

В. В. КИРИЧУК

О НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОТРЕБНОСТЯМ ПОЛЕВОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

1. Современная проблематика исследований астрономической рефракции

Начиная с середины 60-х годов нашего столетия интенсивно ведутся исследования астрономической рефракции, что вызвано: повышением требовательности к точности учета рефракционных искажений в астрономии; потребностью более точной информации о звездных положениях для навигации и ориентирования обширных геодезических сетей; необходимостью точного учета рефракции при решении научных задач космического характера; реальной возможностью изучения «тонких» рефракционных эффектов, основанной на повышении точности инструментов, применяемых в полевой и фундаментальной астрономии.

Основной круг задач, решение которых позволило бы повысить точность учета рефракции, на основании анализа работ

последних 10 лет может быть сформулирован следующим образом:

1. Построение новых таблиц астрономической рефракции на основе современных представлений о строении атмосферы [17, 21, 25].

2. Разработка алгоритмов программ счета рефракции на ЭВМ для мгновенного состояния атмосферы по аэрологическим данным [32].

3. Учет инверсионных явлений в атмосфере при вычислении рефракции [17, 23].

4. Изучение периодических изменений рефракции [3, 4, 26].

5. Исследование турбулентной и случайной рефракции [17].

6. Решение проблемы хроматической рефракции [17].

7. Экспериментальные исследования астрономической рефракции и ее аномалий с целью определения точности существующих таблиц рефракции [3, 13].

8. Учет влияния приземного слоя воздуха на величину астрономической рефракции метеорологическим и геодезическим методами [15, 25].

9. Разработка новых методов определения рефракции из астрономических наблюдений [27].

10. Инструментальный метод определения угла рефракции [22].

2. Специфика полевой геодезической астрономии

Проблематика исследований астрономической рефракции не всегда учитывает специфику полевой геодезической астрономии, которая заключается в малогабаритности, а вследствие этого и маломощности используемых инструментов; в обширности диапазона физико-географических условий наблюдений; в отсутствии свободы выбора места наблюдений*; в своеобразии методов наблюдений и методов учета рефракции; во многообразии количественных и качественных влияний параметров приземного слоя воздуха на общую величину рефракции; в необходимости выполнения для окончательного вывода координат и азимутов как дневных, так и ночных наблюдений; в вытекающей из наивыгоднейших условий некоторых способов потребности в близгоризонтных наблюдениях. Остановимся на некоторых из названных пунктов, требующих, на наш взгляд, пояснений.

Физико-географические условия и метеорологическая обстановка полевых астропунктов.** Известно [17], что залогом ус-

* Выбор места для астропункта диктуется геометрическими соображениями и наивыгоднейшей конфигурацией ориентируемой геодезической сети, а также физической возможностью выполнения работ в данном месте.

** Под метеобстановкой будем понимать особенности параметров приземного слоя воздуха в пункте наблюдения и его окрестностях.

пешного проведения астронаблюдений являются оптическая стабильность атмосферы над пунктом наблюдения и благоприятная метеообстановка вблизи него [13]. Хотя полевые астрономические наблюдения по точности уступают фундаментальным, тем не менее влияние этих двух факторов является существенным. В полевой астрономии нельзя выбирать место наблюдений исходя из наилучших показателей названных факторов.

В то же время необычайно широк, учитывая обширность нашей страны, диапазон изменения физико-географических условий и метеообстановки в астропунктах. Во многих случаях эти условия заведомо являются неблагоприятными для точных астрономических определений. Важную роль при этом играет метеообстановка у инструмента, так как даже при благоприятных общих физико-географических условиях наблюдения могут потерять в точности из-за локальной рефракционно-опасной метеообстановки.

Рефракционные искажения в полевых астрономических наблюдениях, неучитываемые в любой теории рефракции, могут носить как общий (свойственный данному региону), так и локальный (присущий выбранному в данном регионе месту астропункта) характер.

Региональный характер рефракционных искажений определяется средними периодическими (с периодом сутки, месяца, сезон) изменениями характеристик состояния атмосферы над данным регионом; наличием постоянных сезонных ветров в свободной атмосфере; характером рельефа и растительности подстилающей поверхности; отражательными и теплопроводными свойствами поверхности региона и наличием в данном регионе обширных переходных зон (суша—море, степи—леса, равнины—горы и т. д.).

Локальный характер рефракционных искажений определяется микрорельефом вблизи инструмента; неоднородностью близлежащего растительного покрова; силой и направлением местных ветров в приземном слое воздуха; суточными изменениями метеопараметров воздуха у инструмента; наличием близлежащих обширных водных поверхностей; высотой инструмента над землей.

Своеобразие методов наблюдений и методов учета рефракции в геодезической астрономии. Применяемые на производстве методы определения координат и азимута [2, 8, 12, 19, 28] можно разделить:

- а) по числу наблюдаемых звезд — на одиночные, парные и множественные;
- б) по измеряемым в процессе наблюдений координатам — на азимутальные и зенитальные.

Основными методами геодезической астрономии являются парные, то есть наблюдения пары звезд, расположенных симметрично относительно меридиана или 1-го вертикала. Они

позволяют свести до минимума ошибки инструментального и личного характеров, а в ряде случаев и ошибки внешней среды [31].

Когда нельзя применить парный метод (отсутствие подходящих звезд, необеспеченность эфемеридами, специфика определяемой координаты и задачи работ), пользуются одиночным и множественным методами.

Дилемма — применять азимутальные или зенитальные методы — решается, как правило, (при прочих равных условиях) в пользу азимутальных, причем не последнюю роль при этом играют и соображения относительно учета рефракционных погрешностей при измерениях зенитных расстояний [18].

Следующей важной особенностью методики полевых астрономических наблюдений является комбинация дневных и ночных определений для вывода окончательных значений искомым величин. В средних широтах это относится только к определению азимута, а в широтах $\varphi > 65^\circ$ справедливо и для определений широты и поправки часов [2].

В современных методах геодезической астрономии * не учитывается рефракция для редукции абсолютных измерений зенитных расстояний. Это вызвано стремлением избежать методов астроопределений, связанных с такими измерениями, так как они отягощены разнообразными инструментальными ошибками [31]. Исключением является способ определения широты по измерениям близмеридианных зенитных расстояний северной и южной звезд [28], в котором измеренные абсолютные зенитные расстояния редуцируются с помощью тех или иных таблиц рефракции [24, 29]. В относительные измерения зенитных расстояний, используемые в ряде методов (например, в способе Талькотта), вводятся поправки только за дифференциальную рефракцию. Во множественных методах (например, в способе Мазаева) поправки вводятся в зенитные расстояния выбранных альмукантаратов за изменение рефракции в течение времени наблюдения одной звездной серии, то есть практически это поправка также за дифференциальную рефракцию, когда аргументом служит изменение метеопараметров воздуха у инструмента с течением времени. В парных зенитальных методах равных высот зенитные расстояния обеих звезд считаются равными и не измеряются. В основе теории этих методов лежит классическое положение о симметрии рефракции относительно зенита.

Сказанное выше относится исключительно к зенитальным методам геодезической астрономии, ибо речь до сих пор шла об учете вертикальной составляющей рефракции. Но, как известно [20], боковая составляющая астрономической рефракции ничтожно мала по сравнению с вертикальной и с ошибками

* Здесь, как и всюду в данной статье, речь идет только об астроопределениях 1-го класса.

ми собственно измерений: $0,005''-0,1''$ в зоне $0^\circ \leq z \leq 80^\circ$; $0,5''-0,7''$ при $z=89^\circ-90^\circ$.

До настоящего времени детальные исследования боковой составляющей рефракции не проводились, что объясняется для зоны $z < 80^\circ$ недостаточной для этой цели точностью инструментов, а для зоны $z > 80^\circ$ — отсутствием больших рядов наблюдений. Тем не менее надо иметь в виду, что во всех азимутальных методах следует предусматривать возможность рефракционных погрешностей, обусловленных именно боковой составляющей астрономической рефракции.

3. Некоторые аспекты повышения точности полевых астрономических определений

Фундаментальные астрометрические наблюдения в 3—5 раз точнее полевых. Это объясняется малой мощностью, а следовательно, и более низкой точностью инструментов, применяющихся в полевой астрономии. Поэтому полевая астрономия стоит в стороне от исследований таких тонких эффектов рефракции, как зенитальная рефракция, асимметрия рефракции, боковая рефракция, периодические изменения рефракции, различия между «дневной» и «ночной» рефракциями.

На протяжении последних 30 лет инструментальный парк полевой астрономии у нас в стране практически не обновлялся. Не обновлялись и методы полевой астрономии и астрономогеодезисты считали, что влияние названных выше эффектов на точность определений лежит за порогом точности полевых астронаблюдений. В последние годы положение резко изменилось. Появление высокоточных приборов с более мощной оптикой (TPR «Askania Werke», Вильд-Т-4, Theo-003, ДКМ-3, ДКМ-3А) и отечественного ТА-05 «ЦНИИГАиК» позволяет вполне обоснованно ожидать повышения точности полевых астрономических определений в 1,5—2 раза, то есть с погрешностью $\pm 0,2''-0,3''$ [5, 6, 7, 11]. В свою очередь, это неминуемо приведет к необходимости исследований и учета тонких рефракционных явлений в полевой астрономии, где они будут обладать значительно большим многообразием, чем в условиях стационарных астрономических обсерваторий.

4. Качественный анализ влияния аномальных явлений рефракции на полевые астрономические определения

В работе [16] дана четкая классификация рефракционных явлений в земной атмосфере по признаку частоты колебания. Различают нормальную, случайную и аномальную рефракции*.

* Эффектом дрожания при настоящем уровне полевой инструментальной техники можно пренебречь.

В основе теории методов полевой астрономии лежит представление о нормальной рефракции, зависящей при данных значениях метеопараметров только от зенитного расстояния наблюдаемого объекта. Естественно, что и учет рефракции в этом случае предполагается выполнять с помощью тех или иных таблиц. Фактически же, явления случайной и аномальной рефракции, носящие локальный характер, накладываются на нормальную и делают невозможным точный учет с помощью таблиц без проведения специального исследования.

Воздействие случайной рефракции является относительно кратковременным (частота колебаний — 0,01 Гц). Оно сказывается на каждом зенитном расстоянии, в любом азимуте наблюдаемого светила и выражается в появлении среды ряда наблюдений, выполняемых за короткий (1—2 часа) промежуток времени, результатов, резко отличающихся от большинства наблюдений данного ряда. В практике такие случаи не редки, но полевые астрономы предпочитают видеть их причину скорее в случайной личной или инструментальной погрешности, чем в случайной рефракции. В то же время очевидно, что сбор большого статистического материала подобного рода, сопровождаемого заметками о сопутствующих метеоусловиях (облачность, ветер, резкие перепады температуры и давления), мог бы принести пользу в изучении случайной рефракции.

На данном этапе нельзя исключить влияние случайной рефракции на результаты полевых астрономических определений, но изучить это явление и частоту его повторяемости в различных физико-географических условиях необходимо, чтобы выработать рекомендации по выбору мест для полевых астропунктов, наименее опасных в отношении эффекта рефракции.

Характер влияния аномальной рефракции на полевые определения зависит как от физических процессов в атмосфере, обуславливающих ее появление, так и от методики учета рефракции в конкретном методе наблюдений. Основными причинами аномальной рефракции являются общее несоответствие реальной атмосферы в данном регионе в момент наблюдений модели атмосферы, лежащей в основе таблиц рефракции, интегральный наклон слоев воздуха равной плотности и инверсионные явления в атмосфере. Назовем для краткости аномальную рефракцию, вызываемую этими причинами, аномалией соответственно 1-го, 2-го и 3-го типа.

Аномалия 1-го типа существует всегда, так как всегда реальная атмосфера отличается даже от наилучшей модели. Но поскольку по теореме Ориани—Лапласа [16] в зоне $z \leq 75^\circ$ с точностью до 0,01" величина рефракции не зависит от строения атмосферы, то и погрешности полевых астроопределений из-за аномалий 1-го типа не превысят этой величины. Поэтому можно считать, что аномалии 1-го типа в зоне $z \leq 75^\circ$ практически не оказывают влияния на полевые астроопределения 1-го класса.

Иначе обстоит дело в зоне $z > 75^\circ$. Известно [3, 13], что здесь аномалии 1-го типа достигают очень больших величин, изменяющихся нерегулярно во времени. Эти аномалии зависят дополнительно от характеристик приземного слоя воздуха [15]. Влияние аномалий 1-го типа на результаты астроопределений в зоне $z > 75^\circ$ будет проявляться в значительном разбросе результатов, полученных в разные дни и в большом систематическом сдвиге «средневечерних» значений определяемых координат и азимута относительно истинных. Поэтому при применении точных методов, требующих близгоризонтных наблюдений светил, естественно, на повестку дня станет вопрос об учете аномалий 1-го типа.

Причиной аномалий 2-го типа является интегральный наклон слоев воздуха равной плотности в атмосфере, который может быть вызван следующими факторами: общей циклонической деятельностью в атмосфере, рельефом местности и периодическими изменениями радиационного баланса земной поверхности [23].

Наклоны, обусловленные общей циклонической деятельностью, охватывают всю тропосферу и прослеживаются до высоты 20 км. Они носят симметричный относительно зенита и периодический по времени характер. Величина наклонов может быть вычислена с помощью синоптических карт по известной методике [1, 10].

Наклоны, вызванные рельефом подстилающей поверхности, возникают в приземном ($h = 0,5 - 1$ км) слое воздуха и могут достигать значительных величин [30]. Они имеют узколокальный характер. Также как и наклоны в свободной атмосфере ($h > 1$ км), они периодичны и симметричны относительно зенита. В настоящее время общей методики определения величины и направления этих наклонов практически нет.

Наконец, наклоны, обусловленные изменением радиационного баланса земной поверхности, возникают, как правило, в приземном слое воздуха в моменты, близкие к заходу и восходу Солнца. Направление и величина их определяется направлением и высотой Солнца над горизонтом [14]. Как и в предыдущих случаях, наклоны носят периодический характер и симметричны относительно зенита.

В связи с увеличением объема астрономических работ в Арктике и Антарктике, то есть в условиях незаходящего Солнца, актуальность исследования наклонов этого вида и их роли в возникновении аномальной рефракции не вызывает сомнений.

Исходя из анализа механизма образования наклонов слоев воздуха равной плотности в атмосфере можно утверждать, что аномалии 2-го типа, порождаемые ими, будут обладать симметричностью, периодичностью и локальностью проявления. В свою очередь, аномалии 2-го типа будут вносить систематические погрешности периодического характера в астроопреде-

ления координат с помощью парных методов. Из непродолжительных наблюдений на астропункте нельзя надежно выявить эти погрешности. Для их обнаружения и последующего исключения необходимо из анализа синоптических карт данного региона либо вычислить величины наклонов и ввести соответствующие поправки в определяемые координаты [1, 10], либо выполнить астроопределения на пункте дважды (в моменты образования в атмосфере наклонов противоположных по направлению).

Как отмечалось уже, аномалии 3-го типа вызываются инверсионными явлениями в атмосфере, главным образом температурными. Наиболее мощными являются ночные инверсии, распространяющиеся на большую высоту. Кроме того, известны глубокие инверсии температуры в зимнее время, а в полярных районах и в летнее. Они вызывают перераспределение, то есть инверсию плотности воздуха на различных уровнях в атмосфере, что и приводит к аномалиям рефракции 3-го типа. Основное их отличие от аномалий 2-го типа состоит в аперiodичности и асимметрии, что и позволяет отделять эффекты наклонов слоев от эффекта инверсии. Очевидно, такой же характер будет иметь влияние аномалий 3-го типа на астроопределения координат и азимута. При организации астрономических работ в различных регионах следует изучить имеющуюся метеорологическую информацию по выявлению инверсионных явлений и планировать выполнение работ на периоды наиболее благоприятные в этом смысле.

Выводы

На основании сказанного выше можно сформулировать некоторые задачи исследования рефракции применительно к потребностям полевой геодезической астрономии:

1. Разработка критериев рефракционной опасности для рельефных условий, и на основании их рекомендаций по выбору места закладки астропунктов.
2. Экспериментальные исследования влияния асимметрии рефракции на определение координат и азимута.
3. Экспериментальные исследования инверсионных влияний на результаты определения координат и азимута.
4. Исследования аномалий рефракции вблизи горизонта.
5. Анализ производственных наблюдений по обнаружению эффекта случайной рефракции.
6. Анализ производственных наблюдений и повторные определения эффекта аномалий рефракции, вызванных наклонами слоев воздуха равной плотности в атмосфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев Н. А. К вопросу определения астрономической рефракции. — «Астрономический журнал», 1955, т. 32, вып. 6, с. 555—562.
2. Буткевич А. В. О методах определения долготы в Заполярье. — «Тр. НИИГАиК», 1966, вып. 19, с. 54—66.
3. Василенко Н. А. Определение астрономической рефракции у горизонта в различные периоды года. — «Астрометрия и астрофизика», 1972, вып. 17, с. 96—107.
4. Василенко Н. А. О сезонных и суточных изменениях астрономической рефракции. — В кн.: Современные методы учета и исключения влияния рефракции световых волн при геодезических и астрономических измерениях. Тезисы Всесоюзного совещания. Львов, 1974, с. 41—42.
5. Галеев В. X. Астрономические определения на материке Антарктида в период Международного геодезического года. — «Геодезия и картография», 1958, № 8, с. 34—39.
6. Гредель Э. — «Иенское обозрение», 1966, № 11, с. 43.
7. Дьяков Б. Н. Применение новых астрономических инструментов в Заполярье. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1974, вып. 19, с. 13—16.
8. Заблоцкий Ф. Д. О возможности применения способа Крыжановского (видоизмененного способа Геденова) для определения времени в высоких широтах. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1974, вып. 19, с. 17—22.
9. Заблоцкий Ф. Д., Киричук В. В. Экспериментальные исследования астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях в Заполярье. — В кн.: Современ. методы учета и искл. влияния рефр. световых волн при геод. и астрон. измер. Тезисы Всесоюзного совещания. Львов, 1974, с. 44.
10. Зверев М. С. К вопросу о вычислении рефракционных аномалий по данным аэрологических наблюдений. — «Астрономический журнал», 1946, т. 23, вып. 2, с. 97—110.
11. Зимин В. М. Новые астрономические инструменты. — «Геодезия и картография», 1968, № 8, с. 12—18.
12. Инструкция по построению государственной опорной сети СССР. М., 1966, с. 425.
13. Киричук В. В. Об аномалиях астрономической рефракции вблизи горизонта. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1971, вып. 3, с. 67—71.
14. Киричук В. В. Радиационный баланс земной поверхности и наклоны изодиоптрических поверхностей. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1972, вып. 16, с. 42—47.
15. Киричук В. В. Учет влияния коэффициента земной рефракции вблизи горизонта. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1973, вып. 18, с. 21—23.
16. Колчинский И. Г. Рефракция света в земной атмосфере. Киев, 1967, с. 44.
17. Колчинский И. Г. Исследования рефракции света в земной атмосфере. Автореф. докт. дисс. Киев, 1968, с. 36.
18. Кузнецов А. Н. Геодезическая астрономия. М., 1969, с. 315.
19. Львов В. Г. Наставление по определению геодезического азимута из многократных наблюдений ярких звезд вблизи меридиана. М., 1971, с. 57.
20. Маркус Э. М. Исследование боковой рефракции в Бухарестской обсерватории. — «Труды 18-ой Астрономической конференции СССР», 1972, с. 275—280.
21. Нефедьева А. И. Астрономическая рефракция. Ч. 2. — «Известия АОЭ», 1973, № 40, с. 3—69.
22. Прилепин М. Т. Современное состояние и перспективы развития инструментальных методов определения геодезической рефракции. — В кн.: Современные методы учета и исключения влияния рефракции световых волн при геодезических и астрономических измерениях. Тезисы Всесоюзного совещания. Львов, 1974, с. 7—8.

23. Семенов Л. И. Рефракционные аномалии. — «Астрономический журнал», 1937, т. 14, вып. 5—6, с. 500—504.
24. Таблицы рефракции ПАО. М.—Л., 1956.
25. Телеки Г. Астрономическая рефракция и ее проблемы. — «Публикации АО Белград» (перевод), 1970, вып. 16.
26. Телеки Г. Об определении влияния аномалий рефракции. — «Тр. 18-ой астрометрической конференции СССР», Л., 1972, с. 98—101.
27. Телеки Г., Севарлич Ж. Об определении аномальной рефракции из астрометрических измерений в зенитной зоне. — «Тр. Белградского университета» (перевод), 1971.
28. Труды ЦНИИГАиК, 1962, вып. 148, с. 310. —
29. Труды ЦНИИГАиК, 1963, вып. 161, с. 280.
30. Тютюрев Т. С. Влияние наклона приземного слоя воздуха на определение широты и времени. — В кн.: Вращение Земли. К., Изд-во АН УССР, 1963, 281—288.
31. Цветков К. Л. Практическая астрономия. М., 1952, с. 420.
32. Garfinkel V. An investigation in the theory of astronomical refraction. — «Astronomical Journal», 1944, 4, 1148, 169—179.

Работа поступила в редколлегию 17 марта 1975 года. Рекомендована кафедрой теории математической обработки геодезических измерений Львовского политехнического института.