

Ф. Д. ЗАБЛОЦКИН, В. В. КИРИЧУК
**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
 АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ —
 ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

Достижения, проблемы и задачи по определению и учету атмосферной рефракции при астрономических наблюдениях освещены во многих работах советских и зарубежных ученых [1, 5, 10, 11, 13, 16, 17, 18, 19 и др.]. Цель нашей работы — подытожить исследование астрономической рефракции и ее аномалий в близгоризонтной зоне, выполненные в полевых условиях с помощью геодезических и астрономических теодолитов применительно к задачам геодезической (полевой астрономии) и спутниковой геодезии. К таким исследованиям следует отнести прежде всего наблюдения Н. А. Василенко, проводимые с помощью астрономического теодолита УВ 2"/2" в Голосеево, разделные и совместные наблюдения авторов оптическими теодолитами ОТ-02 в юго-западном районе УССР, в Запольшье, в Западном секторе Советской Арктики и в Средней Азии. Не менее заслуживают внимания исследования астрономической рефракции, проводимые российскими геодезистами в южных и юго-восточных районах с помощью оптических теодолитов ОТ-02 и УВКТ, а также наблюдения астрономо-геодезистов Львовского политехнического института теодолитами УВ 2"/2" и ОТ-02 в западных и южных районах той же страны.

Объектами наблюдений в большинстве случаев являлись Солнце и яркие звезды, реже — планеты, в том числе Луна. Основным методом определения астрономической рефракции — измерение зенитных расстояний по часовому углу светила как на фиксированных, так и пронавольных высотах. Фиксация времени при наблюдениях оптическими теодолитами проводилась по методу астрономическими теодолитами УВ 2"/2" с помощью контактного микрометра [9, 14]. В [14] предпринята попытка, определения астрономической рефракции по измерению зенитного расстояния и азимута светила. Один из авторов предложил способ определения астрономической рефракции по наблюдениям двух светил в общем вертикале. Этот способ выполнен ряд наблюдений, подтвердивших хорошую точность инструментального определения рефракции.

Практически в любом методе программы наблюдений сводится к следующему: прием сигналов точного времени, определение места зенита теодолита, серия наблюдений светила, состоящая из n -кратного фиксирования момента прохождения его через горизонтальную нить или несколько нитей в поле зрения трубы с отсчетами вертикального круга, соответствующего положению трубы в момент прохождения светила естественно с учетом уровня при вертикальном круге. Таких серий может выполняться несколько.

приведены структурные характеристики флукуиционных показателей преломления на высоте 1 м над подстилающей поверхностью $C_n \times 10^7$, вычисленные по преобразованной формуле (2):

$$C_n \cdot 10^7 = \frac{\sigma_{\max}'}{5} \left(\frac{z_2}{L} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Формула (3) получена при $D=6$ см.

В последней строке таблицы даны структурные характеристики флукуиционных показатели преломления на высоте 1 м, вычисленные по формуле

$$C_n' = \frac{80 P \cdot 10^{-6}}{T^2} C_n, \quad (4)$$

где C_n' — структурная характеристика флукуиционной температуры на высоте 1 м.

Величину C_n' вычисляют по упрощенной формуле [2]

$$C_n' = 1,4 \frac{\Delta T_{\text{ср}}}{\ln \left(\frac{z_1}{z_2} \right)}, \quad (5)$$

где z_1, z_2 — высоты измерения температуры.

Из таблицы следует, что вычисленные C_n' для отдельной группы по каждому направлению близки по значению и не отличаются закономерностей их изменения в зависимости от z_2 . Это подтверждает полученную нами ранее зависимость $C_n \sim z_2^{-1/2}$ для неустойчивой стратификации.

Наиболее стабильные результаты во второй группе измерений при $\Delta C_{\text{ср}} = -0,48$ объясняются тем, что здесь взято в обработку десять серий, а в двух других — по три серии. Следует отметить, что упрощенная формула (5) дает хорошие результаты для приземного слоя при неустойчивой стратификации.

1. Джалил Б. М. Зависимость амплитуды колебаний изображений от высоты визирного луча // Геодезия, картография и аэрофотогеодезия. 1983. № 38. С. 24—27. 2. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М., 1959.

Статья поступила в редакцию 23. 04. 86

Затем через час-два (поскольку нет единого назначения или согласования) разные исследователи по своему строят программу наблюдений) производится повторное определение места зенита и прием сигналов времени и т. д. Кроме того, как правило, инструментальные измерения рефракции сопровождаются метеорологическими измерениями температуры, давления и влажности воздуха с целью получения табличной рефракции, а затем и ее аномалий. При этом и здесь нет оптимального варианта как в количестве измерений, так и в частоте.

Что касается точности инструментального определения рефракции, то по данным исследований [2, 3, 6, 8, 9] средняя квадратическая ошибка определения угла рефракции теодолитами $01-02$ или $УВ 2''/2''$ составляет при высотах 10° около $2...3''$, а в зоне $8...10''$.

На основании выполненных исследований инструментального определения рефракции и ее аномалий установлено:

1. С увеличением зенитных расстояний возрастают аномалии рефракции, достигающие при $z=88...89^\circ$ нескольких десятков угловых секунд, а в горизонте — минут, в экстремальных (аномальных) условиях — десятков минут.

2. По результатам наблюдений аномалии рефракции в зимнее время года больше, чем в летнее [2].

3. Ряд исследований [2, 12 и др.] утверждают, что существуют наклоны слоев равной плотности в глобальном масштабе с востока на запад. Это подтвердили и результаты наших наблюдений летом 1984 г. в районе г. Балхаш Казахской ССР: как по наблюдениям Солнца, так и ярких звезд в восточной стороне аномалии рефракции получились положительными; при наблюдениях в западной части — отрицательные, или с переменным знаком. Аналогичную картину мы отметили в летний период 1980 г. в арктическом районе: по результатам измерений зенитных расстояний Солнца в утренние часы получены преимущественно положительные аномалии рефракции, а вечером — отрицательные. Правда, в данном случае утренний сектор наблюдений располагался над морской поверхностью, а вечерний — на протяжении ближайших $50...80$ км над сушей.

4. По данным экспериментальных инструментальных исследований рефракции, а также по расчетным значениям, полученным на основании зондирования атмосферы, установлено увеличение астрономической рефракции и ее аномалий вследствие инверсии температуры в нижних слоях воздуха [3, 11, 13 и др.]. Особенно большими они оказались для районов Центральной Антарктиды [4]. Это объясняется наличием там сверхмощных и интенсивных инверсий температуры в приземном и приграничном слоях атмосферы, а также частым появлением приподнятых инверсий.

5. Ряд авторов [2, 9, 12 и др.] установили зависимость аномалий рефракции от температуры, измеренной у инструмента. Очевидно здесь существует не прямая, а косвенная зависимость. С изменением температуры на уровне наблюдателя изменяется стра-

тификация приземного слоя, которая и формирует преимущественно характер самой рефракции и ее аномалий.

6. По результатам наших наблюдений в различных физико-географических районах СССР, а также по данным других исследователей обнаруживается следующий фактор: с увеличением зенитных расстояний при $z > 80^\circ$ аномалии рефракции возрастают, затем в зоне примерно $85...87^\circ$ они убывают по абсолютной величине до минимума или претерпевают изменение знака и далее до горизонта резко возрастают. Описание данного явления встречается в литературе, однако интерпретация не дается. На наш взгляд, зенитная зона $85...87^\circ$ на расстоянии ближайших $5...10$ км от инструмента является как бы разделюющей, рассекающей приграничный слой, отделяя сверху свободную атмосферу, снизу — приземный слой воздуха. Луч, проходящий в этой зоне, как бы уравновешивается. А при наклонах, близких к горизонту, все указанное расстояние луч проходит в приземном слое воздуха, стратификация которого, как известно, претерпевает наибольшие изменения: при инверсии — это наиболее устойчивый слой, при сверххладобатическом распределении температуры — наиболее турбулентный. Аналогичная, но более четкая картина получена для аномалий рефракции в полярных районах. Там аномалии определялись относительно рефракции по данным аэрологического зондирования и рефракции по Пулковским таблицам. По данным зондирования составлено для различных полярных станций по 13 зимних и летних моделей: для десяти станций Антарктиды, для трех Арктики. Во всех без исключения случаях при z от 70° до 85° аномалии рефракции отрицательны и возрастают по абсолютной величине, достигая при $z=85^\circ$ летом $-0,3...-0,5''$, а зимой $-1...-3''$. Затем при $z=87^\circ$ аномалии становятся положительными и при $z=89^\circ$ достигают от $+2$ до $+55''$ летом и от $+20$ до $215''$ зимой.

Несмотря на обилие информации об экспериментальных определениях астрономической рефракции, необходимо отметить следующие существенные недостатки, присущие большинству исследований.

1. Отсутствие единой методики астрономического определения рефракции, что затрудняет сопоставление экспериментальных рядов, полученных различными авторами.

2. Неоднозначность решения вопроса о репрезентативности метеорологических данных в пункте наблюдений (пространственное расположение методичек и частота их опроса).

3. Практически отсутствуют фундаментальные исследования точности методов инструментального определения рефракции как в лабораторных, так и полевых исследованиях.

4. Бессистемность экспериментальных исследований рефракции, т. е. построение программы наблюдений без учета особенностей изучаемого явления.

5. Отсутствие единых требований к выбору, исследованию и юстировке теодолитов, предназначенных для инструментального определения рефракции.

6. Недостаточность исследований влияния погрешностей фиксации времени при определении рефракции, в частности, недооценка влияния лично-инструментальной разности. Последнее усложняется применением в полевой астрономии морально устаревшего и различного оборудования для фиксации времени (маркируемых хронографов, импульсных приставок, хронорегистраторов и т. д.).

7. Разнотипность и нестандартность метеорологических приборов, применяемых для описания метеорологической обстановки в моменты наблюдений светил.

В настоящее время экспериментальные исследования астрономической рефракции призваны решать следующие задачи:

- непосредственное изучение физики рефракционных явлений в атмосфере;
- проверка моделей атмосферы (в том числе таблиц рефракции) и методов учета астрономической рефракции, основанных на этих моделях;
- получение надежной информации для решения обратных задач рефракции.

На основании изложенного с целью успешного и корректного развития экспериментальных исследований рефракции необходимо разработать единый комплект требований и рекомендаций по применению астрономических методов экспериментального определения рефракции, учитывающих все перечисленные недостатки.

1. *Безызв Н. А.* К вопросу определения астрономической рефракции // Астрономический журнал. 1956. Т. 32. Вып. 6. С. 555—562. 2. *Васильченко Н. А.* Определение астрономической рефракции у горизонта в различные периоды года // Астрометрия и астрофизика. 1972. Вып. 17. С. 96—107. 3. *Заболотский Ф. Д., Киричук В. В.* Экспериментальные исследования астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях в Заплярье // Геодезия, картография и аэрофотоосъемка. 1976. Вып. 23. С. 28—35. 4. *Заболотский Ф. Д., Кулиш Д. А.* Влияние инверсии температуры на величину астрономической рефракции в Центральной Антарктиде // Тез. докл. Всесоюзного совещания по рефракции электромагнитных волн в атмосфере. Томск, 07.09.1983. Томск, 1983. С. 76—78. 5. *Зверев М. С.* К вопросу о вычислении рефракционных аномалий по данным аэрологических наблюдений // Астрономический журнал. 1946. Т. 23. Вып. 2. С. 97—110. 6. *Киричук В. В.* Об аномалиях астрономической рефракции вблизи горизонта // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотоосъемка. 1971. Вып. 3. С. 67—71. 7. *Киричук В. В.* К вопросу влияния личной ошибки на определение времени по наблюдениям Солнца // Геодезия, картография и аэрофотоосъемка. 1971. Вып. 14. С. 21—28. 8. *Киричук В. В., Олейник Н. М.* Опыт определения асимметрии астрономической рефракции вблизи горизонта // Геодезия, картография и аэрофотоосъемка. 1977. Вып. 26. С. 32—39. 9. *Коваленко В. А., Маслиц Д. И., Русин М. И., Сидоров И. С.* Определение аномалий астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях в прибрежном районе // Вращение и приливные деформации Земли. 1984. Вып. 16. С. 47—53. 10. *Колчинский И. Г.* Рефракция света в земной атмосфере. К., 1967. 11. *Колчинский И. Г.* Влияние инверсии температуры на астрономическую рефракцию // Астрометрия и астрофизика. 1974. Вып. 21. С. 30—37. 12. *Коржинская С. В., Тютерев Г. С., Конторов А. Ф., Шарковский Н. А.* Рефракция при наблюдениях земного предельного звезда // Астрономические исследования // Современная астрономия. *Федосеев А. И.* Аномалии рефракции // Современные проблемы позиционной астрономии. М., 1975. С. 110—116. 14. *Рейликин Н. Н.* Исследование измерительных способов определения углов астрономической рефракции // Рефракция оптических волн в атмосфере. Томск, 1982. С. 155—167. 15. *Сергаченко В. И.*

О методике определения рефракции в астрометрии // Тез. докл. Всесоюзного астрономического совещания по проблемам совершенствования аппаратуры научно-практического назначения для определения рефракции электромагнитных волн в земной атмосфере. Иркутск, 11—13.09.1984. Иркутск, 1984. С. 21. 16. *Телецкий Г. Г.* Современное состояние вопроса по изучению астрономической рефракции // Новые идеи в астрометрии. Д., 1978. С. 100—102. 17. *Тютерев Г. С.* Аномалии рефракции // Астрономия и геодезия. Томск, 1979. С. 3—23. 18. *Шамаев В. Г.* Проблемы исследования рефракции в астрометрии // Итоги науки и техники. Сер. астрономия. 1983. Т. 23. С. 61—101. 19. *Teitel G., Saastamoinen J.* Problems of three-dimensional refraction in astrometry // Sun. and Planet. Syst. 6th. Eur. Reg. Meet. Astron. Dabrovnik. Oct. 19—23. 1981. Dordrecht. e. v. 1982. P. 455—462.

Статья поступила в редакцию 18.03.86

УДК 528.51

Д. А. ЗАБОЛОТНИН, А. В. ЮСКЬЕВИЧ

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РАДИОДАЛЬНОМЕРА ТРАП-1

В завершающей стадии разработки радиодальномера ТРАП-1 исследовалось влияние различных блоков, входящих в состав радиодальномера, на такую важную его характеристику, как погрешность измерения. Цель исследований — определение блоков дальности измерения. Цель исследований — определение блоков дальности измерения, имеющих доминирующее влияние на ошибку измерения. В качестве переменных факторов в эксперименте использовались блок СВЧ, усилитель промежуточной частоты, усилитель низкой частоты, блок кварцевого генератора, блок автоподстройки несущей и масштабных частот, фазометр, а также выбор измеряемого состояния и несущей частоты, изменяющейся в небольших пределах.

Исследование влияния каждого блока в отдельности по классической схеме требует проведения очень большого объема экспериментальных измерений. Кроме того, такой подход не дает возможности выявить взаимодействия между отдельными факторами. Применение статистических методов планирования и обработки многофакторных экспериментов позволило значительно сократить объем работ и повысить их надежность.

Задачу эксперимента формулируем следующим образом: необходимо найти математическую модель поверхности отклика $y = f(x_1, \dots, x_n)$ и произвести количественную оценку влияния различных блоков (факторов) на погрешность измерения дальности. Таким образом, поставлена задача интерполяции, поэтому математическую модель поверхности отклика определяем интерполяционной формулой.

Исследования радиодальномера проводили на трех базисах, длины которых известны с погрешностью $M = (5+1 \cdot 10^{-6}D)$ мм. Погрешность результатов измерения в i -м опыте

$$y_i = D_i - D_{эм}, \quad (1)$$