

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАЧАЛЬНОГО РАДИУСА
МЕТЕОРНОГО СЛЕДА

Наиболее существенное влияние при радиолокационных наблюдениях метеорных следов и при использовании метеорного канала связи оказывает физический фактор замечаемости, учитывающий процесс образования и разрушения ионизированного метеорного следа. Физическая теория метеоров, описывающая эти процессы, содержит ряд параметров и функциональных зависимостей, которые в настоящее время исследованы недостаточно полно и требуют дальнейшего уточнения. В первую очередь это относится к начальному радиусу метеорного следа, который является одним из важнейших параметров метеорной радиолокации и характеризует отражающую способность метеорного следа как радиолокационной цели. В отличие от принятого в радиолокации понятия эффективной отражающей поверхности цели, зависящей от ее ракурса, формы и материала покрытия, отражающая способность метеорного следа зависит от плотности атмосферы, скорости метеорного тела и его физико-химических свойств. Испарившиеся с поверхности метеорного тела атомы имеют скорость, значительно превышающую скорость молекул атмосферы, и до момента наступления теплового равновесия с окружающей атмосферой проходит некоторый промежуток времени, в течение которого формируется начальный радиус метеорного следа r_0 . В случае гауссового распределения электронов по радиусу следа начальный радиус равен расстоянию от оси следа, на котором концентрация электронов падает в e раз (e – основание натурального логарифма). После достижения этого радиуса начинается процесс амбиполярной диффузии ионизированного метеорного следа. Процесс образования начального радиуса ионизированной компоненты метеорного следа довольно сложен. Для смеси частиц, состоящей из различных типов атомов, молекул и ионов, он может быть достаточно полно описан только с помощью кинетических уравнений Больцмана. Приближенные методы расчета начального радиуса были развиты в работах [1-5], где процесс образования начального радиуса рассматривался как диффузионный. Обычно модель начального радиуса представляют в виде:

$$r_0 = c\rho^{-a}V^b \text{ или } r_0 = cD^aV^b$$

где c , a и b – некоторые константы; ρ – плотности атмосферы на высоте отражающей области метеорного следа; D – коэффициент амбиполярной диффузии; V – скорость метеорного тела.

В табл. 1 представлены значения коэффициентов теоретических моделей начального радиуса.

Таблица 1

Авторы	Коэффициенты модели	
	a	b
Л. Маннинг [2]	1,0	0,0
Е. Эпик [1]	1,0	0,66
Б. Л. Кащеев, В. Н. Лебединец [4]	1,0	1,0
В. С. Тохтасьев [6]	1,0	0,55

Проведенные экспериментальные радиолокационные исследования начального радиуса не в полной мере подтверждают разработанные теоретические модели. Экспериментальные результаты, полученные разными исследователями, расходятся в оценке зависимости начального радиуса от плотности атмосферы и скорости метеорного тела, хотя среднее значение начального радиуса хорошо согласуется с его теоретическим значением. Результаты основных экспериментов по исследованию начального радиуса приведены в табл. 2.

Коэффициенты модели начального радиуса, полученные в каждом частном эксперименте, оказываются существенно меньшими ожидаемых из теоретических соображений. В приведенной таблице выделяются результаты работы [4], в которой оценки коэффициентов модели начального радиуса совпали с теоретическими значениями. Однако при обработке экспериментальных данных, приведенных в [4], методом наименьших квадратов получены значения коэффициентов модели начального радиуса $a = 0,25$, $b = 0,48$, что существенно ниже оценок, полученных авторами.

Таблица 2

Авторы	r_0 , м	D , $\text{м}^2\text{с}^{-1}$	V , $\text{км}\cdot\text{с}^{-1}$	Коэффициенты модели		Параметры аппаратуры (мощность передатчика, кВт /длина волны, м)
				a	b	
Дж. Гринхау, Дж. Холл [7]	1,55	14,0	34	0,35	0	12/17; 10/8,3
Б.Л. Кащеев, В. Н. Лебединец,[4,8]	0,80	6,4	32	1,0	1,0	75/8,13; 100/4
И. В. Байраченко [9]	1,00	8,2	41	0,82*	0,33	40/9,59; 40/6,49
Р. И. Мойся [10]	1,00	8,1	36	0,35	-	40/9,59; 40/6,49;
И. А. Делов, В. В. Жуков [11]	1,86	12,0	33	0,35	0,45	1000/13,4; 100/8,13
Ю. В. Чумак [12]	0,93	7,2	32		-	50/13,3; 50/8,86

*- для получения зависимости r_0 от плотности атмосферы использовались средние значения r_0 и D , полученные в работах [7, 9,13].

Возможной причиной получения заниженных значений коэффициентов модели начального радиуса является несовершенство применяемой аппаратуры, выражающееся в низкой эффективной чувствительности радиолокационных комплексов, относительно небольшим динамическим диапазоном измерения начального радиуса и отсутствием в составе аппаратуры технических средств для определения высоты отражающей области метеорного следа.

Начальный радиус метеорного следа может быть измерен экспериментально при одновременном наблюдении сигналов, отраженных от ненасыщенного метеорного следа на двух и более длинах волн. Впервые эти измерения провели Дж. Гринхау и Дж.Холл [7]. Дальнейшее развитие методики измерения начального радиуса было продолжено в работах Б.Л. Кащеева и В.Н. Лебединца [4,8,13]. Согласно [13] максимальная мощность сигнала, отраженного от ненасыщенного метеорного следа, описывается выражением

$$P_{\max} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^3 \alpha^2}{32\pi^2 R^3} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right) \left(e^{-\frac{4\pi^2 r_0^2}{\lambda^2}} \right)^2 (\varphi(\Delta))^2; \quad \varphi(\Delta) = \left(\frac{1 - e^{-\sqrt{2}\Delta}}{\Delta\sqrt{2}} \right); \quad \Delta = \frac{8\pi^2 D\sqrt{R}}{\nu\lambda^{2/3}}$$

где P_t – мощность передатчика; G_r, G_t – коэффициенты направленного действия приемной и передающих антенн; λ –длина волны РЛС; α –линейная электронная плотность; e, m – заряд и масса электрона; c – скорость света; R – наклонная дальность до следа; Δ – коэффициент формы амплитудно-временной характеристики (АВХ) метеорного следа.

При измерении отношения максимальных амплитуд сигналов, отраженных от одного и того же следа на длинах волн λ_1 и λ_2 , появляется возможность экспериментально определить начальный радиус метеорного следа. При использовании антенн с идентичными формами диаграмм направленности на двух длинах волн из расчетной формулы исключается член, описывающий направленные свойства применяемых антенн

$$r_0 = \frac{\left(0.5 \ln \frac{P_{f1}}{P_{f2}} + \ln \frac{u_1}{u_2} + 1.5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \ln \frac{\varphi(\Delta_1)}{\varphi(\Delta_2)} \right)^{0.5}}{2\pi \left(\frac{1}{\lambda_2^2} - \frac{1}{\lambda_1^2} \right)}$$

В методическом отношении это очень важно, поскольку в большинстве случаев установки для измерения начального радиуса не позволяют измерять углы прихода радиоволн и определять соответствующие им коэффициенты направленного действия антенн.

Решающее влияние на результаты обработки экспериментальных данных оказывает отбор ненасыщенных метеорных следов. Результаты расчетов [14] показывают, что если линейная электронная плотность $\alpha \approx 10^{12}$ эл·см⁻¹, то дифракционные кривые радиоэхо от следов переходного типа по внешнему виду не отличаются от дифракционных кривых радиоэхо от ненасыщенных метеорных следов.

При $\alpha > 10^{11}$ эл·см⁻¹ описываемая методика дает заниженные значения r_0 , при этом ошибки измерения r_0 возрастают с ростом r_0 и α . Для отбора ненасыщенных метеорных следов с $\alpha < 10^{11}$ эл·см⁻¹, без резких изменений линейной электронной плотности вдоль следа и не подверженных искривлению следа под действием атмосферной турбулентности применяют точные количественные критерии [13]. Параметр формы Δ для каждой дифракционной кривой может быть определен независимо тремя методами:

- по постоянной спада АВХ (Δ_1);
- по отношению амплитуд в моменты максимумов и минимумов дифракционной кривой (Δ_2);
- по отношению временных интервалов между экстремумами дифракционной кривой (Δ_3).

Условием выполнения требований к отбору ненасыщенных метеорных следов является равенство параметра формы, определенного тремя этими методами. Детальный анализ эффективности критериев отбора ненасыщенных метеорных следов приведен в работе [15].

В состав радиолокационного комплекса входит радиопередающая и приемно-регистрационная аппаратура, характеристика которой приведена в табл. 3.

Таблица 3

Параметры аппаратуры	РЛС-1	РЛС-2
Рабочая длина волны, м	9	5
Импульсная мощность передатчика, кВт	80	500
Полоса пропускания тракта приемника, кГц	50	50
Предельная чувствительность приемника, мкВ	0,7	0,5
Коэффициент усиления антенн, дБ	13,8	13,8

Потенциал радиолокационных комплексов обеспечивает эффективную предельную чувствительность на обеих частотах, равную $\alpha_{эф}^{min} = 3 \cdot 10^9$ эл/см. Расчетный диапазон измеряемых значений начального радиуса, при приемлемой погрешности ($\delta r_0 < 0,1$ м), лежит в пределах 0,3 – 2,1 м.

Излучение и прием отраженных сигналов ведется на отдельные передающие и приемные антенны, представляющие собой пятиэлементные волновые каналы с высотой подвеса полотен над поверхностью земли $h = \lambda / 3$. Одним из обязательных требований к антеннам при проведении измерений начального радиуса метеорного следа является идентичность формы диаграммы направленности антенн на обеих частотах, что обеспечивается за счет геометрического подобия антенн. Исключение влияния погодных условий на параметры антенн достигается установкой антенн на площадках "идеальной" земли, которые представляют собой горизонтальные поверхности, покрытые стальной сеткой с размером ячейки 0,4 м ($< \lambda_2 / 10$). Диаграммы направленности антенн исследовались по отражениям от метеорных следов методом сравнения с эталонной антенной. В секторе углов $\pm 60^\circ$ по азимуту и $15^\circ - 60^\circ$ по углу места отклонение отношения G_1 / G_2 от единицы не превышало 10 %.

Стабильность и идентичности амплитудных характеристик приемников на обеих частотах обеспечиваются использованием общего тракта промежуточной частоты. Разделение отраженных сигналов, соответствующих длинам волн λ_1 и λ_2 достигнуто разнесением во времени зондирующих импульсов передающих устройств. Относительная средняя квадратическая погрешность определения истинных амплитуд $\delta \square \approx 0,03$. Регистрация амплитудно-временных характеристик метеорных радиоэхо производится фотометодом. Текущий контроль мощности передатчиков выполняется измерителями проходящей мощности, выполненными на базе коаксиальных направленных ответвителей. Калибровка измерителей проходящей мощности осуществлялась поглощающим калориметрическим измерителем большой мощности ($P_{cp} = 10$ кВт), специально разработанным для этой цели. Относительная ошибка измерения проходящей мощности не превышает $\delta P = 0,075$. Максимальная относительная погрешность измерения r_0 при соотношении $c/\lambda > 10$ на λ_1 и $r_0 = 1$ м, не превышает $\delta r_0 = 0,1$. Скорость метеорного тела рассчитывается по алгоритму, обеспечивающему минимум среднеквадратической погрешности с использованием всей информации о положении имеющихся экстремумов АВХ метеорного радиоэха. Относительная погрешность измерения скорости не превышает $\delta v = 0,02$. Угловые координаты отражающей точки метеорного следа в реальном масштабе времени определяются автоматическим угломером [16-18], который обеспечивает измерение угловых координат, наклонной дальности и радиальной скорости дрейфа отражающей области метеорного следа. В автоматическом угломере реализован фазовый метод моноимпульсной радиолокации. Антенная система угломера со-

стоит из пяти антенн типа волновой канал, расположенных крестом и образующих двухбазовую измерительную систему с размерами баз $3,5\lambda$ и 4λ , что обеспечивает высокую точность определения координат:

- среднеквадратическая погрешность определения угловых координат, град. 0,28;
- среднеквадратическая погрешность определения наклонной дальности, м. 200;
- среднеквадратическая погрешность определения высоты, км 1.

Используемая аппаратура и применяемые алгоритмы обработки позволяют методически строго произвести радиолокационные исследования начального радиуса метеорного следа.

В трех циклах измерений, краткая характеристика которых приведена в табл. 4, отобрано около 5,6 тыс. регистраций ненасыщенных метеорных следов, имеющих координаты точки отражения.

Таблица 4

Номер цикла измерений	Дата проведения измерений	Число отобранных метеорных следов	Мощность передатчиков.	
			P_1 , кВт	P_2 , кВт
1	22.11.79 – 10.12.79	1900	60	50
2	28.11.81 – 28.12.81	2500	80	500
3	17.06.82 – 02.07.82	1200	80	500

Таблица 5

Параметр	1-й цикл измерений		2-й цикл измерений		3-й цикл измерений	
	Математическое ожидание	Стандартное отклонение	Математическое ожидание	Стандартное отклонение	Математическое ожидание	Стандартное отклонение
r_0 , м	1,33	0,16	0,97	0,2	1,03	0,11
h , км	94,6	3,99	92,3	4,07	94,5	2,96
V , км·с ⁻¹	42,4	12,8	37,4	12,7	41,9	14,1
$\ln D$, м ² с ⁻¹	2,09	0,36	1,96	0,38	2,03	0,4

Отбор ненасыщенных метеорных следов осуществлялся с применением количественных критериев. Статистические характеристики основных параметров метеорных следов и атмосферы по результатам этих измерений представлены в табл. 5. Поля корреляции $[r_0, V]$, $[r_0, h]$, линии регрессии и контурные эллипсы по результатам второго и третьего цикла измерений приведены на рис. 1, а и б.

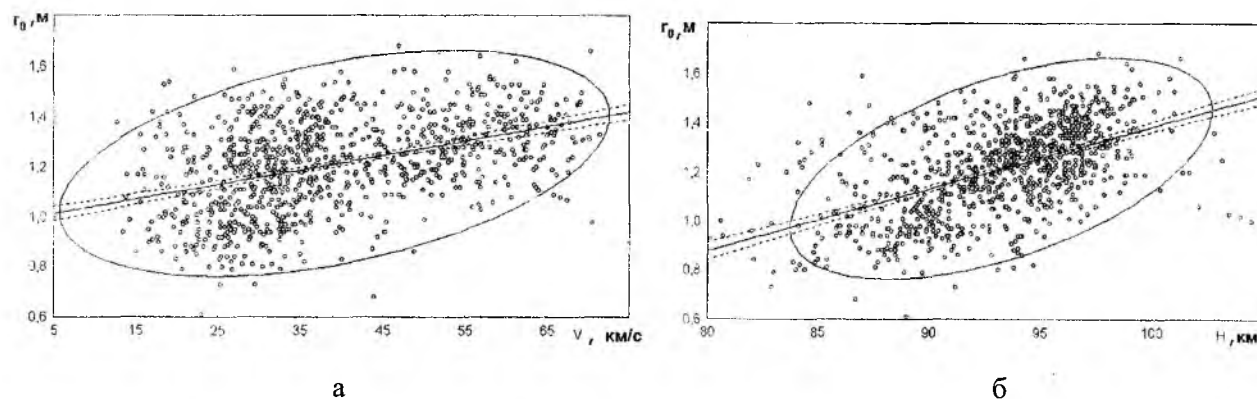


Рис. 1

Вычисление коэффициентов модели начального радиуса производилось по нескольким группам исходных параметров:

- по плотности атмосферы определенной по таблице стандартной атмосферы через измеренную высоту и скорость метеорного тела (коэффициенты a_1 и b_1);
- через коэффициент амбиполярной диффузии, определенной на длине волны λ_1 , и скорость метеорного тела (коэффициенты a_2 и b_2);

– через коэффициент амбиполярной диффузии, определенной на длине волны λ_2 , и скорость метеорного тела (коэффициенты a_3 и b_3). Коэффициенты модели начального радиуса определялись методом наименьших квадратов, результаты определения коэффициентов модели начального радиуса при различных значениях невязки параметра формы приведены на рис. 2, где можно качественно проследить влияние степени жесткости отбора ненасыщенных метеорных следов. Отбирались ненасыщенные следы, для которых выполнялось условие

$$\delta_{\Delta} \leq \left| \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3}{3} - 1 \right|,$$

где δ_{Δ} – порог невязки параметра формы.

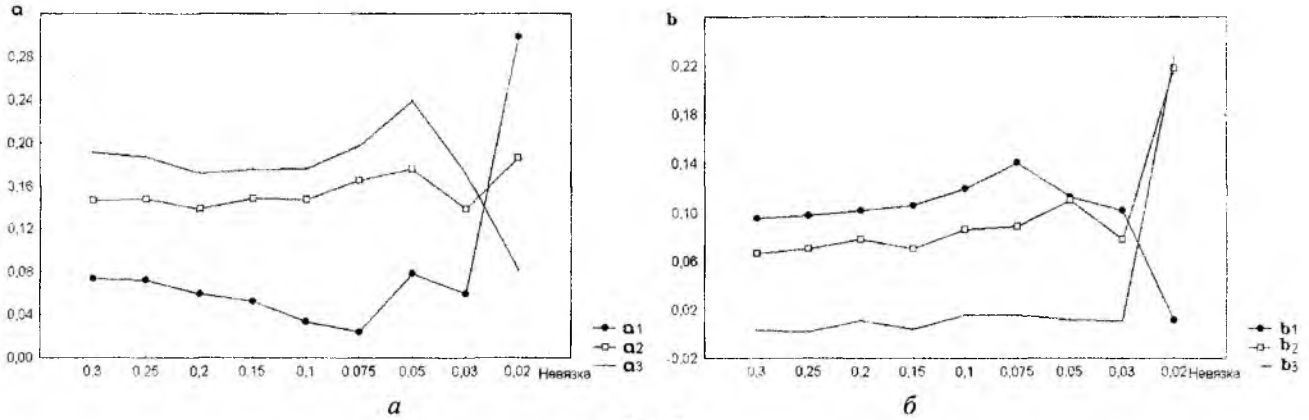


Рис. 2

При увеличении жесткости отбора ненасыщенных метеорных следов должна усиливаться функциональная связь между параметрами метеорного следа, связанными с плотностью атмосферы (начальный радиус, коэффициент амбиполярной диффузии), а также высотой отражающей точки и скоростью метеорного тела. Можно отметить слабое влияние степени жесткости отбора ненасыщенных метеорных следов на величину коэффициентов модели начального радиуса \square рис. 2, а и б. Наблюдается некоторый рост значений коэффициентов модели начального радиуса, достигающих максимума при $\delta_{\Delta} = 0,05$. При низких значениях невязки ($\delta_{\Delta} \leq 0,02$) проявляется неустойчивость параметров модели, что вызвано случайностью отбора следов и малым объемом выборки. При этом относительная погрешность определения параметра формы становится сравнимой с величиной невязки отбора δ_{Δ} . При $\delta_{\Delta} = 0,05$ коэффициенты модели начального радиуса имеют следующие значения:

$$a_1 = 0,079; b_1 = 0,113; a_2 = 0,176; b_2 = 0,110; a_3 = 0,239; b_3 = 0,012.$$

В ряде работ отмечается, что в случае, когда плотность атмосферы определяется со значительной погрешностью, результаты регрессионного анализа дают заниженное значение коэффициента по отношению к его истинному значению. Однако и в случае, когда плотность атмосферы определяется через высоту, определяемую с высокой точностью, результаты оказываются близкими к результатам, полученным при определении плотности атмосферы через коэффициент амбиполярной диффузии. На основании этого можно предположить о существовании дополнительных источников погрешностей определения плотности атмосферы и начального радиуса, связанных со значительными флуктуациями плотности атмосферы. Флуктуации плотности атмосферы отмечаются и при наблюдении фотографических метеоров [19]. Дополнительными источниками погрешностей может быть дробление метеорных тел, наличие резонансных эффектов в метеорном следе, многокомпонентность ионного состава следа, наличие среди анализируемых следов переходного типа.

Форма сглаженного рельефа экспериментальных значений $r_0(h, V)$, представленная на рис. 3, казывает на сложный характер зависимости начального радиуса от плотности атмосферы и скорости метеорного тела.

Коэффициенты модели начального радиуса могут быть найдены путем выделения узких скоростных интервалов и высотных слоев, внутри которых изменение соответствующего параметра незначительно и можно выделить стохастическую зависимость r_0 от ρ без учета влияния V , либо r_0 от V без учета влияния ρ . Коэффициенты модели a и b в этом случае определяются независимо друг от друга с помощью метода наименьших квадратов.

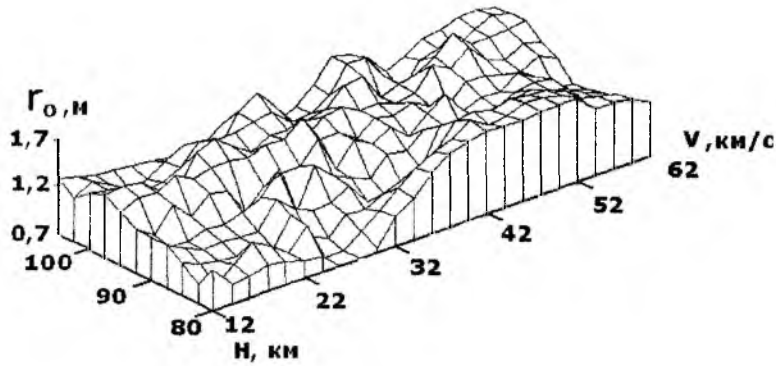


Рис. 3

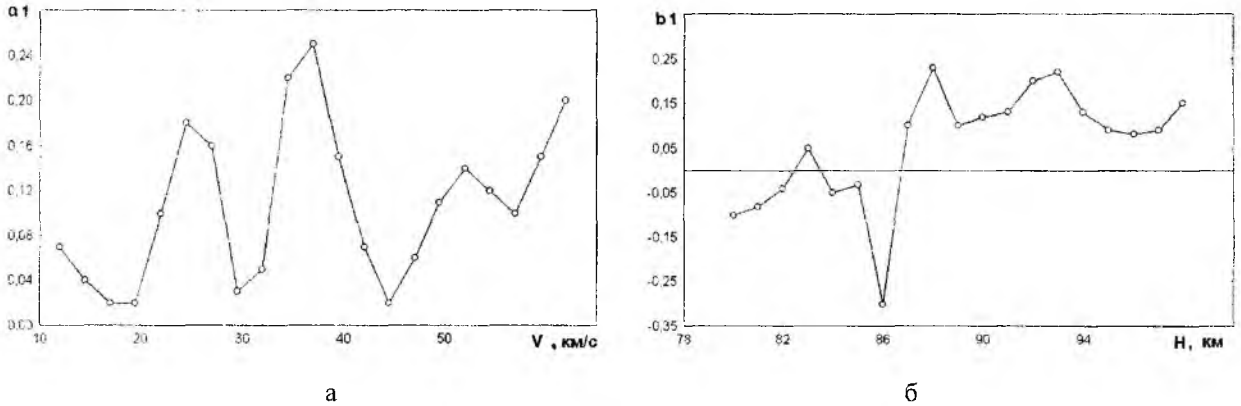


Рис. 4

Значение коэффициента b_1 в нижней части метеорной зоны (рис. 4, б) весьма мало, и даже принимает значение противоположное относительно предсказываемого теорией. Это может быть вызвано завышением измеренного значения r_0 . Возможными механизмами, приводящими к завышению r_0 , являются дробление метеорных тел и наличие резонансных эффектов в следе. Оба этих механизма характерны для низких высот. Резонансные эффекты оказывают большое влияние на величину измеряемого начального радиуса при $r_0 < 1$ м и большом разnose частот, на которых проводится исследование метеорных следов [10]. Полученная в результате анализа зависимость коэффициента $a_1(V)$ (рис. 4, а) носит периодический характер. Объяснить такое поведение можно только в том случае, если предположить, что атмосфера в метеорной зоне имеет относительно устойчивую стратифицированную структуру. Полагая, что ветер в метеорной зоне строго горизонтален, можно найти градиент давления [20]:

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{d^2 V_2}{dh^2},$$

где μ – динамический коэффициент вязкости воздуха; h – высота; V_2 – горизонтальная скорость ветра.

В метеорной зоне связь между термодинамическими параметрами хорошо описывается адиабатическим приближением. Давление и плотность атмосферы в этом случае связаны соотношением [21]

$$p = k_0 \rho^\gamma,$$

где $\gamma = 1,4$ – постоянная адиабаты; k_0 – постоянный коэффициент для элемента объема газа.

Для качественного рассмотрения процессов будем полагать

$$\frac{\delta \rho}{\rho} \approx \frac{d^2 V}{dh^2},$$

где $\delta \rho$ – вариация плотности атмосферы.

Экспериментальное исследование вертикального профиля горизонтальной составляющей скорости ветра и профиля начального радиуса показывает наличие достоверной корреляционной связи между второй производной горизонтальной составляющей скорости ветра. На рис. 5 представлены высотные профили r_0 , D , V , V_2'' , полученные за один час измерений. (18.6.82, 06h–07h). Вертикальная длина волны осцилляций на профиле V_2'' составляет 5–6 км. При этом коэффициент корреляции между вариациями индивидуальных значений r_0 относительно линии регрессии r_0 на h и V_2'' составляет $r \approx 0,7$, что подтверждает предположение о наличии связи r_0 с динамическими процессами в атмосфере.

Возможной причиной малых значений коэффициентов модели r_0 , полученных авторами в эксперименте, является то, что в основе обработки экспериментального материала лежит предположение об однородной нестратифицированной атмосфере. Для корректной оценки коэффициентов модели начального радиуса необходимо производить учет влияния динамических процессов на физические параметры метеорного следа.

Не вызывает сомнения то, что экспериментальный материал, по которому производится оценка коэффициентов модели начального радиуса, представляет собой цензурированную выборку. Ограничения двумерного распределения $r_0(h, v)$ вызваны рядом причин: физическими процессами, происходящими при формировании следа, особенностями отражения радиоволн от метеорного следа, аппаратной селекцией, отбором следов при обработке. Статистический анализ двумерного распределения r_0 показывает, что его одностороннее усечение происходит на краях скоростных интервалов и высотных слоев. Распределения r_0 , соответствующие среднему значению скорости и высоты, подчинены нормальному закону. Используя неискаженную ветвь распределения r_0 , можно восстановить «истинное» распределение r_0 и уточнить среднее значение r_0 , соответствующее тому или иному скоростному интервалу или высотному слою. Восстановление распределений осуществлялось методом наименьших квадратов, при этом стандартное отклонение восстанавливаемого распределения находилось совместно со средним значением распределения, по неискаженной ветви распределения. Воспользуемся полученными скорректированными зависимостями начального радиуса для оценки коэффициентов модели r_0 . При этом возникает проблема, связанная с мультиколлинеарностью, выражающейся в сильной корреляционной связи независимых переменных, которыми в данном случае является высота и скорость метеорного тела. В качестве основной меры борьбы с мультиколлинеарностью предлагается исключение одной из мультиколлинеарных переменных; в данном случае это сводится к тому, что один из коэффициентов модели начального радиуса необходимо задавать принудительно. Существует ряд других методов, позволяющих повысить устойчивость оценок коэффициентов регрессии, одним из которых является метод ридж-оценок линейной регрессии [22]. Результаты оценок коэффициентов модели начального радиуса по скорректированным зависимостям $r_0(V), r_0(h)$ представлены в табл. 6. Ридж-оценки коэффициентов модели r_0 , полученные по скорректированной зависимости, заметно увеличились по сравнению с оценками, полученными по исходной зависимости, однако они остаются меньшими, чем для любой теоретической модели начального радиуса.

В ряде случаев для интерпретации данных радионаблюдений необходимо знать влияние ос-

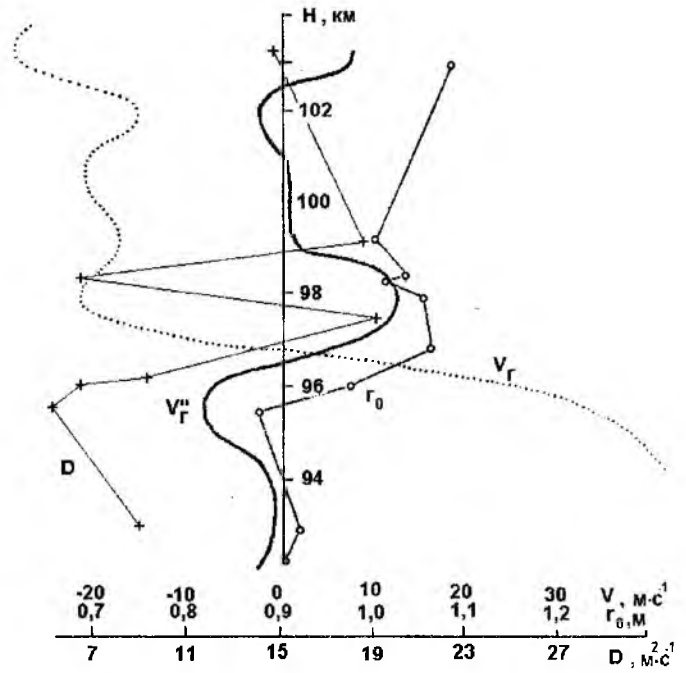


Рис. 5

Таблица 6

Метод		Коэффициенты модели	
		a	b
Пошаговая множественная регрессия	1 шаг	-	1,56
	2 шаг	0,04	1,17
Коэффициент a задан принудительно		0,00	1,56
		0,05	1,16
		0,10	0,75
		0,15	0,35
Ридж-оценка		0,14	0,29

лабяющего действия начального радиуса для всей совокупности наблюдаемых метеоров, а не для отдельной, специально отобранной по количественным критериям, относительно малочисленной группе. Для определенного по всей совокупности наблюдаемых метеоров начального радиуса можно ввести термин эффективный начальный радиус. Одним из возможных способов определения эффективного начального радиуса является статистический метод, в основе которого лежит измерение численности метеоров на двух длинах волн при одновременных параллельных радионаблюдениях метеоров. В этом случае условия наблюдения будут одинаковы для обоих комплексов (при одинаковой ориентации антенн), и на численность метеоров будут влиять только аппаратурные факторы и ослабляющее действие начального радиуса. Отношение численности метеоров, зарегистрированных на двух длинах волн, равно

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_1^{1,5} P_1^{0,5} U_{20} \exp\left[-(\kappa_1 r_0)^2 (s-1)\right]}{\lambda_2^{1,5} P_2^{0,5} U_{10} \exp\left[-(\kappa_2 r_0)^2 (s-1)\right]}$$

здесь U_{10} , U_{20} – пороги регистрации; P_1 , P_2 – мощность передающих устройств; κ_1 , κ_2 – волновые числа для длин волн λ_1 и λ_2 ; s – параметр распределения метеорных тел по массе.

Отсюда эффективный начальный радиус

$$r_{03} = \left(\frac{\ln \frac{N_1}{N_2} - \ln \frac{\lambda_1^{1,5} P_1^{0,5} U_{20}}{\lambda_2^{1,5} P_2^{0,5} U_{10}}}{(s-1)(\kappa_2^2 - \kappa_1^2)} \right)^{0,5}$$

Значение параметра s экспериментально определяется по интегральному распределению амплитуд отраженных сигналов.

Для иллюстрации этого метода рассмотрим сравнительные результаты, полученные при обработке в первом цикле двухчастотных измерений r_0 . Параметр s определялся по распределениям амплитуд для обеих длин волн и среднее значение параметра $s = 2,15$. Эффективный начальный радиус, полученный статистическим методом, $r_{03} = 1,31$ м. Среднее значение начального радиуса, полученное традиционным методом на этом же массиве данных, составило $r_0 = 1,33$ м.

Наличие суточного хода средней скорости и высоты метеоров позволяют использовать данный метод для исследования зависимости начального радиуса от скорости метеоров и плотности атмосферы.

Коэффициенты модели начального радиуса могут быть получены косвенным методом, путем подбора параметров метеорных явлений и сравнения расчетной и экспериментальной зависимостей средней высоты от скорости метеорных тел. На рис. 6 представлена экспериментальная и расчетная зависимости $h(V)$, полученные путем подгонки параметров модели и констант физической теории метеоров.

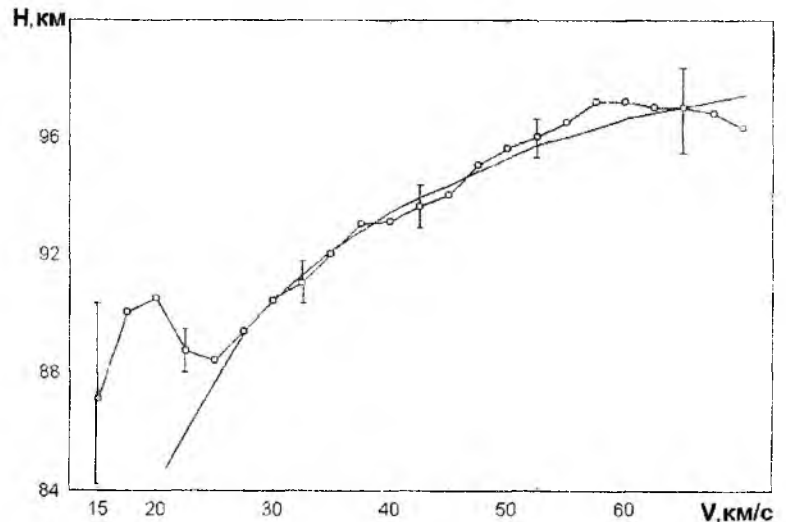


Рис. 6

Наилучшее согласие расчетной и экспериментальной зависимостей на интервале скоростей 25...72 км/с получено при следующем виде моделей и значений констант физической теории метеоров:

- коэффициенты модели начального радиуса $a = 0,45$, $b = 0,4$;
- коэффициент ионизации $\beta = cv^4$, $\beta = 0,025$ при $v = 40$ км/с;
- коэффициент амбиполярной диффузии $D = 8,0 \exp\left(\frac{h-95,0}{5,45}\right)$, здесь h – км;

– плотность метеорных тел $\delta = 3,5 \text{ г-см}^{-3}$.

Проверка гипотезы о согласии расчетной и экспериментальной зависимостей осуществлялась по критерию χ^2 . Для интервала скоростей 25...72 км/с и уровня значимости 0,05 гипотеза не отвергается. При скоростях метеорных тел $v < 25 \text{ км/с}$ наблюдаемые средние высоты лежат выше теоретических (максимальное превышение составляет около 7 км), что можно объяснить низким значением коэффициента ионизации, принятого для расчетов в области малых скоростей. В работе [23] отмечается, что на малых скоростях, кроме механизма ударной ионизации, существуют дополнительные механизмы, приводящие к увеличению r_0 , а соответственно и к повышению наблюдаемых средних высот метеоров. Кроме этого причиной повышения наблюдаемых высот метеоров в области малых скоростей может служить дробление метеорных тел.

Полученные результаты не противоречат современным физическим представлениям, но к полученным таким образом коэффициентам надо относиться осторожно, поскольку эти параметры обеспечивают лишь статистическое совпадение экспериментальной зависимости и теоретической модели метеорных явлений.

Как уже отмечалось, средние значения начального радиуса, плотности атмосферы и скорости метеорного тела в каждом частном эксперименте определяются достаточно точно. Поэтому представляет интерес воспользоваться результатами нескольких экспериментов для получения зависимости r_0 от плотности атмосферы и скорости метеорного тела. Коэффициенты модели начального радиуса, полученные методом наименьших квадратов с привлечением средних значений параметров из других источников [4, 7, 8, 10, 11] и результатов данной работы, равны: $a = 0,995$, $b = 0,102$. Можно отметить, что зависимость от плотности атмосферы практически полностью совпала с теоретическими данными. Малое отличие средних значений скорости, полученных в разных экспериментах, не позволяет достаточно надежно определить зависимость начального радиуса от скорости метеорного тела.

Список литературы: 1. *Opik E.J.* Problems in the physics of meteors // Amer. J.Phys.. 1958. 26, №2. P.70-80. 2. *Manning L.A.* The initial radius of meteoric ionization trail // J. Geofys. Res. 1958. 63, №1. P.181-196. 3. *Лоцилов Ю.А.* О начальном радиусе метеорного следа // Труды городской астрономической обсерватории КГУ. 1961. №33. С.70-74. 4. *Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н.* Радиолокационные исследования метеорных явлений. М.: Изд-во АН СССР, 1961. №7.123 с. 5. *Оксюк Ю.Д.* Влияние механизма ионизации на начальный радиус ионизированного метеорного следа // Метеоры: Сб. ст. № 2, 3. 1963. С. 34-42. 6. *Тохтасьев В.С.* Формирование начального радиуса метеорного следа // Известия АОЭ. Из-во КГУ. 1976. №41, 42. С. 122-128. 7. *Greenhow J.S.* The importance of initial radius on the apparent height and number distribution of meteor echoes// Monthly Not. Roy. Astron. Soc.1960. 121. №2. P. 183-196. 8. *Kashceyv B.L., Lebedinets V. N.* The inintial radius of ionized meteor trails // Smithson. Contribs Astrohhys.1963. P. 19-22. 9. *Байраченко И. В.* Измерения начальных радиусов ионизированных метеорных следов из параллельных наблюдений радиометеоров на двух длинах волн // Геомагнетизм и аэрономия.1965. Т. 5, № 3.С. 460-464. 10. *Мойся Р.И.* Радиолокационные исследования метеоров на нескольких частотах.Определение начального радиуса ионизированного метеорного следа. Дисс. Киев. 1967. 11. *Делов Н. А., Жуков В. В.* Исследование начального радиуса метеорных следов с использованием высотометрического устройства // Проблемы космической физики. 1975. Вып. 10. С. 68-76. 12. *Чумак Ю.В.* Взаимодействие радиоволн с плазмой метеорного следа. Дисс.Киев.1979. 13. *Кащеев Б.Л., Лебединец В. Н., Лагутин М. Ф.* Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука.1967.260 с. 14. *Лебединец В.Н., Соснова А. К.* Отражение радиоволн от метеорных следов II. Дифракционные картины // Геомагнетизм и аэрономия.1969.Т. 9, №4. С. 680-688. 15. *Олейников В.Н.* Эффективность критериев отбора ненасыщенных метеорных следов // Метеорные исследования. М: ВИНТИ.1985. № 10. С. 53-58. 16. *Кащеев Б.Л., Волощук Ю.И., Ткачук А.А. и др.* Метеорная автоматизированная радиолокационная система // Метеорные исследования. 1977. №4. С. 11-61. 17. *Кащеев Б.Л., Жуков В.В.* Автоматический угломер Сообщение 1. Принципы построения // Радиотехника. 1978. Вып.47. С.3-9. 18. *Жуков В. В., Олейников А.Н., Олейников В. Н.* Автоматический угломер Сообщение 2.Предварительная обработка сигналов // Радиотехника. 1978. Вып.47. С. 9-17. 19. *Бабаджанов П. Б., Крамер Е. Н.* Методика и некоторые результаты фотографических исследований метеоров. М.: Изд-во АН СССР, 1963.142с. 20. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика.М.: Наука, 1969. 824 с. 21. *Скорер Р.* Аэродинамика окружающей среды. М.: Мир. 1980. 549 с. 22. *Демиденко Е.З.* Линейная и нелинейная регрессии.М.: Финансы и статистика. 1981. 302 с. 23. *Тохтасьев В.С.* О дополнительных механизмах ионизации в метеорных следах // Метеорное распространение радиоволн. Казань: Из-во КГУ.1970.Вып.7.С.51 □ 64.

Харьковский государственный технический университет радиотехники

Поступила в редколлегию 14.05.2001