

УДК 520.16

## Атмосферные влияния и выбор мест для астрометрических станций

Г. Телеки

В работе рассматривается влияние земной атмосферы на астрометрические инструменты и качество изображения звезд. Обсуждаются вопросы защиты от атмосферных влияний и критерии выбора мест для астрометрических станций.

*ATMOSPHERIC EFFECTS AND SELECTION OF PLACES FOR ASTROMETRIC STATIONS, by Teleki G.*— The paper deals with the Earth's atmosphere effect on astrometric instruments and on the stellar seeing. The problems of the protection against the atmospheric effect as well as the criteria for selection of places for astrometric stations are discussed.

**Введение.** Новая астрометрическая техника начала давать более точные, по сравнению с классической астрометрией, данные о положениях звезд, вращении Земли и др. Еще более точных данных мы ждем от космической астрометрии. Это, в свою очередь, стимулирует дальнейшее совершенствование классических методов и средств измерений, в частности, повышение точности учета инструментальных и неинструментальных влияний на результаты наблюдений. В тех случаях, где это практически невозможно, остается единственное средство — защита инструментов от различных источников ошибок, в том числе атмосферных. Последние имеют всеобщий характер и важны для всех наземных измерений, в том числе тех, которые выполняются с помощью новых методов и средств.

Поскольку интегральное влияние атмосферы на астрометрические измерения не поддается точному подсчету, его разлагают на отдельные составляющие, которые затем суммируются. При редукции данных наблюдений учитывается основная часть атмосферных влияний. Вопрос заключается в том, можно ли считать, что неучитываемая часть влияний носит случайный характер? Опыт показывает, что это не так. К такому выводу можно прийти сопоставляя результаты наблюдений различных станций. Например, исследования широтных наблюдений за время с 1949—1962 гг. показали, что в изменениях широты Китаба и Юкайи имеются неполярные вариации, которые по характеру различны между собой и их можно объяснить влиянием различных атмосферных полей вокруг станций [10].

В связи с этим появляется второй вопрос, можно ли на существующих станциях уменьшить действие атмосферных (особенно, неучитываемых) влияний? На этот вопрос можно ответить положительно. В качестве примера возьмем наблюдения на зенит-телескопе Белградской обсерватории. Этот инструмент в 1968—1970 гг. был покрыт фольгой, наблюдения проводились при максимально закрытой крыше (за исключением узких люков), труба была удлинена за счет противоросника до уровня крыши. Все это уменьшило, наряду с другими, и влияния, связанные с атмосферой: температуры на инструмент, турбулентности воздуха в павильоне и трубе инструмента, неправильного преломления светового луча при прохождении через объектив и, наконец, наклонов слоев одинаковой плотности около павильона. Исследования [8] показали, что при такой организации наблюдений их точность значительно повышается.

Остановимся на влиянии атмосферных факторов на астрометрические инструменты и распространение светового луча, не учитывая при

этом влияния атмосферы на состояние самого наблюдателя. Наша задача — указать на возможные меры, которые необходимо предпринять при установке инструментов и павильонов на обсерваториях, связывая эти обстоятельства с выбором мест для новых астрометрических обсерваторий.

**Влияние атмосферы на инструмент.** Атмосферное поле около инструмента имеет очень сложный характер, интегральное влияние его на инструмент подсчитать практически невозможно. Поэтому рассмотрим отдельно влияние температурного поля, воздушных потоков и влажности.

Обычно учет температурных эффектов выполняют следующим образом. Узучают поведение отдельных частей инструментов в лабораторных условиях в зависимости от температуры, в результате чего определяют поправки к некоторым инструментальным постоянным, учитывая их при обработке наблюдений. Как правило, такие исследования показывают значительную зависимость постоянных инструмента от температуры [11]. Однако полученные в лабораторных условиях зависимости инструментальных постоянных от температуры не соответствуют реальности, так как лабораторные исследования выполняются как правило в устойчивом, достаточно однородном температурном поле, а около инструмента оно неоднородно. Поэтому до сих пор нет надежного способа учета влияния температуры на инструмент, а соответственно, и на результаты астрометрических наблюдений.

Аналогично обстоит дело и с влиянием потоков воздуха, которые оказывают на инструмент не только механическое воздействие, а являются переносчиком определенного атмосферного состояния.

Что касается влияния влажности, то конденсация водяного пара создает асимметрию температурного поля и в павильоне, и в теле инструмента. Кроме того, влажность приводит к коррозии механических частей инструмента.

Все это, бесспорно, указывает на то, что практически невозможно учесть влияние атмосферы на инструмент и поэтому можно предполагать, что соответствующая ошибка в астрометрических данных будет около  $\pm 0.1''$ . Из создавшегося положения имеется единственный выход — попытаться защитить инструмент от атмосферных влияний.

**Влияние атмосферы на распространение светового луча.** Преломление светового луча (рефракция) при его прохождении через земную атмосферу дает самое большое атмосферное влияние на астрометрические наблюдения. На зенитных расстояниях  $45^\circ$  рефракция составляет около  $60''$ , а вблизи горизонта —  $33'$ . Для подсчета интегральный эффект атмосферы разбивают на две части: нормальную рефракцию и аномалии рефракции. Под нормальной рефракцией подразумевают составляющую астрономической рефракции в вертикальной плоскости места наблюдения для случая, когда атмосфера представляет собой идеальный газ и находится в гидростатическом равновесии в ньютоновом гравитационном поле, а распределение плотности является сферически-симметричным. Такую идеальную величину рефракции вычисляют на основании принятых закона изменения плотности воздуха с высотой, показателя преломления в приземном слое воздуха и заданного зенитного расстояния объекта наблюдений. С этой целью пользуются специальными таблицами рефракции, например пулковскими. Можно грубо оценить, что нормальная рефракция составляет около 98 % истинной величины рефракции.

Разность между истинной и нормальной рефракциями называют аномалией рефракции. Можно рассматривать различные составляющие аномалии рефракции, предполагая, что их сумма дает искомый интегральный эффект. В первую очередь эти аномалии возникают из-за нарушения состояния атмосферы (т. е. из-за изменения поля показателя преломления атмосферы) в слоях близ поверхности почвы, а особенно

вблизи инструмента. При их количественных оценках встречаются большие трудности. Например, трудно оценить возможное влияние не только общего состояния атмосферы, но также и самого инструмента, формы и размеров павильона, его внутреннего устройства, источников тепла в окрестности павильона, в регионе и т. д., а также закономерности совместного влияния этих факторов. Ошибки по этой причине могут достигать  $0.1''$  даже в зенитной зоне.

В астрометрии под аномалиями рефракции, независимо от их происхождения, понимают систематические влияния такого рода. Конечно, это не вполне постоянные величины, потому что они могут меняться как в течение ночи, так и от сезона к сезону. Однако такие изменения происходят достаточно медленно и имеют стохастический характер. На больших зенитных расстояниях наблюдения звезд с хорошо известными склонениями дают возможность определить аномалии рефракции с достаточной точностью [1]. Турбулентная среда вызывает мерцание, изменяет качество и положение изображения. Относительно быстрые изменения положения изображений вызываются дрожанием. Все эти явления имеют характер нестационарных стохастических процессов. Дрожание возникает из-за быстрых изменений наклона волнового фронта перед объективом телескопа и очень важно с астрометрической точки зрения. Например, Иванов [6] оценил, что 37 % случайных ошибок наблюдений, выполняемых на Пулковском фотографическом вертикальном круге, вызваны влиянием атмосферной турбулентции, а ошибки Пулковского пассажного инструмента почти полностью обязаны этому влиянию. Хог [5] сделал вывод, что средняя точность наблюдений звезд с современными ФЗТ, астролябиями и меридианными инструментами ограничена дрожанием, которое в зенитной зоне вызывает ошибку  $0.33'' (T+0.65)^{-0.25}$  для временных интервалов  $T \geq 0.2$ . Эта ошибка возрастает приблизительно как  $\text{SecZ}$ .

Бруннер [4] оценивает типичную величину дрожаний для зенитных расстояний от  $60^\circ$  до  $80^\circ$  в  $1-5$  микрорадиан (один микрорадиан  $0.2''$ ), а для дневных условий —  $10-40$  микрорадиан. Колчинский [2] на основе анализа фотографических наблюдений дрожаний изображений звезд получил, что средняя квадратичная величина дрожания растет пропорционально корню квадратному из секанса зенитного расстояния, причем в зените она равна  $0.36'' (\pm 0.02)$ . Им также на основе автокорреляционных функций дрожания изображений были даны оценки погрешностей астрометрических наблюдений в зависимости от времени наблюдений [3]. Иванов [6] считает, что оптимальная продолжительность астрометрических наблюдений около  $2^m$ , а оптимальный диаметр объективов астрометрических телескопов —  $20$  см. Сугава и Наито [9] кроме турбулентции приняли во внимание еще и изменения во внутреннем пограничном слое, адвекцию холодных воздушных масс и внутренние гравитационные волны, получив для астрометрических измерений на небольших зенитных расстояниях ошибку около  $0.01''$ .

Размывание или изменение интенсивности изображения — два других последствия турбулентции, непосредственно влияющих на точность измерений. Размывание зависит от колебаний волнового фронта, а интенсивность меняется из-за изменения амплитуды волны — изменение интенсивности называют мерцанием.

Однако вернемся к нормальной рефракции. Как уже указывалось, эта величина — только одна из составляющих астрономической рефракции в вертикальной плоскости места наблюдения, вообще же рефракция должна рассматриваться трехмерной. Результаты исследования [13] показывают, что до  $45^\circ$  зенитного расстояния можно не учитывать трехмерного влияния (т. е. достаточно учитывать нормальную рефракцию). На зенитных расстояниях до  $70^\circ$  это влияние составляет не более  $0.01''$ , а до  $80^\circ$  — не более  $0.1''$ . Все эти дополнительные поправки не являются постоянными, а изменяются в зависимости от положения

мест наблюдения на поверхности Земли. Получение точных величин этих влияний — проблема метеорологическая.

Особо нужно подчеркнуть трудности получения величин нормальной рефракции на больших зенитных расстояниях. Уже на  $Z=88^\circ$  ошибка определения рефракции составляет несколько секунд дуги, а на горизонте оценить реальную ошибку очень трудно. По этой причине лучше не делать наблюдений на больших зенитных расстояниях.

Попытки определения аномалий астрономической рефракции из астрономических измерений не дали хороших результатов по следующим причинам: несовершенство существующих теорий (таблиц) рефракции; ошибки астрометрических инструментов и, особенно, их зависимость от атмосферных параметров и недостаточное знание механизма влияния неоднородного атмосферного поля на распространение световых волн. Большую часть атмосферных влияний на рефракцию мы можем вычислить. Однако остающаяся, неучитываемая, часть так велика, что существенно ограничивает точность астрометрических измерений на Земле. Положение можно исправить. С одной стороны, более строгим вычислением нормальной рефракции (учесть с необходимой точностью все соответствующие метеорологические элементы, и, если возможно, использовать аэрологические данные вблизи астрономических станций и т. д.). С другой — с помощью тех или иных мер предосторожности — мер термической защиты инструментов. Существует также возможность применения некоторых новых способов учета рефракционных влияний (как, например, дисперсионный способ), но эти способы пока что практически не применяются.

**Меры защиты.** Большинство астрометрических инструментов находится в неблагоприятных условиях: вблизи зданий и селений в неадекватных павильонах, в местах с неблагоприятными атмосферными условиями (большое число пасмурных дней, интенсивные воздушные течения, сильная турбулентность поля и т. д.), на недостаточно стабильной почве и др. Такое неблагоприятное положение можно изменить. Предложим, как это сделано в Белграде [8], максимальную изоляцию самого инструмента. В некоторых обсерваториях можно также устранить все, что способствует изменению температурного поля вблизи павильона — деревья, здания и другие источники, которые образуют тепловые острова. Также полезно, когда инструмент как можно выше поднимается над почвой, но при этом нужно быть осторожным, чтобы не увеличить нестабильность столба инструмента. Большое значение имеет тщательный выбор места установки инструмента.

**Критерии для выбора пунктов астрометрических наблюдений.** По нашему мнению [12], при выборе места для таких пунктов необходимо принимать во внимание следующее: 1. Максимально возможный процент ясных дней и ночей. 2. Равномерность распределения ясных дней и ночей в течение года. 3. Темное небо ночью и хорошая видимость звезд днем. 4. Равномерное распределение темных ночей и дней с лучшей видимостью в течение года. 5. Хорошая прозрачность. 6. Минимальная оптическая турбулентность. 7. Хорошее качество изображений (дрожание и размывание совместно). 8. Максимальная однородность температурного поля вблизи инструмента и павильона. 9. Уравновешенное положение (наклон) атмосферных слоев равной плотности и их минимальная изменчивость с течением времени. 10. Травянистое или кустарниковое покрытие ближайших окрестностей павильона (без зданий, деревьев, леса, дороги и т. д.). 11. Отсутствие сильных ветров. 12. Сравнительно небольшая влажность. 13. Максимальная стабильность почвы, верхних слоев грунта, столбов и направляющих вертикали. 14. Сравнительно малые изменения геологических условий (в отношении строительных требований) в течение достаточно продолжительных интервалов времени в будущем. 15. Наблюдение на зенитных расстояниях  $Z \leq 60^\circ$ . 16. Обеспечение нормальных бытовых условий.

По сравнению с обычными астрофизическими требованиями, перечисленные отличаются пп. 2, 4, 8, 9, 10, 12, 13. Очевидно, что удовлетворить всем требованиям одновременно невозможно, поэтому всегда следует идти на некоторый разумный компромисс.

**Глобальное атмосферное влияние.** Представляет интерес то, как аномалии рефракции, или, точнее, неучитываемые величины, а также облачность как ограничивающий наблюдения фактор, могут влиять на астрометрические данные в разных частях земного шара. Используя оценки глобальных нарушений в радиодиапазоне, были определены

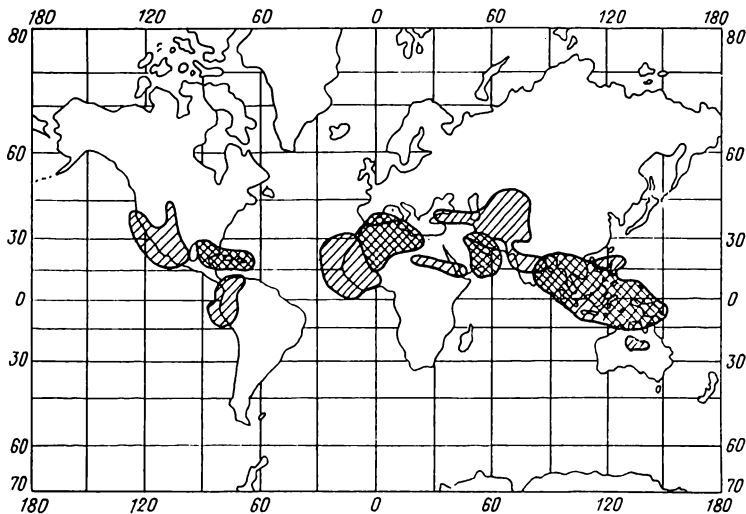


Рис. 1. Области (наклонная штриховка), где по модулю рефракции в приземном слое можно уверенно предсказать его значение на высоте 1 км над поверхностью почвы. Сплошная штриховка — области, где чрезмерно велики градиенты модуля рефракции в поверхностном слое толщиной 100 м.

области, рефракционно неподходящие для астрометрических станций (рис. 1). Конечно, нельзя считать, что такие области вполне соответствуют нестабильности в оптическом диапазоне, но можно предположить, что они являются «невыгодными» для нас территориями. При внимательном рассмотрении рис. 1 видим, что эти неблагоприятные области на самом деле являются граничными областями между территориями, которые имеют различающиеся градиенты температуры в поверхностном слое (океан — суша, граница с пустыней и т. д.). Это особенно касается тропиков.

Зоны, где средняя облачность меньше 55 %, показаны на рис. 2. Границы этих зон следует считать приблизительными и непостоянными в течение года и даже суток. Нельзя также ожидать полную однородность и в самих зонах. На рис. 2 нанесены также области, где число ясных суток в течение года в среднем больше 50 %. Таким образом, атмосферные факторы дают возможность, если смотреть глобально, получить относительно хорошие астрометрические наблюдения лишь на меньшей части земного шара.

**Совместные глобальные атмосферные и сейсмические влияния.** На астрометрические данные влияют разные глобальные факторы. Мы установили порядок действия этих факторов на основании пространственно-временного спектра геодинамических процессов, как это сделал Каула [7]. Прибавим нашу оценку значения рефракционных влияний и облачности и таким образом получим относительный порядок некоторых глобальных влияний, важных при выборе астрометрических станций: сейсмичность — вес 7; облачность — 6; аномалии рефракции — 5; напряжение в земной коре — 3; тектоника плит — 1.

Следовательно, имеется три самых значительных влияния: сейсмическое, облачности и аномалий рефракции. Мы учитываем их совместное действие, а из напряжений в коре — принимаем во внимание только упругие напряжения глобального характера, с которыми связаны зем-

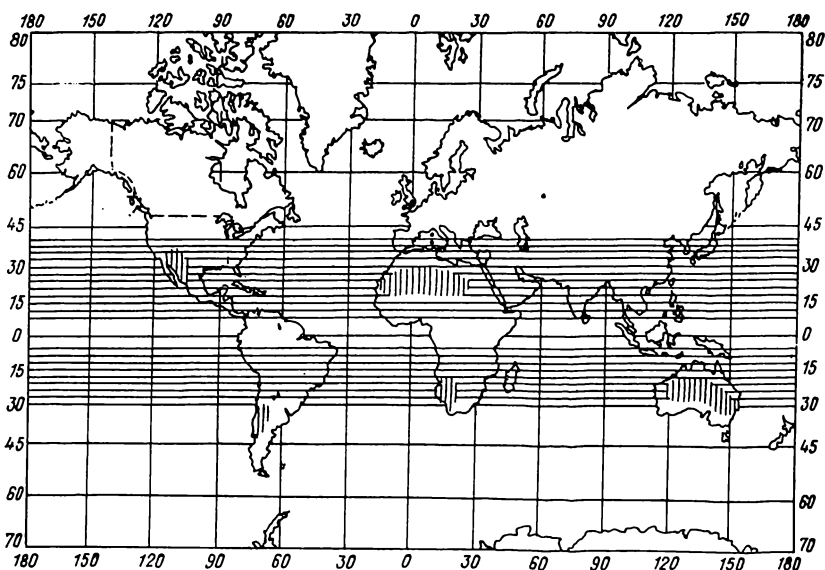


Рис. 2. Области, где средняя облачность меньше, чем 55 % (горизонтальные линии), и области, где число ясных дней в течение года в среднем больше, чем 50 % (вертикальные линии).

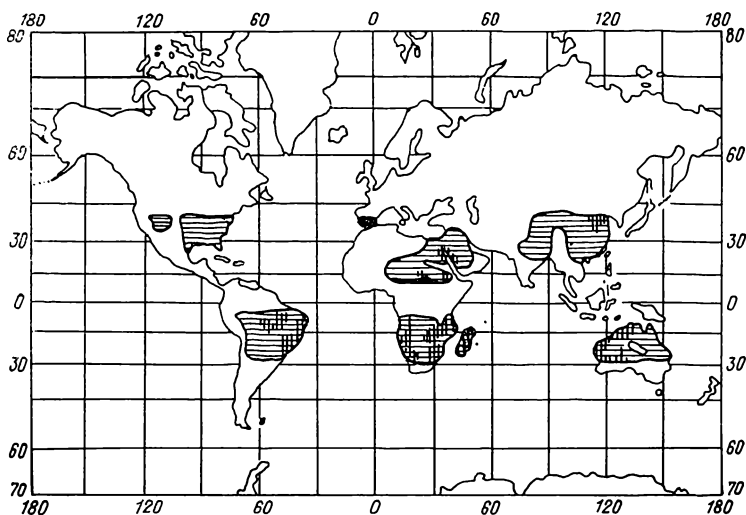


Рис. 3. Потенциально благоприятные области для выбора астрометрических станций (горизонтальные линии). Щиты (вертикальная штриховка) — области, свободные от региональных деформаций коры в течение 2—2.5 млрд. лет.

летрясения. Не будем говорить также и о плитах, но при создании общей картины влияния примем в расчет лишь области, которые называются щитами и которые свободны от региональных деформаций коры, исключая малые движения. Последние проявляются в течение 2.0—2.5 млрд. лет.

Области на земном шаре, благоприятные для астрометрических обсерваторий, в смысле сейсмичности, рефракционных возмущений и облачности — показаны на рис. 3. На этом рисунке приведены и места

пунктов. Из данного рисунка видно, что имеется небольшое число мест, которые можно считать благоприятными. Однако это не значит, что среди областей, отнесенных к неблагоприятным, невозможно найти относительно подходящих мест для астрономических станций. Необходимы региональные и, особенно, локальные исследования. Такие исследования, конечно, необходимы и в областях, обозначенных как благоприятные.

1. *Василенко Н. А.* Результаты анализа аномалий астрономической рефракции.— Астрометрия и астрофизика, 1976, вып. 28, с. 44—45.
2. *Колчинский И. Г.* Зависимость дрожания изображений звезд в телескопах от зенитного расстояния.— Астрометрия и астрофизика, 1970, вып. 10, с. 44—65.
3. *Колчинский И. Г.* Автокорреляционные функции дрожания изображения звезд и их применение для оценки погрешностей астрометрических наблюдений.— Астрометрия и астрофизика, 1973, вып. 20, с. 19—39.
4. *Brunner F. K.* Atmospheric turbulence and its effects on direction measurements.— In: Sun and Planetary System. Dordrecht — Boston — London: D. Reidel Publ. Comp., 1982, p. 505—510.
5. *Hog E.* Refraction Anomalies: The mean power spectrum of star image motion.— Z. Astrophysik, 1968, 69, p. 313—325.
6. *Ivanov V. I.* Atmospheric turbulence effects on astrometric determinations.— In: Refraction Influences in Astrometry and geodesy. Dordrecht — Boston — London: D. Reidel Publ. Comp., 1979, p. 67—72.
7. *Kaula W. M.* Geodynamic problems.— Repts. Dep. Geod. Sc., 1978, No 280, p. 345—351.
8. *Milovanović V., Teleki G., Crujić R.* On the influence of the external factors on the accuracy of determination of latitude variations.— Pubs. Astron. Observ. Sarajevo, 1981, I, p. 131—141.
9. *Sugawa C., Naito I.* Final refraction problems in time and latitude observations through classical techniques.— In: Sun and Planetary System. Dordrecht — Boston — London: D. Reidel Publ. Comp., 1982, p. 471—474.
10. *Teleki G.* Results of the International Latitude Service and meteorological influences.— Mitt. Lohrmann — Observ., 1976, No 33, p. 913—917.
11. *Teleki G.* Atmospheric influence in the optical fundamental astrometry.— Bull. Observ. Astron. Belgrad, 1978, No 129, p. 1—8.
12. *Teleki G.* Astrometric site selection.— In: Sun and planetary system. Dordrecht — Boston — London: D. Reidel Publ. Comp., 1982, p. 483—491.
13. *Teleki G., Saastamoinen J.* Problems of three-dimensional refraction in Astrometry.— In: Sun and Planetary System, Dordrecht — Boston — London: D. Reidel Publ. Comp., 1982, p. 455—462.

Белградская астрономическая обсерватория,  
Белград, Югославия

Поступила в редакцию  
16.07.1984