

Н. Ф. НЕЛЮБИН

**ПРИРОДА СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
В ТЕОРИИ РЕФРАКЦИИ.  
РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ**

Расчетными (метеорологическими) называем методы вычисления рефракционных поправок (углов рефракции и поправок в измеренную оптическими методами дальность) по строгим и приближенным формулам, в которых искомая величина функционально связана с оптико-метеорологическими параметрами атмосферы. Измеряемые или вычисляемые величины в данных методах — профили метеорологических величин или показателя преломления, либо только их приземные значения.

Точность этих методов зависит от многих факторов, но главный источник ошибок — отличие используемого в расчетах профиля показателя преломления, заданного в большинстве случаев в виде модели, от действительного в данный момент времени [12, 14, 16]. При разумном моделировании зависимости показателя преломления от высоты эти ошибки носят случайный характер и их можно минимизировать.

Практически неконтролируемым источником систематических ошибок в расчетных методах является использование сферически-слоистой модели атмосферы, в которой показатель преломления представляет собой функцию высоты.

Трудность расчета рефракционных поправок для реальной атмосферы, являющейся трехмерно-неоднородной средой, заключается не столько в сложности решения исходных уравнений, сколько в отсутствии надежных данных о форме поверхностей одинакового показателя преломления и их пространственно-временной изменчивости. Имеющиеся оценки влияния горизонтальной неоднородности показателя преломления на рефракционные поправки в большинстве случаев носят иллюстративный характер. Действительно, атмосфера Земли — случайно-неоднородная среда с масштабами неоднородностей метеорологических величин от микротурбулентного до регионального, охватывающего по горизонтали сотни и тысячи километров. Различно и время существования неоднородностей: от долей секунд до нескольких суток [4, 9]. Все эти неоднородности накладываются на некую равновесную фигуру, обусловленную полем тяготения и суточным вращением Земли, сезонным изменением притока солнечной радиации. В первом приближении равновесную фигуру атмосферы можно считать эллипсоидом вращения. Оценки, выполненные в [8], показывают, что влияние эллипсоидальности атмосферы на рефракцию неизначительно, хотя сравнение измеренных значений астрономической рефракции с вычисленными дает во многих случаях значительно большие систематические ошибки [1—3, 7, 21, 22 и др.]

Попытки объяснить такие расхождения влиянием наклонов слоев равной плотности, определенных по данным вертикального зондирования на близлежащих аэрологических станциях, в большинстве случаев успехов не приносили [1, 2, 6, 14, 15], даже если в расчетах использовали фактический профиль метеоэлементов, полученный на момент измерений астрономической рефракции.

Действительно, расстояния между пунктами аэрологического зондирования составляют несколько сотен километров, а сами измерения проводятся в основном два раза в сутки. Недостаточна точность измерения и пространственного разрешения по вертикали, особенно в пограничном слое атмосферы. В то же время влияние этого слоя на точность вычисления углов рефракции определяющее, а пространственно-временная изменчивость метеорологических полей наиболее значительна [14, 16, 17].

Поэтому любое изменение синоптической ситуации в районе наблюдений (возникновение или прохождение циклонов, фронтальных разделов, вторжение теплых или холодных воздушных масс и т. д.) вызывает резкое и значительное изменение метеорологических величин [4, 9]. Поэтому фактические горизонтальные градиенты температуры и давления по направлению траектории луча отличаются от расчетных не только

величиной, но и знаком. Особенно большие отклонения фактических градиентов от расчетных в самом нижнем, приземном слое атмосферы, где рельеф и подстилающая поверхность являются дополнительными, искажающими расчетные значения градиентов, факторами.

К сожалению, существующие оценки горизонтальных градиентов немногочисленны и в большинстве своем относятся к приземному слою. Обзор этих данных содержится в работе [20]. Из недавних работ наибольший интерес представляют измерения горизонтальных градиентов температуры, выполненные на трассе длиной 1 км [10]. Для измерений использовано 21 аттестованный термодатчик с погрешностью измерения менее 0,02 °C, расположенных на трассе через 50 м.

Исследования горизонтальных градиентов производились по сезонам в разное время суток. Анализ результатов измерений показывает, что в дневное время горизонтальные градиенты составляют 0,5...0,8 °C на расстоянии 50 м; после захода Солнца и в ночное время значения градиентов уменьшаются и не превосходят 0,05...0,1 °C на расстояниях 50...100 м; наиболее значительны градиенты на участках трассы, имеющих неоднородности подстилающей поверхности (над которыми происходит также и смена знака градиента); среднеинтегральные градиенты по всей трассе составляют 0,1...0,4 K/km; максимальные градиенты по всей трассе не превышали 1,5...1,8 K/km, а в ночное время 0,4...0,5 K/km.

В то же время значения градиентов температуры, вычисленные по стандартным измерениям на уровне земли в точках на расстоянии 100 км по абсолютной величине не превосходят 0,02 K/km в летний период и 0,01 K/km — в зимний [17]. Выполненные в [18] синхронные измерения показателя преломления (в радиодиапазоне) на расстоянии 100 км друг от друга и высоте 100 м от поверхности Земли также показывают, что горизонтальные градиенты по крайней мере на порядок меньше, чем на коротких трассах.

Рассмотрим случай астрономической рефракции при зенитных расстояниях  $\zeta = 70^\circ$  и  $\zeta = 90^\circ$ , а также возьмем приземную трассу длиной  $L$  ( $\zeta \approx 90^\circ$ ).

Добавочную рефракцию в вертикальной плоскости  $\Delta r^B$ , обусловленную горизонтальной неоднородностью атмосферы, можно рассчитать по приближенным формулам [19]

$$\Delta r_{\infty}^B = \frac{\partial n}{\partial L_1} \frac{1}{\beta \cos^2 \xi} / \zeta \leqslant 70^\circ; \quad (1)$$

$$\Delta r_{\infty}^B = \frac{\partial n}{\partial L_1} \frac{R_0}{1 - \Delta n_0 \beta R_0 \sin^2 \zeta} / \zeta \approx 90^\circ; \quad (2)$$

$$\Delta r_L^B = \frac{\partial n}{\partial L_1} \frac{\beta L^2}{4} \text{ (приземная трасса).} \quad (3)$$

Для поправок в горизонтальной плоскости (боковая рефракция  $r_B$ ) формулы имеют вид

$$r_B^B = \frac{\partial n}{\partial L_2} \frac{1}{\beta \cos \zeta} \quad (\zeta \leq 70^\circ); \quad (4)$$

$$r_\infty^B = \frac{\partial n}{\partial L_2} \sqrt{\frac{\pi R_0}{2\beta}} \quad (\zeta \approx 90^\circ); \quad (5)$$

$$r_L^B = \frac{\partial n}{\partial L_2} \frac{L}{2} \quad (\text{приземная трасса}). \quad (6)$$

В приведенных формулах  $\partial n / \partial L_1$  — горизонтальный градиент показателя преломления в плоскости «наблюдатель—источник—центр Земли»;  $\partial n / \partial L_2$  — то же в перпендикулярной плоскости;  $\beta$  — коэффициент, характеризующий скорость убывания показателя преломления с высотой;  $\Delta n_0 = n_0 - 1$  — показатель преломления в точке наблюдения;  $R_0$  — радиус Земли; индексы  $\infty$  и  $L$  относятся к астрономической и земной рефракции.

Используя для показателя преломления формулу Гладстона

$$n_0 = 1 + c_\lambda \frac{P_0}{T_0}, \quad (7)$$

запишем выражение для горизонтального градиента показателя преломления

$$\frac{\partial n}{\partial L} = \frac{c_\lambda}{T_0} G - c_\lambda \frac{P_0}{T_0^2} \Gamma = \nabla n_P - \nabla n_T. \quad (8)$$

В формулах (7), (8)  $P_0$  и  $T_0 = t_0 + 273,15$  — приземные значения давления и температуры;  $G$  и  $\Gamma$  — горизонтальные градиенты давления и температуры;  $c_\lambda = 79 \cdot 10^{-6}$  для  $\lambda = 0,55$  мкм. Для типичных условий вклад градиента давления в общий градиент на порядок меньше, чем вклад градиента температуры, т. е.  $\nabla n_T \gg \nabla n_P$ . Еще менее значителен вклад влажности в величину  $n$  и  $\nabla n$  (в оптическом диапазоне). Поэтому в дальнейших оценках рассмотрим лишь влияние температурных градиентов, полагая

$$\frac{\partial n}{\partial L} \simeq -\nabla n_T = -c_\lambda \frac{P_0}{T_0^2} \Gamma. \quad (9)$$

Используя данные о величине  $\Gamma$  из работы [10], вычислим значения рефракционных добавок для зимних ( $t_0 = -30^\circ\text{C}$ ,  $\Gamma = -0,1$  К/км,  $\beta = 0,12$ ) и летних условий ( $t_0 = +30^\circ\text{C}$ ,  $\Gamma = -0,4$  К/км,  $\beta = 0,1$ ). Результаты расчетов (в угловых секундах) для формул (1)–(6) приведены ниже, при этом полагалось  $P_0 = 1000$  мбар,  $R_0 = 6370$  км,  $L = 20$  км,  $\partial n / \partial L_1 = \partial n / \partial L_2 = -\nabla n_T$ :

	1	2	3	4	5	6	$\nabla n_T \cdot 10^7$
Лето	6,1	542,0	0,71	2,0	22,4	0,71	3,44
Зима	2,0	232,5	0,33	0,7	7,9	0,28	1,34

Столь большие значения изменения астрономической рефракции как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости вызваны тем, что в приведенных формулах значения  $\partial n / \partial L$  полагались постоянными по знаку для всей атмосферы, что не соответствует действительности [9]. В формулах (1)–(6) отсутствует в явном виде зависимость вектора градиента  $n$  от азимута наблюдаемого направления. Поэтому полученные оценки соответствуют азимуту  $A=0, \pm 180^\circ$  при вычислении по формулам (1)–(3) и  $A=\pm 90, \pm 270^\circ$  — при использовании формул (4)–(6). Очевидно, что при азимутах, отличающихся на  $90^\circ$  от приведенных выше, формулы (1)–(6) дадут нулевые значения  $r_L^B$  и  $\Delta r_L^B$ .

Таким образом, приведенные значения  $r_L^B$  и  $\Delta r_L^B$  для астрономической рефракции можно считать максимальными. Наблюдаемые аномалии астрономической рефракции, как правило, меньше расчетных, особенно в случае боковой астрономической рефракции. Значения же  $r_L^B$ ,  $\Delta r_L^B$  для приземных трасс, по-видимому, типичны для равнинной местности. В других условиях, например, в горах или вблизи водной поверхности значения  $\Gamma$ , следовательно и значения  $r_L^B$  и  $\Delta r_L^B$  могут значительно отличаться.

Рассмотрим теперь вопрос о точности измерения  $\Gamma$  в случае горизонтальных трасс, исходя из требуемой точности  $\Delta$  учета  $r_L^B$  и  $\Delta r_L^B$ . Из формул (3) и (6) учетом (9) нетрудно получить выражения для оценки необходимой точности  $\sigma_\Gamma$  измерения горизонтальных градиентов при вычислении  $\Delta r_L^B$

$$\sigma_\Gamma = \frac{4 \Delta^B T_0^2}{\rho'' c_\lambda P_0 \beta L^2} = \frac{\Delta^B}{\Delta r_L^B} \Gamma \quad (10)$$

и боковой рефракции

$$\sigma_\Gamma = \frac{2 \Delta^B T_0^2}{\rho'' c_\lambda P_0 L} = \frac{\Delta^B}{r_L^B} \Gamma. \quad (11)$$

Численные оценки выполним для случая, когда допустимая погрешность определения углов  $r_L^B$  и  $\Delta r_L^B$  составляет 10% самого значения угла, т. е.  $\sigma_\Gamma = 0,1 \Gamma$ . Наконец, необходимая точность измерения температуры каждым датчиком (при измерении двумя независимыми датчиками) такова:

$$\sigma_{T_0} = \sigma_\Gamma L / \sqrt{2} \simeq 0,07 \Gamma L. \quad (12)$$

Полагая  $\Gamma = 0,1$  К/км для трассы  $L = 1$  км, получаем, что для обеспечения расчета  $r_L^B$  и  $\Delta r_L^B$  с ошибкой 10% необходимо измерять температуру с погрешностью менее  $0,01^\circ\text{C}$ . При этом надо иметь в виду, что если измерения проводятся на трассе с разной подстилающей поверхностью, то эта точность может оказаться недостаточной или даже фиктивной. Это связано с тем, что градиент  $\Gamma$ , измеренный по двум датчикам, мо-

жет не соответствовать среднеинтегральному значению Г на всей трассе не только по величине, но и по знаку.

Строгих критерии для определения количества датчиков на измеряемой трассе и их взаимного расположения не существует. Ясно, что количество и точность датчиков определяются характером решаемой задачи, типом трассы и не в последнюю очередь экономической целесообразностью применения расчетного метода в целом.

Еще более технически и методически сложную проблему представляет учет горизонтальных градиентов в свободной атмосфере. Например, для расчета астрономической рефракции на зенитном расстоянии  $88^\circ$  с ошибкой  $1''$  (даже без учета горизонтальной неоднородности) необходимо измерять профиль температуры в тропосфере с точностью не хуже  $0,1^\circ\text{C}$  [12]. Точность существующих методов еще далека от требуемой. Характеристики существующих дистанционных методов измерения температуры по данным работы [5] приведены в таблице, из которой видно, что наиболее перспективным по точности, всепогодности, пространственному разрешению является радиоакустический метод [5].

Проведенные исследования показывают, что наиболее жесткие требования к точности измерения горизонтальных градиентов температуры (также как и температуры) в нижних слоях атмосферы [13]. Расчеты показывают, что вклад слоя атмосферы до 10 км в общую величину  $\Delta r_{\infty}^B$  составляет более 75% при  $\zeta \geq 80^\circ$ , причем при  $\zeta = 90^\circ$  он уже составляет  $\sim 99\%$ . Вклад каждого, отдельного слоя  $\tau$  толщиной 1 км (в процентах ко всей атмосфере) в общую величину  $\Delta r_{\infty}^B$  в зависимости от высоты слоя над поверхностью Земли имеет следующие значения (в числителе для  $\zeta = 80^\circ$ , знаменателе  $90^\circ$ ):

Высота слоя, км	1	2	3	4	5	10	20	30
$\tau$	10,7	9,0	8,4	7,6	7,0	4,3	1,2	0,2
	91,5	2,9	1,6	1,0	0,7	0,2	—	—

Отсюда следует, что в зависимости от диапазона зенитных расстояний необходимо разное пространственное разрешение для определения горизонтальных градиентов и разная высота зондирования. Действительно, если при  $\zeta = 80^\circ$  вклад каждого слоя с высотой убывает незначительно, то при зенитных расстояниях, близких к  $90^\circ$ , определяющим становится нижний километровый слой, формирующий  $\sim 90\%$  всей величины  $\Delta r_{\infty}^B$ . Более того, расчеты показывают, что приземный слой толщиной всего 20 м дает свыше 70%, а слой в 100 м — 81% от величины  $\Delta r_{\infty}^B$  (при  $\zeta = 90^\circ$ ). Таким образом, пространственное разрешение при измерении горизонтальных градиентов грубо пропорционально  $[\text{ctg}] \zeta$ . Для более точных расчетов следует использовать формулу, приведенную в [11].

Еще один источник систематических погрешностей всех расчетных методов — систематические ошибки измерения метео-

**Сравнительные характеристики дистанционных методов измерения температуры**

7-3886

Вид зондирования, зондирующий прибор, диапазон длии волн	Точность определения $T$ , разрешение по высоте. (Диапазон высот)	Ограничение метода	Характеристики измерений, степень разработки метода
Аэрометрическое. Радиозонд	$\pm (0,5...2,0)^\circ\text{C}$ , 100 м (0,1...30 км)	Измерения не проводятся при сильном дожде и скорости ветра $\geq 15 \text{ м/с}$ у земли	Стандартные пункты радиозондирования производят измерения 2 раза в сутки
Радиолокационное. Импульсный радар, 4 м	$\pm 2,5^\circ\text{C}$ , 1 км (1,5...18 км)	Пригоден лишь в погоду без осадков, при низкой влажности	Измерения косвенные, требуют привязки по температуре и привлечения модельных профилей $T$ . Метод в стадии разработки
Лазерное. Импульсный лазар, 0,500...0,700 мкм	$\pm 1^\circ\text{C}$ , 15...75 м 0,1...2 км)	Пригоден лишь в погоду без осадков, только ночью, при средней и большой дальности видимости. Точность падает с высотой	Измерения относительные, необходима привязка по температуре. Имеются отдельные сравнения с локальными измерениями, метод в стадии развития
Акустическое. а) импульсный трехсодар, 5...17 см б) бистатический импульсный содар, 20...15 см	$\pm 10^\circ\text{C}$ , 14 м (50...150 м) 2...3°C (по оценкам) 0,1...1 км)	Пригоден лишь в погоду без осадков, при наличии температурных флюктуаций. Сильно влияние рефракции на путь распространения	Точность неудовлетворительная, перспективы улучшения не наблюдается Проверка не производилась, по оценкам точность сравнима с высотными вариационными температурами
Радиоакустическое. Радар, 0,03...8 м	$\pm 0,5^\circ\text{C}$ , от 1 м до 100 м в зависимости от рабочей длины волны $\lambda_e$ и $0,15...2$ км при $\lambda_e = 8$ м	Пригоден в погоду без сплошных осадков при слабом и умеренном ветре, сильный ветер снижает высоту зондирования	Измерения абсолютные. Начато практическое использование. Продолжается усовершенствование метода с целью повышения точности и уменьшения влияния ветра

параметров в точке наблюдения, в первую очередь температуры воздуха. Достаточно сказать, что при систематической ошибке температуры  $\Delta T_0 = 1^\circ\text{C}$  и давления  $\Delta P_0 = 1$  мбар ошибки в углах вертикальной рефракции  $\Delta r$  имеют следующие значения:

	45°	70°	80°	85°	88°	89°	90°
$-\Delta r''(T_0)$	0,20	0,54	1,1	2,3	5,7	12,2	440
$\Delta r''(P_0)$	0,06	0,15	0,32	0,74	1,7	3,5	125

Формулы для вычисления поправок в вычисленные значения астрономической рефракции до  $\xi \geq 89^\circ$  из-за систематических погрешностей измерения температуры и давления имеют вид [14]

$$\Delta r(T_0) = -\rho'' c_\lambda \frac{P_0}{T_0^2} \Delta T_0 \operatorname{tg} \xi \approx -16'',3 \frac{P_0}{T_0^2} \Delta T_0 \operatorname{tg} \xi; \quad (13)$$

$$\Delta r(P_0) = \rho'' c_\lambda \frac{\Delta P_0}{T_0} \operatorname{tg} \xi \approx 16'',3 \frac{\Delta P_0}{T_0} \operatorname{tg} \xi. \quad (14)$$

Причиной систематических погрешностей может быть также неверно определенная эффективная длина волны излучения, а также неучет ее зависимости от спектральной прозрачности атмосферы, типа источника и приемника излучения [12, 14]. Ошибки могут составлять 3...5" при наблюдениях вблизи горизонта.

Источником систематических погрешностей в расчетных методах являются также инверсии температуры в приземном и пограничном слоях атмосферы. Вопрос этот подробно проанализирован в [15]. Отметим, что для их учета необходимо так или иначе производить дополнительные измерения, либо использовать такие модели атмосферы, в которых инверсии известны. Таковы, например, модели атмосферы, построенные для конкретного района с учетом суточной и сезонной изменчивости [12, 15].

В заключение следует отметить, что для произвольных трасс надежные оценки вертикальной и боковой рефракции расчетными методами необходимо получать при следующей схеме метеорологического обеспечения. Как минимум на двух уровнях, между которыми расположен наблюдатель (и источник излучения для горизонтальных трасс), измеряются горизонтальные градиенты температуры и давления. Точность датчиков, их количество и взаимное расположение должны быть оптимальны для надежного измерения значения и азимута направления средненеинтегральных градиентов вдоль наблюдаемой трассы.

Профиль температуры (или показателя преломления) над верхним уровнем градиентных измерений следует задавать адекватной моделью, исключающей систематические погрешности в рассматриваемом диапазоне высот, либо для его определения использовать дистанционные методы.

Стандартное аэрологическое зондирование целесообразно при выполнении следующих условий.

1. Максимально допустимое расстояние  $D$  между пунктами зондирования и наблюдения должно быть таким, чтобы дополнительная погрешность  $\sigma_r$  из-за «удаления» траектории луча на больших зенитных расстояниях от пункта зондирования не превосходила некоторой заданной величины  $\Delta_D$ . Величину  $D$  определяем по формуле [14]

$$D = \left[ \frac{\Delta_D}{\sigma_r(D_1)} \right]^2 D_1, \quad (15)$$

где  $\sigma_r(D_1)$  — значения ошибок из-за пространственной изменчивости на некотором «единичном» расстоянии  $D_1$ . Например, в случае астрономической рефракции значения  $\sigma_r(D_1=100 \text{ км})$  приведены ниже:

$\xi$	$70^\circ$	$80^\circ$	$85^\circ$	$88^\circ$	$89^\circ$	$90^\circ$
$\sigma''(D_1)$	0,01	0,12	0,7	3,4	10	33

2. Максимально допустимый интервал  $\Delta t$  (ч) между временем зондирования и наблюдения, в течение которого можно пренебречь временной изменчивостью, находим по формуле [14]

$$\Delta t = \left[ \frac{\Delta_t}{\sigma_r(t_1)} \right]^2 t_1, \quad (16)$$

где  $\Delta_t$  — допустимая погрешность в определении углов рефракции из-за временной изменчивости;  $\sigma_r(t_1)$  — значения ошибок в рефракции из-за временной изменчивости в «единичном» интервале времени  $t_1$ . Их значения для астрономической рефракции в зависимости от зенитного расстояния при  $t_1=6 \text{ ч}$  составляют:

$\xi$	$70^\circ$	$80^\circ$	$85^\circ$	$88^\circ$	$89^\circ$	$90^\circ$
$\sigma_r(4)$	0,02	0,2	1,1	7,0	20	60

Следовательно, задавая верхний предел ошибок  $\Delta$ , обусловленных пространственно-временной изменчивостью метеопараметров, по формулам (15) и (16) нетрудно найти значения  $D$  и  $\Delta t$ .

Для измерения температуры в пограничном слое атмосферы наиболее оперативным и точным методом является радиоакустическое зондирование. Его применение существенно упростило бы задачу определения горизонтальных градиентов с необходимым пространственным разрешением и более высокой точностью по сравнению со стандартным зондированием. При этом существенно упрощается задача определения температуры на больших высотах. Поскольку требования к точности измерения температуры уменьшаются с увеличением высоты [12, 14], то выше верхней границы радиоакустического зондирования можно использовать с большей надежностью данные стандартного аэрологического зондирования либо более простые модели атмосферы.

1. Василенко Н. А. Определение астрономической рефракции у горизонта в различные периоды года // Астрометрия и астрофизика. 1972. Вып. 17. С. 96—108. 2. Василенко Н. А., Харитонова Т. Н. О точности вычисления астрономической рефракции методом статистических ортогональных разложений показателя преломления // Астрометрия и астрофизика. 1977. Вып. 31. С. 38—41. 3. Заблоцкий Ф. Д., Киричук В. В. Экспериментальные исследования астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1976. Вып. 23. С. 28—35. 4. Зверев А. С. Синоптическая метеорология. Л., 1968. 5. Каллистровова М. А., Кон А. И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М., 1985. 6. Канторов А. Ф., Коржинская С. В., Тюттерев Г. С. О зависимости значений астрономической рефракции от азимута светила // Рефракция оптических волн в атмосфере. Томск, 1982. С. 9—17. 7. Киричук В. В., Олейник Н. Н. Опыт определения асимметрии астрономической рефракции вблизи горизонта // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1977. Вып. 26. С. 32—39. 8. Куштин И. Ф. Влияние эллипсоидальности атмосферы на углы полной и астрономической рефракции // Геодезия и фотограмметрия. Ростов н/Д., 1980. С. 2—24. 9. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., 1976. 10. Мищенко И. А. Оценка случайной погрешности измерения длины фазовым дальномером, связанный с градиентами температуры приземной трассы // Исследования в области метрологического обеспечения дальномерии. Л., 1981. С. 65—70. 11. Нелюбина В. П., Нелюбин Н. Ф. Вычисление земной и астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях // Астрометрия и астрофизика. 1980. Вып. 41. С. 82—91. 12. Нелюбин Н. Ф. Оперативный учет рефракции на наклонных трассах произвольной протяженности // Проблемы оптики атмосферы. Новосибирск, 1982. С. 127—140. 13. Нелюбин Н. Ф. Необходимая точность наблюдений для проверки теории рефракции // Геодезия и фотограмметрия. Ростов н/Д., 1983. С. 19—31. 14. Нелюбин Н. Ф. Учет влияния атмосферы при измерениях зенитных расстояний и наклонных дальностей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1984. 15. Нефедьева А. И. Астрономическая рефракция, Ч. III // Изв. АОЭ. 1973. № 41. 42. С. 3—70. 16. Оптическая рефракция в земной атмосфере (наклонные трассы) // Под ред. В. Е. Зуева. Новосибирск, 1983. 17. Решетов В. Д. Изменчивость метеорологических элементов в атмосфере. Л., 1973. 18. Рукина А. Н. Одновременное исследование метеорологических условий рефракции радиоволн в пунктах, разнесенных на 100 км // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25, № 2. С. 407—409. 19. Шабельников А. В. Рефракция электромагнитных волн в трехмерно-неоднородной атмосфере // Всесоюз. совещ. по рефракции электромагнитных волн в атмосфере: Тез. докл. Томск, 1983. С. 153—156. 20. Юношев Л. С. Боковая рефракция света при измерениях углов. М., 1969. 21. Brünig M. Messungen und Gedanken zur Frage der Refraktionswerte bei grossen Zenitdistanzen // Die Sterne. 1955. Bd. 31. № 9, 10. S. 172—176. 22. Clemense G. M. Astronomical refraction at great zenith distances // Astron. I. 1951. V. 56. № 1193. P. 123—124.

Статья поступила в редакцию 24.01.87