

Для цитирования: Гайдаев А.А. Наклонное рассеяние радиоволн метеорными следами в импульсном режиме. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4): 42-52
DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-42-52

For citation: Gaydayev A. A. Transverse scattering of radio waves by meteor trails in pulsed mode. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43 (4):42-52 (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-42-52

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 538.56: 621.396.2+523.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2016-43-4-42-52

НАКЛОННОЕ РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН МЕТЕОРНЫМИ СЛЕДАМИ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Гайдаев А. А.

Дагестанский государственный педагогический университет,
367003, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 57,
e-mail: aidislovo@mail.ru

Резюме: *Цель.* Целью данной работы является разработка математического аппарата для описания радиосигналов рассеянных метеорным следом при наклонном распространении радиоволн с учетом ряда ослабляющих факторов. **Метод.** Исследование проведено с использованием математического анализа в приложении к теории метеорного отражения радиоволн. **Результат.** Рассмотрены отдельные вопросы рассеяния радиоволны от недоуплотненных и переуплотненных метеорных следов при их радиозондировании в импульсном и непрерывном режиме. Рассмотрены механизмы, влияющие на формирования амплитуды радиосигнала, отраженного от метеорного следа. Получены математические выражения, позволяющие оценить величину мощности, начальной амплитуды сигналов, отраженных от недоуплотненных и переуплотненных метеорных следов в разных режимах работы радиопередающей станции. **Вывод.** Показано, что вытекающие из теории наклонного метеорного распространения радиоволн выкладки для радиолокационного способа зондирования метеорных следов совпадают с существующей теорией наклонного метеорного распространения радиоволн. Результаты исследования могут быть полезны для дальнейшего развития теории наклонного метеорного распространения радиоволн, и особенно, теории распределения амплитуд отраженных сигналов. Результаты исследования могут быть использованы как для описания наклонного рассеяния метеорными следами в непрерывном режиме, так и для радиолокационного зондирования метеорных следов в обоих режимах.

Ключевые слова: метеорный след, рассеяния, наклонное распространение, радиоволна, зона Френеля

TECHICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

TRANSVERSE SCATTERING OF RADIO WAVES BY METEOR TRAILS IN PULSED
MODE

Abidi A. Gaydaev

*Dagestan State Pedagogical University,
57 M. Yaragskogo Str., Makhachkala 367003, Russia
e-mail: aidislovo@mail.ru*

Abstract: Objectives. *The aim of this work is to develop a mathematical tool for describing the scattering of radio signals by meteor trails associated with radio wave dispersion taking into account a range of extenuatory factors. Method* The study was carried out using mathematical analysis in the application of meteorite radio wave reflection theory. **Results** *The questions of the scattering of radio waves from undercompacted and overcompacted meteor trails, as measured by radio sounding in a continuous pulse mode, are considered separately. The mechanisms that influence the formation of the amplitude of the RF signal reflected from a meteor trail are discussed in detail. The obtained mathematical expressions enable the initial reflected signal amplitudes from undercompacted and overcompacted meteor trails to be evaluated for power capacity in the different operation modes of radio transmitting stations. Conclusion* Following from the theory of the scattering of radiowaves by meteor trails, it is shown that the radiolocation calculation method for sounding meteor trails coincides with the existing theory. The results of the study may be useful for further development of transverse meteor wave propagation theory, especially for the theory of amplitude distribution reflection response. The results may also be used to describe transverse scattering of meteorite trails, as well as for radiolocalisation of meteor trails in both modes.

Keywords: *meteor trail, scattering, transverse propagation, radio waves, Fresnel zone*

Введение. Радиотехнические методы исследования метеорных следов позволили за последние годы существенно продвинуть направления изучения метеорного вещества в околоземном пространстве. В Казани такие исследования проводились в проблемной радиоастрономической лаборатории под руководством К.В. Костылева [19], О.И. Бельковича, В.В. Сидорова, Р.А. Курганова, а в Киеве была разработана метеорная автоматизированная радиолокационная система МАРС под руководством Б.Л. Кашеева, В.Н. Лебеденца, Ю.И. Волощука и др. За последние пятьдесят лет построена статистическая теория радиолокации метеоров [11,12]. Разработана компьютерная модель метеорного радиоканала связи «КАМЕТ» [17].

Вместе с тем рассеяние радиоволн от метеорных следов используется и в практических целях для передачи информации на расстояниях, достигающих до 2000 км. В США и Канаде метеорную радиосвязь используют для мониторинга окружающей среды [2,8]. Ее используют в Аргентине, Индонезии, Египте и других странах. В России и на Украине метеорная радиосвязь применяется в большинстве случаев для синхронизации разнесенных шкал времени [5,6,21,22].

Метеорная связь используется и в военных целях для передачи шифрованной информации на больших расстояниях в УКВ диапазоне [18]. На трассах, расположенных в полярных и субполярных областях, это - наиболее действенное средство связи.

Результаты радиолокационных исследований по изучению метеорных радиоэхо [3,7,23] позволяют повысить качество прогнозирования наклонного метеорного распространения. Большая работа по обобщению результатов экспериментального исследования наклонного метеорного распространения радиоволн проведена Р.А.Кургановым [20].

Вопросы выверки энергетических отношений в метеорных радиолиниях изложены в работах [13,14,15] на базе статистической теории.

Постановка задачи. При использовании импульсного или непрерывного режима излучения при наклонном зондировании метеорных следов следует учесть ряд аспектов, влияющих на величину амплитуды сигнала, отраженного от метеорного следа, которые не были учтены в работах [14, 19, 20]. Решению этой задачи посвящена данная научная статья.

Методы исследования. Аналитические методы исследования источников литературы; критический анализ существующей теории; использование методов математического анализа для решения поставленной задачи.

Одной из основных характеристик сигнала, отраженного от метеорного следа, является его максимальная амплитуда. Согласно теоретическим и экспериментальным исследованием рассеяния радиоволн на метеорных следах, характер и мощность отраженного сигнала существенно зависит от величины линейной электронной плотности в метеорном ионизированном следе (столбе) [4,9,10,16]. Согласно этой теории метеорные следы можно разделить в основном на два типа - недоуплотненные и переуплотненные. Это связано с механизмом рассеивания радиоволн метеорным следом.

При небольшой концентрации электронов в следе, т.е. для недоуплотненных следов предполагается, что рассеяние радиоволн происходит на свободных электронах, тогда как для переуплотненных следов рассеяние происходит как от металлического цилиндра, радиус которого определяется из условия равенства нулю диэлектрической проницаемости внутри следа [1].

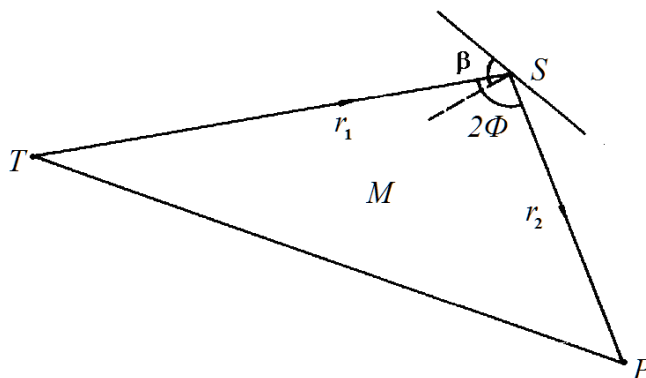


Рис.1. Геометрия отражения сигнала от метеорного следа при наклонном распространении радиоволн

Fig.1. The geometry of reflection of a signal from a meteor track with an oblique Propagation of radio waves

Принимая, что мощность при наклонном зондировании быстро возрастает в течение долей секунды нужных метеору для пересечения основной зоны, и достигает максимального значения доля рассеивания в тот момент времени, когда первая зона Френеля оказывается полностью сформированной, то мощность эхо-сигнала может быть определена:

$$P(0) = \frac{P_T}{16\pi^4} \frac{\lambda G_1 \cdot G_2 \cdot g \cdot \cos^2 \mu}{r_1 r_2 (r_1 + r_2) (1 + \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \Phi)} \quad (1)$$

Здесь P_T - излучаемая мощность, G_1 и G_2 - коэффициент усиления передающей и приемной антенн для направлений TS и SP соответственно, μ - угол между электрическим вектором падающей волны и той компонентой, которая принимается приемной антенной, λ - длина волны, g - коэффициент отражения, β - угол между метеорным следом и плоскостью, проведенной через пункты приема, передачи и отражающую точку метеорного следа; 2Φ - угол TSP (рис. 1).

Из (1) получим выражения для радиолокационного случая, полагая, что длина трассы равна нулю, тогда $r_1 = r_2 = d$, $\Phi = 0$, мощность эхо-сигнала равна:

$$P(0) = \frac{P_T G_1 G_2 \lambda^3}{32\pi^4 d^3} g^2 = F^2 d^{-3} g^2.$$

Здесь

$$F = \sqrt{\frac{P_T G_1 G_2 \lambda^3}{32\pi^4}}.$$

Представленное выражение совпадает с формулой, полученной Бельковичем О.И. [12]. Здесь и ниже все выкладки, вытекающие из наклонного распространения и относящиеся к радиолокационному случаю, представлены в тех же обозначениях, что и в работе [12]. Совпадения этих выкладок свидетельствует об общности данной теории, и ее правильности.

Амплитуду A зарегистрированного сигнала ко входу приемника в общем случае можно записать в виде

$$A = \sqrt{R_{ex} P(0)}, \quad (2)$$

где R_{ex} - входное сопротивление приемника.

В случае рассеивания вперед для недоуплотненных следов, если электрический вектор падающей волны параллелен оси следа [4,10], максимальный коэффициент отражения равен:

$$g_1 = \pi r_e e^{-(kr)^2 \cos^2 \Phi} \alpha = g_{01} e^{-(kr)^2 \cos^2 \Phi} \alpha. \quad (3)$$

Здесь $r_e = 2,81 \cdot 10^{-13}$ см - классический радиус электрона, r - начальный радиус метеорного следа, α - линейная электронная плотность в точке отражения.

Для радиолокационного случая коэффициент отражения g равен:

$$g_1 = \pi r_e \cdot \exp\left\{- (kr)^2\right\} \alpha = g_{01} \cdot \exp\left\{- (kr)^2\right\} \alpha, \quad (4)$$

а для переуплотненных следов в обоих случаях

$$g_2 = 0,84 \left(\frac{\pi^2}{4} e^{-1} r_e \alpha \right)^{1/4} = g_{02} \cdot \alpha^{1/4}, \quad (5)$$

g_{01} и g_{02} введенные в формулах не зависят от параметров метеора и атмосферы:

$$g_{01} = \pi r_e, \quad (6)$$

$$g_{02} = 0,84 \left(\frac{\pi^2}{4} e^{-1} r_e \right)^{1/4}. \quad (7)$$

Коэффициент 0,84 в формулах (5) и (7) введен Маннингом [4] после учета ослабления сигнала за счет рефракции волны во внешних областях ионизированного следа [11,12].

При анализе распределения амплитуд метеорных сигналов считается, что для метеорных следов с α меньшей некоторой переходной α_c коэффициент отражения определяется по формуле (4), т.е. следы с $\alpha < \alpha_c$ считаются недоуплотненными. Для $\alpha > \alpha_c$ g определяется из (5) — переуплотненные следы. Величина α_c определяется из условия непрерывности амплитуды как функции электронной плотности α , т. е. из условия $g_1 = g_2$:

$$g_{01} e^{-(kr \cos \Phi)^2} \alpha_c = g_{02} \alpha_c^{1/4},$$

$$\alpha_c = \alpha_{co} \exp \left\{ \frac{4}{3} (kr \cos \Phi)^2 \right\}, \quad (8)$$

где, $\alpha_{co} = \left(\frac{g_{02}}{g_{01}} \right)^{4/3} = 6 \cdot 10^{13}$ эл/м - переходная линейная электронная плотность при условии $r = 0$, k – модуль волнового вектора.

Для радиолокационного случая, полагая $\cos \Phi = 1$, получим

$$\alpha_c = \alpha_{c0} \exp \left\{ \frac{4}{3} (kr)^2 \right\}.$$

Изменение линейной электронной плотности α вдоль метеорного следа, которая зависит от нормированной высоты [4,10,12], имеет вид:

$$\alpha = \alpha_m z(t'), \quad (9)$$

где, α_m - линейная электронная плотность в максимуме ионизации на следе,

$$z(t') = 2,25 e^{-t'} \left(1 - \frac{1}{3} e^{-t'} \right)^2. \quad (10)$$

Здесь, t' - нормированная высота с началом отсчета на высоте h_m максимума ионизации на данном следе:

$$t' = \frac{h - h_m}{H},$$

где, h – высота отражающей точки на метеорном следе, H – приведенная высота атмосферы.

С учетом (1) - (7), (10), запишем формулы амплитуды сигнала.

Для недоуплотненных следов амплитуда равна:

$$A = C \frac{\cos \mu \cdot g_{01} \alpha_m z(t') \cdot e^{-(kr \cos \Phi)^2}}{\left[r_1 r_2 (r_1 + r_2) (1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \Phi) \right]^{1/2}}, \quad (11)$$

где, $C = \sqrt{R_{\text{ex}}} F$.

Для случая радиолокационного зондирования, полагая $r_1 = r_2 = d$, $\Phi = 0$, получим

$$A = C d^{-3/2} g_{01} \cdot \exp \left\{ - (kr)^2 \right\} \alpha_m z(t').$$

Для переуплотненных следов амплитуда имеет следующий вид:

$$A = C \frac{g_{02} \alpha_m^{1/4} \cdot z^{1/4}(t') \cos \mu}{\left[r_1 r_2 (r_1 + r_2) (1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \Phi) \right]^{1/2}}, \quad (12)$$

и в радиолокационном случае:

$$A = C \cdot d^{-3/2} g_{02} \cdot \alpha_m^{1/4} z^{1/4}(t').$$

Дельностью T метеорного эхо-сигнала будем считать превышение сигналом порогового уровня U .

Изменение амплитуды A метеорного сигнала от недоуплотненного следа во времени можно записать в виде:

$$A = A_0 \cdot \exp(-T / \tau), \quad (13)$$

$$\tau = \frac{\lambda^2}{16\pi^2 D(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \Phi)}, \quad (14)$$

здесь, A_0 — максимальная амплитуда сигнала в момент времен $T = 0$, τ — постоянная спада сигнала метеорного радиоотражения.

Для радио-эхо, приравнявая $\Phi = 0$, получим известную формулу:

$$\tau = \frac{\lambda^2}{16\pi^2 D}.$$

Если в выражение (13) вместо A_0 подставить значение пороговой амплитуды U , то есть минимальной регистрируемой амплитуды сигнала, то легко получить длительность радиоэхо от недоуплотненного следа:

$$T = \tau \ln \frac{A}{U}. \quad (15)$$

Для эхо-сигнала от переуплотненного метеорного следа характерно более медленное нарастание амплитуды, довольно пологая вершина и сравнительно крутой спад.

Время превышения таким сигналом порогового уровня имеет сложный характер, поэтому в данной статье не будем затрагивать этот вопрос.

Максимальная зарегистрированная амплитуда сигнала от недоуплотненного следа будет меньше, чем по формуле (11) за счет двух эффектов — диффузии следа за конечное время пролета метеорным телом первой зоны Френеля и за счет минимального времени, необходимого для регистрации метеорного следа соответствующей станцией [12]. График, приведенный на рис. 2, демонстрирует влияние этих эффектов на амплитуду сигнала.

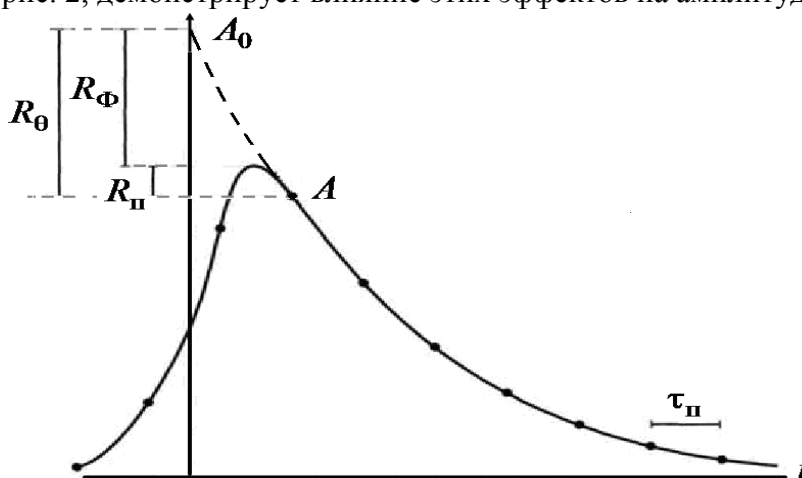


Рис. 2. Временная зависимость амплитуды радиосигнала $A(t)$, отраженного от недоуплотненного следа

Fig. 2. Time dependence of the amplitude of the radio signal of the reflected From an uncomplicated trace

Временная зависимость амплитуды $A(t)$ для радиосигнала, рассеянного недоуплотненным следом для идеального случая показана пунктирной линией ($v = \infty$, $r_0 = 0$), и для случая, когда метеороид движется с конечной скоростью и начальным радиусом - сплошной линией.

На рис.2 также представлены возможные поправки амплитуды сигнала R_{Φ} за счет диффузионного процесса в следе за время образования главной зоны Френеля, а также R_{Π} - поправка, вызванная импульсом сигнала передающей станции с периодом повторения τ_{Π} , который может не совпадать с моментом максимума амплитуды.

$$\text{Суммарный эффект} - R_{\theta} = R_{\Phi} + R_{\Pi}$$

Тогда амплитуда принимаемого сигнала уменьшится на эту величину $A = A_0 - R_{\theta}$. Учет этого эффекта в работе [12] представлен в более удобной форме для выкладок в виде множителя, который приведен ниже.

Зеркально отраженный от метеорного следа принимаемый сигнал проходит в основном от главной зоны Френеля L_{Φ} .

В случае наклонного зондирования она имеет центр в точке, расположенной на оси следа таким образом, что сумма ее расстояний r_1 от передатчика T и r_2 от приемника P представляет минимальный путь луча (рис. 1).

Величина этой зоны равна:

$$L_{\Phi} = 2 \left[\frac{\lambda r_1 r_2}{(r_1 + r_2)(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \Phi)} \right]^{1/2} \quad (16)$$

В случае возвратного зондирования $r_1 = r_2 = d$, $\beta = \pi/2$

$$L_{\Phi} = \sqrt{2d\lambda}.$$

Обозначим через τ_{Φ} — время пролета метеорным телом половины зоны Френеля, тогда

$$\tau_{\Phi} = \frac{L_{\Phi}}{2v}, \quad (17)$$

где, v — скорость метеорного тела.

В работе [12] получена функция Φ_{0c} , которая учитывает влияния ослабляющих факторов на амплитуду.

При этом учитывается высотную зависимость коэффициента диффузии

$$\tau = \tau_0 e^{-t}, \quad (18)$$

где, $t = \frac{h - h_0}{H}$. Здесь t - относительная высота с началом отсчета на характеристической высоте h_0 .

$$\Phi_{0c} = \begin{cases} \exp\{-\theta_0 e^{-t}\} & \text{при } \theta_0 \leq 1 \\ \frac{1}{2\theta_0} e^{-t} & \text{при } \theta_0 > 1 \end{cases}, \quad (19)$$

где, $\theta_0 = \frac{\tau_{\Phi} + \tau_{\Pi}}{2\tau_0}$.

В этом случае с учетом высотной зависимости начального радиуса $r = r_0 e^{at}$ и величины τ (18), формула (8) примет вид:

$$\alpha_c = \alpha_{co} \exp\left\{ \frac{4}{3} (kr_0)^2 \cdot e^{2at} \cdot \cos^2 \Phi + \theta_0 e^t \right\}, \quad (20)$$

для радиолокационного случая

$$\alpha_c = \alpha_{c0} \exp \left\{ \frac{4}{3} (kr_0)^2 e^{2at} + \theta_0 e^t \right\}.$$

Здесь, r_0 - значение начального радиуса на характеристической высоте h_0 , a - постоянная.

На метеорных радиолокационных станциях непрерывного излучения роль τ_n выполняет постоянная времени приемной и регистрирующей аппаратуры, следовательно, полученные формулы приемлемы и для этого случая.

Принимая во внимание высотную зависимость начального радиуса для метеоров с одинаковыми скоростями (19) и формулу (11) можно переписать в виде:

$$A = C \frac{\cos \mu \cdot g_{01} \cdot \exp \left\{ - (kr_0)^2 e^{2at} \cos^2 \Phi \right\} \varphi_{0c} \alpha_m z(t')}{\left[r_1 r_2 (r_1 + r_2) (1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \Phi) \right]^{1/2}}. \quad (21)$$

Для радиолокационного случая получим:

$$A = C \cdot d^{-3/2} g_{01} \cdot \exp \left\{ - (kr_0)^2 e^{2at} \right\} \varphi_{0c} \alpha_m z(t').$$

Обсуждение результатов. Амплитуда сигнала, отраженного от недоуплотненных метеорных следов при наклонном метеорном распространении будет ослаблена за счет конечности времени пролета метеорным телом первой зоны Френеля и за счет минимального времени, необходимого для регистрации метеорного следа соответствующей станцией, как показано на рисунке 2.

Учет ослабляющего действия определяется множителем φ_{0c} . Влияние этой функции будет значительным, если передающая станция работает в импульсном режиме и время срабатывания приемного устройства будет заметным.

Формула для амплитуды радиосигнала рассеянного недоуплотненным следом (21), полученная в случае работы передатчика в импульсном режиме, может быть использована и для непрерывного излучения. При этом в ослабляющей функции φ_{0c} (19) не должна присутствовать τ_Φ , а роль τ_n выполняет постоянная задержка времени регистрирующей аппаратуры.

Вывод. Полученные выкладки в данной статье для наклонного зондирования метеорных следов позволяют по новому подойти к построению общей статистической теории метеорных радиоотражений, которая воплотила бы в себя и радиолокационную теорию.

Они также могут быть использованы, как для описания наклонного рассеяния метеорными следами в непрерывном режиме, так и для радиолокационного зондирования метеорных следов в обоих режимах.

Основные физические выражения, приведенные в данной статье, существенно повлияют на развитие ряда тем теории наклонного метеорного распространения радиоволн, и особенно на теорию распределения амплитуд отраженных сигналов, ранее опубликованной в работах [14,15,20].

Библиографический список:

1. Azarenko N. A, Galaydych V. K. Electromagnetic diffraction by metal cylinder coated with inhomogeneous magneto active plasma sheath. «Journal of Kharkov University», No. 808. – 2008. – P. 73-76.
2. Cannon P. S., Shukia A. K. Optimum antenna spacing for diversity in meteor burst communications systems. Report AGARD-CP-486. NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development. – 1991. – P. 61.

3. Jones, J. & Collins, J. G. The mass distribution of radio meteors and the full-wave scattering theory. *Monthly of the Royal Astronomical Society*, Vol. 166. – 1974. – P. 529-542.
4. Manning L. A. The strength of meteoric echoes from dense columns. *Can. J. Phys.*, 4, 219, 1953.
5. Mathews J. Radio science aspects of radar meteor observations: where are we? /2013 US National Committee URSI National Radio Science Meeting. Boulder, Colorado, USA 9 - 12 January, 2013. – P. 45.
6. Yoshida H., Terasawa T. The Forward Scattering Meteor Radio Echo Observation using a GPS-synchronized Multiple Receiving Stations. /*Asteroids, Comets, Meteors*. – 2012. – P. 6187.
7. Антипов И. Е. Об использовании высоких частот в метеорной радиолокации // *Радиотехника: Всеукр. межвел. науч.-техн. сб.* - 2012. - Вып. 169. - С. 55-59.
8. Антипов И. Е., Коваль Ю.А., Обельченко В.В. Развитие теории и совершенствование радиометеорных систем связи и синхронизации. – Харьков: Коллегиум. – 2006.–308 с.
9. Антипов. И. Е. Автоматизированный алгоритм распознавания и анализа метеорных АВХ // *Радиотехника: Всеукр. межвел. науч.-техн. сб.* – 2011. Вып. 165. – С. 56-62.
10. Байраченко И. В. О рассеянии радиоволн на недоуплотненных метеорных следах. /Сборник работ по международному геофизическому году. Вып 2. Киев: Изд-во киевского университета. – 1963. – С. 34.
11. Белькович О. И. Статистическая теория метеороидов. Казань: КГУ.–1988.– 301 с.
12. Белькович О. И. Статистическая теория радиолокации метеоров. Казань: КГУ. – 1971. – 104 с.
13. Белькович О.И., Гайдаев А.А., Курганов Р.А., Лукин И.В. Определение энергетических потерь в метеорных линиях радиосвязи// Тез. докл. X Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. М.: – 1972. - С. 507-511.
14. Гайдаев А. А. Выверка энергетических соотношений в метеорных радиополосах. Махачкала: ДГПУ. – 2006. – 116 с.
15. Гайдаев А.А., Белькович О.И., Зуллийев А.М. Распределение амплитуд метеорных сигналов при наклонном распространении радиоволн. Известия НЦ СКВШ, Ростов-на-Дону, № 4. – 1983, – С. 44-48.
16. Д. Мак-Кинли. Методы метеорной астрономии. М.: Мир, 1964. 383 с.
17. Карпов А. В. Компьютерная модель метеорного радиоканала // *Изв. вузов. Радиофизика*. Т. 38. – 1995. – С. 1177-1186.
18. Карпов А. В., Сидоров В. В., Сулимов А. И. Метеорная генерация секретных ключей шифрования для защиты открытых каналов связи. // *Информационные технологии и вычислительные системы*. № 3. – 2008. – С. 45-54.
19. Костылев К.В. Астрономические основы метеорной радиосвязи. Казань: КГУ. – 1970. – 142 с.
20. Курганов Р.А. Прогнозирование наклонного рассеивания радиоволн метеорными ионизациями. Казань: КГУ. – 1973. – 184 с.
21. Харченко Е. В. Метод расчета областей наиболее вероятного появления метеорных следов, имеющих точку зеркального отражения. // *Радиотехника*. – Харьков: ХНУРЭ, Вып. 166. – 2011. – С. 186-192.
22. Харченко Е. В. Рассеяние радиосигнала на метеорном следе. /*Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка*. № 966, випуск 18. – 2011. – С. 90-96.
23. Черкас Ю.В., Волощук Ю. И. Выявление метеорных потоков астероидного происхождения вместе с их родительскими телами // *Прикладная радиоэлектроника: Науч.-техн. журнал*. Том. 10, №1. – 2011. - С. 73-77.

References:

1. Azarenko N.A., Galaydych V.K. Electromagnetic diffraction by metal cylinder coated with inhomogeneous magneto active plasma sheath. *Journal of Kharkov University*. 2008;808:73-76.
2. Cannon P.S., Shukia A.K. Optimum antenna spacing for diversity in meteor burst communications systems. Report AGARD-CP-486. NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development. 1991. 61 p.
3. Jones J., Collins J.G. The mass distribution of radio meteors and the full-wave scattering theory. *Monthly of the Royal Astronomical Society*. 1974;166:529-542.
4. Manning L.A. The strength of meteoric echoes from dense columns. *Canadian Journal of Physics* 1953;4:219.
5. Mathews J. Radio science aspects of radar meteor observations: where are we? 2013 US National Committee URSI National Radio Science Meeting. Boulder, Colorado, USA; 9–12 January, 2013. 45 p.
6. Yoshida H., Terasawa T. The Forward Scattering Meteor Radio Echo Observation Using a GPS-synchronized Multiple Receiving Stations. *Asteroids, Comets, Meteors*. 2012. 6187 p.
7. Antipov I.E. Ob ispolzovanii vysokikh chastot v meteornoy radiolokatsii. *Radiotekhnika: Vseukr. mezhvel. nauch.-tekhn. sb.* 2012;169:55-59. [Antipov I.E. On the use of high frequencies in meteoric radiolocation. *Radiotechnics:All-Ukrainian Interdepartmental Scientific and Technical Collection*. 2012;169:55-59. (In Russ.)]
8. Antipov I.E., Koval Yu.A., Obelchenko V.V. Razvitie teorii i sovershenstvovanie radiometeornykh sistem svyazi i sinkhronizatsii. *Kharkov: Kollegium*; 2006. 308 s. [Antipov I.E., Koval Yu.A., Obelchenko V.V. The development of theories and improvement of radio meteoric communications network and synchronizing. *Kharkov: Kollegium*; 2006. 308 p. (In Russ.)]
9. Antipov I.E. Avtomatizirovannyi algoritm raspoznavaniya i analiza meteornykh AVKh. *Radiotekhnika: Vseukr. mezhved. nauch.-tekhn. sb.* 2011;165:56-62. [Antipov. I.E. The automated recognition algorithm and the analysis of meteoric amplitude-time characteristics. *Radiotechnics:All-Ukrainian Interdepartmental Scientific and Technical Collection*. 2011;165:56-62. (In Russ.)]
10. Bayrachenko I.V. O rasseyanii radiovoln na nedouplotnennykh meteornykh sledakh. *Sbornik rabot po mezhdunarodnomu geofizicheskomu godu. Vyp 2. Kiev: Izd-vo kievskogo universiteta*; 1963. 34 s. [Bayrachenko I.V. About the radio scattering on undercompacted meteor trails. *Iss. 2. Kiev: Kiev University Publ.*; 1963. 34 p. (In Russ.)]
11. Belkovich O.I. Statisticheskaya teoriya meteoroidov. *Kazan: KGU*; 1988. 301 s. [Belkovich O.I. *Statistical theory of meteoroids. Kazan: KSU*; 1988. 301 p. (In Russ.)]
12. Belkovich O.I. Statisticheskaya teoriya radiolokatsii meteorov. *Kazan: KGU*; 1971. 104 s. [Belkovich O.I. *Statistical theory of meteor radar. Kazan: KSU*; 1971. 104 p. (In Russ.)]
13. Belkovich O.I., Gaydaev A.A., Kurganov P.A., Lukin I.V. Opredelenie energeticheskikh poter v meteornykh liniyakh radiosvyazi. *Tez. dokl. X Vsesoyuznaya konferentsiya po rasprostraneniyu radiovoln. M.*; 1972. 507-511 s. [Belkovich O.I., Gaydaev A.A., Kurganov P.A., Lukin I.V. Power losses definition in meteor-burst links of radio communication. *Theses of 10th All-Union Conference on Radio-Wave Propagation. Moscow*; 1972. 507-511 s. (In Russ.)]
14. Gaydaev A.A. Vyverka energeticheskikh sootnosheniy v meteornykh radioliniyakh. *Makhachkala: DGPU*; 2006. 116 s. [Gaydaev A.A. *Regulation of energy relation in meteor radio links. Makhachkala: DSPU*; 2006. 116 p. (In Russ.)]
15. Gaydaev A.A., Belkovich O.I., Zulliev A.M. Raspredelenie amplitud meteornykh signalov pri naklonnom rasprostranении radiovoln. *Izvestiya NTs SKVSh. Rostov-na-Donu*; 1983;4:44-48. [Gaydaev A.A., Belkovich O.I., Zulliev A.M. Meteor signals amplitude distribution at oblique radio transmission. *News of Scientific Centre scientific SKVSh. Rostov-on-Don*; 1983;4:44-48. (In Russ.)]

16. D. Mak-Kinli. *Metody meteornoj astronomii*. M.: Mir; 1964. 383 s. [D. McKinley. *Methods of meteor astronomy*. Moscow: Mir; 1964. 383 p. (In Russ.)]
17. Karpov A.V. *Kompyuternaya model meteornogo radiokanala*. *Izv. vuzov. Radiofizika*. 1995;38;1177-1186. [Karpov A.V. *Computer model of a meteor radio channel*. *News of the Higher Institutions. Radiophysics*. 1995;38;1177-1186. (In Russ.)]
18. Karpov A.V., Sidorov V.V., Sulimov A.I. *Meteornaya generatsiya sekretnykh klyuchey shifrovaniya dlya zashchity odkrytykh kanalov svyazi*. *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitelnyye sistemy*. 2008;3:45-54. [Karpov A.V., Sidorov V.V., Sulimov A.I. *Meteor generation of secret encryption keys in the protection of open communication channels*. *Information technologies and computing systems*. 2008;3:45-54. (In Russ.)]
19. Kostylev K.V. *Astronomicheskie osnovy meteornoj radiosvyazi*. Kazan: KGU; 1970. 142 s. [Kostylev K.V. *Astronomical bases of meteor burst communications*. Kazan: KSU; 1970. 142 p. (In Russ.)]
20. Kurganov R.A. *Prognozirovaniye naklonnogo rasseivaniya radiovoln meteornymi ionizatsiyami*. Kazan: KGU; 1973. 184 s. [Kurganov R.A. *Forecast of inclined radio-wave scatter by meteoric ionization*. Kazan: KSU; 1973. 184 p. (In Russ.)]
21. Kharchenko E.V. *Metod rascheta oblastey naiboleye veroyatnogo poyavleniya meteornykh sledov, imeyushchikh tochku zerkalnogo otrazheniya*. *Radiotekhnika*. Kharkov: KhNURE; 2011;166:186-192. [Kharchenko E.V. *Method of calculating the areas of the most probable emergence of the meteor bursts with a specular point*. *Radiotechnics*. Kharkov:KNURE; 2011;166:186-192. (In Russ.)]
22. Kharchenko E.V. *Rasseyanie radiosignala na meteornom slede*. *Visnik Kharkivsskogo natsionalnogo universitetu imeni V. N. Karazishna. Radiofizika ta elektronika*. 2011;966(18):90-96. [Kharchenko E.V. *The radio signal dispersion on a meteor burst*. *News of V.N. Karazin Kharkiv National University. Radiophysics and electronics*. 2011;966(18):90-96. (In Russ.)]
23. Cherkas Yu.V., Voloshchuk Yu.I. *Vyavlenie meteornykh potokov asteroidnogo proiskhozhdeniya vmeste s ikh roditelskimi telami*. *Prikladnaya radioelektronika: Nauch.-tekhn. zhurnal*. 2011;10(1):73-77. [Cherkas Yu.V., Voloshchuk Yu.I. *Identification of meteor showers of an asteroid origin together with their parental bodies*. *Applied Radio Electronics: Research and Technology Journal*. 2011;10(1):73-77. (In Russ.)]

Сведения об авторах.

Гайдаев Абиди Абдулкадырович - кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и методики преподавания.

Information about the author.

Abidi A. Gaydaev – Cand. Sc.(Phys.-Math.), Assoc. Prof.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов. The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 30.09.2016.

Received 30.09.2016.

Принята в печать 25.11.2016.

Accepted for publication 25.11.2016.