

ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ МИРИД В ОПТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Г. Е. Дервиз,* С. В. Милютникова

Лучевые скорости двух долгопериодических переменных R Cas и R Leo измерены с помощью автоматического микроденситометра по спектрограммам с дисперсией $14 \text{ \AA}/\text{мм}$, полученным на ОЗСП БТА 6-м в области $3500\text{--}4500 \text{ \AA}$. Средние лучевые скорости получены по 300 линиям поглощения для R Cas и 400 линиям для R Leo. Выбрано около 30 линий, наиболее пригодных для измерения v_r в спектрах более поздних, чем M5, при данной дисперсии. Сопоставление с наблюдениями в области $\sim 2 \text{ мкм}$ показывает, что лучевые скорости в оптической области соответствуют по величине более длинноволновой компоненте в ИК области.

The radial velocities of two long-period stars R Cas and R Leo were measured with automatic microdensitometer on spectrograms with $14 \text{ \AA}/\text{mm}$ obtained on stellar spectrograph of the 6-m telescope. The mean velocity was computed for 300 absorption lines for R Cas and 400 lines for R Leo. The best lines which could be used for measuring of v_r in spectra later than M5 were listed. Comparison with observations in 2μ region shows that optical velocity is probably near the red component in IR.

Создание модели протяженных атмосфер и оболочек долгопериодических переменных (мирид) должно учитывать наблюдаемое распределение лучевых скоростей и их изменение с фазой. Анализ опубликованных данных говорит о том, что величина лучевой скорости в оптической области спектра сильно зависит от величины обратной линейной дисперсии. Как следует из [1] (рис. 1), наблюдаемые различия в величине лучевой скорости эмиссионных линий для дисперсий ~ 50 и $10 \text{ \AA}/\text{мм}$ могут привести к сдвигу кривой v_r до 0.5 периода. Основная причина этого заключается в сложности спектра мирид. Отождествление и отбор наименее блендированных линий должны производиться с учетом спектрального разрешения и фазы на кривой изменения блеска звезды, так как полной картины изменения интенсивностей линий с фазой пока еще не существует.

Предпринятая нами программа изучения оптических атомных и в особенности молекулярных спектров мирид — источников мазерного излучения — потребовала в первую очередь анализа наблюдаемых атомных абсорбционных линий. В этой работе приводятся результаты исследования спектров типа M5 и более поздних, которые проводились с целью: отработки методики и анализа ошибок при измерении лучевых скоростей в спектрах позднего типа с помощью автоматического микроденситометра; выбора наименее искаженных линий, пригодных для измерения лучевых скоростей в спектрах указанного типа с разрешением около 0.5 \AA ; исследования ожидаемой дисперсии лучевых скоростей, измеренных по разным группам линий.

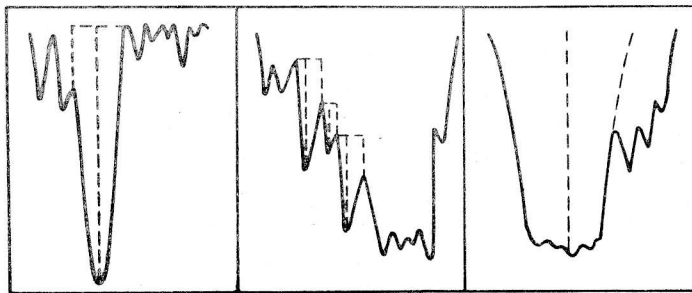
Наблюдения. Спектрограммы ряда мирид были получены по нашей программе на ОЗСП БТА 6-м с обратной дисперсией $14 \text{ \AA}/\text{мм}$ в 1983—1985 гг. Использовалась камера № 2 с решеткой во втором порядке спектра в области $3500\text{--}4800 \text{ \AA}$. Ширина щели в проекции на пластинку составляла 30 мкм , фотоэмульсия Кодак ПаО. Для указанных целей мы выбрали спектрограммы звезд, наиболее различающихся по фазе и спектральному типу. Спектр R Cas получен в фазу, близкую к минимуму, R Leo — к максимуму. α Her — один из немногих стандартных лучевых скоростей типа M. Данные о наблюдениях приведены в табл. 1.

* Ленинградский государственный университет.

ТАБЛИЦА 1

Звезда	Sp	Дата	Фаза	$t_{\text{экс}}$, мин
R Cas	M6—M8e	28.10.83	0.68	360
α Her	M5 II	24.10.83		1
α Her		28.10.83		1
R Leo I	M6—M9e	9.01.85	0.09	49
R Leo II		9.01.85		40

Измерения. Спектрограммы с помощью микроденситометра PDS (Институт астрофизики и физики атмосферы АН ЭССР) были записаны на магнитную ленту в единицах плотности. Размер сканирующей диафрагмы составлял 10×133 мкм. Точность возврата каретки микроденситометра лучше 1 мкм. Для каждой спектрограммы были записаны спектр звезды, фон пластинки и спектры сравнения, расположенные по обе стороны от спектра звезды. Дальнейшая обработка производилась на ЭВМ ЕС 1045 ВЦ ЛГУ. При этом были использованы программы перекодировки записей с магнитной ленты и частично программы по обработке спектра сравнения, написанные Т. Кишпером и Я. Ситска для ЕС 1022. Дисперсионная кривая аппроксимировалась полиномом третьей степени. Точность аппроксимации лучше, чем 0.1 \AA .

Рис. 1. Примеры работы программы по определению x_i .

Как для спектра сравнения, так и для спектра звезды положение линии x_i определяется половиной интеграла интенсивности по профилю линии. Существование линии устанавливается по отклонению точек на величину, большую, чем три стандартных отклонения от среднего фона пластинки (для спектра сравнения) или от среднего локального уровня непрерывного спектра для звездных линий. Однако автоматический поиск линий поглощения в спектре звезды осложняется рядом трудностей. Как известно, участков непрерывного спектра, свободных от линий, в звездах типа М нет. Уровень средней плотности изменяется вдоль спектра, причем градиент изменений большой (сильные линии поглощения, канты молекулярных полос, эмиссионные линии). Кроме того, практически все линии блендированы. Поэтому для каждой линии, найденной по отклонению от среднего уровня, анализировался ее профиль. Программа исследует симметричность крыльев линии и выравнивает их на один уровень плотности для вычисления интеграла. Примеры показаны на рис. 1. Широкие с искаженным шумом ядром линии (например, H и K CaII), а также близкие бленды с $\Delta\lambda$ порядка спектрального разрешения программа не учитывает. Эмиссионные линии, которые программа также выделяет, в этой статье не рассматриваются.

Таким образом, на начальном этапе мы стремились к тому, чтобы определить положение максимально возможного числа абсорбционных линий (минимумов поглощения), зарегистрированных на спектрограмме. По положению x_i , мкм, с помощью дисперсионной кривой определялись наблюдаемые длины

волн λ_i , которые затем использовались для вычисления лучевых скоростей. [При необходимости этот список (x_i, λ_i) может быть выдан на печать].

Определение лучевых скоростей. Программа подбирает для любой $\lambda_{\text{табл}}$ все λ_i , попадающие в заданный интервал $\Delta\lambda$, например 0.5 или 1.0 Å. Лучевые скорости вычисляются для каждой пары $(\lambda_{\text{табл}}, \lambda_i)$. При разумном выборе $\Delta\lambda$ редко находится более одного варианта λ_i , так как среднее расстояние между отдельными, хотя бы частично разрешенными линиями, определяется конечным разрешением спектрограммы.

Однако опыт нашей работы показал, что такой формальный («слепой») подход дает при массовой обработке очень большую дисперсию наблюдаемых v_r из-за неоднозначности выбора $\lambda_{\text{табл}}$. Быстрее и эффективнее проводить отождествление и выбор линий с помощью аналоговой записи спектра или с использованием графического дисплея. Отметим, что набор линий, пригодных для измерения v_r , различается как от звезды к звезде, так и в зависимости от фазы и даже от плотности спектрограммы. Более слабые линии при увеличении плотности дают меньший вклад в общую бленду; сильные линии при малой плотности дают меньшую точность.

Учитывая сказанное, мы проводили отождествление с помощью списка (x_i, λ_i) и записей спектрограмм на микрофотометре плотностей. Использовались общеизвестные таблицы и атласы спектральных линий, а также каталог линий β Peg [2]. В результате были исключены явные бленды, сильные линии с недодержанной центральной частью, линии с асимметричным профилем, искаженные эмиссией и т. п. После этого число линий сократилось более чем наполовину (табл. 2). Для этих линий были вычислены $v_i = c(\lambda_i - \lambda_{\text{табл}}) / \lambda_{\text{табл}}$. В четвертом столбце табл. 2 приведено стандартное отклонение $\sigma_v = \left[\frac{(v_i - \bar{v})^2}{n-1} \right]^{1/2}$, где n — число отобранных линий. Если учесть, что в области 4000 Å $10 \text{ км/с} = 0.13 \text{ Å} = 10 \text{ мкм}$, то видно, что дисперсия принятого способа измерений определяется в основном разрешением спектрограмм.

ТАБЛИЦА 2

Звезда	Зарегистрировано на PDS	Отобрано для измерений n	σ_v , км/с	Хорошие линии $n_{\text{хор}}$	$\sigma_{\text{хор}}$, км/с
R Cas	712	300	4.5	17	3.3
α Her	577	319	5	26	4
α Her	687	231	5	25	4
R LeO I	931	423	10	27	4
R LeO II	740	363	9	27	2.9

Анализ результатов. Средние гелиоцентрические скорости по всем отобранным линиям приведены во втором столбце табл. 3. Зависимость $v_i(\lambda)$ для R Cas (рис. 2) позволяет судить о величине и характере ошибок. Некоторый ход \bar{v} с длиной волны имеется, хотя амплитуда изменений \bar{v} порядка спектрального разрешения. Для других спектрограмм эта зависимость отличается главным образом по дисперсии (табл. 2), но особенность в области $3800\text{--}4000 \text{ Å}$ сохраняется и в 1983 и в 1985 гг.

ТАБЛИЦА 3

Звезда	\bar{v}	$\bar{v}_{\text{хор}}$	\bar{v}_{TiO}	v_*	$v_{\text{ИК}}$	$v_{\text{ОН}}$	
						1612	1665 МГц
R Cas	15.2 ± 0.3	17.3 ± 0.8	15 ± 2	17.0	27.9	15	23
R Leo I	22.9 ± 0.5	23.2 ± 0.8	30 ± 2	7.0			
R Leo II	19.8 ± 0.5	18.5 ± 0.6	38 ± 3	7.0	0 25 1 19 1 19		10

Источником этих систематических ошибок могут быть как инструментальные причины, так и ошибки аппроксимации дисперсионной кривой. Их можно исключить с помощью спектрограммы звезды-стандарта, но учитывая то обстоятельство, что спектральная аппаратура на БТА часто работает в режиме обеспечения двух-трех программ в ночь и что некоторые инструментальные

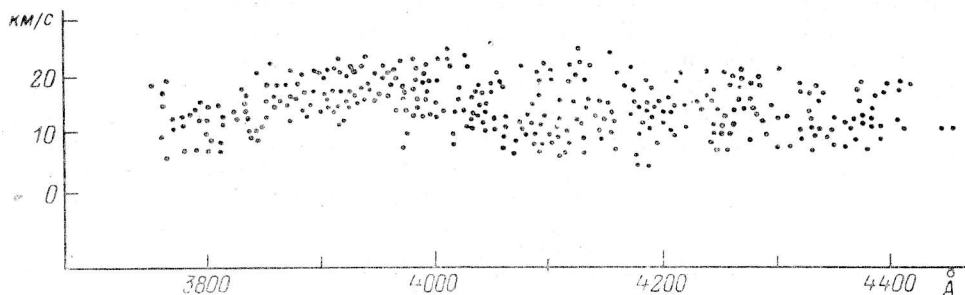


Рис. 2. Зависимость наблюдаемых лучевых скоростей от длины волны для R Cas.

эффекты могут в начале ночи давать позиционный сдвиг до 100—150 мкм [3], спектрограммы стандарта необходимо получать по крайней мере два раза в ночь.

В нашем случае исключение тренда для R Cas приводит к изменению средней лучевой скорости на 2.5 км/с и не влияет на дисперсию. В то же время примерно столько же составляет неопределенность в стандартном значении \bar{v} для α Her (см. [4] и ссылки в ней). Взяв среднее для α Her $\bar{v} = -33.8$ км/с,

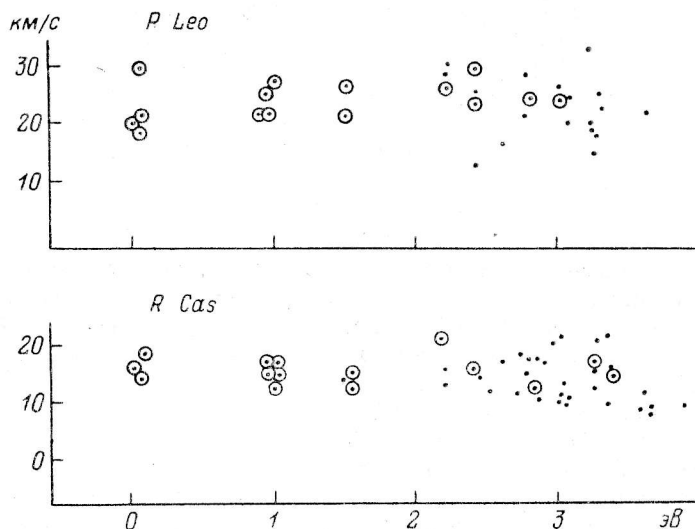


Рис. 3. Зависимость лучевых скоростей линий FeI от потенциала возбуждения нижнего уровня.

получаем, что поправка для перевода в стандартную систему в 1983 г. составляла +3.6 км/с. В случае необходимости данные для R Cas, которая наблюдалась в ту же ночь, могут быть исправлены.

Различие между \bar{v} для спектрограмм I и II R Leo (3.4 км/с) характеризует изменение инструментальных ошибок в течение ночи. Подробный анализ их имеется в работе [3]. Столь малая разница между двумя спектрограммами подтверждает их выводы и свидетельствует о том, что через 1—2 ч после начала наблюдений условия, влияющие на позиционные сдвиги, стабилизируются. Поскольку мы не имели в 1985 г. спектрограммы стандарта, нельзя определить систематическую ошибку v_r . Косвенные оценки позволяют считать, что она составляет не более +4—5 км/с.

Исследованные спектрограммы не показали заметной зависимости лучевых скоростей линий от потенциала возбуждения нижнего уровня. Возможно, лишь для R Cas имеется незначительное уменьшение с ростом χ_i . Можно также отметить увеличение дисперсии скоростей для $\chi_i > 2$ эВ. На рис. 3 приведена зависимость v_i от χ_i для линий FeI в спектрах R Cas (81 линия) и R Leo (140 линий). Чтобы не усложнять рисунок, мы не приводим данных для других элементов. Кругами отмечены средние значения v_i для мультиплетов, включающие от 3 до 11 линий.

При указанном разрешении линии с нулевым потенциалом возбуждения также не показывают различия в средней лучевой скорости. (Наиболее сильные и широкие резонансные линии мы не рассматривали). Поэтому мы считали, что при данной дисперсии околосредняя компонента не вносит существенного вклада в профиль линии, и их можно не исключать из общего списка. *

ТАБЛИЦА 4

$\lambda, \text{Å}$	$\lambda, \text{Å}$
3515.03 Ni (19)	3828.56 V (9)
97.70 Ni (18)	83.30 Cr (23)
3615.65 Cr (3)	99.74 Fe (4)
49.31 Fe (5)	3908.76 Cr (23)
52.55 Co (4)	12.94 Ni (5)
53.46 Ti (19)	17.20: Fe (20)
54.62 Ti (18)	20.27 Fe (4)
83.08 Fe (5)	30.29 Fe (4)
3715.91 Fe (124)	47.78: Ti (14)
22.56 Fe (5)	3958.21: Ti (13)
29.82 Ti (17)	74.74 Co (18)
37.15 Fe (5)	79.53 Co (3)
41.06 Ti (17)	87.98: Y (2)
48.28 Fe (5)	95.31: Co (49)
75.57 Ni (33)	4189.85: V (24)
87.90 Fe (21)	90.71: Co (1)
93.60 Ni (4)	99.98: Fe (3)
	4206.64: Fe (3)
	4445.48 Fe (2)

Выбор хороших линий. При выборе линий, наиболее пригодных для измерения v_T при данной дисперсии, мы использовали регистрограммы спектров и данные об интенсивностях линий в спектре β Peg (MO III) [2]. Табл. 4 содержит длины волн и отождествление линий, отобранных для измерения v_T в спектрах более поздних чем M5. В спектре R Cas хороших линий оказалось существенно меньше, так что первая половина таблицы (отмечена горизонтальной чертой) содержит линии, выбранные в спектре R Leo, а вторая половина — линии, отобранные и для R Leo и для R Cas; двумя точками отмечены линии только для R Cas. В последних столбцах табл. 2 приведены общее число и стандартное отклонение хороших линий, а в табл. 3 их средние гелиоцентрические скорости. Видно, что $\bar{v}_{\text{хор}}$ практически равно \bar{v} , измеренным по всем линиям. Поскольку хорошие линии выбирались независимо от результатов измерений, это совпадение подтверждает справедливость отбора и возможность использования их для измерения v_T .

Вращательные линии TiO. В табл. 3 приведены также лучевые скорости вращательных линий полосы $C^3\Delta - X^3\Delta$, 3—0 α -системы TiO. Участок этой полосы в области 4607—4621 Å (11 линий) отчетливо наблюдается на всех спектрограммах. Лабораторные длины волн были получены на основе теоретического спектра TiO, вычисленного Л. Хяни (ИАФА АН ЭССР) по модели атмосферы Джонсона и др. с параметрами $T_{\text{эфф}}=3200$ К, $\lg g=0.0$ [5]. Отметим, что v_{TiO} для R Cas, измеренные нами ранее с помощью компаратора, дали такое же значение $\bar{v}_{\text{TiO}}=(16.6 \pm 1.5)$ км/с, хотя мы вычисляли $\lambda_{\text{табл}}$ без учета модели атмосферы [6]. Область этих линий TiO неполностью свободна от блендирования, что и определяет довольно большую ошибку по сравнению

с другими линиями. Наиболее сильные из них 4613.36 и 4616.13 Сг (21). Имеются и более слабые линии Fe и V. Однако большая интенсивность полос TiO в спектрах столь позднего типа и регулярная структура наблюдаемой полосы позволяют считать, что определяющий вклад в наблюдаемые профили вносят вращательные линии TiO.

Сравнение с наблюдениями в других спектральных диапазонах. В табл. 3 представлена скорость центра масс звезды (v_*), полученная по радиоизлучению тепловых эмиссионных линий SiO [7]. Поправка $\Delta v_{\text{LSR}} = v_{\text{гелиоп}} - v_{\text{LSR}}$ принималась для R Cas равной +7.7 км/с, для R Leo —7.4 км/с. В последних столбцах табл. 3 приведены лучевые скорости абсорбционных линий CO для R Cas, CO, OH и атомных линий для R Leo в области 1.5—2 мкм [8], а также эмиссионных линий OH 1612, 1665/67 МГц [9].

Основной результат инфракрасных наблюдений состоит в том, что изменение лучевых скоростей с фазой в области $\lambda = 2$ мкм свидетельствует о достаточно регулярных пульсациях звезды. При этом указанные ИК линии образуются в более глубоких, по сравнению с видимыми, слоях атмосферы. Фазовая картина v_r хорошо повторяется в разных циклах, чего не наблюдается в видимой области. Амплитуда изменений v_r более 20 км/с. В фазы, близкие к максимуму, наблюдаются две компоненты ИК линий, которые отличаются по $T_{\text{возб}}$. В табл. 3 приведены v_r «холодной» и «горячей» компонент для соответствующих фаз.

С точки зрения этой модели для R Cas, т. е. в фазу вскоре после минимума блеска, в атмосфере звезды наблюдается довольно стационарное распределение скоростей. В видимой области лучевые скорости близки к скорости центра масс. Эмиссионных линий в это время мы не обнаружили. Более глубокие слои, где образуются ИК линии, находятся, как это видно из сопоставления $v_{\text{ИК}}$ с v_* , в слабом нисходящем движении. Вторая ИК компонента еще не видна. Эта фаза непосредственно перед зарождением нового возмущения и начала нового цикла пульсаций. Для R Leo, т. е. около максимума, распределение v_r совершенно иное. У ИК линий наблюдаются две компоненты (табл. 3), лучевые скорости которых противоположны по направлению относительно v_* и значительно от нее отличаются. Наши наблюдения показывают, что лучевые скорости абсорбционных линий в видимой области соответствуют более длинноволновой ИК компоненте, т. е. отражают интенсивное нисходящее движение. При нашем разрешении нет возможности обнаружить двойственность линий, однако возможно, что наблюдаемая значительная дисперсия v_r у R Leo по сравнению с R Cas объясняется именно вкладом в профили линий второй компоненты, отражающей восходящее движение.

Линии TiO в видимой области показывают наибольшую нисходящую скорость у R Leo. В соответствии с моделью Хинкла и др. [8] они, как наблюдаемые в видимой области, должны возникать в более внешних слоях, куда возмущение не дошло. По абсолютной величине v_{TiO} наиболее близка к ИК линиям CO. Важно отметить, что ИК наблюдения относятся к 1976—1982 гг. А в сентябре 1985 г. в том же цикле, что и наши наблюдения, в спектре R Leo произошли необычные изменения радиопотока: появилась сильная эмиссия OH на 1665 МГц при отсутствии линии OH на 1667 МГц, $v_{1665} \approx v_*$. Таким образом, возможно, что после максимума конца 1984 г. в атмосфере и оболочке R Leo произошли изменения, отразившиеся как на дисперсии v_r в видимой области, так и на эмиссии OH.

Авторы выражают благодарность сотрудникам САО В. Г. Ключковой и И. Ф. Бикмаеву за помощь в наблюдениях, Т. Киннеру, Я. Ситска (ИАФА АН ЭССР) за предоставленную возможность измерений на микроденситометре и программы перекодировки и Л. Хяни (ИАФА АН ЭССР) за вычисления лабораторных длин волн.

Литература

1. F o x M. W., W o o d P. R. Shock waves in Mira-variables. II // *Astrophys. J.* 1985. 297. P. 455—475.
2. D a v i s D. N. The spectrum of β Pegasi // *Astrophys. J.* 1947. 106. P. 28—75.

3. Бикмаев И. Ф., Панчук В. Е. Исследование позиционных характеристик Основного звездного спектрографа 6-м телескопа (БТА) // *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*. 1986. 23. С. 111—116.
4. Garcia J. M., Andersen J., Gimenez A., Nordström B. Coude radial velocity observations at Calar Alto Observatory: zero-point and accuracy // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1986. 66. P. 111—117.
5. Johnson H. R., Bernat A. P., Krupp B. M. Red giant model atmospheres. I // *Astrophys. J. Suppl.* 1980. 42. P. 501—522.
6. Дервиз Т. Е. О лучевой скорости R Cas // *АИЦ*. 1985. № 1394. С. 6—8.
7. Numan L. A., Olofsson H. Time variations of the SiO emission from circumstellar shells // *Astron. Astrophys.* 1985. 147. P. 309—316.
8. Hinkle K. H., Scharlach W. W. G., Hall D. N. B. Time series infrared spectroscopy of Mira variables. II // *Astrophys. J. Suppl.* 1984. 56. P. 1—17.
9. Engels D. Catalog of Late-type stars with OH, H₂O or SiO maser emission // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1979. 36. P. 337—345.
10. Leonis R. // *IAU Circ.* 1986. № 4164.

Поступила в редакцию 21 декабря 1987 г.
