

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА ПО СПОСОБУ СПЕКТРАЛЬНЫХ РАЗНОСТЕЙ

А. КРАУТЕР

Будапештский Технический Университет, Кафедра Низшей Геодезии

(Поступило в печать: 29-го мая 1969 г.)

Представлено доцентом Ф. Шаркези

Способ спектральных разностей является в настоящее время наиболее перспективным способом определения поправки за метеорологические условия при светодальномерных измерениях расстояний. В его основе лежит измерение разности оптических путей, приобретенной световыми колебаниями двух длин волн после прохождения измеряемого расстояния вследствие атмосферной дисперсии. Часть возникающей разности обусловлена отличием среднего состояния атмосферы вдоль измеряемой линии от стандартного,¹ поэтому измерение этой разности позволяет получить среднеинтегральное значение показателя преломления воздуха для световых колебаний вдоль измеряемой линии.

Способ впервые был предложен М. Т. Прилепиным [3]. Им была получена рабочая формула:

$$n = \frac{\Delta D}{D} \cdot \frac{n_0 - 1}{\Delta n_0} + 1, \quad (1)$$

где n — среднеинтегральное значение группового показателя преломления воздуха вдоль измеряемой линии; ΔD — измеряемая разность оптических путей; D — приближенное значение измеряемого расстояния; n_0 — групповой показатель преломления стандартного воздуха для той длины волны, при которой вычисляется n ; Δn_0 — разность значений группового показателя преломления стандартного воздуха для использованных длин волн.

В 1965. г. Томпсоном и Вудом [15] была получена формула

$$n = \frac{\alpha D}{\alpha D - \Delta D}, \quad (2)$$

где

$$\alpha = \frac{\Delta n_0}{n_0 - 1}.$$

¹ стандартным называется сухой воздух, содержащий 0,03% углекислого газа при нормальном давлении (нормальное давление при температуре 0° С и при ускорении силы тяжести 980,665 см/сек² соответствует 760 мм рт.ст.) и при температуре +15° С

Отметим, что в формулах (1) и (2) влияние влажности воздуха не учитывается. Тождественность этих формул можно легко доказать, имея в виду, что $\alpha D \gg \Delta D$.

Рассмотрим теперь, каким образом зависит средняя квадратическая ошибка средненинтегрального значения группового показателя преломления воздуха вдоль измеряемой линии m_n от точности измерения или определения остальных значений в формуле (1). Если предположить, что измерение расстояний производится при большей длине волны световых колебаний (это целесообразно с точки зрения распространения световой энергии в атмосфере), а также, что точность определения показателя преломления стандартного воздуха повышается с возрастанием длин волн (это подтверждается практикой), и, наконец, что состояние атмосферы во время измерений незначительно отличается от стандартного, то, согласно теории ошибок, получим

$$m_n = \frac{n_0 - 1}{\Delta n_c} \sqrt{\left(\frac{m_{\Delta D}}{D}\right)^2 + m_{\Delta n_0}^2}, \quad (3)$$

где $m_{\Delta D}$ — средняя квадратическая ошибка измерения разности оптических путей; $m_{\Delta n_0}$ — средняя квадратическая ошибка определения разности значений группового показателя преломления стандартного воздуха для использованных длин волн.

Первый член под квадратным корнем в формуле (3) представляет техническую сторону способа спектральных разностей. Не менее важен, однако, и второй член подкоренного выражения. Он указывает на то обстоятельство, что только техническое совершенствование аппаратуры не может беспредельно повышать точность определения показателя преломления воздуха способом спектральных разностей. Разумное техническое совершенствование, с одной стороны, должно соответствовать желаемой точности измерения расстояний, с другой стороны, оно должно учитывать точность, с которой возможно определить разность значений группового показателя преломления стандартного воздуха.

По имеющимся в литературе сведениям [15], [13] в наши дни техника измерений позволяет получать разность оптических путей световых колебаний с относительной ошибкой $\frac{m_{\Delta D}}{D} \sim 10^{-8}$ при расстояниях не менее 10 км. Поэтому приобретает особое значение исследование возможной величины второго члена в правой части равенства (3), зависящей от неточности применяемых дисперсионных формул. К сожалению, исследователи, разработавшие и развивавшие способ спектральных разностей применительно к измерению расстояний, сосредотачивали внимание на технической стороне вопроса, упустив из виду то обстоятельство, что точность дисперсионной формулы играет не меньшую роль при точном измерении расстояний.

В настоящее время Международным геодезическим и геофизическим союзом приняты коэффициенты дисперсионной формулы типа Коши, определенные Барреллом и Сирсом, а также дисперсионная формула другого вида (Эдлена), полученная, однако, в частности, по результатам измерений Баррелла и Сирса [5].

При оценке точности этих формул, прежде всего, рассмотрим некоторые обстоятельства их получения. В [6] Эдлен правильно отметил, что при определении коэффициентов дисперсионной формулы для более широкого диапазона спектра необходимо использовать результаты действительных измерений дисперсии в коротковолновой части спектра. Однако, так как в этой области были определены лишь значения относительной дисперсии, необходимо было их «привязать» к абсолютным значениям, полученным по наиболее достоверной дисперсионной формуле в зоне перекрытия.

При выборе наиболее достоверной дисперсионной формулы Эдлен отмечает, что наименьшим разбросом обладают результаты Кэстерса и Лампе [12], а также Баррелла и Сирса [4], в то же время они расходятся по абсолютному значению примерно на $8,5 \cdot 10^{-8}$. «Такое расхождение значительно больше, чем погрешности измерений Баррелла и Сирса, судя по подробному описанию их опытов и остается необъяснимым, пока неизвестны соответствующие данные экспериментов Кэстерса и Лампе. При таком положении я предпочел выбрать результаты Баррелла и Сирса . . .»

После появления формулы Эдлена произошли следующие события, позволяющие сомневаться в правильности коэффициентов Баррелла и Сирса.

В 1956 г. В. П. Коронкевич [1] опубликовал определенные им абсолютные значения показателя преломления воздуха. Полученные результаты поразительно близки к значениям, определенным Кэстерсом и Лампе.

Как указывает В. П. Коронкевич [1], в правильности дисперсионной формулы можно убедиться «. . . сравнением показателя преломления нормального² воздуха для красной линии кадмия, вычисленного по формуле, со значением этой величины, полученным непосредственно при определении метра в длинах световых волн.»

Приведенные в [1] данные свидетельствуют о том, что коэффициенты Кэстерса и Лампе, а также В. П. Коронкевича полностью удовлетворяют этому условию, в то же время значения показателя преломления, полученные двумя путями по коэффициентам Баррелла и Сирса, расходятся на $11 \cdot 10^{-8}$.

В 1960 г. Свенссон опубликовал статью [14], в которой пишет следующее:

«При исследовании Баррелла и Сирса, использованном Эдленом, при определении абсолютного значения показателя преломления воздух был обезвожен посредством силикагеля помимо других веществ . . . можно было бы заподозрить, что силикагель в некоторой мере повлиял на результаты.

² нормальным называется сухой воздух, содержащий 0,03% углекислого газа при температуре 0° С и давлении 760 мм рт.ст.

Абсолютные значения . . . могут быть занижены из-за дефицита азота в воздухе, обусловленного силикагелем.

Более поздние абсолютные измерения показателя преломления воздуха показывают, что абсолютные значения, полученные Барреллом и Сирсом, могут быть занижены. Влияние силикагеля может способствовать объяснению расхождений между абсолютными значениями, полученными Барреллом и Сирсом, а также Кэстерсом и Лампе.»

Таким образом, не исключено, что коэффициенты дисперсионной формулы, принятые Международным геодезическим и геофизическим союзом в 1960 г., дают систематически заниженные результаты в видимой области спектра. И, хотя Эдлен в более поздней работе [7] вновь отдает предпочтение результатам Баррелла и Сирса, но в то же время признает, что неточность абсолютных значений показателя преломления стандартного воздуха в настоящее время имеет порядок $5 \cdot 10^{-6}$.

До сих пор все наши рассуждения, касающиеся неточности дисперсионных формул, относились к значениям так называемого фазового показателя преломления, характеризующего скорость распространения фазы некоторого монохроматического светового колебания. Однако, поскольку при светодальномерных измерениях имеют дело с немонахроматическим светом, следует перейти к значениям так называемого группового показателя преломления, характеризующего скорость распространения световой энергии. Зависимость между фазовым и групповым показателем преломления имеет вид

$$n_{rp} = n_{\phi} - \lambda \cdot \frac{dn_{\phi}}{d\lambda} \quad (4)$$

Фазовый показатель преломления по формуле типа Коши

$$(n_{\phi} - 1) \cdot 10^6 = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}, \quad (5)$$

где A , B , C — упомянутые уже коэффициенты, определенные по результатам измерений дисперсии.

Из (4) и (5) получим

$$(n_{rp} - 1) \cdot 10^6 = A + \frac{3B}{\lambda^2} + \frac{5C}{\lambda^4}, \quad (6)$$

При переходе от фазового показателя преломления к групповому обнаруживается весьма серьезное расхождение между значениями, вычисленными по дисперсионным коэффициентам Кэстерса и Лампе и В. П. Коронкевича, несмотря на то, что значения фазового показателя преломления, полу-

ченные по этим же коэффициентам, почти одинаковы. Очевидно, что расхождение это обусловлено различными крутизнами дисперсионных кривых, определенных упомянутыми исследователями.

Возникает вопрос: почему имеют отдельные дисперсионные кривые различные крутизны. Возможны два случая:

1. Если измерение фазового показателя преломления сопровождается заметными случайными ошибками, то точки, соответствующие измеренным значениям n_{ϕ} при допустим безошибочных значениях длины волны, будут располагаться не по одной кривой, а на некоторой площади, ширина которой характеризуется средней квадратической ошибкой измерения n_{ϕ} . Внутри этой площади может располагаться семейство кривых данного типа с различными параметрами.

2. Если измерение фазового показателя преломления сопровождается систематическими ошибками, то эти ошибки изменяют идеальную дисперсионную кривую, причем, если они зависят от длины волны (или проще: не постоянные), то искажается и скорость изменения n_{ϕ} по λ , т. е. крутизна дисперсионной кривой.

Так как расхождения между измеренными и вычисленными значениями фазового показателя преломления малы внутри одной серии измерения, в то же время, разности измеренных значений n_{ϕ} полученных различными авторами, почти на порядок выше, то результаты интерференционных измерений искажены именно систематическими ошибками.

Систематическую ошибку в дисперсированных формулах удобно рассматривать в виде постоянной и переменной составляющих. Нетрудно видеть, что в дисперсионной формуле типа Коши $(n_{\phi} - 1) \cdot 10^6 = A$ является асимптотой данной дисперсионной кривой. Так как коэффициент A имеет различные значения у различных исследователей (дисперсионные формулы искажены постоянной систематической ошибкой), то значения фазового показателя преломления, вычисленные по различным дисперсионным формулам, с возрастанием длины волны будут стремиться не к одной и той же величине. Правда, эти формулы относятся, как правило, к небольшой части спектра, но нет основания предполагать, что показатель преломления в некотором (даже, неопределенном) участке ведет себя не так, как в примыкающей части спектра, если речь идет об общем стремлении значения фазового показателя преломления к некоторой постоянной величине при возрастающих длинах волны.

Что может представлять собой это предельное значение фазового показателя преломления? Ответ на этот вопрос дают результаты измерений дисперсии как в далекой инфракрасной части спектра, так и в области весьма коротких радиоволн. Некоторые из таких результатов приведены в табл. 1.

Результаты, полученные при помощи микроволновых рефрактометров, менее точны и характеризуются средней квадратической ошибкой $\pm 0,1 - 0,2$. С учетом всех приведенных результатов ожидаемое минимальное значение

Таблица 1

		Автор	Год	Способ	$(n_{0 \min} - 1) \cdot 10^6$
Со стороны	световых волн	К о х [11]	1905	измерение при $\lambda \sim 70\,000 \text{ \AA}$	273,0
		он же [11]	1905	„ при $\lambda \sim 90\,000 \text{ \AA}$	273,0
		Эдлен [6]	1953	экстраполяция при $\lambda \rightarrow \infty$	272,6
		Шлютер и Пек [14]	1958	измерение при $\lambda \sim 20\,000 \text{ \AA}$	273,0
		Рэнк и др [14]	1958	„ при $\lambda \sim 15\,000 \text{ \AA}$	273,2
	радиоволн	Эссен и Фрум [8]	1951	микроволновый рефрактометр 24 000 Мгц	273,1
		Гэбриел [10]	1952	„ 9 423 Мгц	272,9
		Э с с е н [9]	1953	„ 9 200 Мгц	273,0
		Джесинский и Берри [10]	1953	„ 3 360 Мгц	273,3

фазового показателя преломления стандартного воздуха составляет примерно $(n_{0 \min} - 1) \cdot 10^6 \sim 272,9$.

Если систематическую ошибку дисперсионных формул представить в виде двух составляющих, зависящей и не зависящей от длины волны, то достоверным признаком наличия постоянной части систематических ошибок в дисперсионной формуле является мера отклонения коэффициента A от приведенного выше значения.

Теперь рассмотрим другую составляющую систематической ошибки. Ошибка такого вида переменная по величине (зависит от длины волны, но эта зависимость может быть и неизвестной) и ее наличие искажает форму дисперсионной кривой (первая составляющая изменяет лишь местоположение дисперсионной кривой в системе координат). Влияние этой ошибки выражается в значениях коэффициентов B и C .

Оценим влияние переменной части систематической ошибки. Допустим, что имеем интерферометр с двумя вакуумированными эталонами. Вследствие первоначальной искусственной разности оптических путей на экране прибора наблюдается интерференционная картина. В момент введения в один из эталонов атмосферного воздуха интерференционная картина изменяется и образуется «крюк» (в случае нормальной дисперсии место сильнейшего искажения интерференционной картины называется ахроматическим местом). Если каким-либо образом определить длину волны ахроматического места λ_a и длину волны нулевой интерференционной полосы λ_0 одновременно (например, путем фотографирования интерференционной картины), то, учитывая дифференциальное уравнение общей интерференционной полосы по [1] можно написать

$$n(\lambda_0) - n(\lambda_a) + \lambda_a \cdot \frac{\partial n(\lambda_a)}{\partial \lambda_a} = 0. \quad (7)$$

С учетом (4) получим

$$n_{\Phi}(\lambda_0) = n_{r\rho}(\lambda_a). \quad (8)$$

Найденное автором в [2] соотношение (8) позволяет свести задачу определения значений группового показателя преломления к задаче вычисления значений фазового показателя преломления.

Из (5), (6) и (8) получим

$$\frac{B}{C} = \frac{5 \lambda_0^4 - \lambda_a^4}{\lambda_0^2 \lambda_a^4 - 3 \lambda_a^2 \lambda_0^4}. \quad (9)$$

Равенство (9) позволяет при неизвестных точных значениях коэффициентов B и C при помощи известного их отношения B/C найти соответствующие пары величин λ_a и λ_0 . Это же равенство позволяет решить следующую задачу: найти новые коэффициенты A , B и C в дисперсионной формуле типа Коши так, чтобы по этой формуле можно было вычислить значение как фазового, так и группового показателя преломления под условием $[v] = \min.$, где v — отклонение значений n , полученных по новой формуле, от некоторых значений, принятых безошибочными. При вычислениях, выполненных на основе равенства (9), безошибочными предполагались значения фазового показателя преломления, пропорциональные значениям, вычисленным по формуле Эдлена, с коэффициентом пропорциональности, учитывающим систематическую ошибку результатов Баррелла и Сирса. Коэффициент пропорциональности определялся так, чтобы отклонения n_{Φ} от средних арифметических значений, вычисленных по формулам Кэстерса и Лампе, а также В. П. Коронкевича, были минимальными в диапазоне длин волн от 0,45 мк до 0,67 мк. Предполагалось также, что безошибочное значение группового показателя преломления при длине волны λ_a может быть получено, как значение фазового показателя преломления при длине волны λ_0 , где последнее значение вычисляется по формуле Эдлена с уже известным коэффициентом пропорциональности. Связь между соответствующими значениями λ_a и λ_0 определяет формула (9).

Так как формула (9) дает правильные значения λ_0 , соответствующие заданным λ_a , только при безошибочном значении отношения B/C , а поправки к значениям B и C , получаемые в конце вычислений, изменяют отношение B/C , значения новых коэффициентов A , B и C могут быть вычислены только путем последовательного приближения.

Ввиду того, что ожидалось изменение значений коэффициентов B и C в зависимости от диапазона, охваченного вычислениями, задача была решена в нескольких отдельных циклах: диапазон первого цикла включал в себя дли-

ны волны в пределах от $\lambda_a = 0,67$ мк до $\lambda_a = 0,45$ мк, последнего (шестого) — от $\lambda_a = 0,67$ мк до $\lambda_a = 0,40$ мк. Значение коэффициента A также было включено в вычисления в качестве неизвестного.

Вычисления были выполнены при помощи электронной вычислительной машины; полученные результаты приведены в табл. 2. ($m = \sqrt{\frac{[v\lambda]}{n-3}}$, где $48 \leq n \leq 56$ — число уравнений поправок).

Таблица 2

Величина λ мк	A	B	C	$K = \frac{B}{C}$	m
0,45	272,765	1,4937	0,01859	80,35	$\pm 0,010$
0,44	272,774	1,4903	0,01884	79,09	$\pm 0,012$
0,43	272,784	1,4866	0,01912	77,73	$\pm 0,014$
0,42	272,796	1,4822	0,01944	76,26	$\pm 0,017$
0,41	272,810	1,4772	0,01978	74,66	$\pm 0,020$
0,40	272,827	1,4714	0,02018	72,93	$\pm 0,025$

Коэффициенты, полученные для диапазона от 0,45 мк до 0,67 мк, близки к значениям, определенным Кэстерсом и Лампе.

Теперь рассмотрим, какие расхождения имеют место в значениях группового показателя преломления, вычисленных по формуле Баррелла и Сирса, а также по новым коэффициентам в диапазоне спектра от 0,40 мк до 0,65 мк. При этом особое внимание следует уделить части этого диапазона от 0,40 мк до 0,45 мк, так как при применении способа спектральных разностей используемый диапазон спектра расширяется именно в сторону более коротких волн. Результаты вычислений приведены в табл. 3.

Таблица 3

λ мк	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44
Коэффициенты					
Баррелла и Сирса	304,048	302,421	300,916	299,522	298,229
новые	304,357	302,672	301,129	299,701	298,380
$\Delta n_0 \cdot 10^8$	-31	-25	-21	-18	-15

λ мк	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
Коэффициенты					
Баррелла и Сирса	297,027	292,140	288,598	285,946	283,907
новые	297,160	292,177	288,594	285,930	283,893
$\Delta n_0 \cdot 10^8$	-13	-4	0	+2	+1

Как показывают результаты в табл. 3, свыше определенной длины волны (примерно 0,50мк) расхождения становятся незначительными. Однако это означает, что при использовании длин волн, находящихся на краях видимой части спектра, разности значений группового показателя преломления стандартного воздуха (и, следовательно, определенное по способу спектральных разностей среднеинтегральное значение группового показателя преломления воздуха вдоль измеряемой линии) будут искажены заметными систематическими ошибками.

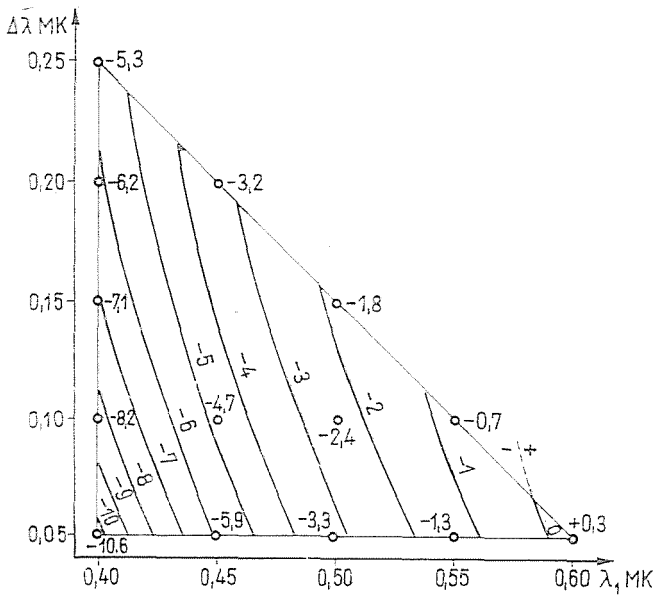


Рис. 1

Оценим величину этой систематической ошибки. Исходим из следующих предпосылок: 1. используемый диапазон спектра при измерении разности оптических путей лежит в пределах от 0,40мк до 0,65мк; 2. внутри этого диапазона возможны любые схемы устройства оптических рефрактометров с минимальной разностью длин использованных световых волн, равной 0,05мк; 3. точность определения среднеинтегрального значения группового показателя преломления зависит только от точности дисперсионной формулы (техника измерений обеспечивает точность на порядок выше). С учетом оговорок, сделанных при получении (3), будем иметь

$$\delta_n \sim - \frac{\delta \Delta n_0}{\Delta n_0} (n_0 - 1), \tag{10}$$

где δ_n — систематическая ошибка среднеинтегрального значения группового показателя преломления вдоль измеряемой линии; $\delta \Delta n_0$ — систематическая ошибка разности значений группового показателя преломления стандартного воздуха.

По (10) можно вычислить значения возникающей систематической ошибки при использовании любой схемы устройства, характеризующейся разностью длин волн $\Delta \lambda$ и значением λ_1 , соответствующим одной из используемых длин волн (другая длина волны составляет $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta \lambda$). При вычислении анализу точности была подвергнута формула Баррелла и Сирса, а «истинные» значения разности Δn_0 , необходимые при определении систематической ошибки $\delta \Delta n_0$, были вычислены по новым коэффициентам. Результаты показаны на рис. 1.; числа означают единицы шестого знака.

Как видно, применение дисперсионной формулы Баррелла и Сирса, коэффициенты которой приняты Международным геодезическим и геофизическим союзом, приводит к появлению заметных систематических ошибок в среднеинтегральном значении группового показателя преломления воздуха вдоль измеряемой линии, определенном по способу спектральных разностей. При этом особенно опасно использовать коротковолновый диапазон спектра с малой разностью длин волн. Вследствие этой систематической ошибки расстояния, полученные по результатам измерений, оказываются преуменьшенными.

Резюме

При светодальномерных измерениях если использовать два составляющих спектра, то по разности полученных результатов можно вычислить среднеинтегральное значение показателя преломления воздуха вдоль линии. Точность значения показателя преломления, определенного по способу спектральных разностей, зависит от точности измерения разности оптических путей, а также от точности использованной дисперсионной формулы. В статье рассматривается систематическая ошибка дисперсионной формулы типа Коши в виде двух составляющих: зависящей и не зависящей от длины волны света. При помощи дифференциального уравнения общей интерференционной полосы найдено новое отношение (8), позволяющее свести задачу определения значений группового показателя преломления к задаче вычисления значений фазового показателя преломления. Это же отношение позволило определить новые значения коэффициентов в дисперсионной формуле типа Коши. Указывается, что применение дисперсионной формулы типа Коши с коэффициентами, определенными Барреллом и Сирсом и принятыми Международным геодезическим и геофизическим союзом, приводит к появлению заметных систематических ошибок в среднеинтегральном значении группового показателя преломления воздуха вдоль линии, определенном по способу спектральных разностей.

Литература

1. Коронкевич, В. П.: Дисперсия воздуха в видимой области спектра. Оптика и спектроскопия 1, 85—89 (1956).
2. Краутер, А.: Определение показателя преломления воздуха при светодальномерных и радиодальномерных измерениях расстояний. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1968.
3. Прилепин, М. Т.: Светомодуляционный способ определения среднего значения показателя преломления воздуха вдоль линии. Труды ЦНИИГАиК, № 114, 127—130, Москва, 1957.

4. BARRELL, H.—SEARS, J. E.: The refraction and dispersion of air for the visible spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society Ser. A.* **238**, N° 786, 1—64. London, 1939.
5. DRAHEIM, H.: Neue Resolutionen der IAG zur elektronischen und elektrooptischen Entfernungsmessung. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 1964, N° 3, 109—111.
6. EDLEN, B.: The dispersion of standard air. *Journal of the Optical Society of America* **43**, 339—344 (1953).
7. EDLEN, B.: The refractive index of air. *Metrologia* **2**, 71—80 (1966).
8. ESSEN, L.—FROOME, K. D.: The refractive indices and dielectric constants of air and its principal constituents at 24 000 Mc/s. *Proceedings of the Physical Society Sect. B.* Vol. **64**, Part 10, N° 382 B 862—875, London, 1951.
9. ESSEN, L.: The refractive indices of water vapour, air, oxygen, nitrogen, hydrogen, deuterium and helium. *Proceedings of the Physical Society, Sect. B.*, Vol. **66**, Part 3, N° 399 B, 189—193, London, 1953.
10. JASINSKI, W.—BERRY, J. A.: Measurement of refractive indices of air, nitrogen, oxygen, carbon dioxide and water vapour at 3360 Mc/s. *Proceedings of the IEE*, Vol. **101**, Part 3, N° 69—74, 337—342, London, 1954.
11. KOCH, J.: Über die Dispersion der Luft im infraroten Spektrum. *Annalen der Physik* **17**, 658 (1905).
12. KÖSTERS—LAMPE: Bestimmung der Luftbrechung. *Physikalische Zeitschrift* **35**, 223 (1934).
13. OWENS, J. C.: The use of atmospheric dispersion in optical distance measurement. *Bulletin Géodésique* **89**, 277—292 (1968).
14. SVENSSON, K. F.: Measurements of the dispersion of air for wavelengths from 2302 to 6907 Å. *Arkiv för Fysik* **16**, 361—381 (1960).
15. THOMPSON, M. C.—WOOD, L. E.: The use of atmospheric dispersion for the refractive index correction of optical distance measurements. (A paper given at the IAG Symposium on Electromagnetic Distance Measurement, Oxford, England, 1965.)