

УДК 521.85:524.35–56

О ВОЗМОЖНЫХ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ ДИАМЕТРА УГЛЕРОДНОЙ ЗВЕЗДЫ У ТАУ

© 2013 Е. М. Трунковский*

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского
Государственного Университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 15 февраля 2013 года; принята в печать 25 марта 2013 года

Проведен анализ имеющихся результатов прямых измерений углового диаметра углеродной звезды У Тау в различных спектральных полосах оптического и ближнего ИК-диапазонов спектра. Показано, что имеющиеся данные позволяют предполагать наличие периодических или квазипериодических пульсаций звезды с периодом, близким к возможному периоду ее фотометрической переменности в соответствующий интервал времени наблюдений. Если пульсации действительно имеют место, то их характер может быть таким, что при уменьшении диаметра звезды возрастает ее светимость. В то же время возможен и другой вариант интерпретации результатов измерений, при котором значения углового диаметра звезды d , полученные из наблюдений в красной области оптического диапазона спектра, соответствуют фотосфере звезды, а значения d , полученные из наблюдений в ближнем ИК-диапазоне, соответствуют оптически толстым излучающим слоям ее протяженной атмосферы или оболочки.

Ключевые слова: *покрытия звезд Луной—звезды: колебания—звезды: индивидуальные: У Тау*

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследователями холодных звезд-гигантов и сверхгигантов давно обсуждается вопрос о возможных пульсациях этих звезд и соответствующих изменениях их диаметров со временем (см., например, работы [1] и [2]). В свое время Уайтом в работе [3] на основе анализа имевшихся данных измерений углового диаметра Бетельгейзе (α Ori) различными прямыми методами были получены указания на возможные периодические изменения диаметра фотосферы этого сверхгиганта спектрального класса M2.0 Iab. Если обнаруженные изменения углового диаметра α Ori отнести к реальным пульсациям ее фотосферы, то, согласно [3], максимальная относительная величина этих пульсаций может достигать примерно 30–45%.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ПОКРЫТИЙ ЛУНОЙ ЗВЕЗДЫ У ТАУ

В работе [4] были представлены результаты прямого определения углового диаметра углеродной звезды У Тау из анализа фотоэлектрического наблюдения покрытия ее Луной в спектральной полосе R оптического диапазона спектра ($\lambda_0 \simeq 0.70$ мкм). Наблюдение было выполнено 4 февраля 1982 г. на 48-см рефлекторе

A3T-14 Высокогорной Тянь-Шаньской обсерватории ГАИШ близ Алма-Аты, фотоэлектрическая регистрация кривой покрытия проводилась с временным разрешением 1 мс. На Рис. 1 представлены зарегистрированная кривая покрытия и оптимальная модельная дифракционная кривая, соответствующая определенному значению углового диаметра звезды. При обработке полученной фотоэлектрической кривой покрытия были найдены следующие значения углового диаметра звезды (в миллисекундах дуги, сокращенно mas): $d = 5.0$ mas для однородно яркого звездного диска и $d = 5.6$ mas для диска с полным потемнением к краю. На Рис. 2 показана зависимость величины u — суммы квадратов нормированных уклонений фотоэлектрических отсчетов от модельной кривой — от значения углового диаметра d при различных предположениях о потемнении к краю звездного диска. Погрешность определения значения d была оценена в этой работе величиной $\sigma_d \simeq 1.2$ mas; эта оценка получена путем синтезирования “квазинаблюдаемых” реализаций на основе возмущений полученной оптимальной модельной кривой, соответствующей зарегистрированному участку покрытия [4].

К настоящему времени автору известны результаты семи прямых измерений углового диаметра У Тау, полученных из анализа фотоэлектрических кривых покрытий ее Луной. Эти результаты при-

*E-mail: tem@sai.msu.ru

ведены в таблице. Значения углового диаметра d и погрешностей его определения σ_d даны в таблице в миллисекундах дуги. Кривые покрытий У Тау регистрировались как раньше, так и позже упомянутого наблюдения Трунковского [4]. В таблице дана информация о датах наблюдений покрытий У Тау и работах, где опубликованы соответствующие этим датам результаты. Следует подчеркнуть, что среди перечисленных наблюдений покрытий только два были выполнены в оптическом диапазоне (в красной области) спектра, все остальные наблюдения покрытий данной звезды были выполнены в ближнем инфракрасном диапазоне спектра (см. таблицу).

3. АНАЛИЗ ИМЕЮЩИХСЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во втором столбце таблицы приведены некие условные значения фаз φ фотометрической переменности звезды У Тау. В прошлом эта звезда на основе анализа имевшихся тогда фотометрических наблюдений была отнесена к полуправильным переменным гигантам типа SRa с периодом $240^{\text{d}}.9$ и квазипериодом изменений средней звездной величины около 1750^{d} [9]. В каталоге [9] дана следующая эфемерида переменности, основанная на данных фотометрии:

$$JD_{\text{max}} = 2437065 + 240^{\text{d}}.9 E. \quad (1)$$

Однако в более поздних изданиях *Общего каталога переменных звезд* тип переменности звезды был уже определен как SRb, а это означает, что найти достаточно устойчивый период фотометрической переменности по данным за более-менее длительный интервал наблюдений не представляется возможным [10]. В частности, согласно экспертной оценке [11], получить достаточно устойчивое и надежное значение периода фотометрической переменности по всем имеющимся сейчас данным фотометрии У Тау (в спектральной полосе V) за интервал наблюдений с ноября 1973 г. по октябрь 1995 г., по всей вероятности, практически невозможно. Если же проанализировать данные ПЗС-фотометрии этой звезды в полосе V по наблюдениям последнего времени — с декабря 2002 г. по октябрь 2010 г., — то формально получается следующая эфемерида фотометрической переменности [11]:

$$JD_{\text{max}} = 2454542 + 245^{\text{d}}.1 E. \quad (2)$$

Однако углеродные звезды — гиганты и сверхгиганты, — в том числе и данная звезда, представляют собой весьма сложные объекты, обладающие, как правило, протяженными атмосферами и/или газопылевыми оболочками, и поэтому сам характер их фотометрической переменности может

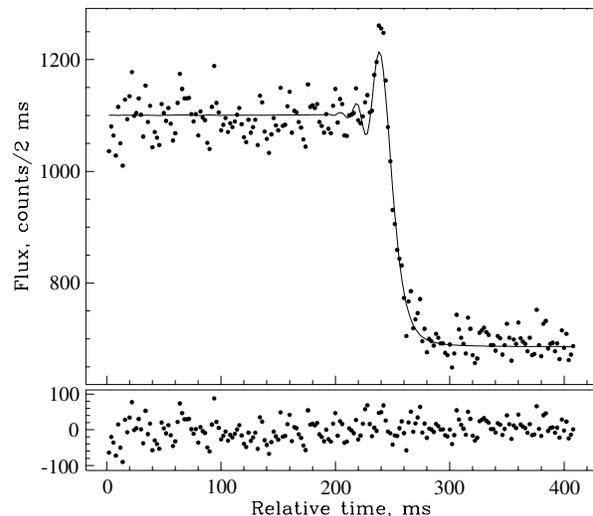


Рис. 1. Дифракционная кривая покрытия У Тау в спектральной полосе R, зарегистрированная 4 февраля 1982 г. Наблюдатель — Е. Трунковский. По горизонтальной оси — время в миллисекундах относительно некоторого условного момента. По вертикальной оси — значения сигнала, пропорциональные регистрируемому световому потоку. Точки — отсчеты фотометра, соответствующие интервалу накопления 2 мс (получены путем сложения каждых двух последовательных отсчетов, накопленных за 1 мс), сплошная линия — оптимальная модельная кривая для покрытия одиночной звезды. В нижней части рисунка показаны кривые отклонения от оптимальной модельной кривой.

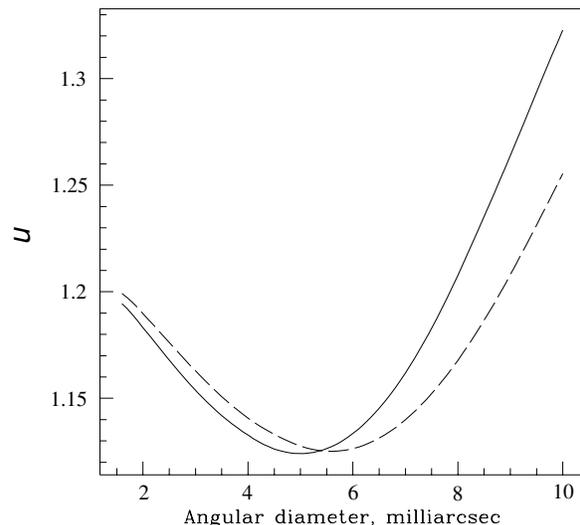


Рис. 2. Зависимости $u(d)$, полученные при обработке кривой покрытия У Тау, наблюдавшейся 4 февраля 1982 г. Сплошная линия — для однородно яркого звездного диска (коэффициент потемнения к краю $\mu = 0$), штриховая линия — для $\mu = 1$.

Результаты прямых измерений углового диаметра углеродной звезды Υ Тау в спектральных полосах H и R

Date	φ	λ_0 , μm	Band	d_{ud} , mas	σ_{ud} , mas	d_{pld} , mas	σ_{pld} , mas	Paper
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
14 мая 1975	0.76	1.64	H	8.39	0.24	8.80	0.25	[5]
31 августа 1975	0.21	1.64	H	7.98	0.23	8.38	0.24	[5]
14 ноября 1981	0.62	1.654	H	8.91	0.37	9.27	0.40	[6]
14 ноября 1981	0.62	0.75	$\sim R$			7.8	1.3	[7]
8 января 1982	0.85	1.654	H_{conv}	7.12	0.46	7.41	0.48	[6]
4 февраля 1982	0.96	0.70	R	5.0	1.2	5.4	1.2	[4]
20 февраля 1994	0.22	1.65	H_{conv}	8.40	0.51	8.73	0.54	[8]

быть достаточно сложным и изменчивым, — подробнее об этом см. в статье [4]. Таким образом, нельзя исключить, что в те годы, когда были выполнены известные фотоэлектрические наблюдения покрытий Υ Тау Луной, тип переменности этой звезды был в большей степени близок к SRa, чем позже ([11]), и, следовательно, можно (с определенными оговорками) допустить, что эфемерида (1) относительно адекватно отражает типичные характеристики фотометрической переменности Υ Тау того интервала времени. Приняв такое допущение, можно вычислить соответствующие фазы этой переменности; именно эти значения фаз φ и приведены в таблице.

Подчеркнем, что та же самая эфемерида (1) фотометрической переменности Υ Тау была использована при вычислении соответствующих фаз в работах [6] и [8], результаты которых представлены в таблице.

В третьем столбце таблицы указаны эффективные длины волн излучения λ_0 (в микронах), к которым относятся соответствующие измерения углового диаметра звезды, а в четвертом столбце — названия спектральных полос, которым соответствуют эти значения λ_0 . Поскольку значения величины d , полученные из наблюдений в разных спектральных полосах, могут различаться, сравнение различных измерений углового диаметра, выполненных в разные моменты времени, следует проводить корректно, “привязав” их к определенной спектральной полосе. Поэтому в работах [6] и [8] был использован факт измерения углового диаметра Υ Тау одновременно в полосах H и K ближнего ИК-диапазона (14 ноября 1981 г.), и значения величины d , полученные из анализа других наблюдений в спектральной полосе K ($\lambda_0 = 2.17\text{--}2.21$ мкм), преобразовывались

(“конвертировались”) в значения, соответствующие предполагаемым измерениям величины d в полосе H ($\lambda_0 = 1.65$ мкм) в те же моменты времени. Схема этого преобразования заключалась в следующем. Из наблюдения 14 ноября 1981 г., проведенного Шмидтке и др. [6] одновременно в полосах H и K , были получены два различных значения углового диаметра, соответствующих предположению об однородно ярком диске звезды, а затем вычислен коэффициент, равный отношению этих значений (1.026); этот коэффициент при необходимости использовался для перехода из полосы K в полосу H и получения значения d для однородно яркого диска, соответствующего полосе H . Затем, при переходе к модели звездного диска с частичным потемнением к краю, использовался дополнительный корректирующий коэффициент (см. ниже). В случаях наблюдений в полосе K значения d в таблице получены “конвертированием” по той же схеме из названных работ, и в четвертом столбце таблицы стоит обозначение полосы H_{conv} . Сказанное не имеет отношения к наблюдению Блау и др. [7], выполненному 14 ноября 1981 г. в широкой спектральной полосе с $\lambda_0 \sim 0.75$ мкм, близкой по характеристикам к полосе R оптического диапазона (см. ниже).

В пятом столбце приведены значения углового диаметра звезды d_{ud} , соответствующие предположению об однородно ярком звездном диске, в шестом столбце — погрешности определения величин d_{ud} . В случаях, когда значения d вычислялись в результате упомянутого преобразования на основе измерений в полосе K (т.е. когда в качестве спектральной полосы указано H_{conv}), погрешности σ_{ud} оказываются существенно больше тех, которые соответствуют непосредственным измерениям, за счет вклада неопределенностей

преобразования. Седьмой столбец таблицы содержит значения углового диаметра d_{pld} , соответствующие некоторой модели частичного потемнения к краю звездного диска, принятой в работе [6]; эти значения получены из значений d_{ud} путем использования определенных корректирующих коэффициентов, вычисленных на основе моделей атмосфер звезд поздних классов [6]; предполагается, что значения d_{pld} соответствуют реальным величинам углового диаметра звезды. Как следует из работы [6] (см. в ней Таблицу 1), эти корректирующие коэффициенты достаточно хорошо известны для ближнего ИК-диапазона (с точностью примерно 1%), и в случае полосы H этот коэффициент составляет 1.040, поэтому в применении к данной ситуации его можно рассматривать как модельно независимый. Исключением является значение d_{ld} , полученное в работе [7] по данным наблюдения 14 ноября 1981 г.; оно соответствует предположению о полном потемнении к краю звездного диска. Для наблюдения Трунковского [4] в полосе R упомянутый корректирующий коэффициент, согласно [6], должен составлять примерно 1.075, поэтому соответствующее значение d_{pld} в таблице близко к 5.4. В восьмом столбце таблицы даны погрешности определения величин d_{pld} ; эти погрешности σ_{pld} больше значений σ_{ud} , поскольку коэффициенты перехода от d_{ud} к d_{pld} обладают собственными погрешностями; величина погрешности σ_{ld} для значения d_{ld} из работы [7] взята из этой же работы, и она несколько больше величины погрешности σ_d из работы [4].

Как видно из таблицы, погрешности определения величины d из наблюдений в оптическом диапазоне 14 ноября 1981 г. [7] и 4 февраля 1982 г. [4] весьма велики и значительно превосходят оценки погрешностей определения углового диаметра, полученные авторами других работ; вероятно, это связано как с большим различием в точности фотоэлектрической регистрации кривых покрытий, так и, отчасти, с существенным различием методик оценки погрешностей σ_d . Можно полагать, что полученная в работе [4] оценка этой величины близка к верхнему пределу возможной ошибки определения углового диаметра. Главным же является тот факт, что величина d , полученная из анализа кривой покрытия, зарегистрированной автором, является минимальной среди всех имеющихся прямых измерений. И, несмотря на большую величину погрешности σ_d , соответствующую этому измерению величины d , можно с достаточной уверенностью считать, что отличие значения d , полученного по данным наблюдения 4 февраля 1982 г., от всех других имеющихся прямых определений углового диаметра (за исключением, быть может, значения, полученного в [7]) выходит за пределы

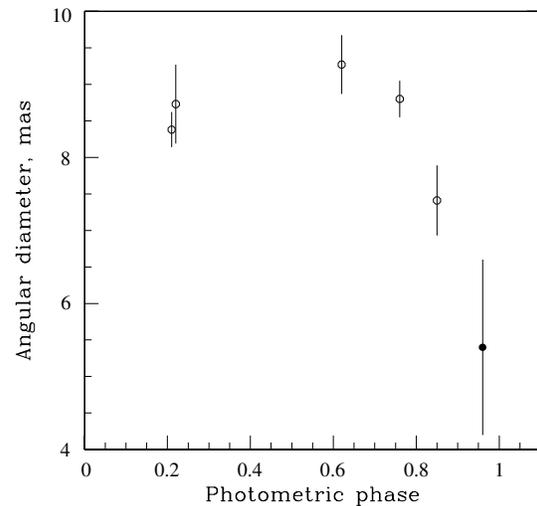


Рис. 3. Значения углового диаметра У Тау d_{pld} , полученные из наблюдений покрытий звезды Луной, в зависимости от фазы ее фотометрической переменности (см. таблицу). Величины d_{pld} соответствуют принятой модели потемнения к краю звездного диска. Значение d_{pld} , полученное из наблюдения 4 февраля 1982 г. в полосе R , представлено черным кружком.

возможных ошибок измерения этой величины, — это хорошо видно на Рис. 3.

Зависимость значений углового диаметра У Тау d_{pld} , полученных из известных наблюдений покрытий звезды Луной и приведенных в таблице, от фазы ее фотометрической переменности φ представлена на Рис. 3; здесь же показаны соответствующие погрешности определения этих значений. Для большей наглядности картины поведения значений d на этом рисунке отсутствует измерение Блау и др. [7], выполненное одновременно с измерениями Шмидтке и др. [6]; роль результата Блау и др. [7] обсуждается ниже. Величина углового диаметра d_{pld} , определенная из наблюдения покрытия 4 февраля 1982 г. в полосе R , представлена сплошным черным кружком.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

Вообще говоря, сопоставление значения d , полученного из наблюдения в полосе R , со значениями, соответствующими полосе H , не вполне корректно (см. выше). Однако “конвертация” значения d , соответствующего полосе R , в значение, соответствующее полосе H , практически невозможна, поскольку не было одновременных наблюдений покрытия звезды в этих двух спектральных полосах с теми же телескопом и фотометром, которые использовались для наблюдения

покрытия одновременно в полосах H и K . Отметим, что различие между значениями d , полученными в полосе H из наблюдений 14 ноября 1981 г. [6] и 14 мая 1975 г. [5], и значением, полученным из наблюдения 8 января 1982 г. для полосы H [6], весьма велико и выходит за пределы стандартных погрешностей определения величины d для этих измерений, а значение d , полученное по данным наблюдения 4 февраля 1982 г. в полосе R , намного меньше минимального из упомянутых значений, соответствующих полосе H , и это отличие также выходит за пределы соответствующих погрешностей. В такой ситуации сравнение значений d , соответствующих полосам H и R , представляется более или менее правомерным, и зависимость значений d от фазы переменности, изображенная на Рис. 3, наводит на мысль о периодических или квазипериодических изменениях диаметра звезды. Измерение величины углового диаметра γ Тау по данным наблюдения 4 февраля 1982 г. выполнено вблизи фазы фотометрического максимума, и полученное значение d оказалось наименьшим из известных. При этом по другим измерениям в области $\varphi \gtrsim 0.6$ отчетливо прослеживается тенденция к уменьшению величины d по мере приближения к фазе максимума. Обращает на себя внимание также тот факт (отмеченный в работе [8]), что значения $d_{\text{плд}}$, полученные из наблюдений 31 августа 1975 г. и 20 февраля 1994 г. и соответствующие почти совпадающим фазам переменности звезды φ , оказались весьма близки друг к другу.

Таким образом, можно предположить, что звезда γ Тау является пульсирующей и что уменьшение ее диаметра сопровождается увеличением ее светимости. Если подобная зависимость действительно имеет место, это может указывать на такой характер пульсаций, когда при сжатии звезды существенно возрастает ее эффективная температура.

Если считать, что результаты прямых измерений углового диаметра γ Тау, представленные в таблице, отражают реальные изменения диаметра звезды, то относительная величина этих изменений может достигать примерно 40–70%. Однако количество прямых измерений величины d , имеющееся к настоящему времени, безусловно, недостаточно для уверенного вывода о периодических или квазипериодических пульсациях звезды.

Другим вариантом интерпретации полученных результатов является предположение о наличии вокруг собственно звезды околосредней пылевой оболочки либо протяженной атмосферы, плавно переходящей в оболочку, присутствие которых может приводить к тому, что измеряемые значения

величины d при наблюдениях в различных спектральных полосах будут различны. Можно представить себе следующую модель: излучение фотосферы звезды с относительно высокой температурой проходит через сравнительно прозрачную (в оптическом диапазоне) протяженную атмосферу или оболочку и отдает часть своей энергии частицам атмосферы/оболочки при рассеянии и поглощении; за счет полученной энергии атмосфера (или оболочка) излучает в ближнем ИК-диапазоне, а несколько ослабленное оптическое излучение фотосферы также выходит наружу и поступает к наблюдателю. В результате становится возможным одновременно регистрировать и излучение фотосферы в оптическом диапазоне, и излучение от окружающих ее слоев атмосферы или оболочки в ближнем ИК-диапазоне. Тогда кривая покрытия, полученная при наблюдении в оптическом диапазоне (Рис. 1), может соответствовать угловому диаметру фотосферы звезды, а кривые, зарегистрированные в ближней ИК-области спектра, могут относиться к слоям протяженной атмосферы или оболочки, излучение которых доминирует на соответствующих длинах волн. Поскольку указанные слои атмосферы или оболочки должны быть в этом случае оптически толстыми в ближнем ИК-диапазоне, они могут проявлять себя при наблюдениях в этой области спектра как основное тело звезды, а если свойства и параметры атмосферы (оболочки) меняются со временем, то измеряемые в этом диапазоне значения углового диаметра могут также изменяться со временем.

Второй (только что изложенный) вариант интерпретации имеющихся данных прямых измерений углового диаметра звезды был подробно проанализирован в работе [4], где были получены оценки основных физических характеристик звезды, а также предположительно существующих вокруг нее протяженной атмосферы или (и) оболочки.

Важно также обратить внимание на следующее: если на Рис. 3 нанести измерение Блау и др. [7], соответствующее фазе фотометрической переменности $\varphi \simeq 0.62$, то мы увидим, что, с одной стороны, значение $d \simeq 7.8 \pm 1.3 \text{ mas}$, полученное из наблюдения в оптическом диапазоне, оказывается заметно меньше значения, полученного из наблюдения в ту же дату в полосе H ближнего ИК-диапазона, а с другой стороны, заметно больше значения, полученного из наблюдения в полосе R оптического диапазона при другой фазе переменности $\varphi \simeq 0.96$. И хотя формально указанные различия значений d лежат в пределах погрешностей определения этих величин (см. таблицу), все же эти различия находятся на границах интервалов допустимых погрешностей, и поэтому в действительности могут являться значимыми. Следовательно, не исключено, что значение d из работы

Блау и др. [7] было реально существенно меньше значения d из работы Шмидтке и др. [6] и, в то же время, реально существенно больше значения d из работы Трунковского [4]. В таком случае результат, полученный в работе [7], не противоречит ни одному, ни другому варианту интерпретации имеющихся результатов:

1) если мы имеем дело с пульсациями звезды, то значение d из работы [7] могло соответствовать диаметру фотосферы звезды, который при фазе $\varphi \simeq 0.62$ существенно превышал величину диаметра фотосферы при $\varphi \simeq 0.96$;

2) в то же время диаметр фотосферы из работы [7] мог быть существенно меньше диаметра излучающих в ближнем ИК-диапазоне слоев атмосферы или оболочки, если значение d из работы [6] относилось к этим слоям.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, вопрос об интерпретации представленных данных остается открытым. Тем не менее, предположение о пульсациях звезды γ Тау, как это хорошо видно на Рис. 3, в настоящее время можно считать вполне правомерным.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (грант НШ-7179.2010.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. D. Gehrz and N. J. Woolf, *Astrophys. J.* **165**, 285 (1971).
2. J. A. Frogel and A. R. Hyland, in: *17 Colloque International d'Astrophys, Les spectres des astres dans l'infrarouge et les micro-ondes* (Cointe-Ougree, Univer. de Liege, 1972), p. 111.
3. N. M. White, *Astrophys. J.* **242**, 646 (1980).
4. E. M. Trunkovskij, *Sov. Astron.* **31**, 195 (1987).
5. S. T. Ridgway, D. C. Wells, R. R. Joyce, *Astronom. J.* **82**, 414 (1977).
6. P. C. Schmidtke, J. L. Africano, G. H. Jacoby, et al., *Astronom. J.* **91**, 961 (1986).
7. G. L. Blow, P. C. Chen, D. A. Edwards, et al., *Astronom. J.* **87**, 1571 (1982).
8. A. Richichi, T. Chandrasekhar, F. Lisi, et al., *Astronom. and Astrophys.* **301**, 439 (1995).
9. Б. В. Кукаркин, П. Н. Холопов, Ю. Н. Ефремов и др., *Общий каталог переменных звезд. II* (Наука, Москва, 1970).
10. Н. Н. Самусь, О. В. Дурлевич, Е. В. Казаровец и др., *Общий каталог переменных звезд. II*, <http://www.sai.msu.su/groups/cluster/gcvs/>.
11. Н. Н. Самусь (частное сообщение).

On Possible Quasi-Periodic Diameter Variations of the Carbon Star γ TAU

E. M. Trunkovsky

An analysis of the available results of direct angular diameter measurements of the carbon star γ Tau in different spectral bands of the optical and near-IR spectral regions is carried out. It is shown that the available data allows to suggest the presence of periodic or quasi-periodic pulsations of the star with a period close to the possible period of its photometric variability in the corresponding time interval of observations. If the pulsations really take place, then their nature may be such that the star's luminosity increases with its decreasing diameter. At the same time, another interpretation of the measurement results is possible, where the values of the star's angular diameter d obtained from the observations in the red part of the optical spectrum correspond to the star's photosphere, whereas the values d obtained from observations in the near-IR region correspond to the optically thick radiating layers of its extended atmosphere or envelope.

Keywords: *occultations—stars: oscillations—stars: individual: γ Tau*