

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ МЕТЕОРОВ В ХАРЬКОВЕ НА ШЕСТИ УРОВНЯХ РЕГИСТРАЦИИ

*Б. Л. Кащеев, Ю. И. Волощук, Б. С. Дудник,
Н. В. Новоселова, А. А. Ткачук*

Нахождение падающего потока мелких метеорных тел и распределения их в пространстве в настоящее время имеет большое значение для решения ряда научных и прикладных вопросов. Накопленный харьковским коллективом опыт по разработке радиолокационной аппаратуры для изучения метеоров и верхней атмосферы Земли был использован в 1965—1967 гг. при создании нового комплекса высокочувствительной аппаратуры для наблюдения метеоров в двух режимах — «радиант» и «численность».

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСА АППАРАТУРЫ В РЕЖИМЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ МЕТЕОРОВ И МЕТОДИКА ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Техническое описание комплекса радиолокационной аппаратуры опубликовано ранее в ряде работ [1, 2 и др.]. Основные технические данные аппаратуры при выполнении настоящей работы были следующие: несущая частота — 22,4 Мгц; частота повторения — 300 имп/сек; мощность в импульсе — 1 Вт; к. н. д. приемной антенны — 260; к. н. д. передающей антенны — 244.

Минимальная принимаемая мощность различна для каждого уровня чувствительности приемника.

Наблюдения метеоров выполнялись на отдельных приемной и передающей антеннах, каждая из которых состоит из 20 диполей, помещенных в уголкового отражателя [3]. Обе антенны направлены на восток под углом 45° к горизонту. Ширина диаграммы направленности по половинной мощности составляет в горизонтальной плоскости около 5°, в вертикальной — 30°. Уровень боковых лепестков не превышает по мощности 4% по сравнению с мощностью в максимуме излучения. Это дает около 7% регистрации метеоров вне главного лепестка (оценка выполнена с помощью азимутмера, при покадровой регистрации метеоров).

Отражения от метеоров фиксировались на киноплёнке с непрерывной протяжкой, одновременно записывались амплитуды принятых отражений.

В течение всего периода наблюдений численность метеоров измерялась на шести различных уровнях чувствительности приемного устройства. Чувствительность переключалась в приемнике автоматически через каждые 6 мин. Минимальная регистрируемая амплитуда метеоров на

каждом уровне определялась из сравнения на киноплёнке впечатанных стандартных сигналов от Г4-7 с метеорными отражениями. Импульсно-модулированный сигнал от Г4-7 подавался на вход приемника через делитель с известным коэффициентом деления. Для уменьшения погрешности прибора Г4-7 выходное напряжение генератора измерялось с помощью селективного микровольтметра, погрешность которого не превышает 10%.

Для каждого уровня регистрации строились амплитудные калибровочные кривые по впечатанным стандартным сигналам. Эти кривые использовались в дальнейшем при построении графика распределения амплитуд. Поскольку динамический диапазон приемника составлял примерно 20 дБ, а соседние уровни чувствительности приемника при регистрации численности метеоров отличались приблизительно на 6 дБ, то метеорные отражения с одинаковыми амплитудами могли часто фиксироваться на двух-трех уровнях; это давало дополнительный критерий правильности калибровки при построении общего графика распределения амплитуд.

Выбор «большой» длины волны при проектировании комплекса объяснялся желанием получить как можно большую чувствительность к слабым метеорам. При этом учитывалось большое влияние начального радиуса на замечаемость метеоров при малых длинах волн. С этой же целью была разработана система, излучающая большую мощность. Увеличение длины волны и излучаемой мощности привело к заметному увеличению различного рода помех (типа ВНЗ, отражений от неоднородностей ионизации ионосферы и др.). Кроме того, работа в диапазоне 22—23 МГц сопровождается большим числом помех от вещательных станций. По этой причине круглосуточные измерения численности метеоров можно было проводить в большинстве случаев только при чувствительности аппаратуры 45 мкВ (иногда при меньшей). В ночное время измерения велись еще при чувствительности 8, 10 и 20 мкВ. Каждый месяц проводились два-три цикла измерений по двое-трое суток каждый. Большое внимание уделялось контролю постоянства излучаемой мощности и чувствительности приемного устройства.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ХАРЬКОВСКОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

Известно, что минимальная мощность сигнала, отраженного от насыщенного метеорного следа, определяется выражением

$$P_{\text{пр}} = \frac{P G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \lambda^3 \alpha^2}{32 \pi^2 R^3} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 [f(r_0) \varphi(\Delta)]^2, \quad (1)$$

где

$$f(r_0) = e^{-\frac{2\pi}{\lambda} r_0}, \quad \varphi(\Delta) = \frac{1 - e^{-V\sqrt{2}\Delta}}{V\sqrt{2}\Delta}, \quad \Delta = \frac{8\pi^2 D V \bar{R}}{V \lambda^{3/2}};$$

r_0 и D — начальный радиус и коэффициент диффузии в точке отражения;

V — скорость метеорного тела;

P, λ — излучаемая мощность и длина волны РЛС;

$G_{\text{пер}}, G_{\text{пр}}$ — к. н. д. передающей и приемной антенн;

α — электронная концентрация в точке отражения;

R — расстояние до точки отражения по лучу зрения;

e, m — заряд и масса электрона;

c — скорость света.

Исследования, проведенные в Харькове в 1960 г. [4], в Киеве в 1967 г. [5], а также теоретические работы [6 и др.] показывают зависимость начального радиуса не только от высоты точки отражения, но и от скорости метеора. Это означает, что одна и та же мощность на входе приемника будет создаваться при прочих равных условиях метеорными следами с различными электронными концентрациями, если эти следы создаются метеорными телами разных скоростей. К сожалению, состояние экспериментального определения $r_0(h, V)$ в настоящее время находится на невысоком уровне (трудность эксперимента, колебания параметров атмосферы и др.), хотя решение этого вопроса важно для определения падающего потока метеоров.

Оценка чувствительности радиолокационного комплекса ХПИ выполнена для метеоров, образованных метеорными телами со скоростью 30 км/сек (на эту скорость приходится максимум распределения скоростей метеоров по нашим наблюдениям в покадровом режиме [7]). Для метеоров выбранной скорости определен по амплитудному спаду средний коэффициент диффузии $D = 11,5 \text{ м}^2/\text{сек}$, что соответствует высоте $h = 100 \text{ км}$, если считать правильной зависимость $D(h)$, полученную Гринхау и Ньюфелдом [8]. Для заданной высоты и скорости, по-видимому, можно принять $r_0 = 2 \text{ м}$ (экспериментально определено в ХПИ в 1960 г.). С выбранными r_0 и D по формуле (1) вычислены значения электронной концентрации предельных метеоров, регистрируемых в направлении максимума диаграммы направленности антенны. В табл. 1 представлены зенитные электронные концентрации α_z и абсолютные звездные радиовеличины m_z предельных метеоров, регистрируемых на шести уровнях чувствительности приемника радиолокационного комплекса ХПИ. Абсолютная звездная радиовеличина метеоров определялась по формуле

$$m_z = 35 - 2,5 \lg \alpha_z, \quad (2)$$

где $\alpha_z = \alpha \sec z$ — зенитная линейная плотность следа;
 z — зенитный угол.

Таблица 1

Уровень чувствительности приемника	$\alpha_z \text{ см}^{-1}$	m_z
1	$1,0 \cdot 10^9$	12,5
2	$1,2 \cdot 10^9$	12,2
3	$2,5 \cdot 10^9$	11,5
4	$5,6 \cdot 10^9$	10,6
5	$1,2 \cdot 10^{10}$	9,7
6	$2,6 \cdot 10^{10}$	8,9

ОЦЕНКА ОШИБКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ МЕТЕОРОВ

В 1952 г. измерения численности метеоров до 15-й звездной величины были выполнены Галахером и Эшлеманом в Станфорде [9] на волне 13 м при ширине диаграммы направленности антенны $1,5^\circ$ в горизонтальной плоскости и 60° в вертикальной. Измерения показали очень сильное изменение часовых чисел ото дня ко дню, вызванное, по мнению авторов, большим количеством малых групп, так называемых «спорадических потоков».

Измерения численности метеоров, проведенные в Харькове, также показали весьма заметное изменение часовых чисел от суток к суткам, но не настолько сильное, как указано в работе [9].

В табл. 2 приведена экспериментальная относительная ошибка наблюдаемой численности δ_0 для каждого уровня чувствительности аппаратуры

$$\delta_0 = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{\sum (\Delta N_i)^2}{n-1}}$$

Стандартное отклонение среднего значения численности метеоров в каждый момент времени

$$\sigma_{\bar{N}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta N_i)^2}{n(n-1)}}$$

изображено на рис. 1 (март 1968 г.) вертикальными отрезками линий.

Чтобы выяснить причины изменения часовых чисел, мы оценили ожидаемые ошибки в определении численности метеоров, вызванные методом измерения, и сравнили их с экспериментальными отклонениями.

Различие в часовых числах метеоров в течение месяца в одно и то же время суток может быть вызвано рядом причин: флуктуациями чувствительности аппаратуры, изменением падающего потока метеоров, ошибками обработки регистраций, влиянием помех и т. д.

Ошибка обработки δ_1 получена по результатам счета числа метеоров шестью наблюдателями разного профиля работы (обработчики пленок, инженеры-конструкторы, эксплуатационники и т. д.). Она минимальна на втором и третьем уровнях чувствительности аппаратуры; на первом она увеличилась из-за трудности выделения метеоров среди помех, на последних — вследствие малой статистики. Для всех уровней чувствительности аппаратуры ошибка обработки представлена в табл. 2.

Таблица 2

Ошибка	Уровень чувствительности аппаратуры					
	1	2	3	4	5	6
δ_0	0,22	0,24	0,33	0,42	0,52	0,65
δ_1	0,08	0,07	0,07	0,08	0,10	0,10
δ_2	0,16	0,07	0,06	0,02	0,00	0,00
δ_4	0,24	0,19	0,18	0,18	0,19	0,19

Ошибка из-за помех оценивалась по киноплёнке. При импульсной помехе она пропорциональна суммарному времени помехи с учетом теряющегося при этом относительного числа отражений; при непрерывной помехе типа ВЧЗ ошибка пропорциональна относительной площади помехи с учетом распределения метеоров по дальности. Относительная ошибка в определении численности метеоров вследствие помех δ_2 приведена в табл. 2.

Ошибка в определении численности метеоров из-за флуктуации чувствительности аппаратуры может быть оценена из следующих представлений. Число метеоров на заданном уровне чувствительности аппаратуры определяется соотношением

$$N = N_0 \left(\frac{\eta}{\eta_0} \right)^k, \quad (3)$$

где k — тангенс угла наклона графика распределения амплитуд (см. п. 6). Тогда ошибка в определении численности метеоров

$$\delta_3 = \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)^2 = \Delta k \left(\ln \frac{\eta}{\eta_0} \right)^2 + k^2 \left[\left(\frac{\Delta A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где ΔA и ΔP — ошибки в амплитуде сигнала и мощности, недоступные контролю. Если η_0 — неискаженная ошибкой чувствительность аппаратуры, а η — измеренная ее чувствительность, то первым слагаемым в формуле (4) можно пренебречь ($\Delta k = 0,07 \pm 0,10$), и для нашей аппаратуры $\delta_3 = 0,16$.

Можно считать, что относительная ошибка в численности δ_4 , вызванная совместным влиянием указанных причин, $\delta_4^2 = \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2$. Эта ошибка характеризует метод измерения. Из эксперимента известна выборочная дисперсия численности для каждого уровня. Отношение наблюдаемого среднеквадратичного отклонения к среднему числу метеоров, обозначенное δ_0 , приводится в табл. 2. «Вычитая» из экспериментальной относительной ошибки δ_0 ошибку метода δ_4 , можно получить оценку для величины относительной флуктуации падающего потока метеоров в течение месяца. Для метеоров до $11,5^m$ она составляет примерно 30%.

МЕТЕОРНЫЕ ПОТОКИ

Из-за узкой диаграммы направленности антенны большинство активных метеорных потоков должно наблюдаться короткое время, два-четыре часа, за исключением потока Квадрантид, находящегося в поле зрения 9 часов.

Геминиды должны наблюдаться с 4 до 8 ч местного времени. Измерения проводились в 1966 г. в период опробования комплекса аппаратуры и в 1967 г. с 9 по 14 декабря. Некоторое, весьма малое, увеличение численности метеоров замечено только на шестом уровне чувствительности аппаратуры. На всех остальных уровнях, если и есть какое-то изменение, то оно не превышает обычных ошибок измерения.

Квадрантиды должны наблюдаться с 12 до 21 ч местного времени. Измерения численности метеоров проводились в 1967 г. 3 и 4 января. Поток не замечен.

Аквариды «проходят» через антенну с 9 ч 30 мин до 11 ч 30 мин местного времени. Измерения велись с 21 по 23 апреля и с 4 по 6 мая 1968 г. Поток не замечен.

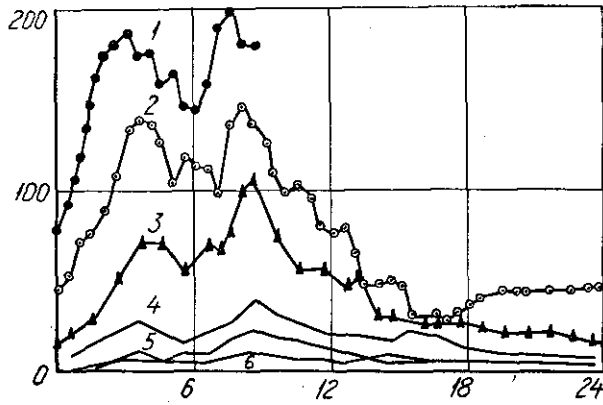
Эти результаты служат дополнительным подтверждением многократно наблюдаемого факта, что параметр s для метеоров потока значительно меньше, чем для метеорного фона.

ЧИСЛЕННОСТЬ СПОРАДИЧЕСКИХ МЕТЕОРОВ

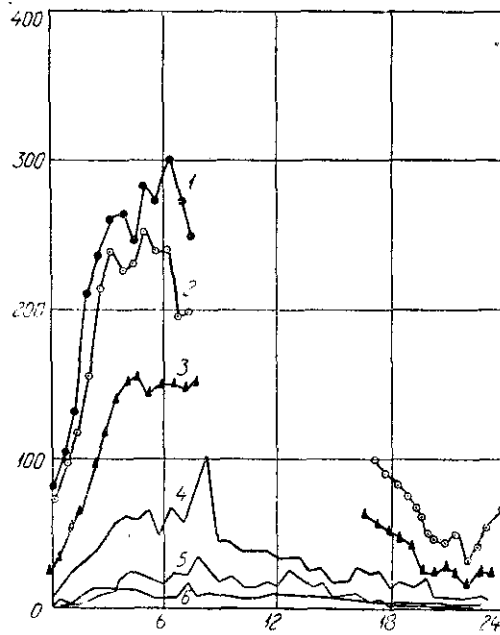
Можно считать, как это следует из предыдущего пункта статьи, что практически все зарегистрированные за время наблюдений метеоры (несколько сотен тысяч) относятся к спорадическим. На рис. 1 *a, б, в, г, д, е, ж* представлен суточный ход численности метеоров за каждый месяц (октябрь 1967 г. — июль 1968 г.). В усреднение входило не менее двух циклов ежемесячных измерений, сдвинутых на 8—10 суток.

Анализ суточных кривых численности метеоров за весь период наблюдений показывает наличие двух максимумов около 3 и 8—9 ч местного времени. Первый максимум всегда несколько ниже второго. Он обусловлен прохождением в области наблюдения антисолнечной точки. В январе этот максимум очень широк и непосредственно переходит

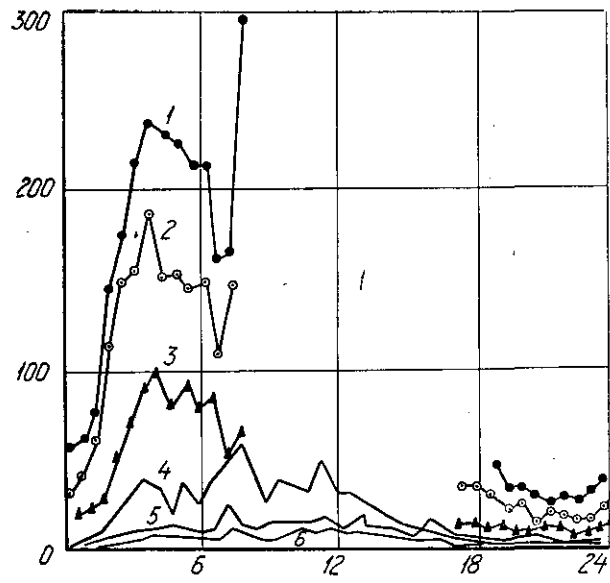
Рис. 1. Суточный ход численности метеоров.
 По оси абсцисс отложено местное солнечное время, по оси ординат — численность метеоров за 6 мин измерения. Цифрами на графиках отмечены уровни чувствительности аппаратуры.



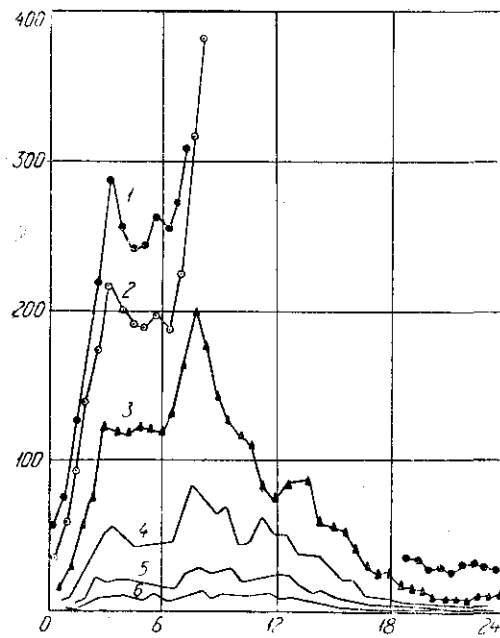
а — октябрь 1967 г.



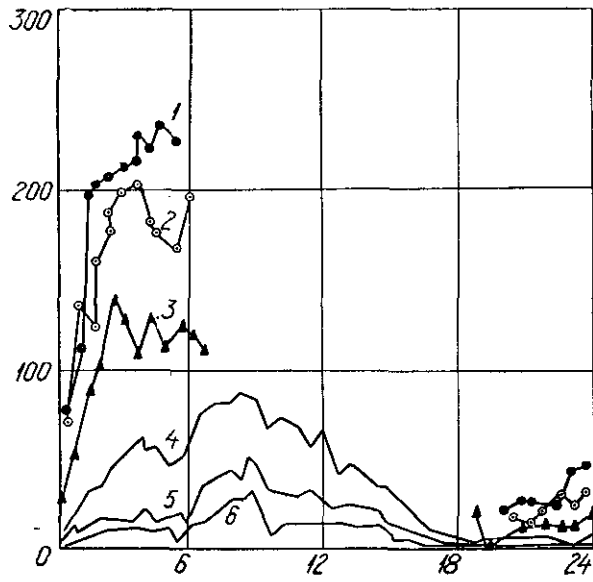
б — январь 1968 г.



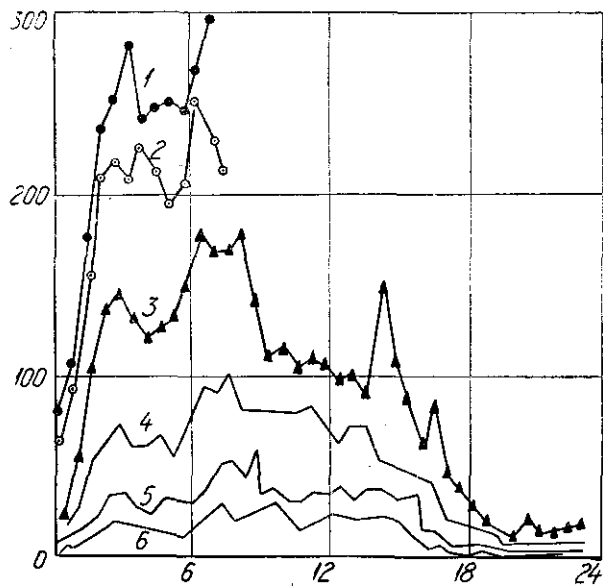
в — февраль 1968 г.



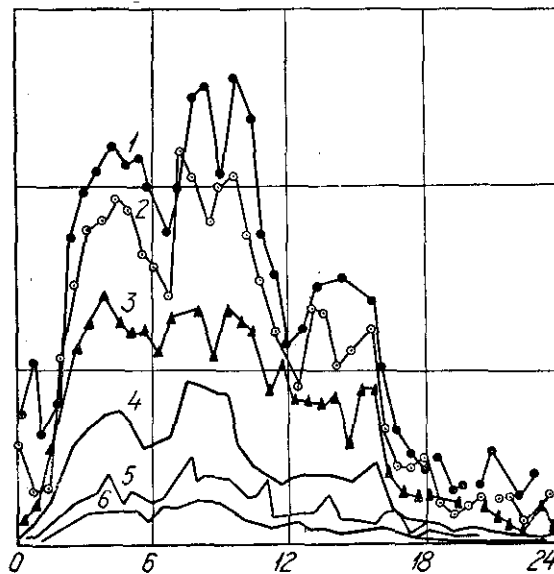
г — март 1968 г.



д — апрель 1968 г.



е — май 1968 г.



ж — июль 1968 г.

в еще больший в 9 ч местного времени, хотя точка со склонением $+20^\circ$ (антисолнечная) находится в области наблюдения с 2 до 5 ч. По-видимому, январский широкий максимум можно объяснить наличием большой группы активных радиантов между апексной и антисолнечной областью.

В апреле, а особенно в мае, когда склонение антисолнечной точки становится отрицательным, антисолнечная область находится в зоне видимости с 1 до 2 ч. Первый максимум численности метеоров смещается на три—четыре часа. На это же время приходится максимум численности метеоров в октябре, хотя склонение антисолнечной точки в этом месяце больше нуля и антисолнечная область наблюдается на широте нахождения станции (при данных антеннах) с 1 ч 30 мин до 3 ч 30 мин местного времени.

Итак, первый максимум численности вызван метеорными телами с орбитами вблизи плоскости эклиптики, видимые радианты которых сдвинуты к антисолнечной области. Он бывает, как правило, на два—три часа позднее прохождения через антенну антисолнечной области, и величина его на всех уровнях чувствительности приемника остается практически постоянной в течение всего времени измерений.

Второй максимум численности метеоров приходится на 9—10 ч местного времени и объясняется концентрацией видимых радиантов к апексу Земли. Величина его коррелирует с высотой апекса над горизонтом.

Проведенные измерения показывают, что общий характер суточного хода численности метеоров на разных уровнях чувствительности аппаратуры остается одинаковым, хотя и имеются некоторые различия. В летние месяцы, например, «солнечный» максимум (в 13—15 ч) виден отчетливее на более чувствительных уровнях регистрации; отдельные пики сдвинуты во времени на разных уровнях и т. п.

Можно сравнить суточный ход численности метеоров в 1967—1968 гг. с аналогичными результатами, полученными в 1958—1960 гг. в Харько-

ве [4]. Суточный ход численности метеоров $8 \div 12,5$ звездной величины в 1968 г. очень похож для соответствующих месяцев на ход численности метеоров $5 \div 6$ -й звездной величины, зарегистрированной в Харькове в 1958 г., и значительно меньше похож на ход численности в соответствующие месяцы в 1960 г., хотя общая чувствительность аппаратуры в 1960 г. была выше.

Заметное различие суточного хода численности метеоров в 1968 г. по сравнению с 1958 г. наблюдается в летние месяцы. Так, в мае 1968 г. преобладающий широкий максимум приходился на 12 ч, в июле он еще возрос, хотя одновременно наблюдался меньший максимум в 8 ч и еще меньший в 3 ч местного времени. По наблюдениям же в Харькове в 1968 г. в мае солнечный максимум четко различается, но не превышает по величине апексный, а в июле он опять становится меньше.

Говорить о каких-то особенностях поведения роя мелких метеорных тел, встречаемого Землей и создающего метеоры до 12—13-й звездной величины, не имея хотя бы годового цикла измерений, по-видимому, нельзя. По-прежнему, как и для более крупных метеорных тел, подтверждается наблюдениями наличие концентрации к плоскости эклиптики, преобладание прямых движений, хотя необычным является высокая численность в январе, превышение мартовской численности над майской и т. д.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА S В РАСПРЕДЕЛЕНИИ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ ПО МАССЕ

Вопрос о распределении амплитуд метеоров впервые теоретически рассмотрел Кайзер [10]. Позднее О. И. Белькович [11] пересмотрел его, принимая во внимание случайное положение зеркальной точки на следе и влияние начального радиуса на амплитуду отраженного сигнала. Для ненасыщенных метеоров в логарифмическом масштабе распределение их подчиняется линейному закону. Тангенс наклона этой прямой k определяется формулами:

$$\text{по Кайзеру } |k| = s - 1, \quad (5)$$

$$\text{по Бельковичу } |k| = \frac{s - 1}{1 + 0,23 \left(\frac{2\pi}{\lambda} r_0 \right)^{1,8}}, \quad (6)$$

где s — показатель степени в законе распределения метеорных тел по массе;

λ — длина волны;

r_0 — начальный радиус на характеристической высоте (в «точке» максимума ионизации предельно слабого регистрируемого следа, образованного метеорным телом с наиболее вероятной скоростью).

Нами были получены экспериментально значения параметра k для большинства месяцев наблюдения по нескольким интервалам суток. На рис. 2 представлен образец распределения амплитуд метеоров в марте с 4 до 7 ч местного времени. В табл. 3 приведено значение параметра k для некоторых месяцев с 4 до 7 ч.

Таблица 3

Месяц	Октябрь	Февраль	Март	Апрель	Май
Параметр K	0,95	1,12	1,18	1,06	1,13

Ошибка в определении параметра k составляет в среднем 7—10%. Замеченные колебания k от месяца к месяцу меньше, чем колебания в течение суток (в дневное время k уменьшается до 0,85—0,95). Счи-

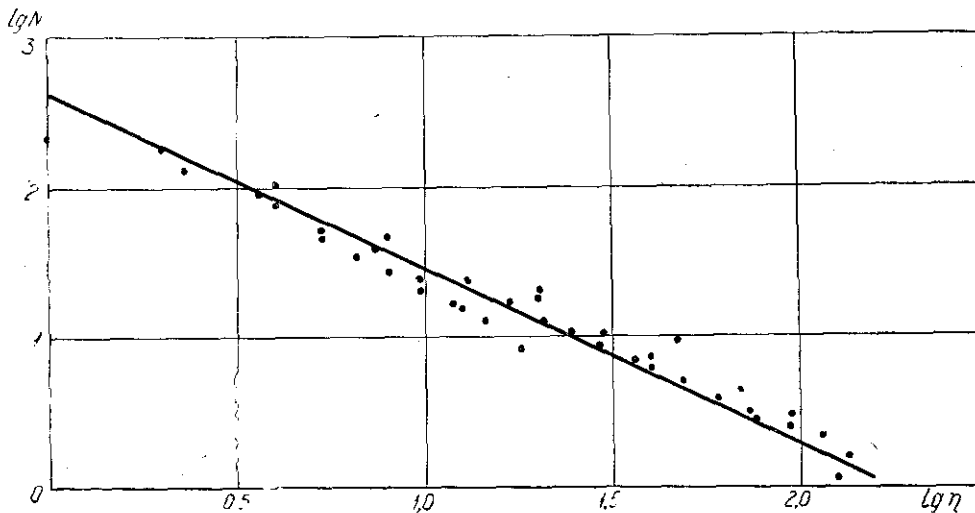


Рис. 2. Распределение амплитуд метеоров (март, 4—7 и местного времени).

тая среднее значение $k = 1$, можно оценить параметр s в законе распределения метеорных тел по массе. Поскольку в большинстве прежних работ s оценивалось без учета начального радиуса, то, пользуясь выражением (5), получаем $s = 2$, что совпадает со значением s , полученным в Харькове в 1960 г. для спорадических метеоров по распределению длительности и с большинством других определений для метеоров до 6—8-й звездной величины.

Более правильно пользоваться формулой (6), но для этого необходимо знать начальный радиус на характеристической высоте. Считая для наших измерений $h_0 = 106$ км, а $r_0 = 3,5$ м, получаем среднее значение $s = 2,55$. По-видимому, данное значение ближе к истинному, чем $s = 2$, но едва ли это означает, что параметр s увеличился при переходе к слабым метеорам. Скорее всего прежние определения s для спорадического фона более ярких метеоров занижены из-за неточного учета некоторых физических процессов.

Суточный ход численности метеоров 8—12,5 абсолютной радиозвездной величины, зарегистрированных в октябре 1967 г., январе—мае и июле 1968 г., позволяет сделать следующие выводы.

1. Общий характер суточных кривых одинаков в течение месяца для метеоров 8—12,5 звездной величины.

2. Отсутствует заметное изменение численности метеоров в периоды действия известных потоков.

3. Флуктуация падающего потока метеоров в течение месяца составляет в среднем 30%.

4. Годичный ход численности слабых метеоров меньше, чем это считалось до настоящего времени. По крайней мере, в зимние месяцы численность их мало отличается от майской.

5. Для большинства метеорных тел, создающих метеоры, рассматриваемые в настоящей работе, преобладающим, по-видимому, является прямое движение по орбитам, близким к плоскости эклиптики. Более четкое представление об общих закономерностях в распределении метеоров можно будет получить после анализа результатов наблюдений за большее число месяцев.

6. Из распределения амплитуд получено значение показателя степени в законе распределения метеорных тел по массам для спорадических метеоров $s = 2,55$ с учетом случайного положения зеркальной точки на следе и влияния r_0 на амплитуду отраженного сигнала. Если же не учитывать влияния r_0 и пользоваться теоретическим распределением амплитуд Кайзера, то $s = 2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Г. Бондарь, Б. С. Дудник, А. А. Ткачук. Передающее и антенное устройства метеорной станции высокой эффективной чувствительности. Вестник ХПИ, № 22(70). «Радиотехника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
2. Ю. И. Волошук, В. А. Нечитайленко. Регистраторы метеорной станции высокой эффективной чувствительности. Вестник ХПИ, № 22(70). «Радиотехника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
3. Б. Г. Бондарь, В. М. Жебко, В. В. Лизогуб, М. И. Гуртовой. Направленная коротковолновая антенна для исследования метеоров. Вестник ХПИ, № 22(70). «Радиотехника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
4. Б. Л. Кашеев, В. Н. Лебединец. Радиолокационные исследования метеорных явлений. «Результаты МГГ», № 7. Изд-во АН СССР, 1961.
5. Р. И. Мойся. Определение начальных радиусов метеорных следов. Астрономический циркуляр, 1967, № 409.
6. Б. Л. Кашеев, В. Н. Лебединец, М. Ф. Лагутин. Метеорные явления в атмосфере Земли. Изд-во АН СССР, 1967.
7. Б. Л. Кашеев, И. А. Делов, Б. С. Дудник, Н. В. Новоселова, А. А. Ткачук. Измерения радиантов и орбит слабых метеоров. См. настоящий сборник.
8. J. S. Greenhow, E. L. Neufeld. The diffusion of ionized meteor trails in the upper atmosphere. *J. Atmosph., Terr. Phys.*, 6, 1955.
9. P. B. Gallagher, V. R. Eshleman. Sporadic shower properties of very small meteors. *J. Geophys. Res.*, 65, 1960.
10. T. R. Kaiser. *Meteors*. Pergamon Press, London, 1955.
11. О. И. Белькович. Распределение амплитуд метеорных эхо-сигналов. Сб. «Метеорное распространение радиоволн», № 3—4. Изд-во КГУ, Казань, 1966.