

## ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 621.37/.39.001.5 + 06

DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_3\_119

*В. И. Куштин, П. Н. Щербак, Т. М. Пимшина, С. Е. Турчик*

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ, АСТРОНОМИЧЕСКИХ И ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

**Аннотация.** Учет влияния атмосферы на результаты астрономических, геодезических, фотограмметрических работ, а также дистанционного зондирования является актуальной задачей при реализации различных научных и практических проектов современности. Использование современных средств и методов геодезических измерений, изменяющиеся параметры атмосферы Земли вследствие природных и антропогенных процессов, повышение требований к точности полученных результатов обуславливают необходимость разработки более совершенных способов учета влияния рефракции и замедления скорости электромагнитных волн на точность измерений как в световом, так и в радиодиапазоне. В работе показана необходимость учета влияния рефракции на измеряемые расстояния при зенитных расстояниях более 45 градусов. Предложена формула для высокоточного определения поправок из-за влияния рефракции в измеренные радиооптическими системами расстояния.

**Ключевые слова:** атмосфера, рефракция, задержка радиосигнала, поправки в дальности, модели атмосферы, электромагнитные волны.

**Для цитирования:** Учет влияния атмосферы на результаты высокоточных геодезических, астрономических и фотограмметрических измерений / В. И. Куштин, П. Н. Щербак, Т. М. Пимшина, С. Е. Турчик // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 119–124. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_3\_119.

**Введение**

Практически все астрономические и геодезические измерения выполняют в атмосфере Земли. Материалы фотограмметрических работ получают с носителей, которые располагаются или в атмосфере Земли, или, при космических съемках, за пределами атмосферы. В обоих случаях проектирующие лучи, строящие изображение на снимке в определенном диапазоне спектра электромагнитного излучения, проходят через часть или всю атмосферу. В основном все измерения, выполняемые в астрономии, геодезии, фотограмметрии и других смежных областях знаний, подвержены влиянию атмосферы.

Точность современных приборов для измерения длин и углов является высокой, но она в значительной мере снижается вследствие недостаточно точного учета влияния атмосферы на результаты измерений. Поэтому теоретические разработки и экспериментальные исследования, связанные с учетом влияния атмосферы на результаты высокоточных измерений, имеют большое теоретическое и практическое значение.

Вопросами учета оптической рефракции в астрономии занимаются уже несколько столетий. Имеется много теоретических и экспериментальных разработок, направленных на высокоточное определение углов астрономической рефракции. Следует заметить, что большие достижения в этих исследованиях имеют ученые России, о чем свидетельствует то, что «Таблицы рефракции Пулковской обсерватории», пятое издание которых вышло в 1985 году (четыре прежних издания были в 1870, 1905, 1930 и 1956 годах) [1], являются международными и используются всеми астрономическими обсерваториями мира.

В связи с возможностью выполнять измерения астрономическими приборами с точностью до 0,01" и выше возникает необходимость более точного определения и учета углов астрономической рефракции, что является весьма сложной задачей, особенно при больших зенитных расстояниях.

**Основная часть**

Вопросами учета оптической рефракции в геодезии занимаются несколько столетий как в нашей стране, так и за рубежом. Большое число теоретических и экспериментальных исследований, которые довольно подробно рассмотрены в работах [2–7], показывает сложность решения проблемы

рефракции, особенно в приземном слое, в котором состояние атмосферы зависит от многих факторов, учесть которые весьма сложно.

Измерение расстояний свето- и радиодальномерами основано на определении времени  $t$  распространения электромагнитных волн (ЭМВ) вдоль измеряемой линии в прямом и обратном направлениях и вычислении длины линии по формуле:

$$S = \frac{c t}{n^2},$$

где  $c = 299792,458$  км/с – скорость ЭМВ в вакууме;  $n$  – среднеинтегральный коэффициент преломления атмосферной среды на трассе ЭМВ. Обычно полагают  $n = (n_1 + n_2)/2$ , где  $n_1, n_2$  – коэффициенты преломления, определенные в начальной и конечной точках трассы. В действительности  $n \neq (n_1 + n_2)/2$ , особенно для наклонных трасс [8].

В фотограмметрии полагают, что проектирующие лучи, строящие изображение на снимке, являются прямыми. Проходя через атмосферные слои с различными коэффициентами преломления, проектирующие лучи искривляются, и вследствие этого происходит смещение точек снимка, которое необходимо учитывать [9]. Кроме того, если приемник ЭМВ, например, аэрофотоаппарат, находится внутри носителя, где атмосферные условия отличаются от условий внешней атмосферы, то возникает дополнительное искривление проектирующих лучей, называемое внутренней рефракцией.

Следовательно, если до сравнительно недавнего времени вопросами учета рефракции в оптическом диапазоне излучения ЭМВ занимались в основном в астрономии, то в настоящее время в связи с развитием традиционных научных знаний и появлением новых научных дисциплин, таких как космическая геодезия, космическая фотограмметрия, дистанционное зондирование и других, возникает необходимость более точного определения углов рефракции при решении традиционных задач и изучения вопроса распространения ЭМВ в атмосфере при решении новых проблем [10].

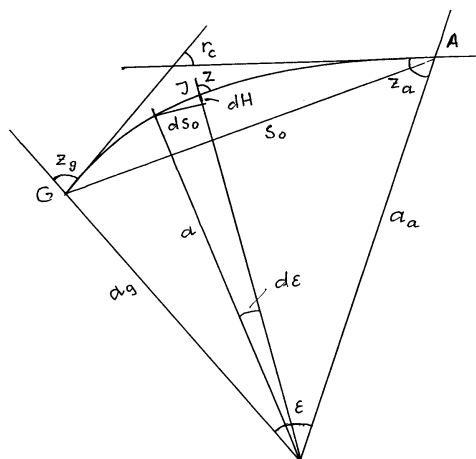


Рис. 1. К выводу формулы поправки из-за кривизны трассы ЭМВ

Из-за влияния атмосферной рефракции путь, пройденный ЭМВ, является кривой – линия  $GJA$  на рис. 1 [11], от длины  $S$  которой нужно перейти к прямой  $GA = S_0$ . На рис. 1 в соответствии с теоремой косинусов:

$$S_0 = \sqrt{a_g^2 + a_a^2 - 2a_g a_a \cos \epsilon},$$

где  $a_g = R_{0g} + H_g$ ,  $a_a = R_{0a} + H_a$ ;  $a_g, a_a$  – средние радиусы кривизны Земли в начальном пункте  $G$  и конечном  $A$ ;  $R_{0g}, R_{0a}$  – средние радиусы кривизны эллипсоида по направлениям на пункты  $A$  и  $G$ ;  $H_a, H_g$  – геодезические высоты пунктов  $A$  и  $G$ ;  $\epsilon$  – угол между направлениями на пункты  $A$  и  $G$  с вершиной в точке пересечения большой и малой осей эллипсоида.

Средний радиус кривизны равен среднеарифметическому из всех радиусов кривизны нормальных сечений  $R_A$  эллипсоида в данной точке, проведенных с интервалом  $\Delta A$ , где  $A$  – истинный азимут, т. е.  $R_0 = \frac{1}{n} \sum_1^n R_A$ .  $R_A$  – радиус произвольного нормального сечения определяется по формуле Эйлера.

$$R_A = \frac{N}{1 + e'^2 \cos^2 B \cos^2 A}; N = \frac{a}{\sqrt{1 - e'^2 \sin^2 B}}; e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}; e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2},$$

где  $a, b$  – большая и малая полуоси эллипсоида;  $B$  и  $A$  – геодезическая широта и азимут направления соответственно;  $e, e'$  – первый и второй эксцентриситеты эллипсоида. Поверхность земного эллипсоида образуется путем вращения эллипса вокруг малой оси. Параметры эллипсоида вращения подбираются под условием наилучшего соответствия фигуре геоида. Вычисления в работе выполнены для параметров эллипсоида Красовского.

Так как  $\cos \varepsilon = 1 - 2\sin^2 \frac{\varepsilon}{2}$ , то

$$S_0 = \sqrt{a_g^2 - 2a_g a_a + a_a^2 + 4a_g a_a \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}}.$$

Учитывая высоты начальной и конечной точек траектории, получим:

$$S_0 = \sqrt{(H_a - H_g)^2 + 4a_g a_a \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}}. \quad (1)$$

Угол  $\varepsilon$ , выраженный в секундах дуги, при том, что  $d\varepsilon = \frac{dS_0}{a} = \frac{\operatorname{tg} z}{a} dH$ , будет равен:

$$\varepsilon = \rho'' \int_{H_g}^{H_a} \frac{\operatorname{tg} z}{a} dH = \rho'' \int_{H_g}^{H_a} \frac{\operatorname{tg} z}{a_g + H} dH = \frac{\rho''}{a_g} \int_{H_g}^{H_a} \frac{\operatorname{tg} z}{1 + \frac{H}{a_g}} dH. \quad (2)$$

Входящие в формулу (2)  $\rho'' = 206265''$  – величина радиана в секундах, а зенитное расстояние  $z$  для сферической модели атмосферы

$$\sin z_i = \frac{(R+H_g)(1+10^{-6}N_g)\sin z_g}{(R+H)(1+10^{-6}N)} = \frac{(R+H_a)(1+10^{-6}N_a)\sin z_a}{(R+H)(1+10^{-6}N)},$$

где  $H_g, H_a$  – высоты,  $z_g, z_a$  – зенитные расстояния,  $N_g, N_a$  – индексы преломления в начальной и конечной точках трассы;  $H, N, z$  – те же значения в текущих точках траектории ЭМВ.

Значения  $\varepsilon$  можно определить методом численного интегрирования или в соответствии с рис. 1 по формуле

$$\varepsilon = z_g + r_c - z_a, \quad (3)$$

где  $r_c$  – угол полной рефракции:

$$r_c = -10^{-6} \rho'' \int_{H_g}^{H_a} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{n} dN. \quad (4)$$

В формуле (4) угол  $\varphi$  для сферической модели атмосферы будет равным зенитному расстоянию. При использовании моделей атмосферы с изодиоптрическими слоями, т.е. слоями с одинаковым коэффициентом преломления,  $\varphi$  – угол между нормалью к изодиоптрической поверхности и трассой ЭМВ.

Анализ реализации формул (1)–(4) позволяет сделать вывод о том, что для определения  $S_0$  с миллиметровой точностью (до 1 мм), с соответствующей точностью должны быть определены и значения входящих в формулу (1) аргументов, например, углы  $\varepsilon$  до  $(3 \cdot 10^{-5})''$ , что является существенным недостатком данного решения. Авторами предложено следующее решение.

В соответствии с рис. 2:  $dS_0 = dS \cos(r_g - r_{ci}) = dS \left(1 - 2\sin^2 \frac{r_g - r_{ci}}{2}\right)$ .

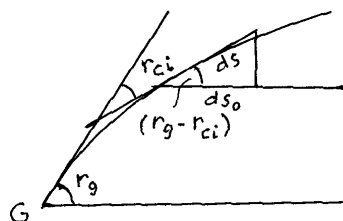


Рис. 2. К определению поправки  $\Delta S$  в дальность из-за влияния рефракции

Интегрируя, с учетом  $dS = dH \sec z$  имеем:

$$S_0 = S - 2 \int_0^S \sin^2 \frac{r_g - r_{ci}}{2} dS = S - 2 \int_0^H \sin^2 \frac{r_g - r_{ci}}{2} \sec z dH = S - \frac{1}{2} \int_0^H (r_g - r_{ci})^2 \sec z dH.$$

Тогда

$$\Delta S = S_0 - S = - \int_0^H \left( \frac{r_g - r_{ci}}{291,7} \right)^2 \sec z dH, \quad (5)$$

где  $\Delta S$  – в мм, углы земной  $r_g$  и полной  $r_{ci}$  рефракции – в секундах дуги,  $dH$  – в км.

В ходе исследования для условий стандартной атмосферы ГОСТ 4401-81 методом численного интегрирования формулы (5) получены значения  $-\Delta S$ , мм, приведенные в таблице. Величины углов  $r_g$  и  $r_{ci}$  взяты из работы [8].

Значения  $-\Delta S$ , мм для зенитных расстояний 45, 70 и 80° и различных высот

H, км	Зенитные расстояния $z_g$ , градусы			
	45	70	80	87
5	0,01	0,22	1,8	
10	0,05	0,82	6,6	168,8
40	0,36	5,45	40,9	
100	0,90	13,5	93,0	722,8

### Выводы

Данные таблицы показывают необходимость учета поправок в дальности из-за влияния рефракции при зенитных расстояниях более 45°, для определения которых с высокой точностью можно использовать предложенное решение.

### Список литературы

- 1 Таблицы рефракции Пулковской обсерватории. – Ленинград : Наука, 1985.
- 2 Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения / А. Л. Островский, Б. М. Джуман, Ф. Д. Заблоцкий [et al.]. – Москва : Недра, 1990.
- 3 **Angus-Leppan, P. V.** Surface effects on refraction in precise levelling / P. V. Angus-Leppan // Conference on Refraction Effects in Geodesy & Conference on Electronic Distance Measurement 5–8 Nov. 1968, Univ. of N. S. W. – New South Wales (Australia), 1969. – P. 74–89.
- 4 **Parkinson, B. U.** Decade of the NAVSTAR Global Navigation System Development Program (Moscow, World) / B. U. Parkinson // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 1984. – Vol. 71, No. 10.
- 5 **Мозжухин, О. А.** К анализу путей развития проблемы учёта рефракции в нивелировании / О. А. Мозжухин // Геодезия и картография. – 2016. – Т. 77, № 11. – С. 16–19. – DOI 10.22389/0016-7126-2016-917-11-16-19.
- 6 **Мозжухин, О. А.** Рефракция в двустороннем тригонометрическом нивелировании. Определение поправок / О. А. Мозжухин // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79, № 4. – С. 8–13. – DOI 10.22389/0016-7126-2018-934-4-8-13.

### References

- 1 Refractive tables of the Pulkovo Observatory. – Leningrad : Nauka, 1985.
- 2 Taking into account atmospheric influences on astronomical and geodetic measurements / A. L. Ostrovskiy, B. M. Dzhuman, F. D. Zablokiy [et al.]. – Moscow : Nedra, 1990.
- 3 **Angus-Leppan, P. V.** Surface effects on refraction in precise levelling / P. V. Angus-Leppan // Conference on Refraction Effects in Geodesy & Conference on Electronic Distance Measurement 5–8 Nov. 1968, Univ. of N. S. W. – New South Wales (Australia), 1969. – P. 74–89.
- 4 **Parkinson, B. U.** Decade of the NAVSTAR Global Navigation System Development Program (Moscow, World) / B. U. Parkinson // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 1984. – Vol. 71, No. 10.
- 5 **Mozzhuhin, O. A.** On the analysis of the ways of development of the problem of accounting for refraction in leveling / O. A. Mozzhuhin // Geodeziya i kartografiya. – 2016. – Vol. 77, No. 11. – P. 16–19. – DOI 10.22389/0016-7126-2016-917-11-16-19.
- 6 **Mozzhuhin, O. A.** Refraction in bilateral trigonometric leveling. Definition of amendments popravok / O. A. Mozzhuhin // Geodeziya i kartografiya. – 2018. – Vol. 79, No. 4. – P. 8–13. – DOI 10.22389/0016-7126-2018-934-4-8-13.

7 **Куштин, В. И.** Определение поправок в дальности при измерениях электрооптическими системами / В. И. Куштин, С. Е. Турчик, П. Н. Щербак // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4. – С. 247–255. – DOI 10.46973/0201-727X\_2022\_4\_247.

8 Оптическая рефракция в земной атмосфере (наклонные трассы) / А. В. Алексеев, М. В. Кабанов, И. Ф. Куштин [et al.]. – Новосибирск : Наука, СО АН СССР, 1983. – 230 с.

9 Влияние фотограмметрической и внутренней рефракций на определение линейных элементов внешнего ориентирования / В. И. Куштин, Н. Ф. Добрынин, Т. М. Пимшина // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5224](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5224) (дата обращения: 31.08.2023).

10 **Дробязко, Д. Л.** Боковая рефракция в сетях сгущения / Д. Л. Дробязко, В. И. Куштин // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4(1). – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5224](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5224) (дата обращения: 31.08.2023).

11 **Куштин, В. И.** Учет влияния атмосферы на результаты измерения длин радиоэлектронными системами : монография / В. И. Куштин. – Москва : МИИГАиК, 2003. – 180 с. – ISBN 5-7890-0251-X.

7 **Kushtin, V. I.** Determination of corrections to the distance in measurements by electro-optical systems / V. I. Kushtin, S. E. Turchik, P. N. Shcherbak // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 4. – P. 247–255. – DOI 10.46973/0201-727X\_2022\_4\_247.

8 Optical refraction in the Earth's atmosphere (inclined traces) / A. V. Alekseev, M. V. Kabanov, I. F. Kushtin [et al.]. – Novosibirsk: Nauka, SO AN SSSR, 1983. – 230 p.

9 The influence of photogrammetric and internal refraction on the determination of linear elements of external orientation / V. I. Kushtin, N. F. Dobrynin, T. M. Pimshina // Engineering Bulletin of the Don. – 2018. – No. 4. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5224](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5224) (date of access: 08/31/2023).

10 **Drobyazko, D. L.** Lateral refraction in condensation networks / D. L. Drobyazko, V. I. Kushtin // Engineering Bulletin of the Don. – 2012. – No. 4(1). – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5224](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5224) (date of access: 08/31/2023).

11 **Kushtin, V. I.** Using the influence of the atmosphere on the results of length measurement by radio-electronic systems : monografiya / V. I. Kushtin. – Moscow : MIIGAiK, 2003. – 180 p. – ISBN 5-7890-0251-X.

*V. I. Kushtin, P. N. Shcherbak, T. M. Pimshina, S. E. Turchik*

#### CONSIDERATION OF THE INFLUENCE OF THE ATMOSPHERE ON THE RESULTS OF HIGH-PRECISION GEODETIC, ASTRONOMICAL AND PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENTS

**Abstract.** According to the influence of the atmosphere on the results of astronomical, geodetic, photogrammetric work, as well as remote sensing is an urgent task in the implementation of various scientific and practical projects of our time. The use of modern means and methods of geodetic measurements, changing parameters of the Earth's atmosphere due to natural and anthropogenic processes, increasing requirements for the accuracy of the obtained results necessitate the development of more advanced ways to account for the influence of refraction and deceleration of the speed of electromagnetic waves on the accuracy of measurements both in the light and radio range. The paper shows the need to take into account the influence of refraction on the measured distances at zenith distances of more than 45 degrees. A formula is proposed for the high-precision determination of corrections due to the influence of refraction in the distances measured by radio-optical systems.

**Keywords:** atmosphere, refraction, radio signal delay, range corrections, atmospheric models, electromagnetic waves.

**For citation:** Consideration of the influence of the atmosphere on the results of high-precision geodetic, astronomical and photogrammetric measurements / V. I. Kushtin, P. N. Shcherbak, T. M. Pimshina, S. E. Turchik // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 119–124. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_3\_119.

**Сведения об авторах****Куштин Владимир Иванович**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог»,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: ips@rgups.ru

**Щербак Петр Николаевич**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: pph@rgups.ru

**Пимшина Татьяна Михайловна**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: ips@rgups.ru

**Турчик Светлана Евгеньевна**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог»,  
ассистент,  
e-mail: ips@rgups.ru

**Information about the authors****Kushtin Vladimir Ivanovich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Research, Design and Construction of Railways»,  
Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
e-mail: ips@rgups.ru

**Shcherbak Peter Nikolayevich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Track and Track Facilities»,  
Doctor of Engineering Sciences, Professor  
e-mail: pph@rgups.ru

**Pimshina Tatiana Mihailovna**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Research, Design and Construction of Railways»,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associated professor,  
e-mail: ips@rgups.ru

**Turchik Svetlana Evgenievna**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Research, Design and Construction of Railways»,  
Lectures,  
e-mail: ips@rgups.ru