

УДК 521.95:523.31—852:535.327

А. Ю. Яценко

## Рефракционное обеспечение высокоточных меридианных наблюдений

Приведено теоретическое решение проблемы рефракционного обеспечения наблюдений, выполненных с помощью современных фотоэлектрических меридианных кругов или других инструментов аналогичной точности. Прогнозируемая ошибка учета рефракции — менее  $0.01''$ . Даны оценки характеристик фотоэлектрического микрометра, расположения и точности метеодатчиков.

*DETERMINATION OF REFRACTION FOR VERY PRECISE MERIDIAN CIRCLE OBSERVATIONS, by A. Yu. Yatsenko.*—A theoretical solution of the problem of refraction determination for photoelectric meridian circle observations is given. The assumed precision of refraction determination is higher than  $0.01''$ . The estimates of photoelectric micrometer characteristics, arrangement and precision of meteorological sensors are given.

**Введение.** С появлением фотоэлектрических меридианных кругов проблема учета рефракции стала одной из наиболее важных. Собственная ошибка фотоэлектрических меридианных кругов (по оценкам их создателей) — менее  $0.01''$ . Ошибка одного наблюдения в Токийском каталоге [16] по склонению составила, однако,  $0.19''$ . Есть основания считать главной причиной того, что реальная ошибка одного наблюдения на этом инструменте более чем в десять раз превышает его собственные инструментальные ошибки, неточный учет рефракции традиционными методами — с помощью таблиц рефракции.

Существуют два теоретически возможных метода повышения точности учета астрономической рефракции.

**Дисперсионный метод.** Это прямой метод, позволяющий в принципе определить рефракцию по измерениям разности положений одного небесного светила в двух или более цветах в ходе наблюдений. Из возможных формул приведем одну, позволяющую по разности положений (т. е. по атмосферной дисперсии) получить значение рефракции [14]:

$$\rho_2 = \frac{L_2}{L_1 - L} \Delta\rho_{12} - \frac{1}{2} \left\{ \left[ (l_1 - l_2) \frac{L_1 + L_2}{L_1 - L_2} - (l_1 + l_2) \right] \frac{f_0 R_0 \sin z}{h_0} \right\}. \quad (1)$$

Здесь  $L_1$  и  $L_2$  — составные части показателей преломления  $n = 1 + L(\lambda)\varphi(P, T) - l(\lambda)\psi(f, T)$  для сухого воздуха, зависящие только от длины волны света;  $l_1$  и  $l_2$  — то же, для водяных паров;  $h_0$  — высота однородной атмосферы (примерно 8 км);  $f_0$  — парциальное давление водяных паров на поверхности Земли;  $R_0$  — радиус шарообразной Земли;  $z$  — наблюденное зенитное расстояние;  $\Delta\rho_{12}$  — полученная из наблюдений атмосферная дисперсия положений небесного объекта. Второй член в выражении (1) — это поправка за влажность. Она очень мала; на зенитном расстоянии  $45^\circ$  составляет не более 0.5 % величины  $\rho_2$ . Таким образом, мы имеем фактически линейную зависимость  $\rho_2$  от  $\Delta\rho_{12}$ . Посмотрим, к чему это приводит. Из теории вероятностей известно, что при косвенных измерениях погрешность функции  $f = f(a)$  равна [3]:  $\Delta f = (\partial f / \partial a) \Delta a$ , где производная  $\partial f / \partial a$  вычисляется при  $a = a$ , а  $a$  есть

среднее из  $n$  измерений:  $\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$ . В нашем случае  $\frac{\partial \rho_2}{\partial (\Delta \rho_{12})} = \frac{L_2}{L_1 - L_2}$ , т. е. ошибка определения

$$\Delta \rho_2 = \frac{L_2}{L_1 - L_2} \Delta (\Delta \rho_{12}). \quad (2)$$

Мы провели вычисления с целью определить величины  $\Delta \rho_{12}$  для разных длин волн. При этом использовалась теория рефракции в меридиональной модели атмосферы, изложенная в [8]. Результаты представлены в табл. 1, из которой видно, что коэффициент в (2) для  $\lambda_1 = 740$  и  $\lambda_2 = 400$  нм будет равен приблизительно 38 для всех зенитных

Таблица 1. Рефракция для разных длин волн

$\lambda$ , нм	$z$ , град			
	15	30	45	60
740	15.914"	34.281"	59.333"	102.540"
590	16.011	34.489	59.693	103.163
400	16.336	35.189	60.904	105.257

Примечание.  $T = 275.62$  К,  $P = 1014.34$  гПа,  $f_0 = 0$  гПа, широта точки наблюдения  $45^\circ$ , азимут  $90^\circ$ .

Таблица 2. Составляющие астрономической рефракции

Тип флуктуаций	Квазипериод, с	Диапазон частоты	Примечание
1. Высокочастотные («дрожание»)	$10^{-3} - 1$	кГц — Гц	Среднее квадратичное уклонение, вычисляется по спец. формулам
2. Среднечастотные («случайная рефракция»)	$1 - 10^3$	Гц — мГц	Гравитационные волны, не вычисляется по теории рефракции
3. Низкочастотные (суточные и годовые вариации)	$10^3 - 10^7$	мГц — мкГц	Вычисляется по теории рефракции или по таблицам рефракции (нормальная, регулярная рефракция)
4. Низкочастотные («аномалии»)	$10^3 - 10^8$ и более	мГц — нГц	Не вычисляется по теории рефракции

расстояний. Но 740 и 400 нм — это края видимого спектра. На практике провести наблюдения на таких длинах волн вряд ли будет легко. Если же взять более узкую спектральную полосу  $\lambda_1 = 590$  и  $\lambda_2 = 400$  нм, то коэффициент в (2), как следует из табл. 1, увеличивается уже до 50. Это значит, что для определения рефракции  $\rho_2$  с ошибкой, например  $0.01''$ , мы должны измерить атмосферную дисперсию с ошибкой  $0.0002''$ . Нужно принять еще во внимание дрожание и мерцание светил, а также (в подавляющем большинстве) их недостаточную яркость. Все это показывает, насколько трудно будет реализовать дисперсионный метод на практике. На данном этапе считаем, что гораздо больший эффект с намного меньшими затратами нам обеспечит второй метод.

**Метеорологический метод.** При изложении этого метода будем придерживаться терминологии И. Г. Колчинского [12], приведенной в табл. 2. Из таблицы видно, что для достижения требуемой точности, например  $0.01''$ , нужно учесть все перечисленные виды рефракционных флуктуаций с точностью чуть выше  $0.01''$ .

Первый тип флюктуаций («дрожание») можно исключить с помощью фотоэлектрического окулярного микрометра, если при этом будем иметь, например, 100 регистраций положения светила за время его прохождения через поле зрения. Для этого микрометр должен быть многощелевым. Известно [3], что доверительный интервал для среднего положения звезды за время ее прохождения через поле зрения равен

$$\sigma = [t_{\alpha}^2(n) \Delta S_{\bar{a}}^2 + (k_{\alpha}/3)^2 \delta^2]^{0.5}, \quad k_{\alpha} \equiv t_{\alpha}(\infty), \quad (3)$$

где  $t_{\alpha}$  — коэффициент Стьюдента;  $\delta$  — погрешность прибора, т. е. окулярного микрометра, равная  $0.01''$ ;  $\Delta S_{\bar{a}}$  — средняя квадратичная погрешность результата серии измерений

$$\Delta S_{\bar{a}} = \left\{ \sum_{i=1}^n (\bar{a} - a_i)^2 / [n(n-1)] \right\}^{0.5}; \quad (4)$$

$a_i$  — измеренное положение светила по склонению или по прямому восхождению. Если принять  $\Delta S_{\bar{a}}$  равной  $0.03''$ , то доверительный интервал  $\sigma$  с вероятностью 0.90 составит  $0.05''$ . Величина  $\Delta S_{\bar{a}} = 0.03''$  (т. е. среднее квадратичное значение одного уклонения положения звезды из-за дрожания  $\Delta S_{\Delta a}$  равно  $0.30''$ ) получена по нашим визуальным отсчетам на меридианном круге Астрономической обсерватории им. В. П. Энгельгардта: 25 звезд по 4 отсчета, т. е. 100 отсчетов. Вероятно, фотоэлектрический микрометр даст меньшее значение  $\Delta S_{\bar{a}}$ . Предположим, что оно равно  $0.02''$  (т. е.  $\Delta S_{\Delta a} = 0.20''$ ). В этом случае для тех же 100 отсчетов при одном прохождении звезды через поле зрения мы можем исключить первый и частично второй (до флюктуаций с периодом  $10^2$  с) типы флюктуаций с вероятностью 0.90 до уровня  $0.03''$ .

Второй член в выражении (3) с вероятностью 0.90 составит  $0.005''$  при ошибке окулярного микрометра  $0.01''$ , т. е. точность исключения дрожания ограничивается в основном астроклиматом и количеством отсчетов окулярного микрометра, причем для уменьшения ошибки от  $0.03$  до  $0.01''$  придется увеличить число отсчетов от 100 до 500 при сохранении  $\Delta S_{\Delta a}$  на уровне  $0.20''$ . Для уменьшения ошибки исключения дрожания до уровня миллисекунд необходимы более глубокие исследования этого вопроса.

Третий тип флюктуаций, как следует из табл. 2, учитывается по таблицам рефракции (или по формулам). Оставшуюся часть второго и четвертый тип флюктуаций можно учесть с помощью аэрологической и метеоинформации при условии корректной ее обработки. Для анализа этого вопроса разобьем атмосферу на две области, как делают метеорологи (см., например, [6]): 1. Приземный слой до высоты примерно  $0.1$  км (точнее, до высоты, на которой исчезает влияние строений и особенностей рельефа вблизи точки наблюдения на горизонтальные градиенты температуры); 2. Свободная атмосфера —  $0.1 - 82$  км. За нуль принята реальная поверхность Земли независимо от ее высоты над уровнем моря. Таких понятий, как пограничный слой, тропосфера и др., мы касаться не будем.

Рассмотрим сначала влияние на рефракцию свободной атмосферы. Для точного учета этого влияния следует получить ответы на такие вопросы: 1) чему равна допустимая абсолютная погрешность метеодатчиков радиозонда; 2) соответствует ли она реальной погрешности этих приборов; 3) достаточно ли количество уровней, на которых проводятся отсчеты метеопараметров атмосферы радиозондами; 4) чему равно максимально допустимое удаление станции аэрологического зондирования от меридианного инструмента.

Радиозондирование с наземных аэрологических станций (в настоящее время работают 800 таких станций плюс 40 судов погоды [2]) играет основную роль при изучении атмосферы.

Наши выкладки выполнены для зоны зенитных расстояний  $0-60^\circ$ , на которых обычно и проводятся высокоточные наблюдения. Эта зона охватывает цилиндр высотой 82 км, радиусом 140 км с центром в точке наблюдения. Снизу он ограничен земной поверхностью, сверху — поверхностью, близкой к эллипсоидальной. Высота определяется величиной показателя преломления, который (на 82 км) выходит за пределы точности ( $10^{-8}$ ), обеспечиваемой формулой Оуэнса [13]. 98 % величины рефракции приходится, однако, на значительно меньшую зону: это цилиндр высотой 27 км и радиусом 46 км.

Известно, что радиозонды дают информацию от уровня 0.12 до 27—40 км, т. е. они обеспечивают практически всю вторую область атмосферы.

Таблица 3. Рефракция, возникающая при изменении разностей температур на широте  $56^\circ$  и соседних широтах (с севера на  $2^\circ$ , с юга на  $1,5^\circ$ ), для всех уровней, кроме 0 км

z, град	Азимут			
	$0^\circ$ , юг		$180^\circ$	
	Окончательная	Опорная	Окончательная	Опорная
0	0.000"	0.002"	0.000"	-0.002"
15	15.225	15.227	15.225	15.222
30	32.796	32.798	32.796	32.792
45	56.760	56.762	56.761	56.753
60	98.091	98.087	98.093	98.070

Таблица 4. Рефракция, возникающая при внесении в исходные распределения метеопараметров «лишних» уровней, нарушающих исходные профили температуры до 4 К и давления до 5 гПа

z, град	Азимут			
	$0^\circ$		$180^\circ$	
	Окончательная	Опорная	Окончательная	Опорная
0	0.004"	0.002"	-0.004"	-0.002"
15	15.224	15.227	15.220	15.222
30	32.794	32.798	32.789	32.792
45	56.759	56.762	56.749	56.753
60	98.084	98.087	98.062	98.070

Для получения ответа на первый вопрос мы вычислили опорные значения рефракции для следующих условий: широта точки наблюдения  $+56^\circ$ ; температура  $T=288.8$  К; давление  $P=1010.8$  гПа; влажность  $f_0=0$  гПа. Аэрологические данные взяты на опорных широтах 44, 47, 50, 54.5, 56, 57.5, 62, 65,  $68^\circ$  для высот основных изобарических поверхностей, что соответствует примерно таким геометрическим высотам — 0, 1.45, 3, 5.8, 9.5, 12.2, 14, 16.5, 21, 24.5 км и для некоторых высот из [11]: 30, 40, 55, 75, 100 км. С этими опорными значениями рефракции далее будем сравнивать все остальные результаты.

Внесем «возмущение» в высотное распределение температуры на всех опорных широтах на величину  $-5$  К на высотах 1.5—82 км. Результаты вычислений совпали с опорными значениями. Таким образом, одинаковое изменение температуры (или давления) на всех широтах практически не сказывается на рефракции в пределах миллисекунды дуги (такое изменение температуры может наблюдаться при струйном течении западного или восточного направления).

Теперь внесем «возмущение» в температуры на тех же высотах так, чтобы разность температур на широтах 56 и  $54.5^\circ$  изменилась на всех уровнях 1.5—82 км в сравнении с исходной на 1.5 К, а на широтах 56 и  $57.5^\circ$  на 2 К (эти широты охватывают «большой цилиндр»). Результаты представлены в табл. 3, из которой видно, что при абсолютной ошибке метеодатчика радиозонда 0.8 К мы обеспечиваем учет рефракции в свободной атмосфере с ошибкой не более 0.004", при том что «возмущение» было внесено во всю толщу атмосферы, что мало вероятно. Это ответ на первый вопрос. Реальная ошибка датчика температуры радиозонда не выше этой величины [5], т. е. ответ на второй вопрос будет утвердительным. Требования к датчикам давления и влажности несколько меньшие, так как давление хорошо описывается аналитическими формулами, если известен градиент температуры, а поправка за влажность составляет доли процента величины рефракции.

Для получения ответа на третий вопрос мы внесли в исходное распределение температур на опорных широтах два «лишних» уровня, на которых температура на 2—4 К отличается от той, что должна быть согласно исходным данным, а давление — на 0—5 гПа. Результаты представлены в табл. 4. Отметим, что радиозонд выдает обычно отметки на 45 уровнях и более, а не на 15, как принято в «опорных» расчетах. Таким образом, ответ на третий вопрос будет утвердительным.

Ответ на четвертый вопрос можно получить таким путем. Берем три станции аэрологического зондирования, ориентированные по меридиану. Интерполируем значения метеопараметров с двух крайних станций на промежуточную и сравниваем их со значениями, реально полученными на ней. «Сближая» или «удаляя» станции друг от друга (т. е. рассматривая другие станции), можно найти максимально допустимое расстояние между ними при заданном уровне точности определения метеопараметров, и следовательно, рефракции. Для высот изобарических поверхностей и ветра подобное исследование выполнено в [10]. Максимально допустимое расстояние для ветра — 900 км, для высот изобарических поверхностей — 1500 км. О температуре данных нет. Для определения максимального расстояния мы взяли усредненные по месяцам значения температуры на основных изобарических поверхностях на станциях Вологда (широта 59.3°), Москва (55.75°) и Тамбов (52.75°) и провели интерполяцию значений температуры. Проинтерполированные значения совпали с реальными с точностью 0.2—0.5 К почти на всех высотах. Данные взяты из [1].

В 1974—1977 гг. мы взяли на станции Казань несколько сотен отдельных аэро разрезов. Анализ этих данных показал, что в ясные ночи в промежутке между 20 и 3 ч местного времени температура изменяется не более чем на 1—2 К на всех уровнях, кроме нижнего 1-километрового слоя. В такое изменение входит и регулярное суточное изменение температуры. Это значит, что и для отдельных аэрологических разрезов будут верны выводы, сделанные на основе усредненных параметров. Таким образом, интерполяция температуры со станций, расположенных на удалении до 400 км, позволит вычислять рефракцию с ошибкой не выше 0.01".

В [9] показано, что в зоне зенитных расстояний 0—60° значения рефракции, вычисленные для меридиональных средних моделей атмосферы, совпадают со значениями из Пулковских таблиц рефракции с точностью до 0.01". Значит, влияние свободной атмосферы для указанных зенитных расстояний в принципе можно учитывать с помощью этих таблиц. Последнее не так просто, как может показаться. Нужно исключить часть рефракции, приходящейся на приземный слой, и привести температуру, давление и влажность, используемые для вычисления табличных редуций, в соответствие с реально измеренными температурой, давлением и влажностью на верхней границе приземного слоя и вертикальными *табличными* градиентами температуры и влажности.

Из изложенного следует, что верхняя граница приземного слоя находится на высоте, на которой наклоны поверхностей постоянного показателя преломления (ПППП) столь малы, что для зоны зенитных расстояний 0—60° меридиональную (или меридионально-широтную) модель атмосферы можно заменить сферически-симметричной без ущерба для точности на принятом ее уровне. Для каждого пункта на Земле будет своя высота приземного слоя.

Следовательно, рефракционные аномалии с периодом  $10^2$ — $10^8$  с возникают главным образом в приземном слое. Причем, на наш взгляд, значительная доля аномалий возникает из-за неправильного выбора точки отсчета температуры воздуха для вычисления полной величины рефракции. Практическое подтверждение этому (правда, для меньшего объема пространства) дано в [7, 15]. Теперь мы расширяем понятие «зона действия павильона» [7, 15] до понятия «приземный слой». По-

ясним, как неправильный выбор температуры приводит к аномалиям рефракции. Пулковские таблицы вычислены в предположении, что ПППП сферически-симметричны. Общеизвестно, что величина рефракции при таком предположении определяется в основном метеопараметрами в точке наблюдения. Если с помощью вертикального градиента температуры, *принятого в таблицах*, привести температуру у верхней границы приземного слоя к точке, в которой она реально отсчитывается, то и сама «приведенная» температура и ее временной ход несомненно будут иными, нежели у реально снятой в этой точке температуры — скажутся влияния инструмента, павильона и специфические движения воздуха вблизи инструмента. Иными словами, при абсолютных наблюдениях мы получаем аномалии рефракции из-за разности «приведенная — отсчитанная температура», а при относительных наблюдениях — из-за изменения этой разности со временем в сочетании с тем, что меридианные наблюдения определяемого объекта и опорной звезды всегда разделены во времени. Конечно, на результирующую аномалию наложатся влияние наклонов ПППП в приземном слое (включая павильон) и сглаживающее влияние рефракционных аномалий других опорных звезд.

**Выводы.** 1. Информация о свободной атмосфере, полученная с соответствующей сети станций аэрологического зондирования, достаточна для учета рефракции с ошибкой несколько миллисекунд дуги. На точность такого вывода в принципе могла бы повлиять гипотеза о гравитационных волнах (см. [4] и табл. 2). Но данные сотен отдельных аэрологических разрезов, взятых на станции Казань, косвенно противостоят этой гипотезе в случае ясного ночного неба; 2. Система рефракционного обеспечения должна включать в себя: а) окулярный микрометр, позволяющий делать около 100 отсчетов; б) не менее шести мачт или привязных баллонов высотой до 100 м с датчиками метеопараметров на них. Мачты должны располагаться с севера на юг парами, причем одна пара — в плоскости первого вертикала меридианного круга, а две другие — на удалении 170 м от него (для охвата зоны  $z=0-60^\circ$ ). Точность трех датчиков на самом вершине трех мачт, проходящих в плоскости меридиана, составляет 0.02 К (для получения полной рефракции), а остальные — от 0.8 на верхней границе приземного слоя до 0.02 К в павильоне (для определения наклонов ПППП, которые в зале могут быть вертикальными [15]); в) обработку всей информации по методу «кубиков» (см. плоскостной вариант этого метода в [15]) с использованием пространственной (меридионально-широтной) теории рефракции.

Все перечисленные требования, на наш взгляд, можно реализовать на практике и повысить таким образом точность позиционных меридианных наблюдений более чем на порядок.

1. *Атлас* климатических характеристик температуры, плотности и давления воздуха, ветра и геопотенциала в тропосфере и нижней стратосфере северного полушария. Вып. III. Многолетняя средняя температура воздуха на главных изобарических поверхностях. Таблицы.— М.: Гидрометеониздат, 1975.— Ч. 1.—169 с.
2. *Борисенков Е. П., Альгер-Залик Ю. Ж., Кузнецов А. Д.* Зондирование атмосферы метеорологическими аэростатами.— Л.: Гидрометеониздат, 1982.—176 с.
3. *Кассандрова О. Н., Лебедев В. В.* Обработка результатов наблюдений.— М.: Наука, 1970.—104 с.
4. *Колчинский И. Г.* Оптическая нестабильность земной атмосферы по результатам наблюдений звезд.— Киев: Наук. думка, 1967.—184 с.
5. *Решетов В. Д.* Требования к точности радиозондирования атмосферы // Тр. Центр. аэрол. обсерватории.— 1983.— Вып. 151.— С. 3—7.
6. *Хромов С. П.* Метеорология и климатология для географических факультетов.— Л.: Гидрометеониздат, 1983.—455 с.
7. *Яценко А. Ю.* Выбор точки отсчета температуры воздуха при меридианных наблюдениях // Кинематика и физика небес. тел.— 1987.—3, № 3.— С. 88—90.

8. Яценко А. Ю. Рефракция в меридиональной модели атмосферы. Теоретические основы // Там же.—1988.—4, № 2.— С. 59—66.
9. Яценко А. Ю. Рефракция в меридиональной модели атмосферы. Анализ результатов.— Киев, 1989.—17 с.— Деп. в ВИНТИ 25.01.89, № 634.
10. Bergthorsson P., Döös Bo R. Numerical weather map analysis // Tellus.—1955.—7, N 3.— P. 329—340.
11. CIRA 1965: COSPAR International Reference Atmosphere 1965.— Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1965.—313 p.
12. Kolchinskij I. G. On terminology in the theory of atmospheric refraction // Pubs Observ. astron. Beograd.—1987.— N 35.— P. 332—337.
13. Owens J. C. Optical refractive index of air: Dependence on pressure, temperature and composition // Appl. Opt.—1967.—6, N 1.— P. 51—59.
14. Sibilev V. P., Shulga A. V. The use of atmospheric dispersion in astronomical refraction determination // Pubs Observ. astron. Beograd.—1987.— N 35.— P. 180—187.
15. Yatsenko A. Yu. On the room refraction // Bull. Observ. Astron. Beograd.—1985.— N 135.— P. 16—20.
16. Yoshizawa M., Suzuki S., Fukaya R. Tokyo PMC catalog 85 // Ann. Tokyo Astron. Observ.—1987.—21, N 4.— P. 399—408.

Астрон. обсерватория им. В. П. Энгельгардта,  
Казань

Поступила в редакцию 03.05.88,  
после доработки 03.10.88