

В.П. Васильев, В.А. Сергеев, С.Р. Измайлов, И.А. Бабаев

Обнаружение особенностей горизонтальных минутнопериодических вариаций атмосферной рефракции

*Солнечно-экологический научный центр
Украинского отделения международного общества солнечной энергии, г. Харьков*

Поступила в редакцию 16.05.2001 г.

На основании данных более чем двухлетних фотоэлектрических измерений временных параметров движения изображений звезд, проходящих на разных высотах (от 30 до 90°) поперек главного меридиана, проведены поиск и анализ горизонтальных вариаций атмосферной рефракции (ВАР). Зарегистрированы присутствующие во все сезоны года горизонтальные ВАР с характерными амплитудами в несколько угловых секунд. Проведены статистический анализ этих ВАР и качественный анализ их спектров мощности, рассчитанных по методу Диминга, в диапазоне периодов от десятков секунд до десятков минут. На спектрах выявлены два устойчивых пика с периодами 1 и 2 мин, более четко проявляющихся при приближении к моменту захода Солнца. Обнаружен ряд особенностей минутнопериодических составляющих ВАР, которые выражаются в существенной зависимости вида спектров от наклона трассы и ее северо-южной ориентации, а также от сезона года. В диапазоне высот от 30 до 70–75° с южной стороны от зенита в сезоны, близкие к равноденствиям, и летом на спектрах присутствует один четкий пик в области двухминутных периодов. Амплитуда этого пика резко возрастает с уменьшением угла наклона трассы. В близзенитной зоне 75–90° с той же стороны от зенита двухминутный пик почти не наблюдается, но в зимне-весенний сезон здесь проявляется похожий пик в области одноминутных периодов. С северной же стороны (высоты 67–90°) оба минутнопериодических пика столь четко не выделяются в течение всех сезонов. Кратко обсуждается возможная природа источника исследованных ВАР.

Введение

Регистрация оптическими методами и выяснение природы различного типа стохастических и квазипериодических вариаций атмосферной рефракции (ВАР) лежат в основе фундаментальных исследований динамики приземных слоев атмосферы. Кроме того, учет ВАР необходим при обеспечении широкого класса оптических экспериментов с использованием лазерного зондирования, наблюдательных методов позиционной астрономии и т.п. Проявляющиеся как оптическая нестабильность атмосферы, ВАР лежат в широком диапазоне временных масштабов. К настоящему времени выполнено большое число экспериментов и теоретических работ по изучению короткопериодических ВАР (см., например, [1, 2] и список литературы), связанных с турбулентными движениями воздушной массы. Что же касается относительно длиннопериодических ВАР с периодами порядка минуты, то здесь ситуация далека от полной ясности, несмотря на многолетнюю историю их поиска и регистрации.

По-видимому, впервые наличие минутнопериодических ВАР было отмечено еще в начале прошлого века (см. [3] и литературу) на основе анализа фотографической регистрации звездных следов неподвижной камерой. Впоследствии для выделения чисто горизонтальных ВАР исследовались вертикальные фотографические следы околополярных звезд, полученные в южноафриканских обсерваториях [3]. Эти ис-

следования подтвердили преимущественно горизонтальный характер смещения изображений звезд с периодом около 1 мин. К подобным выводам приходит также автор работы [4] на основании визуальных наблюдений динамики звездных изображений. В более поздней работе [5] были также изложены результаты фотографических исследований данного типа ВАР, подробный анализ которых привел автора к предположению о наличии неких атмосферных волн с периодом порядка минуты. При наблюдениях звезд с использованием существенно более точного метода цветовой разности координат аналогичное и, по мнению авторов, загадочное явление было также зарегистрировано в течение двух сеансов измерений [6].

Иными словами, уже несколько десятилетий в литературе обсуждается возможность существования в частотном спектре ВАР минутнопериодической особенности с указаниями на преимущественно горизонтальный характер и волновое происхождение порождающих ее движений воздуха. По данным [3–6], характерные амплитуды угловых смещений изображений звезд при этом составляли десятые доли – единицы секунд, что вполне поддавалось измерению и выделению на фоне всевозможных фоновых эффектов. Однако эпизодичность этих измерений, проведенных к тому же различными методами и с недостаточной для спектрального анализа статистикой, пока не позволяет прийти к однозначным выводам, которые необходимы для выяснения природы этого явления.

Отметим также, что фотографические методы поиска особенностей ВАР, с помощью которых получено большинство из указанных результатов, далеко не свободны от принципиальных ограничений. Например, при большом поле зрения неподвижной камеры малые искривления звездных следов, отражающие искомый эффект, становятся труднообнаружимыми. Использование же малого поля зрения для удаленных от полюса звезд не позволяет получить временной масштаб следа, достаточный для выявления минутной периодичности его искривления. Компромиссный подход – работа в следящем режиме – не дает уверенности в отсутствии неотделимого маскирующего эффекта, который может возникать из-за многочисленных источников нестабильностей в ориентации оптической оси прибора. Использование только близполюсных звезд, достаточно медленно движущихся в поле зрения, существенно сужает общий диапазон поиска. Данные обстоятельства усугубляют неопределенность в получении окончательного ответа на вопрос о свойствах этого типа ВАР и тем более в поиске закономерностей их возникновения и особенностей, достаточных для однозначной теоретической интерпретации.

В данной статье предпринята попытка обнаружения и предварительного изучения особенностей минутнопериодических горизонтальных ВАР на основе систематического наблюдательного материала, полученного в единой и обладающей достаточной точностью фотоэлектрической методике со статистической обеспеченностью, позволяющей производить корректный анализ методами спектрального оценивания.

Экспериментальные данные и методика их обработки

Для поиска горизонтальных ВАР использовались рутинные данные астрометрических наблюдений звезд, выполненных С.Р. Измайловым на пассажном инструменте «АПМ-1 № 540001» (диаметр объектива 100 мм, фокусное расстояние 1000 мм) Астрономической обсерватории Харьковского университета (географическая широта 50°) в течение 1980–1982 гг. Регистрирующая аппаратура описана в [7], а сами наблюдения по стандартной методике заключались в дифференциальной фотоэлектрической регистрации абсолютных моментов строго горизонтального прохождения центров изображений звезд через микрорешетку из двух наборов равноудаленных реперов (14 узких полос металлической пленки, нанесенной на прозрачную подложку), расположенных вертикально вблизи фокальной плоскости объектива инструмента. Точность регистрации примерно 10^{-3} с является достаточной для целей настоящего исследования ВАР. Действительно, даже при самой высокой скорости движения изображения звезды, расположенной на небесном экваторе ($\delta = 0$), этой величине точности соответствует угловая величина 0,015 с, которая существенно меньше характерных амплитуд ВАР. При наблюдениях оптическая ось приборов данного типа ориентируется не-

подвижно в плоскости главного меридиана, т.е. регистрация прохождений звезд происходит при их строго горизонтальном движении в кульминации. Поэтому в отсутствие дрожания прибора и рефракционных искажений волнового фронта в горизонтальном направлении скорость движения изображения будет постоянной и интервал времени $\Delta t(\delta)$ между моментами пересечения его центром соседних границ неподвижных реперов будет одинаковым при неизменном склонении звезды δ . Такая стационарная в рамках данной аппаратуры величина временного интервала легко определяется по угловой ширине реперов или расстоянию между ними в проекции на небесную сферу с учетом масштаба изображения. В данном случае это расстояние составляло 20,48 угл. с, что соответствует временному интервалу $\Delta t = 1,365$ с, если $\delta = 0$. При увеличении δ эта разность возрастает пропорционально $\sec \delta$.

Если же горизонтальные рефракционные искажения присутствуют на луче зрения, то экспериментальная (фактическая) разность $\Delta t_e(\delta)$ моментов пересечения будет уже изменяться в соответствии с изменениями мгновенной скорости движения изображения. При этом величина

$$\Delta p = 15\Delta t_e(\delta) - 20,48 \text{ sec } \delta \quad (1)$$

будет характеризовать абсолютную величину горизонтальных рефракционных отклонений центра изображения звезды от его истинного положения в угловых секундах. В связи с этим можно предположить, что характерные частоты возможных дрожаний инструмента и локальной микротурбулентности воздуха намного выше искомых частот ВАР и поэтому не влияют на получаемые результаты. В использованных наблюдениях весь сеанс измерений длился до нескольких часов, а характерное время между прохождениями различных звезд через систему реперов в течение одного сеанса изменялось от десятков секунд до десятков минут, в зависимости от их δ , при количестве звезд до нескольких десятков за сеанс.

В данной работе по 1247 горизонтальным прохождениям звезд через главный меридиан в различные сезоны более чем двухлетнего периода (всего 53 даты) было определено 15744 значения $\Delta t_e(\delta)$ и далее по формуле (1) было вычислено такое же количество значений Δp . При этом использовались звезды, проходящие через главный меридиан на различных высотах над горизонтом в диапазоне от 30° и более как к югу, так и к северу от зенита при достаточной случайности их координат в течение каждого сеанса измерений. Необходимые характеристики полученного после учета систематических погрешностей массива значений Δp , который в дальнейшем был использован для расчетов временных спектров, представлены на рис. 1, 2.

Результаты и их обсуждение

Как видно из рис. 1, 2, амплитуды всего набора Δp варьируют в широких пределах (от десятых долей до десятков угловых секунд), но в основном они

не превышают 3–4 с, что несколько больше типичных величин, найденных другими авторами и относящихся только к минутнопериодическим ВАР.

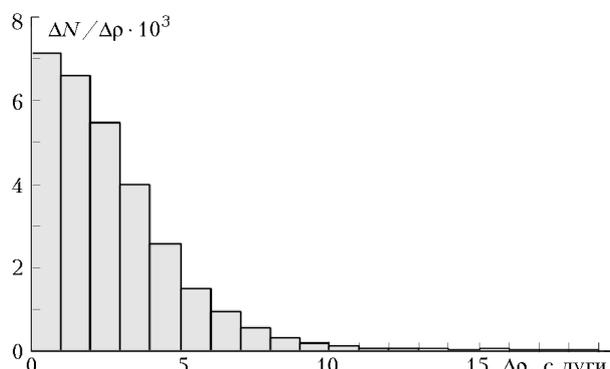


Рис. 1. Диаграмма распределения значений $\Delta\rho$ амплитуды ВАР

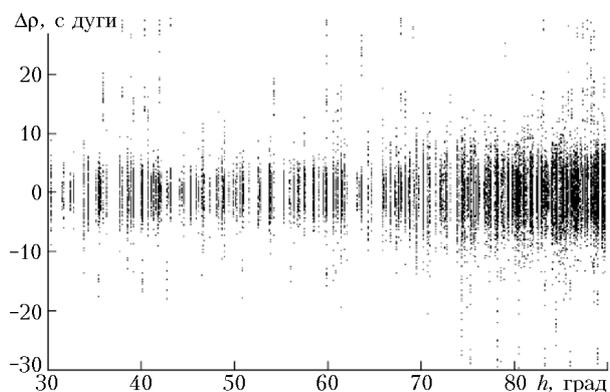


Рис. 2. Распределение значений $\Delta\rho$ амплитуды ВАР в зависимости от высоты h прохождения звезды над горизонтом (наклона траектории)

Анализ не выявил какой-либо зависимости характерных амплитуд горизонтальных ВАР от высоты регистрируемых звезд над горизонтом (см. рис. 2). Вместе с тем временная динамика статистических параметров массива значений $\Delta\rho$ обнаруживает связь долговременных изменений структуры ВАР с периодом, прошедшим от момента захода Солнца. Эту связь демонстрируют кривые на рис. 3, полученные на основе

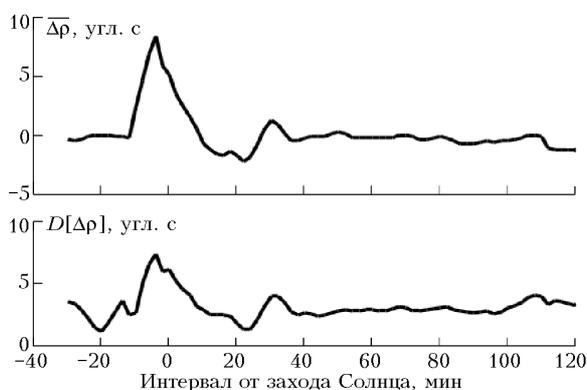


Рис. 3. Динамика усредненных амплитуд ВАР $\bar{\Delta\rho}$ и их дисперсии $D[\Delta\rho]$ в период захода Солнца и после него

усреднения статистических параметров ВАР в соответствующие моменты времени за все даты наблюдений. Такая динамика горизонтальных ВАР отражает типичное состояние газовой среды в период и после прохождения через нее некоего возмущения, в роли которого в данном случае, по-видимому, выступает вечерняя (переходная) неустойчивость атмосферы.

На основе метода вычисления преобразования Фурье по неэквидистантным точкам с нормировкой на спектры временных окон (метод Диминга [8]) нами были получены частотные спектры мощности зарегистрированных ВАР. Так как продолжительность сеанса наблюдений и объем данных за разные даты сильно отличались, то кроме спектров ВАР за весь сеанс для сравнительного анализа использовались также спектры данных во временных окнах. Окна выбирались таким образом, чтобы их продолжительность и информационное наполнение были примерно одинаковыми. Каждое из выбранных таким образом окон в среднем охватывало интервал около 1 ч и включало около 240 точек. Позиционирование таких окон, последовательно располагаемых в течение каждого сеанса измерений, позволяло также анализировать динамику спектров ВАР в зависимости от изменения общего состояния атмосферы в период и после захода Солнца.

Анализ показал, что при всем многообразии спектральных особенностей горизонтальных ВАР, формируемых комплексом атмосферных факторов, для большинства спектров характерно наличие как минимум одного из двух достаточно выделенных пиков (максимумов) в диапазоне циклических частот 0,03 – 0,14 рад/с. Вершины этих пиков соответствуют периодам, равным примерно 2 и 1 мин, а их ширины и амплитуды соответствуют характерным величинам горизонтальных ВАР в десятые доли угловой секунды, что совпадает с результатами других авторов [3–6]. Эта особенность наиболее четко проявляется в вечернее время: при приближении к моменту захода Солнца минутнопериодические пики, как правило, возрастают по амплитуде. Причем это возрастание происходит по абсолютной величине и относительно стохастических вариаций горизонтальной рефракции, амплитуды которых во время захода больше, чем ночью. На рис. 4,а показаны примеры отдельных спектров мощности. Показательно, что при исключении временных интервалов с переходными (вечерними) атмосферными процессами из сеансов измерений минутнопериодические пики на спектрах исчезают (кривая 3). Усредненный по значительной части окон всех сеансов измерений спектр (рис. 4,б) также отражает эти общие тенденции в динамической структуре ВАР.

Как видно из изложенного, преобладание минутнопериодических составляющих является, по сути, единственной устойчивой особенностью, присутствующей на спектрах горизонтальных ВАР (полученных в пределах как отдельных временных окон и сеансов измерений, так и усредненных) в диапазоне периодов от десятков секунд до десятков минут.

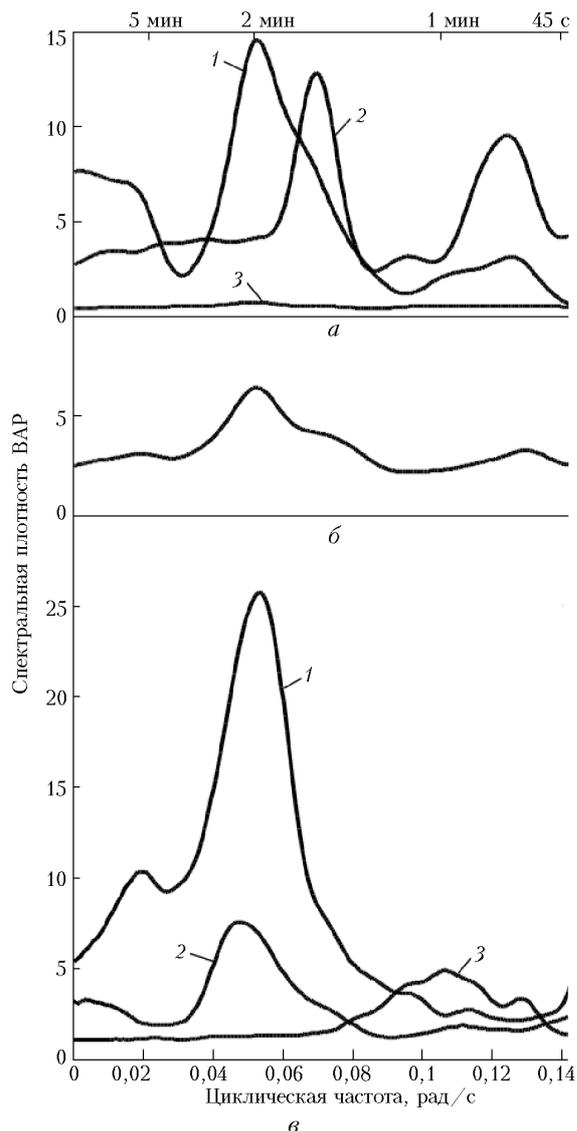


Рис. 4. Особенности временных спектров горизонтальных ВАР: *a* – примеры спектров, полученных по наблюдениям звезд в период захода Солнца (кривая 1), в непосредственной близости от периода захода Солнца (кривая 2) и ночью (кривая 3); *б* – спектр, усредненный по большинству временных окон за разные сеансы наблюдений, в течение которых проявлялись минутнопериодические ВАР; *в* – спектры, усредненные по различным высотным секторам наклона трассы над горизонтом к югу от зенита: кривая 1 – в диапазоне высот 30–50° (сезоны вблизи равноденствий), кривая 2 – в диапазоне 50–70° в те же сезоны, кривая 3 – в диапазоне 85–90° (зимне-весенние сезоны)

Статистические характеристики используемого массива данных позволяли также качественно исследовать поведение спектров в различных диапазонах высот прохождения звезд над горизонтом, а также в различные сезоны года. Такое исследование выявило ряд интересных и достаточно неожиданных особенностей горизонтальных ВАР, которые частично отражают усредненные спектры, показанные на рис. 4, *в*. Оказалось, что двухминутный пик наиболее четко наблюдается лишь на спектрах, относящихся к на-

клонным трассам – высотам примерно до 70–75° над горизонтом с южной стороны от зенита. Более того, как видно из сравнения кривых, с увеличением наклона трассы величина двухминутного пика резко возрастает. На больших высотах вплоть до зенита с той же стороны от него четко выделяется только одноминутный пик. Причем вычисление спектров для промежуточных диапазонов высот указывает на то, что эта трансформация спектра связана не со смещением двухминутного пика в сторону более высоких частот с ростом высоты, а, напротив, с существованием каждого из пиков в своем высотном секторе. К северу же от зенита во всем диапазоне высот, представленном данными о ВАР (67 – 90°), минутнопериодические особенности на спектрах существенно подавлены.

Оказалось также, что эти два минутнопериодических пика, как правило, разделены не только по высоте, но и по времени года. Так, двухминутный пик на наклонных трассах наиболее отчетливо проявляется в сеансах, близких к равноденствиям и летом, в то время как одноминутный пик на близзенитных трассах более уверенно выделяется лишь в зимне-весенние сезоны. Следовательно, для данной географической широты пункта измерений в диапазоне высот, больших 30° к югу и северу от зенита, можно грубо выделить три различных сектора, в каждом из которых минутнопериодические горизонтальные ВАР либо четко проявляются в разных частотных участках и в разные сезоны, либо почти не проявляются. Важно отметить, что без разбиения на сезоны для всех этих трех секторов суммарные распределения интервалов прохождения (регистрации) звезд на временной оси были практически одинаковыми (в том числе и по положению относительно момента захода Солнца) и поэтому не могли обеспечить такие различия спектров.

Столь нетривиальная геометрия и пространственно-временная связь локализации минутнопериодических ВАР, обнаруженные нами, требуют дальнейшего подробного анализа в рамках теоретических моделей процесса их возникновения. Однако уже сами по себе эти особенности указывают на то, что источник горизонтальных колебаний атмосферы, порождающий данный тип ВАР, распределен в ней неизотропно и подвержен сезонным изменениям при глобально-перманентном характере в целом.

Заключение

Таким образом, на основе полученных результатов можно считать факт существования горизонтальных минутнопериодических ВАР окончательно доказанным и определить следующий набор их основных свойств и пространственно-временных особенностей:

- 1) перманентность существования горизонтальных ВАР в вечерне-ночной атмосфере при независимости всего набора их абсолютных амплитуд (характерные величины порядка нескольких угловых секунд) от высоты луча зрения над горизонтом (по крайней мере, в пределах углов, больших 30°) и его ориентации относительно зенита;

2) наличие и устойчивость выделенных периодов 1 и 2 мин, непосредственно которым соответствуют амплитуды горизонтальных VAR в десятые доли угловой секунды;

3) увеличение вероятности появления горизонтальной минутнопериодической составляющей VAR при приближении к моменту захода Солнца – ее интенсивность значительно возрастает как по абсолютной величине спектральных максимумов, так и по отношению к локальным во времени фоновым возмущениям в переходные часы, когда атмосфера в целом более нестабильна;

4) северо-южная асимметрия (по крайней мере, в диапазоне зенитных углов до 23° к югу и северу от зенита): горизонтальная минутнопериодичность VAR во все сезоны выделяется, в основном, на трассах южной ориентации в пункте измерений;

5) высотные отличия спектров VAR в южном секторе направлений луча зрения: наклонным трассам соответствует период 2 мин, амплитуда которого резко возрастает с уменьшением угла наклона, а трассам, более близким к вертикальным, – период 1 мин;

6) сезонные вариации спектров: вблизи равенств и летом возникает в основном только двухминутный период, в то время как одноминутный период тяготеет к зимне-весеннему сезону.

Определенность этих выводов обеспечивается достаточной статистикой используемых в работе данных (15744 экспериментальных значения Δp амплитуды VAR, они получены за все сезоны в течение более двух лет).

Свойства и обнаруженные особенности зарегистрированных нами VAR указывают на глобально-перманентный характер приводящего к их возникновению источника волновых возмущений. С подобным выводом согласуются также предшествующие результаты наблюдений других авторов, которые эпизодически, с интервалами до десятков лет, проводились различными методами в различных пунктах, в том числе расположенных в разных земных полушариях. Кроме того, эти особенности указывают на связь его появления в широтной зоне ниже широты пункта измерений с периодом захода Солнца. Поэтому наи-

более вероятным источником такого рода можно считать движущийся сквозь атмосферу солнечный термический терминатор как долго-локализованную и длительно сохраняющуюся в связанной с ней системе координат область относительно существенного перепада температуры. Как было показано ранее, на средних широтах этот источник способен обеспечить в тропосфере генерацию и горизонтальное усиление именно минутнопериодического участка акустического спектра атмосферных волн в режиме так называемого резонанса по скорости (см. [9] и цитированную там литературу).

Для подтверждения такой интерпретации полученных нами результатов исследования горизонтальных VAR представляют несомненный интерес поиск и детальный анализ параметров этого эффекта на различных широтах во время и после восхода Солнца, когда его предполагаемый источник выражен более резко по сравнению с симметрично расположенной по долготе своей вечерней частью.

1. *Алексеев А.В., Кабанов М.В., Куштин И.Ф.* Оптическая рефракция в земной атмосфере (наклонные трассы) / Под ред. В.Е. Зуева. Новосибирск.: Наука, 1983. 232 с.
2. *Оптическая нестабильность земной атмосферы* / Под ред. Ш.П. Дарчия. М.; Л.: Наука, 1985. 246 с.
3. *Land G.* Anomalies in atmospheric refraction // *Astron. J.* 1954. V. 59. № 1213. P. 19–26.
4. *Courvoisier L., Basel Z.* Beobachtungen kurzperiodischer Refraktionsschwankungen // *Astrophys. Nachr.* 1949. V. 277. P. 259–263.
5. *Колчинский И.Г.* Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звезд. Киев.: Наукова думка, 1957. 184 с.
6. *Сорокин Л.Ю., Токовинин А.А.* Цветовая разность координат как метод изучения двойных звезд // *Письма в астроном. ж.* 1985. Т. 11. № 7. С. 542–554.
7. *Туренко В.И., Ванцан А.Ф., Литкевич Н.Г.* Анализ результатов наблюдений службы времени АО ХГУ и ХГНИИМ за 1972 – 1974 годы // *Вестн. Харьков. ун-та.* 1977. № 160. С. 36–42.
8. *Deeming T.J.* Fourier analysis with unequally-spaced data // *Ap. Space Sci.* 1975. V. 36. № 1. P. 137–158.
9. *Vasylyev V.P., Sergeev V.A.* Speed-resonant terminator wave generation in the earth troposphere // *Earth, Moon and Planets.* 2000. V. 84. № 2. P. 81–93.

V.P. Vasylyev, V.A. Sergeev, S.R. Izmailov, I.A. Babaev. Revealing of peculiarities in horizontal minute-periodic variations of atmospheric refraction.

Horizontal variations of atmospheric refraction (VAR) are sought and analyzed through the data obtained in the over-two-year photo-electric measurements of temporal parameters of moving images of stars passing at different altitudes (from 30 to 90 degrees) across the first meridian. The all-year present horizontal VAR with characteristic amplitudes of some angular seconds are recorded. The statistical analysis for these VARs and qualitative analysis of their power spectra, calculated with the Deeming method, are made in the range of periods from tens of seconds to tens of minutes. The spectra display two stable peaks with periods of 1 and 2 minutes, being clearer with approaching the sunset point. A number of features in minute-periodic VAR components, manifesting themselves in essential dependence of the spectra type on the path inclination and north-southern orientation, as well as on the season of the year, is found. At the altitudes from 30 to 70–75 degrees southward from the zenith during nearequinox seasons and in summer the spectra exhibit one clear peak in the two-minute periods region. This peak amplitude sharply increases with decreasing of the path inclination angle. In the near-zenith zone of 75–90 degrees on the same side from zenith the two-minute peak is not observed, but in the winter-spring season the similar peak here is exhibited in the region of one-minute periods. On the northern side (altitudes of 67–90 degrees) both minute-periodic peaks practically are not observed during all seasons. The possible nature of the studied VAR source is briefly discussed.