

УДК 621.396.667

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В КАНАЛАХ ГЛИССАДЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОСАДКИ В АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНАХ

Г.С. НАХМАНСОН¹, Д.В. БУЧНЕВ¹, А.В. БУНИН²¹ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж, Россия²МГТУ ГА, г. Москва, Россия

Анализируются угловые отклонения траекторий распространения радиоволн в каналах глиссады радиотехнических систем посадки воздушных судов на основании данных температурно-ветрового зондирования атмосферы. Рассчитаны параметры плотностей распределения вероятностей указанных отклонений на различных расстояниях от взлетно-посадочной полосы для четырех арктических регионов России. Показано, что величина доверительных интервалов отклонений траекторий при требуемом значении доверительной вероятности в 2–4 раза превышает размеры областей допустимых отклонений.

Ключевые слова: рефракция, атмосфера, показатель преломления, радиотехническая система посадки, траектория распространения, арктические регионы.

ВВЕДЕНИЕ

При снижении воздушного судна (ВС) по заданной траектории (глиссаде) информацию о местоположении ВС относительно взлетно-посадочной полосы (ВПП) экипажи ВС получают с помощью радиотехнической системы посадки (РТСП). Углы наклона глиссады φ относительно земной поверхности составляют $2^{\circ}40' \div 3^{\circ}15'$. Поэтому на траектории распространения радиоволн в каналах глиссады РТСП может оказывать влияние изменение показателя преломления атмосферы с высотой [1–4]. В [5, 6] приведены методика расчета угловых отклонений траекторий распространения радиоизлучения от номинальной линии глиссады и их статистических характеристик на основании зависимостей атмосферного показателя преломления от высоты, восстановленных по данным температурно-ветрового зондирования атмосферы с использованием известного соотношения [3, 4 и др.]

$$n = 1 + 10^{-6} N = 1 + 10^{-6} \cdot 77,6 T^{-1} (p + 4810 e \cdot T^{-1}),$$

где N – показатель преломления в N-единицах, T – абсолютная температура, К, p – атмосферное давление, гПа, e – парциальное давление водяного пара, гПа, и результаты расчетов на примере воронежского региона. Особенностью предложенной методики является использование при расчетах восстановленного вертикального профиля показателя преломления атмосферы с учетом ошибок измерения параметров атмосферы на фиксированных высотах [7].

В связи с тем, что в настоящее время в арктических регионах создается сеть аэродромов, необходимо иметь данные о возможных искажениях траекторий распространения радиоволн в каналах глиссады РТСП при размещении их на указанных аэродромах.

Целью настоящей работы является получение и анализ статистических характеристик угловых отклонений траекторий распространения радиоволн в каналах глиссады РТСП для арктических регионов: г. Мурманска, г. Нарьян-Мара, г. Норильска и о. Хейса архипелага Земля Франца-Иосифа.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛОВЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ТРАЕКТОРИЙ

Нахождение плотностей распределения вероятностей угловых отклонений траекторий распространения радиоизлучения в каналах глиссады РТСП в [2] проводилось на осно-

вании сформированных выборок данных температурно-ветрового зондирования атмосферы с базами $n = 240$ для каждого региона. Для описания плотностей распределения вероятностей отклонений на дальностях 1, 4, 10, 15 и 20 км от ВПП использовалась формула Эджворта [8]:

$$W(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varphi} e^{-\frac{(\varphi-m_\varphi)^2}{2\sigma_\varphi^2}} \left\{ 1 + \frac{\gamma_{1\varphi}}{6} H_3\left(\frac{\varphi-m_\varphi}{\sigma_\varphi}\right) + \frac{\gamma_{2\varphi}}{24} H_4\left(\frac{\varphi-m_\varphi}{\sigma_\varphi}\right) + \frac{\gamma_{1\varphi}^2}{72} H_6\left(\frac{\varphi-m_\varphi}{\sigma_\varphi}\right) \right\},$$

где $H_3(x) = x^3 - 3x$, $H_4(x) = x^4 - 6x^2 + 3$, $H_6(x) = x^6 - 15x^4 + 45x^2 - 15$, $m_\varphi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{\varphi i}$ – среднее значение угловых отклонений траекторий от номинальной линии глissады, $\Delta_{\varphi i}$ – отклонение i -й траектории от номинальной линии глissады,

$\sigma_\varphi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta_{\varphi i} - m_\varphi)^2$ – дисперсия угловых отклонений,

$\gamma_{1\varphi} = \frac{1}{\sigma_\varphi^3 \cdot n} \sum_{i=1}^n (\Delta_{\varphi i} - m_\varphi)^3$ – коэффициент асимметрии угловых отклонений,

$\gamma_{2\varphi} = \frac{1}{\sigma_\varphi^4 \cdot n} \sum_{i=1}^n (\Delta_{\varphi i} - m_\varphi)^4 - 3$ – коэффициент эксцесса.

В таблице приведены результаты расчетов параметров плотностей распределения вероятностей угловых отклонений траекторий распространения радиоизлучения в каналах глissады РТСП: m_φ , среднеквадратических отклонений σ_φ , $\gamma_{1\varphi}$, $\gamma_{2\varphi}$ и доверительных интервалов для вероятностей $P = 0,683$ (для нормальных отклонений) и $P = 0,997$ (для допустимых отклонений).

Регион	Угол глissады φ_0	Дальность, км	m_φ	σ_φ	$\gamma_{1\varphi} \times 10^3$	$\gamma_{2\varphi}$	Доверительная вероятность P	
							0,683	0,997
							Ширина доверительного интервала	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мурманск	$2^\circ 40' = 2,67^\circ$	1	2,67°	0,47°	2	-0,31	0,97°	2,63°
		4	2,66°	0,50°	20	0,97	0,91°	3,50°
		10	2,66°	0,50°	23	-0,70	1,06°	2,56°
		15	2,65°	0,55°	17	-1,37	1,21°	2,55°
		20	2,65°	0,51°	15	-1,55	1,15°	2,35°
	$3^\circ 15' = 3,25^\circ$	1	3,25°	0,58°	0	-0,29	1,19°	3,23°
		4	3,25°	0,59°	11	0,62	1,12°	3,98°
		10	3,24°	0,63°	13	-1,08	1,36°	3,02°
		15	3,24°	0,63°	10	-1,50	1,41°	2,90°
		20	3,23°	0,60°	10	-1,61	1,35°	2,75°
Нарьян-Мар	$2^\circ 40' = 2,67^\circ$	1	2,66°	0,55°	0	-0,95	1,17°	2,68°
		4	2,66°	0,70°	10	-0,86	1,49°	3,47°
		10	2,66°	0,57°	9	-1,44	1,28°	2,66°
		15	2,65°	0,56°	9	-1,62	1,26°	2,55°
		20	2,65°	0,54°	7	-1,74	1,23°	2,45°

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нарьян-Мар	$3^{\circ}15' = 3,25^{\circ}$	1	$3,25^{\circ}$	$0,67^{\circ}$	-1	-0,89	$1,43^{\circ}$	$3,31^{\circ}$
		4	$3,25^{\circ}$	$0,83^{\circ}$	6	-1,04	$1,81^{\circ}$	$4,04^{\circ}$
		10	$3,24^{\circ}$	$0,67^{\circ}$	5	-1,56	$1,49^{\circ}$	$3,05^{\circ}$
		15	$3,24^{\circ}$	$0,67^{\circ}$	5	-1,71	$1,51^{\circ}$	$3,03^{\circ}$
		20	$3,23^{\circ}$	$0,61^{\circ}$	5	-1,76	$1,38^{\circ}$	$2,75^{\circ}$
Норильск	$2^{\circ}40' = 2,67^{\circ}$	1	$2,67^{\circ}$	$0,54^{\circ}$	1	-1,17	$1,19^{\circ}$	$2,59^{\circ}$
		4	$2,66^{\circ}$	$0,69^{\circ}$	12	-0,07	$1,39^{\circ}$	$4,06^{\circ}$
		10	$2,66^{\circ}$	$0,58^{\circ}$	11	-0,82	$1,23^{\circ}$	$2,88^{\circ}$
		15	$2,65^{\circ}$	$0,61^{\circ}$	9	-1,30	$1,34^{\circ}$	$2,86^{\circ}$
		20	$2,65^{\circ}$	$0,57^{\circ}$	6	-1,50	$1,27^{\circ}$	$2,62^{\circ}$
	$3^{\circ}15' = 3,25^{\circ}$	1	$3,25^{\circ}$	$0,67^{\circ}$	-1	-0,98	$1,44^{\circ}$	$3,27^{\circ}$
		4	$3,25^{\circ}$	$0,80^{\circ}$	6	-0,16	$1,62^{\circ}$	$4,60^{\circ}$
		10	$3,24^{\circ}$	$0,71^{\circ}$	5	-1,11	$1,55^{\circ}$	$3,41^{\circ}$
		15	$3,24^{\circ}$	$0,70^{\circ}$	5	-1,44	$1,56^{\circ}$	$3,25^{\circ}$
		20	$3,23^{\circ}$	$0,64^{\circ}$	2	-1,59	$1,44^{\circ}$	$2,94^{\circ}$
о. Хейса архипелага Земля Франца-Иосифа	$2^{\circ}40' = 2,67^{\circ}$	1	$2,67^{\circ}$	$0,54^{\circ}$	1	-0,96	$1,16^{\circ}$	$2,64^{\circ}$
		4	$2,66^{\circ}$	$0,71^{\circ}$	14	-0,15	$1,43^{\circ}$	$4,09^{\circ}$
		10	$2,66^{\circ}$	$0,56^{\circ}$	20	-0,88	$1,21^{\circ}$	$2,79^{\circ}$
		15	$2,66^{\circ}$	$0,59^{\circ}$	25	-1,12	$1,29^{\circ}$	$2,83^{\circ}$
		20	$2,65^{\circ}$	$0,60^{\circ}$	24	-1,32	$1,31^{\circ}$	$2,79^{\circ}$
	$3^{\circ}15' = 3,25^{\circ}$	1	$3,25^{\circ}$	$0,65^{\circ}$	-1	-1,04	$1,41^{\circ}$	$3,14^{\circ}$
		4	$3,25^{\circ}$	$0,81^{\circ}$	8	-0,38	$1,67^{\circ}$	$4,41^{\circ}$
		10	$3,24^{\circ}$	$0,66^{\circ}$	12	-1,09	$1,44^{\circ}$	$3,19^{\circ}$
		15	$3,24^{\circ}$	$0,72^{\circ}$	15	-1,32	$1,58^{\circ}$	$3,37^{\circ}$
		20	$3,23^{\circ}$	$0,70^{\circ}$	15	-1,45	$1,56^{\circ}$	$3,25^{\circ}$

На рис. 1–4 представлены построенные на основании данных таблицы плотности распределения вероятностей угловых отклонений траекторий распространения радиоволн относительно номинальной линии глissады на дальностях 1, 4, 10, 15 и 20 км от ВПП соответственно для регионов г. Мурманска, г. Нарьян-Мара, г. Норильска и о. Хейса архипелага Земля Франца-Иосифа. Кривые, приведенные на рис. 1, а, 2, а, 3, а и 4, а, соответствуют результатам, полученным для угла глissады $2^{\circ}40'$, а кривые на рис. 1, б, 2, б, 3, б и 4, б – для угла глissады $3^{\circ}15'$.

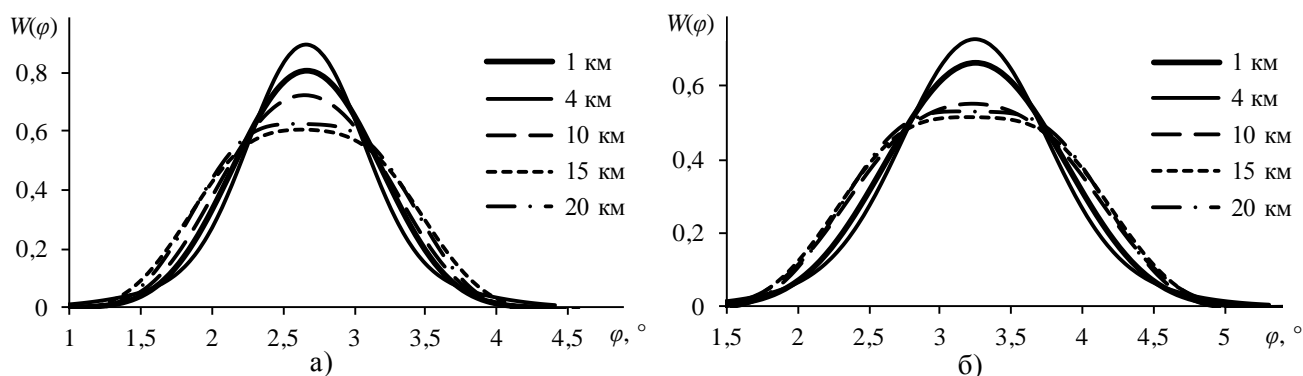


Рис. 1. Плотности распределения вероятностей угловых отклонений траекторий распространения радиоволн относительно глissады для региона г. Мурманска: а – угол глissады $2^{\circ}40'$; б – угол глissады $3^{\circ}15'$

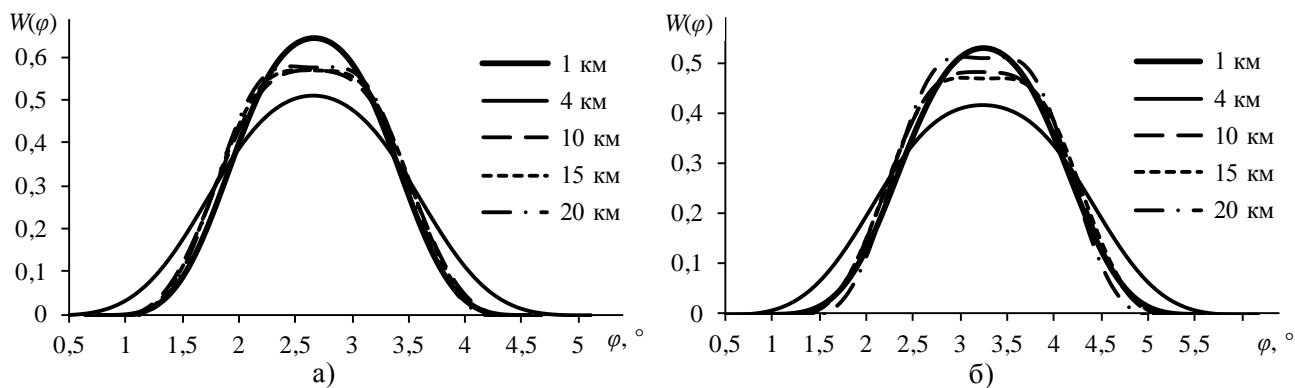


Рис. 2. Плотности распределения вероятностей угловых отклонений траекторий распространения радиоволн относительно глissады для региона г. Нарьян-Мара:
a – угол глissады 2°40'; *б* – угол глissады 3°15'

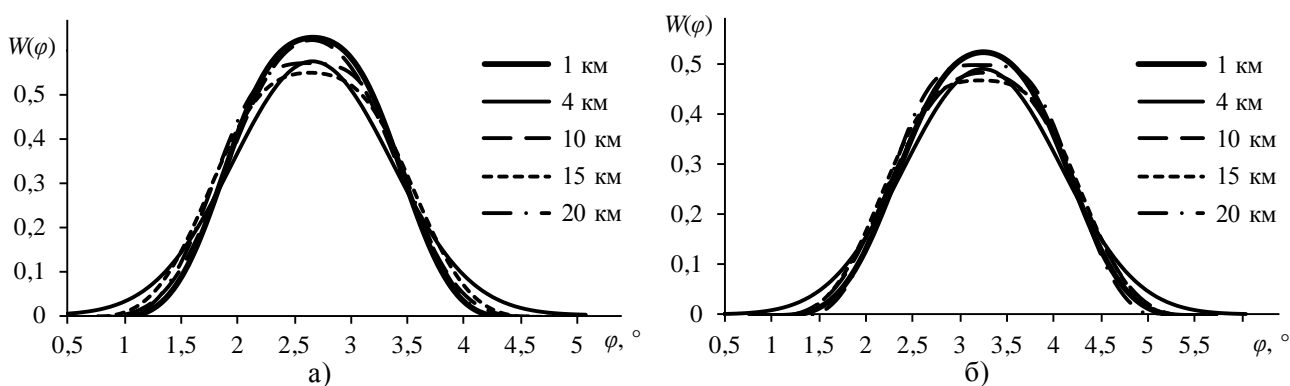


Рис. 3. Плотности распределения вероятностей угловых отклонений траекторий распространения радиоволн относительно глissады для региона г. Норильска:
a – угол глissады 2°40'; *б* – угол глissады 3°15'

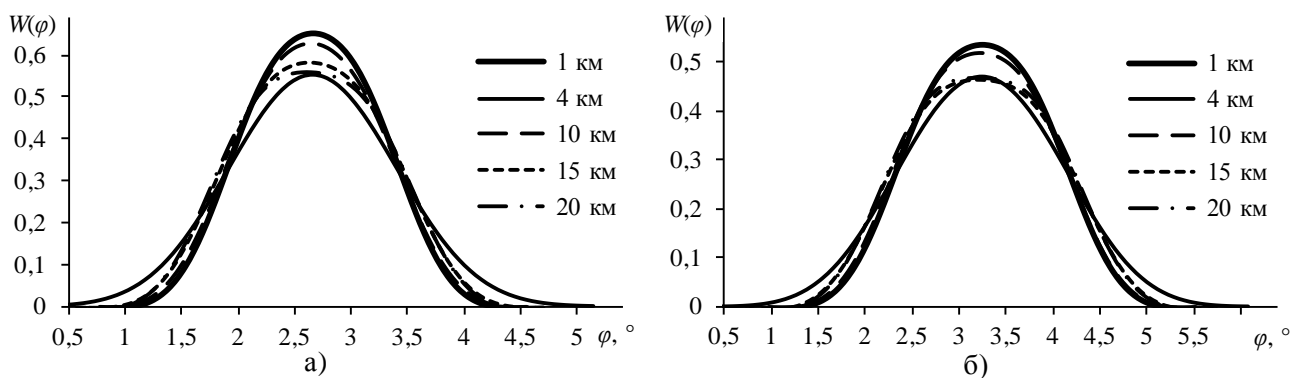


Рис. 4. Плотности распределения вероятностей угловых отклонений траекторий распространения радиоволн относительно глissады для региона о. Хейса:
a – угол глissады 2°40'; *б* – угол глissады 3°15'

Анализ данных, представленных в таблице и на рис. 1–4, показывает, что во всех рассмотренных регионах средние значения отклонений траекторий распространения радиоволн от номинальных углов наклона глissады не превышают 0,02° на дальностях до 20 км. Средне-квадратические отклонения траекторий распространения радиоизлучения почти всюду превышают допустимый предел $\pm 0,5^\circ$ [9], что приводит к превышению величинами доверительных интервалов для вероятностей $P = 0,683$ и $P = 0,997$, при аппроксимации плотностей распределения вероятностей нормальным законом, установленных значений нормальных и допустимых

отклонений в 2,8–3,8 раз – в регионе Мурманска, в 3,2–5,0 раз – в регионе Нарьян-Мара, в 3,2–4,8 раз – в регионе Норильска и в 3,2–4,9 раз – в регионе о. Хейса архипелага Земля Франца-Иосифа. Коэффициенты эксцесса, в большинстве случаев принимающие отрицательные значения и уменьшающиеся с увеличением дальности от ВПП, характеризуют более пологие вершины графиков плотностей распределения вероятностей отклонений по сравнению с нормальными распределениями. Малые значения коэффициентов асимметрии говорят о практически симметричном виде плотностей распределения вероятностей отклонений относительно среднего значения.

Учет коэффициентов асимметрии и эксцесса при аппроксимации плотностей распределения вероятностей угловых отклонений траекторий распространения радиоволн в каналах глиссады рядом Эджворта влияет на ширину доверительных интервалов – при вероятности $P = 0,683$ она увеличивается по сравнению с нормальным распределением, а при вероятности $P = 0,997$ – уменьшается. При этом ширина доверительных интервалов, соответствующих вероятности $P = 0,683$, превышает установленные значения для нормальных отклонений в 2,7–4,2 раз – в регионе Мурманска, в 3,5–5,4 раз – в регионе Нарьян-Мара, в 3,6–4,9 раз – в регионе Норильска и в 3,5–5,0 раз – в регионе о. Хейса архипелага Земля Франца-Иосифа, а соответствующих вероятности $P = 0,997$ – превышает значения для допустимых отклонений в 2,4–4,0 раз – в регионе Мурманска, в 2,5–4,0 раз – в регионе Нарьян-Мара, в 2,6–4,6 раз – в регионе Норильска и в 2,6–4,4 раз – в регионе о. Хейса архипелага Земля Франца-Иосифа. Наибольшие значения ширины доверительных интервалов для вероятности $P = 0,997$ во всех регионах соответствуют дальности 4 км от ВПП, а ширина интервалов для угла глиссады $3^{\circ}15'$ превышает их ширину для угла $2^{\circ}40'$.

Сравнительный анализ доверительных интервалов угловых отклонений траекторий распространения радиоизлучения при требуемом значении доверительной вероятности $P = 0,997$ для различных регионов показывает, что в регионах Мурманска и Нарьян-Мара, а также в регионах Норильска и о. Хейса, значения их ширины близки по величине ($2,4 \div 4,0^{\circ}$ и $2,6 \div 4,5^{\circ}$ соответственно), причем ширина доверительных интервалов в регионах Норильска и о. Хейса превышает их ширину для регионов Мурманска и Нарьян-Мара на $0,2 \div 0,5^{\circ}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что в рассмотренных арктических регионах неоднородности показателя преломления в атмосфере могут приводить к отклонениям траекторий распространения радиоволн в каналах глиссады радиотехнических систем посадки воздушных судов, превышающим пределы области допустимых отклонений $\pm 0,5^{\circ}$ относительно номинальной линии глиссады. При этом требуемая доверительная вероятность $P = 0,997$, соответствующая допустимым отклонениям, достигается при увеличении доверительных интервалов отклонений в 2–4 и более раз, в частности, для региона г. Мурманска ширина интервалов превышает их установленное значение $1,0^{\circ}$ в 2,4–4,0 раза, для региона г. Нарьян-Мара – в 2,5–4,0 раза, для региона г. Норильска – в 2,6–4,6 раза, а для региона о. Хейса архипелага Земля Франца-Иосифа – в 2,6–4,4 раза.

Изложенное выше говорит о необходимости учета влияния атмосферы на траектории распространения радиоволн в каналах глиссады радиотехнических систем посадки при производстве полетов для повышения безопасности посадки воздушных судов в рассматриваемых регионах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969. 155 с.

2. Колосов М.А., Шабельников А.В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. М.: Сов. радио, 1976. 220 с.
3. Бин Б.Р., Даттон Е.Д. Радиометеорология / пер. с англ.; под ред. А.А. Семенова. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 363 с.
4. Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. М.: Наука, 1976. 165 с.
5. Нахмансон Г.С., Бучнев Д.В., Суслин А.В. Влияние атмосферы на траектории распространения излучения антенн каналов глиссады в радиотехнических системах посадки воздушных судов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19, № 12. С. 53–58.
6. Нахмансон Г.С., Бучнев Д.В., Суслин А.В. Атмосферные искажения траекторий распространения излучения в каналах глиссады радиотехнических систем посадки воздушных судов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2015. Вып. 1. С. 32–38.
7. Паршуков В.А. Оценка точности вычисления рефракции в атмосфере по данным высотных метеоизмерений // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 2. С. 172–176.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968. 720 с.
9. Давыдов П.С., Сосновский А.А., Хаймович И.А. Авиационная радиолокация. Справочник. М.: Транспорт, 1984. 223 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Нахмансон Геннадий Симонович, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических систем (и средств обеспечения полетов) ВУНЦ ВВС «ВВА», электронный адрес: kig28@mail.ru.

Бучнев Дмитрий Владимирович, адъюнкт кафедры радиотехнических систем (и средств обеспечения полетов) ВУНЦ ВВС «ВВА», электронный адрес: d_buch@list.ru.

Бунин Александр Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных комплексов, систем и сетей Московского государственного технического университета гражданской авиации, электронный адрес: avbunin2010@qmail.com.

THE RADIO WAVES PROPAGATION CHARACTERISTICS IN THE GLIDESLOPE AXES OF THE GROUND CONTROLLED APPROACH SYSTEMS IN THE ARCTIC REGIONS

Gennadiy S. Nakhmanson

Military Educational-Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin», Voronezh, Russia, kig28@mail.ru

Dmitriy V. Buchnev

Military Educational-Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin», Voronezh, Russia, d_buch@list.ru

Aleksandr V. Bunin

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, avbunin2010@qmail.com

ABSTRACT

Information about the location of the aircraft, with a decrease along a predetermined path, the carriages, the floorer with the use of radio landing systems. On the trajectory of radio wave propagation in the channels of the radio glide path landing systems affected by the change of refractive index in the atmosphere depending on altitude. Known methods of calculation of the angular deviations of trajectories of propagation of radiation from the nominal glide path line. Current-

ly in the Arctic regions, a network of airfields, so it is necessary to have data of possible distortions of the trajectories of propagation in the channels of the glide path radio systems on such airfields. The article analyzes the angular deviation of the trajectories of propagation in the channels of the radio glide path landing system of aircrafts on the basis of temperature-wind sounding of the atmosphere. Calculated parameters of the probability density functions of these deviations at different distances from the runway for three Arctic regions of Russia. The article shows that the magnitude of the confidence intervals of deviations of trajectories at the required value of confidence probability is 2-4 times the size of the area tolerance. Contained in the article the results clearly indicate the necessity of considering the influence of the atmosphere on the trajectory of radio wave propagation in channels of radio glide path landing system in flight operations to improve safety of aircraft landing in the Arctic regions.

Key words: refraction, atmosphere, refraction index, ground controlled approach system, propagation path, arctic regions.

REFERENCES

- 1. Kolosov M.A., Armand N.A., Jakovlev O.I.** Rasprostranenie radiovoln pri kosmicheskoy svyazi. M.: Svjaz', 1969. 155 p.
- 2. Kolosov M.A., Shabel'nikov A.V.** Refrakcija jelektronnih voln v atmosferah Zemli, Venery i Marsa. M.: Sov. radio, 1976. 220 p.
- 3. Bin B.R., Dutton E.D.** Radiometeorologija. Per. s angl. pod red. A.A. Semenova. L.: Gidrometeoizdat, 1971. 363 p.
- 4. Kazakov L.Ja., Lomakin A.N.** Neodnorodnosti koeficienta prelomlenija vozduha v troposfere. M.: Nauka, 1976. 165 p.
- 5. Nakhmanson G.S., Buchnev D.V., Suslin A.V.** Vliyanie atmosfery na traektorii rasprostraneniya izlucheniya antenn kanalov glissady v radiotekhnicheskikh sistemakh posadki vozdushnikh sudov. *Electromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2014. vol. 19, № 12, pp. 53–58.
- 6. Nakhmanson G.S., Buchnev D.V., Suslin A.V.** Atmosfernye iskazheniya traektorij rasprostraneniya izlucheniya v kanalakh glissady radiotekhnicheskikh sistem posadki vozdushnikh sudov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij Rossii. Radioelektronika*, 2015, № 1, pp. 32–38.
- 7. Parshukov V.A.** Ocenka tochnosti vychislenija refrakcii v atmosfere po dannym vysotnyh meteozmerenij. *Radiotekhnika i jelektronika*, 2009, vol. 54, № 2, pp. 172–176.
- 8. Korn G., Korn T.** Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. M: Nauka, 1968. 720 p.
- 9. Davydov P.S., Sosnovskij A.A., Khaymovich I.A.** Aviatcionnaya radiolokatsiya. Spravochnik. M: Transport, 1984. 223 p.