_p изображений, даже для плохо измеряемых изображений с ошибкой в $4''$, погрешность определения координат полюса составит менее $10'$. Для уверенно измеряемых изображений величина ошибки определения точки метеорной траектории составляет $1''$ – $2''$. Если изображение метеорной траектории зафиксировано по диагонали снимка (длина траектории в этом случае будет достигать $60'$), тогда ошибка определения координат полюса составит около $3'$, что является пределом для нашего метеорного патруля. При наблюдениях в зависимости от угловой скорости метеора и ориентации траектории в кадре метеорное изображение может иметь от 1 до 12 штрихов (рис. 9). Возможен случай и стационарного метеора, тогда все метеорное изображение попадает в кадр, например, метеор № 643 при длине в $20'$ имеет 27 штрихов. Но стационарные метеоры достаточно редко фиксируются (менее 1% всего на-

блюдательного материала), и распределение на рис. 9 является типичным для подавляющего числа наблюдаемых метеоров.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КООРДИНАТ РАДИАНТОВ МЕТЕОРОВ МЕТОДОМ СТАНЮКОВИЧА

Вычисление сферических координат радиантов обычно предполагает существование снимков метеорных изображений, полученных на двух базисных наблюдательных станциях, и удачное расположение базиса относительно траектории метеора. Удачной конфигурацией считается случай, когда угол сближения двух траекторий является наибольшим, потому что при уменьшении угла падает точность определения координат радианта. Более трудной задачей является определение координат радианта по небазисным наблюдениям. Одним из первых исследователей, который разработал методику таких определений, был Станюкович (1939). Одним из условий метода было требование фотографирования с использованием обтюратора (вращающегося сектора), в этом случае изображение метеора получалось с рядом перерывов, и таких перерывов на снимке должно быть не менее трех. Метод базируется на простых соотношениях:

$$\frac{L_m}{L_n} = \frac{\sin \psi_{1n} \sin \psi_{2n} \sin \lambda_m}{\sin \psi_{1m} \sin \psi_{2m} \sin \lambda_n}, \quad (7)$$

где L_i – длина любого отрезка метеорной траектории, буквенный индекс указывает на номер отрезка пути метеора, а числовой – его начало или конец, λ_i – угловая длина отрезка, а $\psi_{1,2i}$ – угловое расстояние от радианта. В случае равномерно вращающегося сектора обтюратора будет соблюдаться следующее равенство:

$$\frac{L_m}{L_n} = \frac{v_m}{v_n}, \quad (8)$$

где v_i – линейная скорость движения на участке i . Если бы у метеорной частицы не было торможения, то задача определения координат радианта решалась бы элементарно просто. Но пренебрегать торможением нельзя, и для этого в работе (Станюкович, 1939) излагается методика вычислений координат радианта и торможения с использованием интерполяционных кривых и итераций. В качестве примера приведено определение радианта и относительных скоростей метеора этим методом и проведено сравнение с результатами обработки корреспондирующих наблюдений этого же метеора. Разница по склонению для двух методов обработки составляет 24". Распространения приведенный метод в свое время не получил, по-видимому, из-за сложности для своего времени процедуры вычислений, технических требований к стабильности вращения обтюратора и необходимости применения

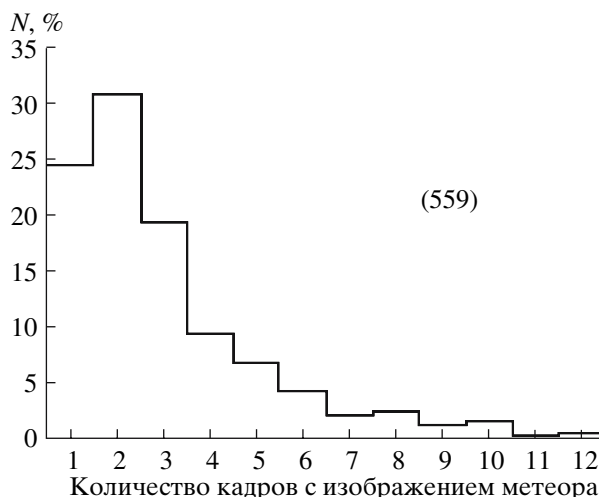


Рис. 9. Гистограмма распределения количества метеорных штрихов, фиксируемых в одном фильме.

длиннофокусных патрульных камер для повышения пространственного разрешения.

В нашем же случае метод Станюковича обретает актуальность и может быть использован наряду с другими методами определения координат радиантов. Фокусное расстояние нашего телескопа 534 мм, и точность определения начала или конца штриха метеора составляет порядка 2". Как показано в работе (Горбанев и др., 2006), точность смены кадров патрульной телевизионной системы не хуже 0.1 мс и точность временных засечек ухудшается только за счет существования у метеора “хвостов”. И наконец, современные вычислительные возможности позволяют легко проводить любые расчеты, не прибегая к упрощениям. Количество наблюдательного материала, пригодного для обработки, т.е. случай, когда зафиксировано 3 и более полных штриха, составляет 35% от общего объема (рис. 9).

Используя главную идею метода, мы создали программное обеспечение *FROSA 1.0*, которое позволяет определять прямое восхождение и склонение метеорного радианта. Этапы вычислений следующие: проводится отбор метеоров, у которых фиксируются три или больше полных штриха, т.е. у штрихов можно измерить координаты начала и конца. По этим прямоугольным координатам методом Тернера определяем соответствующие сферические координаты начала и конца каждого штриха метеорного изображения. В качестве рабочего уравнения воспользуемся соотношением для прямого восхождения

$$\frac{\sin(\alpha_R - \alpha_{1n}) \sin(\alpha_R - \alpha_{2n})}{\sin(\alpha_R - \alpha_{1m}) \sin(\alpha_R - \alpha_{2m})} = \frac{v_m \sin(\alpha_{1n} - \alpha_{2n})}{v_n \sin(\alpha_{1m} - \alpha_{2m})}, \quad (9)$$

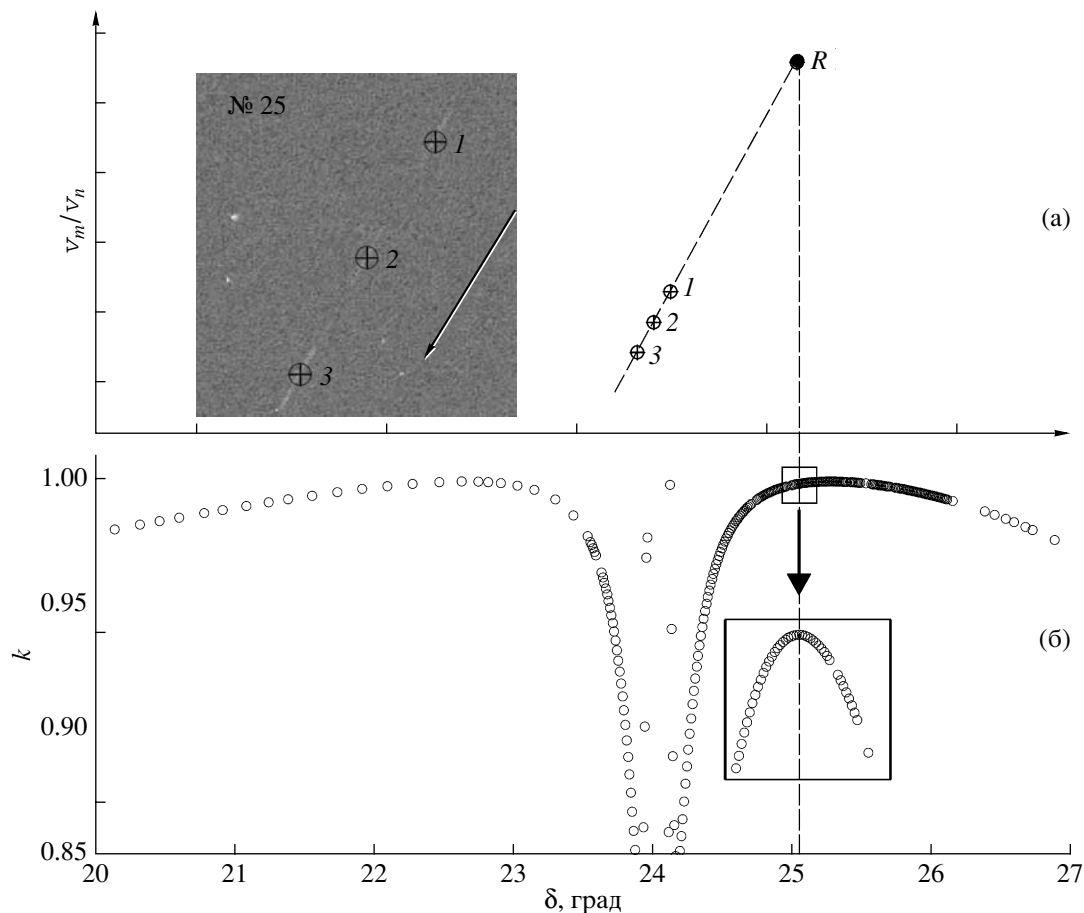


Рис. 10. Методика определения экваториальных координат точки метеорного радианта по методу Станюковича. На врезке показано скомбинированное изображение штрихов метеора № 25. Номерами на изображении и графике (а) обозначены середины штрихов. Стрелкой на врезке отмечено направление полета метеорной частицы. Точка радианта R имеет такое значение склонения δ (в данном примере порядка 25°), когда для определенного значения v_m/v_n и δ достигается максимальный коэффициент корреляции k левой и правой частями уравнения (10). Поиск прямого восхождения радианта проводится аналогично по формуле (9).

и аналогично для склонения

$$\frac{\sin(\delta_R - \delta_{1n}) \sin(\delta_R - \delta_{2n})}{\sin(\delta_R - \delta_{1m}) \sin(\delta_R - \delta_{2m})} = \frac{v_m \sin(\delta_{1n} - \delta_{2n})}{v_n \sin(\delta_{1m} - \delta_{2m})}, \quad (10)$$

где α_R и δ_R – прямое восхождение и склонение радианта; α_{ni} и δ_{ni} – прямое восхождение и склонение начала ($n = 1$) или конца ($n = 2$) метеорного штриха; v_i – линейная скорость движения метеорной частицы на участке i .

Скомбинированные из единичных снимков изображения метеоров называют в метеорной астрономии велограммами. На врезке рис. 10а представлен фрагмент такой велограммы для изображения зафиксированного метеорного явления с указанием стрелкой направления полета и средних точек пронумерованных штрихов. На рис. 10а в ка-

честве примера представлена зависимость величины v_m/v_n от склонения δ для средних точек изображения трехштрихового метеора № 25 (где символом R отмечена точка радианта метеора). Используя уравнение (10) и изменяя значение величины δ_R в окрестности метеорного изображения, вычисляем соответствующие отношения v_m/v_n . Для наглядности изобразим на рис. 10а точки $(v_m/v_n, \delta)$ для координат середин метеорных штрихов и координаты одной из точек вычисляемого радианта R . Искомая точка и точки середин метеорных штрихов должны лежать на одной прямой, и для каждой координаты δ можно вычислить коэффициент корреляции k для этих точек, максимальное значение которого соответствует наилучшему варианту. На рис. 10б представлена зависимость вычисленного коэффициента корреляции k от склонения δ_R радианта. Наличие двух максимумов у этой зависимости объясняется существованием двух решений для уравнения (9) или (10), поэтому при выборе координаты радианта следует учитывать направление по-

лета метеора. На врезке рис. 10б более подробно представлен максимум зависимости $k(\delta_R)$, соответствующий искомому значению координаты радианта. Итерационный процесс оптимально проводить с переменным шагом по координате δ_R , по мере приближения к максимуму.

Координаты точки радианта и точек метеорной траектории должны лежать на небесной сфере на дуге большого круга, уравнение которого записывается в виде:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_1 \sin(\alpha_R - \alpha_2) - \operatorname{tg} \delta_2 \sin(\alpha_R - \alpha_1) = \\ = \operatorname{tg} \delta_R \sin(\alpha_1 - \alpha_2), \end{aligned} \quad (11)$$

где α_i и δ_i точки метеорной траектории.

Определив значение склонения радианта, используя уравнение (11), вычисляем соответствующее значение прямого восхождения.

Аналогично, используя уравнение (9), определяем прямое восхождение, а затем вычисляем склонение с помощью уравнения (11).

Возникает вопрос, какой вариант следует использовать для измеряемого метеора? Выбор уравнения (9) или (10) будет зависеть от ориентации метеорной траектории на небесной сфере. Если перемещение (в угловых единицах) по прямому восхождению больше, чем по склонению, тогда предпочтение следует отдать вычислению прямого восхождения. В таком случае приращение угловой длины метеорных штрихов, вычисляемые в методе Станюковича, будут определяться более уверенно.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ КООРДИНАТ РАДИАНТОВ МЕТЕОРОВ МЕТОДОМ СТАНЮКОВИЧА

Ошибка определения координат радианта зависит от ошибки измерений начала и конца метеорного штриха σ_h . Существенно влияет на точность измерений наличие у некоторых метеорных изображений “хвостов”, так как их яркость и длина больше отражают физические процессы, чем кинематические. Поэтому наиболее удобными для измерений являются изображения метеорных штрихов с четкими и яркими краями. Точность измерений головной части метеорного штриха, с точки зрения надежности, является более высокой, чем “хвостовой” части. Поэтому, если метеорное явление зафиксировано в виде шести и более штриховых изображений, но с наличием “хвоста”, то для повышения точности лучше использовать только начало штриха.

В связи с тем, что для каждого штриха точность измерения существенно различается, возникает сложность в определении величины ошибки для координат точки радианта. Поэтому для вычисления ошибки определения координат радиан-

та методом Станюковича использовалась следующая методика. Для каждой точки начала или конца метеорного штриха использовалась индивидуальная величина ошибки измерений, полученная по выборке из 30 измерений. Каждая серия измерений применялась для вычислений координат радианта методом Станюковича, таким образом мы получили 30 определений координат радианта. Кроме этого были просчитаны два варианта вычислений для проверки утверждений о выборе уравнения (9) или (10) для индивидуального метеора. Для этого, используя уравнение (9), определим прямое восхождение, значение которого подставляем в уравнение (11) для вычисления соответствующего склонения. Аналогично из уравнения (10) и (11) получаем вторую пару координат радианта.

На рис. 11 представлены результаты обработки методом Станюковича метеорной велограммы метеора № 35. На рис. 11а представлена сама велограмма, а на рис. 11б представлен участок небесной сферы с точками, принадлежащими метеорной траектории, и точка вычисленного радианта (стрелкой указано направление полета метеора). Результаты расчетов для двух вариантов представлены на рис. 11в (вариант вычислений склонения по уравнению (10)) и рис. 11г (вариант вычислений прямого восхождения по уравнению (9)). Как видно из рис. 11в, г, первый вариант (вычисления с использованием уравнения для склонения) дает ошибки в два раза меньше. Действительно, для метеора № 35 за 0,3 с полета угловое смещение по склонению составляет около $26'$, а для прямого восхождения около $17'$, т.е. для большего смещения меньше величина ошибки метода. Это подтверждает утверждение о том, что для метода Станюковича следует использовать при вычислениях экваториальную координату, для которой больше приращение метеорных штрихов.

Ошибка определения координат радианта методом Станюковича σ_s зависит от ошибки определения полюса большого круга метеора σ_p и ошибки измерения координат концов штрихов метеора σ_h . Для прямого восхождения и склонения ошибки находим по формулам:

$$\sigma_s(\alpha) = \sqrt{\sigma_p^2(\alpha) + \sigma_h^2(\alpha)}, \quad (12)$$

$$\sigma_s(\delta) = \sqrt{\sigma_p^2(\delta) + \sigma_h^2(\delta)}. \quad (13)$$

Методика определения σ_p была описана выше.

Вычисленные координаты точки видимого радианта метеора № 35 составляют по прямому восхождению $57^\circ 3' \pm 2'$ и по склонению $+22^\circ 54' \pm 3'$. Следует указать, что вычисленные величины являются экваториальными координатами видимого радианта, отнесенными к моменту наблюдений, с координатами эпохи используемого звездного катало-

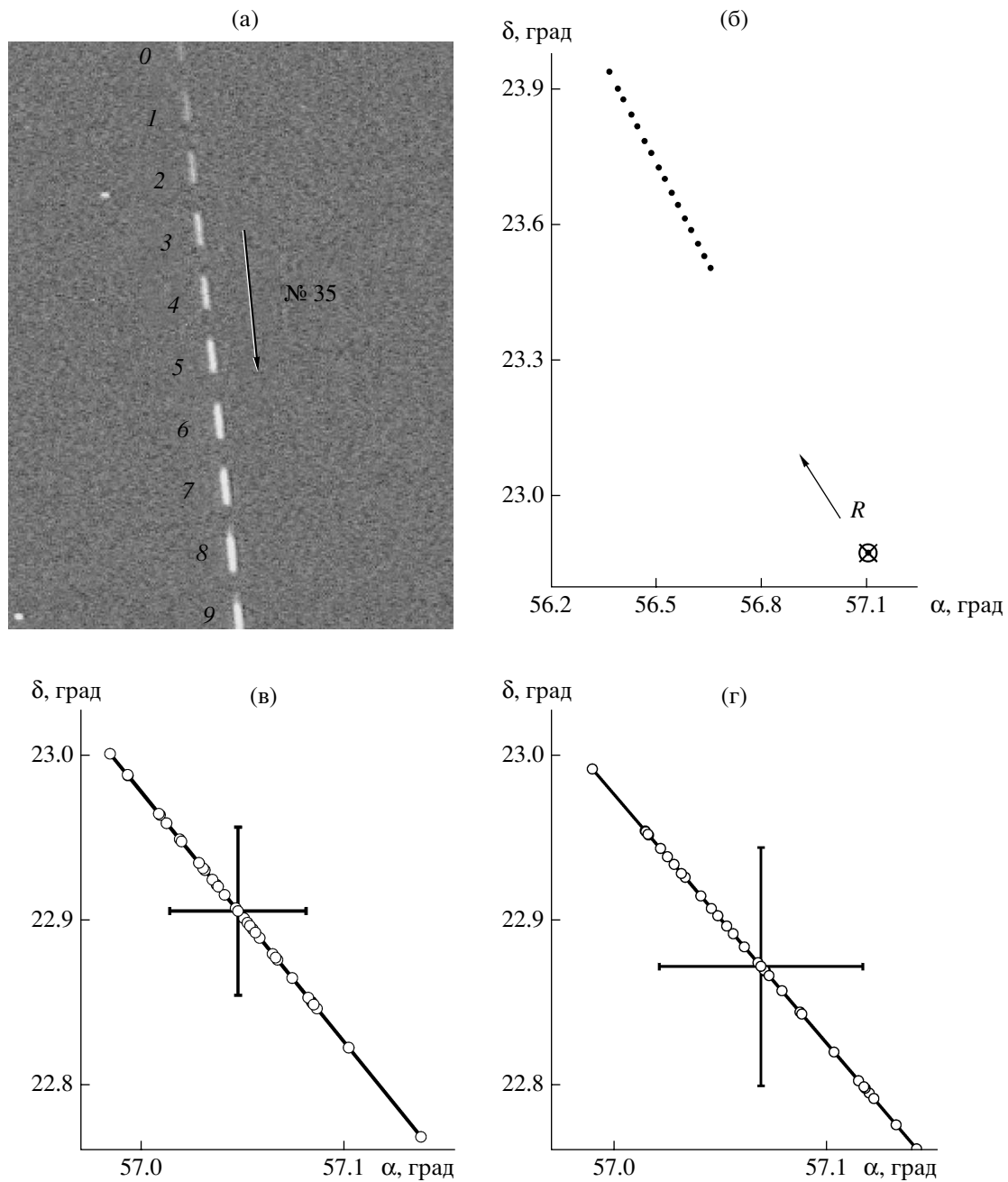


Рис. 11. Точность определения экваториальных координат точки метеорного радианта по методу Станюковича: (а) – метеорная велограмма; (б) – участок небесной сферы с точками метеора и точкой вычисленного радианта; (в) и (г) – к вычислению ошибки точек метеорного радианта односторонним методом (см. текст статьи).

га Tucho-2. По времени пролета и вычисленному положению видимого радианта метеор № 35 можно отнести к потоку Северные Тауриды (58° , $+22^\circ$, время действия с 1 октября по 25 ноября).

Несомненно, базисные наблюдения дают более надежную информацию по кинематическим характеристикам метеоров. В настоящее время такие базисные наблюдения нами проводятся, что будет описано в следующих статьях. Но следует отметить, что в практике базисных метеор-

ных наблюдений фиксируется большой процент небазисных метеоров, которые могут быть обработаны по изложенной выше методике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Патрулирование метеоров телескопическим методом с использованием в качестве регистратора панорамного телевизионного приемника наряду с возможностью фиксировать изображения сла-

рых метеоров с временным разрешением 0.02 или 0.04 с позволяет получать позиционные определения с недостижимой ранее точностью. Для изображений звездообразных объектов величина ошибки позиционных определений составляет около 1", для метеорного протяженного изображения эта величина может принимать значение 1" для ярких и 4" для слабых метеоров. Экваториальные координаты полюсов больших кругов метеорных траекторий могут определяться с ошибкой не хуже 4' для метеорных траекторий длиной не менее 15'. Применение метода Станюковича позволяет получать экваториальные координаты точки радианта с точностью не хуже 4'–5'. Повышение точности измерений на порядок по сравнению с короткофокусными фотографическими наблюдениями метеоров, а также временное разрешение явлений позволяют вернуться к решению задач метеорной астрономии, решение которых не было возможно ранее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горбанев Ю.М., Голубаев А.В., Жуков В.В. и др. Методика и статистика телевизионных наблюдений телескопических метеоров // *Астрон. вестн.* 2006. Т. 40. № 5. С. 449–464.
- Камасев Л.А. Исследование метеоров в атмосфере Земли фотографическим методом. Л.: Гидрометеорологическое изд., 1966. 334 с.
- Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н. Радиолокационные исследования метеорных явлений. Изд-во АН СССР, 1961. 124 с.
- Козак П.Н. Анализ методов и точность экваториальных координат при цифровой обработке телевизионных наблюдений метеоров // *Кинемат. и физ. небес. тел.* 2002. Т. 18. № 5. С. 471–480.
- Крамер Е.Н., Шестака И.С. Фотографические методы метеорной астрономии. Киев, 1989. 97 с.
- Мартыненко В.В., Вагнер Л.Я., Кремнева Н.М. и др. Структура радиантов и активность Персеид в 1971 г. // *Астрон. вестн.* 1978. Т. 12. № 4. С. 235–243.
- Михайлов А.А. Курс общей астрофизики и звездной астрономии. М., 1967. 586 с.
- Симакина Е.Г. О гиперболических орбитах метеоров // *Астрон. вестн.* 1968. Т. 2. № 3. С. 153–157.
- Станюкович К.П. Определение радиантов, скоростей и высот метеоров по односторонним фотографиям // *Бюлл. Всесоюзного астрономо-геодезического общества.* 1939. № 4. С. 3–10.
- Behrend R., Buil Ch., Antonini P., Demeautis Ch. GSC 628 290: A new EW/KW variable // *Inform. Bull. Var. Stars.* 2002. № 5219. P. 1.
- Gehrels T., Marsden B.G., McMillan R.S. Astrometry with a scanning CCD // *Astron. J.* 1986. V. 91. № 5. P. 1242–1243.
- Nunez J., Codina J.M., Torras N. Study of the astrometric accuracy of photographic plates obtained with standard astrophotographs // *Astron. J.* 1992. V. 103. № 5. P. 1687–1688.

Techniques for Positional Measurements of Telescopic Meteor TV Images

Yu. M. Gorbanev*, A. V. Golubaev, V. V. Zhukov, I. I. Kimakovskaya, S. R. Kimakovsky, E. F. Knyazkova, S. V. Podlesnyak, L. A. Sarest, I. A. Stogneeveva, and V. A. Shestopalov

Astronomical Institute, Odessa National University, Odessa, Ukraine

Abstract—We present the results of our positional reduction of the observational material obtained using a meteor patrol based on a Schmidt telescope and a TV CCD detector. More than 1000 telescopic meteors were recorded in three years of meteor patrolling. Techniques for the cataloging and positional reduction of 3050 TV images with meteor trails are described. We have developed a technique for measuring the images of reference stars to determine the rectangular coordinates in the image frame. We discuss the achieved accuracy of determining the equatorial coordinates of reference and check stars by Turner's method (of the order of a few arcseconds). We have developed software that allows the rectangular coordinates of meteor trajectory points to be determined after the meteor image reduction. These coordinates are used to determine the equatorial coordinates of the poles of the great circles of meteor trajectories (the angular length is not less than 15' with an accuracy of at least 4'). We consider the possibility of using Stanyukovich's method to determine the equatorial coordinates of radiant for non-basis meteor observations. The accuracy of determining the radiant coordinates has been estimated to be 4'–5'. Prospects for obtaining the kinematic characteristics of meteor particles are discussed.