

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ
ТИПА ПУЛЬСАЦИЙ В АТМОСФЕРАХ РАННИХ СВЕРХГИГАНТОВ. I. HD 21389.
ИЗМЕНЕНИЕ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ СО ВРЕМЕНЕМ

А. Х. РЗАЕВ, Е. Л. ЧЕНЦОВ, С. К. ЗЕЙНАЛОВ

Гармонический анализ длительных рядов спектральных наблюдений с 1976 по 1988 гг. показал, что в атмосфере HD 21389 присутствуют радиальные пульсации. Для нижних слоев, где формируются линии HeI, найден период 13.61^d. Для промежуточных слоев, где формируются линии ионов и высшие члены серии Бальмера до H_ε включительно, период равен 8.38^d, он вновь увеличивается к верхним слоям: 9.49^d, 12.05^d и 22.59^d для H_δ, H_γ, H_β и H_α, соответственно. Амплитуда лучевых скоростей для нижних и промежуточных слоев, вплоть до H_γ, составляет 6 км/с, и увеличивается к верхним слоям до 13.0 и 22 км/с для H_β и H_α, соответственно. Среднее значение лучевой скорости для нижних слоев направлено к центру звезды, промежуточные слои в среднем неподвижны относительно центра массы звезды, а верхние расширяются.

Для самых верхних слоев, где формируются линии H_α, заподозрены также нерадиальные пульсации с периодом около 140.0^d.

The harmonic analysis of long time series of spectral observations from 1976 to 1977 indicates that in the atmosphere of the HD 21389 the radial pulsations are present. For the lower layers where formed lines of the HeI the period of pulsations are 13.61^d. For the intermediate layers where formed lines of ions and higher Balmer lines up to H_ε the period are about 8.33^d. Period of pulsations again increase toward the outer layers: 9.49^d, 12.05^d, 12.96^d and 22.59^d for H_δ, H_γ, H_β and H_α correspondingly. The amplitude of radial velocity for lower and intermediate layers up to H_γ are 6 km/s, and increase toward the outer layers by 13.0 and 22.0 km/s for H_β and H_α correspondingly. The average values of radial velocity of lower layers directed toward the mass centre of the stars. The intermediate layers are in the still state relative to the mass centre, and outer layers are expanding.

Apparently for the uppermost layers, where line H_α formed, non-radial pulsations with the period about 140.0^d exist.

1. Введение

Исследование звезд наибольшей светимости представляет огромный интерес с точки зрения звездной и химической эволюции Галактики. Среди них особое место занимают звезды WR и горячие сверхгиганты. Несмотря на многочисленные работы, посвященные этим объектам, как отмечено в работе Мадера (1986), изучение их нестационарности еще находится в ранней стадии и является перспективным и многообещающим направлением исследований. Известно, что практически все ранние сверхгиганты являются спектральными, фотометрическими переменными, показывают изменения лучевых скоростей и темпов звездного ветра. Все эти явления могут быть связаны с пульсациями в атмосферах и оболочках.

Наблюдательные признаки нестационарности сверхгигантов приведены в работах Паддока (1935), Абта (1957а, б), Андерхилл (1961, 1966), Айдына (1972, 1976), Хатчингса и Ласкаридеса (1973), в обзорах Розендаля (1973), Хатчингса (1976), Сноу и Мортон (1976), Стеркена (1977), Ченцова (1978), де Ягер (1980), а также Контизас и Контизас (1980), Эббетса (1982), Соколова и Ченцова (1984), Зверевой и др. (1984), Зейналова и др. (1985), ван Гендерена и др. (1985), Сквайз (1986), Люпи и Нордсiek (1987) и т. д.

Работы, связывающие переменность с пульсационными свойствами объектов и, в частности, приводившие аргументы в пользу нерадиальных пульсаций, и рассматривающие возможные механизмы накачки пульсаций: Абт (1957а), Розендаль и Сноуден (1971), Мадер и Руфнер (1972), ван Гендерен (1974, 1975, 1985, 1986, 1989), Гранес (1975), Стозерс (1976), Люси (1976), Стеркен (1977), Мадер (1980а, б, в), де Ягер (1980), Перси и Велч (1983), Вогт и Пенрод (1983), Бааде (1984), Бааде и Ферлет (1984), Ферро (1985), Мадер (1986), Такеути и Аикава (1986), Мусаев и Ченцов (1986), Рзаев и др. (1989) и т. д.

Обобщая результаты этих работ, можно сказать, что основные особенности переменности сверхгигантов следующие.

Наблюдаемые изменения светимости, лучевых скоростей, дифференциальных сдвигов, профилей и асимметрии линий, а также звездного ветра, с большой вероятностью вызываются пульсациями.

Амплитуда изменений блеска увеличивается со светимостью. Зависимость ее от спектрального класса показывает маленький локальный максимум для ранних В и сильное возрастание для красных сверхгигантов.

Изменения являются циклическими, а не строгими периодическими. Однако, циклы оказываются довольно стабильными (Стеркен, 1981).

Существуют зависимости "период-светимость-цвет" с периодами от нескольких дней для В, и до сотен дней - для красных сверхгигантов.

Средний наблюдательный период обычно превышает значение P_0 для радиальных колебаний в основной моде. Это особенно характерно для ранних В-сверхгигантов и указывает на нерадиальные пульсации.

Ответственным за накачку пульсаций в ранних сверхгигантах считают давление излучения, а в желтых и красных сверхгигантах ведущую роль играют конвективные и турбулентные эффекты.

Надо отметить, что многие наблюдаемые особенности спектров сверхгигантов не находят пока еще полного и ясного физического объяснения, а с другой стороны, для выбора того или иного механизма накачки наблюдательных данных не хватает. В таких вопросах, как взаимодействие пульсирующей атмосферы с оболочкой звезды,

влияние вращения звезды, отличительные свойства колебательных движений для сверхгигантов разных спектральных классов, аномальное поведение объектов типа 89 Her F2Ia, HD 161796 F3Ib (Бюрки и др., 1980; Ферни, 1981, 1983) очень важно детальное исследование каждого объекта.

Среди белых сверхгигантов, вероятно, лучше всего изучена звезда α Cyg. Еще в 30-е годы были найдены изменения лучевой скорости с "характерным временем" около 12.0^d (Паддок, 1935). Данные Паддока были заново проанализированы Люси (1976), который выявил не менее 16-ти значимых периодов в интервале от 6.9^d до 100.8^d . Кроме того, в атмосфере этой звезды наблюдаются эффекты стратификации. Линии металлов предположительно фотосферного происхождения имеют типичные амплитуды изменения лучевых скоростей $\Delta v_r \approx 6$ км/с. В более высоких областях, где образуются бальмеровские линии с малыми номерами и линии MgII 4481, $\Delta v_r \approx 15$ км/с, а в самых высоких областях (центральные части линии H_α и h и k MgII) эта величина достигает от 50 до 150 км/с (Иноу, 1979). Отметим, что это не единственная звезда, в которой наблюдается изменение лучевых скоростей в зависимости от глубины формирования линии. Сходные эффекты отмечались у HD 160529 A2Ia (Вольф и др., 1974), HD 186209 O9.7IabN (Мусаев и Ченцов, 1989), HD 21389 AOIa (Зверева и др., 1984), HD 21291 B9Ia (Рзаев и др., 1989) и др. Требуется дальнейший тщательный анализ движений в атмосферах сверхгигантов, включающий учет нерадиальных пульсаций и эффектов стратификации. Несомненно, детальное исследование лучевых скоростей в спектрах сверхгигантов может быть мощным инструментом для изучения структуры колеблющихся оболочек этих звезд, а также для развития теории звездных нерадиальных пульсаций и выявления их механизмов.

Исследования полей скоростей и их изменений со временем требуют не только длительных и непрерывных, но и качественных спектральных наблюдений. Наблюдательный материал должен обеспечивать наряду со спектральным разрешением достаточный уровень отношения сигнал/шум. Такие спектральные наблюдения для белых сверхгигантов HD 21389 и HD 21291 были проведены на 2-м телескопе Шамахинской астрофизической обсерватории АН Азербайджана в фокусе кудэ.

Наш интерес к звездам HD 21291 и HD 21389 связан с тем, что, во-первых, они выделялись среди белых сверхгигантов более определенным сходством с пульсирующими переменными и было установлено, что их нестационарность связана с квазипериодическими движениями атмосферных слоев относительно центра массы звезды (Абт, 1957а; Айдын, 1972; Зверева и др., 1984). Характер и вид этих движений для обеих звезд оказались одинаковыми.

Во-вторых, они близки по спектральному классу - обе принадлежат к ассоциации Sam OBI, их модули расстояния совпадают друг с другом и модулем, принятым для ассоциации Хэмфрис (1978). Они окружены единым пылевым облаком (Рожковский и Курчаков, 1967), которое, по-видимому, повторяет общее движение звезд в пространстве и поэтому нет существенного различия между скоростями, найденными по звездным и межзвездным линиям для обеих звезд (Зверева и др., 1984).

В-третьих, эти звезды достаточно яркие - $m_V = 4.3^m$ и 4.7^m для HD 21291 и HD 21389, соответственно. Как было показано Рзаевым и Ченцовым (1991), 2-м телескоп с кудэ-спектрографом является эффективной системой для изучения проблем пульсации у подобных объектов.

И, наконец, эти звезды являются объектами, подходящими для изучения вышеуказанных проблем еще и потому, что их спектры в оптическом диапазоне богаты линиями, которые позволяют изучить кинематику атмосферы в широком диапазоне

оптических глубин.

2. HD 21389. Обзор исследований

Изменения лучевой скорости найдены еще Юнгом (Мур, 1911), звезда включалась в 3-й Ликский каталог спектрально-двойных (Мур, 1924).

Абт (1957а) по 16 кудэ-спектрограммам 2-м телескопа McDonald, полученным в течение месяца с дисперсией 8.5 Å/мм, нашел квазипериодические изменения лучевых скоростей линий SiIII (λ 4128, 4130) и FeII (λ 4508, 4515, 4520, 4522). Продолжительность цикла, оцененная по максимальным значениям лучевой скорости, составила 7.7^d. Считая эту переменность следствием радиальных пульсаций атмосферы звезды, Абт нашел значение пульсационной константы близким $Q \approx 0.06^d$. Надо отметить, что за время наблюдений максимальное изменение лучевой скорости для SiIII и FeII достигло 13 и 10 км/с, соответственно. Наблюдался также отрицательный сдвиг линий FeII относительно линий SiIII - в начале наблюдения он составлял 4 км/с, а в конце почти исчез. Если учесть, что лучевые скорости были измерены на визуальном компараторе и что в спектре этой звезды указанные линии SiIII вдвое интенсивнее линий FeII, то происхождение этого отличия может быть и методическим.

В работе Айдына (1972), исследовавшего 5 сверхгигантов класса А, для HD 21389 обнаружен отрицательный сдвиг линий SiIII относительно линий FeII. Четыре из пяти полученных Айдыном спектрограмм показали бальмеровский регресс. В одну из дат наблюдений бальмеровский регресс сопровождался эмиссией на синем крыле H_{α} , что подтвердило сжатие верхних слоев атмосферы. Было также отмечено изменение профилей и асимметрия линий H_{β} и H_{γ} , раздвоение их ядер.

Бальмеровский регресс был также зарегистрирован Хатчингсом и Ласкаридесом (1973). По спектрограмме, полученной 30.01.70 г. с дисперсией 15 Å/мм, разность лучевых скоростей H_{β} и H_{18-19} превысила 30 км/с. Авторами найдена также зависимость лучевой скорости от потенциала возбуждения, а следовательно, от высоты в атмосфере.

В известном обзоре Розендала (1973) у HD 21389 отмечены эмиссии как на красном крыле H_{α} , так и на обоих ее крыльях, а также дифференциальные сдвиги линий, свидетельствующие о расширении верхних слоев атмосферы.

Контгас и Контгас (1980) по спектрограмме с дисперсией 12 Å/мм получили постоянную скорость для всех групп линий. Сравнение их результатов с результатами Хатчингса и Ласкаридеса (1973) подтвердило изменения лучевых скоростей со временем.

Надо отметить, что все спектрограммы в последних 4-х работах, кроме одной, получены в один год. Сопоставление этих результатов дает сведения о переменности лучевых скоростей и дифференциальных сдвигов линий, о возможном присутствии движений типа пульсаций в верхней части атмосферы.

Но сведений о поле скоростей и тем более о его изменениях со временем явно недостаточно. Работа Абта (1957а), который основывался на узких интервалах оптических глубин, естественно, не добавляет нужных сведений.

В связи с вопросом о пульсациях особенно интересны обнаруженные в спектре HD 21389 эмиссии CIV λ 1548 и λ 1550 (Андерхилл, 1980). Это узкие хромосферные линии, несмещенные относительно спектра нижней атмосферы, характерные для звезд

спектральных классов не ранее F и требующие повышения температуры от нижних слоев атмосферы к хромосфере не менее, чем на порядок величины. Переменность резонансных линий указывает на то, что у этой звезды подфотосферная конвективная зона не играет значительной роли, энергия скорее всего генерируется в верхней атмосфере.

Впервые ультрафиолетовый (УФ) спектр этой звезды в заатмосферном ультрафиолете был исследован по данным IUE в работе Прадери и др. (1980). У резонансных линий MgII(1) наблюдалось по две синесмещенных компоненты, показывающих скорости около -150 и -96 км/с. Асимметрия и сдвиги других абсорбций в УФ-спектре указывали на расширение оболочки и потерю массы этой звездой. Сравнение профилей резонансных линий MgII, SiII, CII у HD 21389 и α Cyg дало оценку темпа потери массы \dot{M} для HD 21389 порядка $10^{-8} M_{\odot}/г.$

Оценка темпа потери массы была также сделана в работе Барлоу и Кохена (1977) по данным инфракрасной фотометрии. Она дала $\dot{M} \approx 4.2 \times 10^{-7} M_{\odot}/г.$

Попытка Куназ и др. (1983) интерпретировать наблюдаемые профили линий H_{α} и MgII(2802), используя разные законы $v(r)$, не увенчалась успехом, а оценка темпа потери массы дала противоречивые результаты: по H_{α} , имевшей профиль типа P Cyg III по Билсу(1955), $\dot{M} \approx 8 \times 10^{-8} M_{\odot}/г.$ по линии MgII λ 2802 $\dot{M} \approx 10^{-9.5} M_{\odot}/г.$

В работе Талавера и Гомеза де Кастро (1987) по данным IUE детально исследован УФ-спектр 13 A-сверхгигантов, в том числе и HD 21389.

Было показано, что у этих звезд синесмещенные компоненты и асимметрия у линий CII(1), SiII(2) и MgII(1) обусловлены звездным ветром. У HD 21389 линии CII и SiII симметричны, линии FeII не имеют ветровых компонент, но асимметричны и показывают незначительное смещение - 20 км/с. Линии MgII явно асимметричны и состоят из нескольких глубоких синесмещенных компонент, лучевые скорости их -196, -136 и -91 км/с и -210, -136 и -91 км/с для λ 2795 и λ 2802, соответственно. Их сравнение с данными Прадери и др. (1980) показывает, что профили переменны. Существование синесмещенных компонент и переменность лучевых скоростей у большинства сверхгигантов высшей светимости (в том числе и у HD 21389) говорят о том, что значительная часть массы выбрасывается в виде "порывов" звездного ветра или оболочек. Талавера и Гомез де Кастро (1987), Прадери и др. (1980) в отличие от Андерхилл (1980) не обнаружили линий высокоионизованных элементов (CIV, SiIV, NV, HeII λ 1640).

Исследования УФ-спектра HD 21389 показывают, что в слоях, где начинается звездный ветер, также существует градиент скорости, переменной во времени. Полученные оценки \dot{M} различаются на три порядка. Конечно, нельзя ожидать полного совпадения результатов, полученных разными методами, но основная причина расхождения, по-видимому, состоит в реальной переменности объекта.

Надо отметить, что при наличии радиального градиента скорости в атмосфере отдельную проблему составляет определение лучевой скорости центра массы звезды, а до тех пор, пока эта проблема не решена, пульсации трудно отличить от нестационарного расширения атмосферы. Как показал Конти и др. (1977), именно так в свое время обстояло дело с O-сверхгигантами. Для белых сверхгигантов указанная возможность хотя и представляется менее вероятной, все еще остается.

Для HD 21389 дифференциальные сдвиги линий, относящихся к широкому интервалу оптических глубин, и их изменения со временем исследовались Зверевой и др. (1984). Для одиннадцати дат по 29-ти спектрограммам с дисперсией от 7 до 28 Å/мм были построены кинематические разрезы, т. е. представлены v_r отдельных

линий или их однородных групп как функции глубин их формирования τ_λ в атмосфере. Они показали, что не только величина, а также знак радиального градиента скорости в атмосфере меняются со временем. Было отмечено, что для моментов, когда бальмеровский прогресс максимален, прямой P Cyg-профиль линии H_α выражен наиболее четко. Слабая эмиссия на обоих крыльях H_α наблюдалась при небольшом бальмеровском регрессе. Сопоставление лучевой скорости отдельных линий или групп линий с лучевой скоростью центра массы звезды показало, что движение этих слоев действительно напоминает пульсации. Было показано, что для самых внешних слоев максимальная скорость расширения превосходит скорость сжатия. Для промежуточных слоев, где формируются линии ионов и высшие члены серии Бальмера, доминирует сжатие. Скорость падения вещества была максимальной для внешних слоев и медленно уменьшалась к внутренним слоям, и вновь увеличивалась для самых внутренних слоев, где формируются линии HeI. Для большей части наблюдаемого интервала оптических глубин (не считая самых верхних слоев) амплитуда изменений лучевых скоростей не превышает ~ 10 км/с. По сути, эта работа подтвердила наличие квазипериодических движений атмосферных слоев HD 21389 относительно центра массы звезды.

Аналогичное исследование нестационарности атмосферы сделано в работе Денизмена и Хак (1988), где HD 21389 изучена вместе с другими сверхгигантами HD 199478 B8Ia и HD 21291 B9Ia по кудэ-спектрограммам с дисперсиями 7-12 Å/мм. У HD 21389 профили линий меняются со временем, H_α и H_β показывают изменение асимметрии и профиля в течение одной ночи. Из трех профилей H_α два, полученных в одну ночь, - асимметричные синесмещенные (-55 и -46 км/с) абсорбции без следов эмиссии, третий профиль - с эмиссией на обоих крыльях с синесмещенной (-19.1 км/с) абсорбционной компонентой. Отмечена переменность дифференциальных сдвигов SiIII и FeII со временем, и предполагается, что все наблюдаемые изменения вызваны либо макроскопическими радиальными движениями в атмосфере, либо полу- или нерегулярными движениями типа пульсации.

В указанной работе Денизмена и Хак (1988) ошибки измерения лучевой скорости одной линии и редукиции оцениваются как 1.6 и 0.8 км/с, соответственно. Однако сопоставление приводимых скоростей линий, входящих в одну общую группу, показывает, что на самом деле ошибки превышают указанные в несколько раз. О том же свидетельствуют и значительные различия лучевых скоростей межзвездных линий для спектрограмм, полученных в течение одной ночи (от -6 до -17 км/с). По этой причине к полученным результатам (в особенности это относится к кратковременным изменениям лучевых скоростей) надо относиться с осторожностью.

Дальнейшие спектроскопические исследования этой звезды базировались на высокодисперсионных кудэ-спектрограммах однородного качества, полученных на 2-м телескопе ШАО АН Азербайджана.

По спектрограммам с дисперсией 12 Å/мм, полученным в течение 6-ти ночей (25-30.09.84 г.), было исследовано изменение лучевых скоростей линии H_α , SiIII(6347, 6371), HeI(λ 5875, 6678) со временем (Зейналов и Рзаев, 1988). Показано, что кривые $v_r(t)$ для всех линий в общем повторяют друг друга. Лучевые скорости HeI λ 6678 и λ 5875 отличаются, это различие меняется со временем. Для линий H_α и HeI заметно изменение в течение 3-х часов.

Наиболее длительный ряд наблюдений был проведен с 26.08.86 г. по 23.09.86 г.: получено 11 спектрограмм с дисперсиями 8 и 12 Å/мм. Качество полученных спектрограмм, а также методика измерения и редукиция лучевых скоростей линий (см.

раздел 2) позволили подробно изучить поле скоростей и изменения лучевых скоростей линий со временем (Зейналов и Рзаев, 1991). Кинематические разрезы атмосферы $v_r(\lg \tau_\lambda)$ выявили квазипериодические колебательные движения относительно центра массы звезды. Формы кривых $v_r(\lg \tau_\lambda)$ свидетельствуют о том, что движения слоев, особенно самых верхних (H_δ - H_α) и самых нижних (HeI) из доступных наблюдениям, по-видимому, происходят независимо друг от друга, а промежуточные слои движутся более или менее синхронно. Амплитуды и средние значения скорости для разных слоев различаются. Для внутренних и промежуточных слоев (где формируются линии ионов и высшие члены серии Бальмера, включая линии H_δ) амплитуда лучевых скоростей почти одна и та же - около 8 км/с. Среднее значение скорости для промежуточных слоев равно лучевой скорости центра массы звезды (Зверева и др., 1984), т. е. эти слои колеблются относительно центра массы звезды. Для нижних слоев оно равно ≈ -4 км/с, т. е. эти слои обычно падают на звезду. К внешним слоям амплитуда увеличивается, для H_γ , H_β и H_α она равна 15, 20 и 30 км/с, соответственно. Среднее значение лучевых скоростей для H_β и H_α -12 и -23 км/с, соответственно, т. е. эти слои чаще всего находятся в состоянии расширения.

Добавление новых спектрограмм к уже имеющимся существенно расширило информацию о поле скоростей в атмосфере HD 21389. Теперь требуется анализ возможной периодичности в изменениях лучевых скоростей и профилях линий. При этом очень важен вопрос о кратковременных ($<1^d$) изменениях названных параметров линий - они отмечены в работах Рзаева и Зейналова (1984) и Денизмена и Хак (1988). По данным Зейналова и Рзаева (1988), Рзаева и др. (1991) для HD 21389 кратковременные изменения лучевых скоростей замечены лишь для верхних слоев атмосферы и не сопровождаются изменениями профилей линий. Кривые зависимости лучевых скоростей бальмеровских линий от их сериальных номеров, построенные по данным спектрограммам, полученным в 1986 г., показали, что для соответствующего диапазона оптических глубин наблюдаются изменения знака градиента скорости один или даже несколько раз. Сделано предположение, что периоды или фазы колебаний этих слоев отличаются друг от друга.

Далее (в разделе 4) мы рассмотрим результаты гармонического анализа лучевых скоростей линий для HD 21389.

3. Спектральный материал, некоторые особенности его получения, обработки и редукации

Как отмечено в разделе 1, на 2-м телескопе ШАО АН Азербайджана с помощью кудэ-спектрографа с 1984 по 1988 гг. выполнялись наблюдения белых сверхгигантов HD 21291 и HD 21389. Часть использованного здесь материала получена ранее на Основном звездном спектрографе (ОЗСП) БТА САО АН СССР (Зверева и др., 1984).

Материал накапливался для проверки предположения о существовании в атмосферах указанных объектов периодических или квазипериодических движений типа пульсаций. Решение подобных задач предъявляет к спектрографу весьма строгие требования: высокая позиционная точность при высоком спектральном разрешении должна сочетаться еще и с максимально возможной фотометрической точностью. Мы, использовали только среднефокусные камеры: при фокусах 700 и 600 мм и углах блеска решеток $23^\circ 40'$ и $25^\circ 10'$ они обеспечивают дисперсии около 8 и 9 Å/мм - для

кудэ-спектрографа и ОЗСП, соответственно. Некоторые важные параметры обоих приборов исследованы в работе Рзаева и Ченцова (1991).

В случае кудэ-спектрографа удастся снизить отклонения фотоэмульсии от фокальной поверхности до ± 2 мкм, что, конечно, исключает ложные дифференциальные сдвиги и инструментальную асимметрию линий. Для ОЗСП, имеющего в среднефокусной камере полеспрямляющую линзу, указанные отклонения в лучшем случае остаются на уровне ± 10 мкм. Специальные исследования, выполненные по спектрам дневного неба, Прокциона и других стандартов лучевых скоростей, показали, что "локальная" лучевая скорость, т. е. полученная по малому участку спектрограммы, отклоняется от средней по всей спектрограмме не более, чем на ± 1 км/с (ОЗСП, для кудэ-спектрографа эта цифра еще меньше).

Систематических ошибок, связанных как с нестабильностью спектрографа, так и с гидированием, следует опасаться лишь в случае ОЗСП БТА (см., например, работу Бикмаева и Панчука, 1986). Оценки, сделанные по межзвездным и теллурическим линиям, показали, что систематические отклонения средних по отдельным сезонам от среднего по всему нашему материалу колеблются от -0.5 км/с до $+1.4$ км/с. Лучевые скорости, найденные по отдельным спектрограммам, полученным на ОЗСП, могут иметь систематические погрешности до 2 км/с.

Данные о лучевых скоростях, относящиеся к 1986, 1987, 1988 гг. и ранее не публиковавшиеся, получены только с помощью кудэ-спектрографа при следующих условиях:

- дисперсии около 8 и 12 Å/мм для синей ($\lambda 3600-5000\text{Å}$) и красной ($\lambda 5600-6900\text{Å}$) областей спектра, соответственно;
- синяя область экспонировалась без порядкоразделительного фильтра (можно дважды, в 3-ем и 4-ом порядках, измерять высшие члены серии Бальмера);
- высота спектра - от 0.7 мм до 1.0 мм;
- источник спектра сравнения - лампа с железным полым катодом, заполненная аргоном;
- фотопластинки Kodak 103aO и 103aF, проявитель MWP-2;
- плотности спектрограмм близки к 1.0 у H_γ и H_α для синей и красной областей, соответственно.

Как и ранее, измерение положений линий на вновь полученных спектрограммах проведено с помощью осциллоскопического компаратора СА0.

В отличие от ОЗСП форма дисперсионной кривой кудэ-спектрографа остается достаточно стабильной не только в течение ночи, но и от сезона к сезону. Поэтому при редукции измерений применялась упрощенная и экономящая время процедура. Изменения дисперсии вдоль пластинки фиксируются по 2 линиям спектра сравнения, начальной и конечной для каждого интервала примерно по 400 Å. Поправки за нелинейность дисперсионной кривой вводятся с помощью эмпирических зависимостей, построенных по 5-10 лучшим спектрограммам. Ошибки редукции, выполненной таким способом, не превышают 0.4 км/с.

Эффективные длины волн звездных линий брались в основном из списка Добричева и др. (1986), ориентированного на сверхгиганты В9-А3. В ходе выполнения данной работы удалось уточнить эффективные длины волн для двух blends FeII, TiII. По обеим звездам они оказались близкими друг к другу: $\lambda 4534.077$ и 4549.460 Å.

В табл. 1 представлены гелиоцентрические лучевые скорости отдельных линий и их однородных групп. Новые данные дополнены полученными прежде. Все спектрограммы, полученные в ШАО, измерены дважды, причем наиболее важные линии измерялись двумя

ТАБЛИЦА I

Группа линий	JD 2440000 +					
	3060.583	3112.292	3130.302	3140.181	3148.333	3395.563
H _α	-18.5± 1.0	-26.5± 2.0	-17.0± 1.5	-12.0± 1.0	-10.5± 2.0	-
H _β	-	-12.0± 2.0	-	-	- 7.0± 2.0	-
H _γ	-	-10.5± 2.0	- 7.0± 2.0	-	-12.0± 3.0	-
H _δ	-	- 8.0± 2.0	- 5.0± 2.0	-	- 8.0± 2.0	- 5.8± 1.5
H _ε	-	-	-	-	-	-
H ₈₋₁₀	-	- 8.9± 3.0	-	-	- 8.0± 2.0	- 3.0± 2.0
H ₁₁₋₂₅	-	- 9.0± 3.0	-	-	-	-
Mg II (4481)	-	-10.0± 1.0	- 9.0± 1.0	-	- 8.5± 2.0	-
Fe II	- 6.0± 1.5	- 7.5± 2.5	- 7.5± 1.5	- 9.0± 2.0	- 7.0± 2.0	- 3.2± 1.5
Si II	- 6.5± 1.0	- 7.3± 2.0	- 7.5± 2.0	- 7.5± 2.0	- 3.7± 2.0	- 4.0± 1.5
TiII+CrII	- 7.0± 2.0	-	- 8.0± 2.0	- 9.0± 3.5	- 7.5± 2.0	- 4.0± 1.5
Σ H _ε -CrII	- 6.5± 0.4	- 8.5± 1.0	- 8.0± 0.6	- 8.5± 0.7	- 6.9± 1.7(5)	- 3.6± 0.5(4)
He I	- 5.8± 1.5	0.0	- 8.5± 2.5	0.0± 2.0	- 2.0	- 3.0
Ni II (4067)	-	-	-	-	-	-
M/з	- 9.6± 1.0	- 7.0± 1.0	-10.5± 1.5	- 7.5± 1.5	- 9.0± 1.5	-
Дата	09.10.76	29.11.76	17.12.76	27.12.76	04.01.77	09.09.77
Символ на рис.1 - 4	Δ			+		

ТАБЛИЦА I (продолжение)

Группа линий	JD 2440000 +						
	6668.500	6674.521	6675.500	6679.500	6684.458	6686.500	6687.500
H _α	-	-	-	-	-	-	-
H _β	-16.0±1.5	-10.6±1.4	- 8.4±1.2	-15.0±1.5	- 8.9±1.4	- 6.8±1.9	- 6.3±1.0
H _γ	- 8.3±1.2	- 9.7±0.8	- 4.9±0.6	-10.1±1.0	- 5.0±1.2	- 7.5±1.5	-10.4±1.2
H _δ	- 7.7±0.8	- 4.0±1.0	- 4.5±0.5	- 9.3±1.2	- 4.7±1.0	- 9.0±1.0	- 9.7±1.2
H _ε	- 8.4±0.4	- 3.4±0.6	- 5.2±0.6	-10.1±1.0	- 6.7±0.9	-12.2±0.5	-12.3±0.3
H ₈₋₁₀	- 9.8±2.5(3)	- 5.5±3.0(3)	- 4.2±1.5(3)	- 9.3±2.5(3)	- 5.2±1.8(3)	- 6.4±0.9(3)	-12.8±0.2(2)
H ₁₁₋₂₅	-10.1±2.7(5)	- 4.5±0.2(4)	- 4.3±2.0(7)	- 9.1±1.0(4)	- 6.2±1.7(7)	- 8.7±2.4(3)	-15.4±1.4(9)
Mg II (4481)	- 8.3±0.4	- 4.5±0.2	- 5.7±0.2	- 9.3±0.5	- 3.7±0.5	- 8.8±0.6	-11.4±0.3
Fe II	- 8.2±2.0(19)	- 5.9±2.3(23)	- 6.6±1.5(24)	-11.5±1.4(21)	- 4.2±1.4(20)	-12.0±1.8(14)	-12.9±1.7(22)
Si II	- 6.6±0.9(5)	- 5.9±1.7(4)	- 5.3±1.1(5)	- 9.0±1.1(5)	- 5.7±0.7(4)	-10.9±1.9(5)	-13.6±1.2(5)
TiII+CrII	- 8.6±2.0(7)	- 5.6±2.5(12)	- 7.5±2.0(11)	-10.1±0.8(8)	- 3.3±2.0(8)	- 0.3±1.3(6)	-11.5±1.0(9)
Σ H _ε -CrII	- 8.6±1.1(7)	- 5.0±0.9(7)	- 5.5±1.1(7)	- 9.8±0.8(7)	- 5.0±1.2(7)	- 9.6±2.0(7)	-12.8±1.3(7)
He I	- 6.9±2.7(9)	- 6.2±0.8(5)	- 5.6±1.1(5)	- 5.1±2.0(7)	- 8.2±1.5(5)	- 9.3±3.9(3)	- 8.8±1.8(6)
Ni II (4067)	-10.4±1.5	- 2.4±1.0	- 4.5±1.4	- 4.0±1.5	- 3.0±1.0	-11.4±1.2	-12.5±2.0
M/з	- 7.3±0.1	- 6.8±1.4	- 6.7±0.4	-11.3±0.6	- 8.2±0.1	- 8.3±0.8	-11.7±0.6
Дата	26.08.86	01.09.86	02.09.86	06.09.86	10.09.86	13.09.86	13.09.86
Символ на рис.1 - 4							

JD 2440000 +

3638.208	3730.542	5969.396	5970.438	5972.440	5973.375	5973.490	5974.480
-	- 2.0± 2.5	- 0.0± 0.6	- 6.2±0.7	- 9.2±0.8	-14.0±1.0	- 3.6±0.8	- 5.6±1.0
- 6.0± 2.0	-	-	-	0.0±1.2	-	-	- 1.1±1.8
- 8.0± 1.5	1.2± 2.0	-	-	- 4.1±1.4	-	-	- 3.2±1.4
- 6.0± 1.5	-	-	-	- 3.5±1.5	-	-	- 5.8±1.5
-	-	-	-	- 2.0±1.5	-	-	- 9.5±1.5
- 5.0± 3.5	- 2.0± 2.0	-	-	- 2.0±1.4(3)	-	-	- 7.5±1.5(1)
-	- 5.0± 4.0	-	-	-	-	-	-
- 4.0± 1.0	-	-	-	-10.1±1.5	-	-	- 9.0±1.5
- 4.0± 1.5	- 3.5± 1.5	-	-	-10.1±1.8(11)	-	-	-10.2±2.5(21)
-	- 5.2± 1.0	- 2.4±0.8(2)	- 4.6±1.7(2)	- 7.9±2.6(6)	- 8.8±0.6(2)	- 9.0±0.2(2)	- 8.1±1.1(7)
- 3.5± 1.5	- 3.5± 1.0	-	-	-	-	-	-
- 4.0± 0.6(4)	- 3.8± 1.2(5)	-	-	- 6.5±3.7(5)	-	-	- 8.9±1.0(5)
- 5.0± 2.0	- 4.5	1.2±4.9(2)	- 2.2±9.3	- 4.4±3.0(7)	- 6.0±3.3(2)	- 5.9±1.4(2)	- 2.5±1.5(4)
-	-	-	-	-	-	-	-
-	- 9.0± 1.5	- 9.4± 0.8	- 8.1±1.5	- 9.0±1.0	- 9.0±0.9	- 9.7±0.5	- 8.2±0.8
09.05.78	10.08.78	25.09.84	26.09.84	28.09.84	29.09.84	29.09.84	30.09.84

JD 2440000 +

6688.458	6697.479	7054.417	7054.563	7459.458	7459.542	7460.521	7460.584
-13.4±1.5	-14.5±1.5	-	-	-	-	-	-
-15.0±2.0	- 8.5±1.2	-21.7±1.0	-16.2±1.0	- 8.4±0.9	-15.3±1.0	- 8.0±1.2	-12.8±1.6
-10.5±2.0	-10.6±1.1	- 5.8±0.7	- 6.0±1.0	-10.6±1.0	-11.6±1.5	-10.3±0.9	- 5.6±0.9
-10.4±1.8	-12.6±1.5	- 3.8±3.3	- 4.1±0.7	- 6.1±0.4	- 8.8±0.3	- 3.1±0.1	- 4.1±0.3
-11.0±1.0	-11.5±0.9	-	- 8.6±0.3	- 8.2±0.5	- 9.7±0.6	- 6.4±0.9	- 4.2±0.1
-10.0±1.5(3)	-11.3±3.5(3)	-	- 9.7±6.0(2)	- 9.4±1.5(3)	- 9.2±1.6(3)	- 5.1±2.2(3)	- 3.9±0.6(3)
- 9.0±2.5(2)	- 8.0±2.5(7)	-	-13.9±0.6(3)	- 9.3±1.7(4)	- 9.1±1.0(2)	- 5.5±3.7(5)	- 4.2±2.9(4)
- 8.9±0.6	- 7.3±0.4	- 6.9±0.5	- 6.8±0.6	- 9.6±0.3	- 9.2±0.6	- 6.8±0.4	- 7.4±1.3
- 9.4±2.8(11)	- 9.0±1.5(28)	- 7.6±1.2(14)	- 8.6±2.5(20)	- 8.8±1.4(15)	- 8.0±1.9(27)	- 6.9±1.5(17)	- 7.1±1.6(20)
-13.2±2.5(2)	- 7.5±0.9(9)	- 6.9±4.9(4)	- 8.6±1.7(5)	- 7.8±1.5(5)	- 7.6±1.3(5)	- 5.8±1.9(5)	- 4.6±2.2(4)
- 9.0±2.0(5)	- 9.2±1.0(9)	- 6.1±1.5(1)	- 7.2±0.5(4)	- 7.4±0.3(7)	- 8.0±1.0(12)	- 8.2±0.2(7)	- 8.7±0.4(5)
-10.1±1.5(7)	- 9.1±1.6(7)	- 6.9±0.5(4)	- 8.3±1.0(6)	- 8.5±0.7(7)	- 8.7±0.7(7)	- 5.7±1.8(7)	- 5.7±1.8(7)
- 7.0±0.5(2)	- 7.0±1.5(4)	- 7.0±1.9(4)	- 7.0±1.0(4)	- 6.7±1.1(4)	- 7.5±0.3(3)	- 7.3±2.1(4)	- 6.1±2.6(5)
- 9.6±2.5	-12.3±2.0	-12.6±2.0	-15.5±1.5	- 6.4±1.0	- 8.2±1.5	- 1.5±2.0	- 1.6±2.2
- 9.3±0.4	- 9.9±1.1	- 6.1±1.5	- 8.0±0.2	- 8.3±0.2	- 8.9±0.1	- 7.1±0.1	- 6.4±0.3(1)
14.09.86	23.09.86	15.09.87	16.09.87	24.10.88	25.10.88	26.10.88	26.10.88

разными лицами. Избранные линии достаточно глубоки и контрастны - для них ошибки не превышают 1.5 км/с. Для групп приведены ошибки среднего, в скобках указаны также числа линий в группах.

4. Поиск периодов

Двумерный дисперсионный анализ (Шеффе, 1963; Гисс и Болтон, 1986) показал, что лучевая скорость HD 21389 меняется как от пластинки к пластинке, так и от линии к линии. Значимость временной переменности очень высокая (>99%), для изменений скорости с глубиной в атмосфере она превышает >95%. Значения дисперсии S_p^2 , характеризующие дифференциальные сдвиги линий, сильно меняются от пластинки к пластинке. Учитывая это обстоятельство, а также закономерности, описанные в разделе 1, поиск возможных периодов осуществлялся отдельно для каждой избранной линии или группы линий. При этом сначала использовались 9 точек, полученных в течение одного месяца в 1986 г., а потом к ним последовательно добавлялись данные за 1987-1988 гг., 1984 г. и, наконец, за 1976-1978 гг. Поскольку частота Найквиста для наших данных оказалась

равной 0.5, поиск периодов, меньших 2^d , не проводился. В интервале $2-10^d$ по разным линиям или группам линий выявлялось от 1-го до 4-х периодов, в интервалах $10-100^d$ и $100-400^d$ - по одному, а на более низких частотах они отсутствовали. Для всех этих периодов строились и сопоставлялись графики фазовой зависимости лучевой скорости $v_r(\varphi)$. Обычно лучший из графиков соответствовал наиболее значимому периоду. Отобранные таким образом периоды, амплитуды и средние значения лучевых скоростей \bar{v}_r приведены в табл. 2, соответствующие графики представлены на рис. 1-4. Как в табл. 2, так и на рисунках, в скобках даны числа моментов наблюдений.

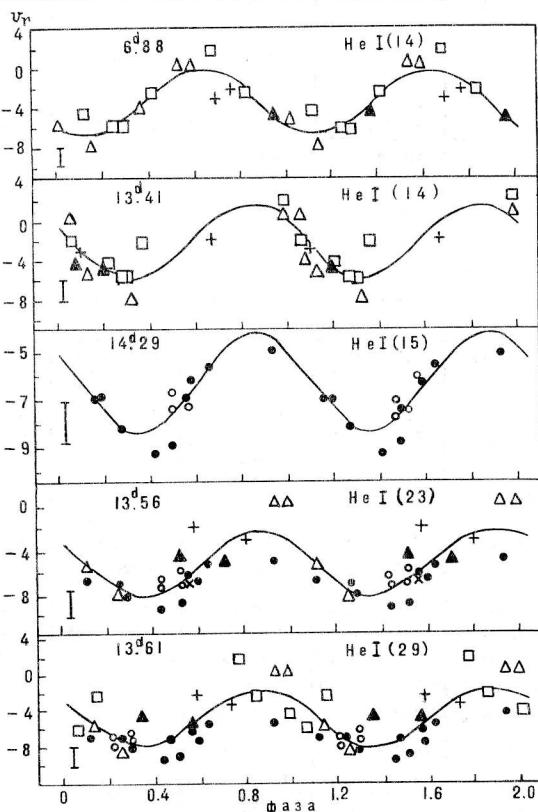


Рис.1. Кривые изменения лучевых скоростей для нижних слоев атмосферы HD 21389. В скобках указано число точек для данной группы, объяснение в тексте.

Наибольшее количество вариантов представлено для линий HeI. Судя по предыдущим нашим исследованиям, они наиболее чувствительны к нестационарности атмосферы, а значит, параметры найденной по ним периодичности также могут изменяться со временем. Данные 1986 г. и 1987-1988 гг. (когда не наблюдалось кратковременных изменений линий HeI) показали один и тот же период 14.3^d , они были объединены и

представлены в табл. 2 и на рис. 1 как HeI(15). Вариант HeI(14) основывается на данных 1984 г. (6 временных точек, период наибольшей неустойчивости, существование различий в лучевых скоростях и даже противоположные их изменения со временем для разных линий группы, см. Зейналов и Рзаев, 1988), к которым добавлены результаты наблюдений 1976-1978 гг. (8 временных точек), дающие близкие значения \bar{v}_r и амплитуды. Для этого варианта наряду с периодом 13.4^d обнаружен еще и вдвое меньший. Объединение всех имеющихся данных по линиям гелия проведено в двух вариантах: без результатов 1984 г. - HeI(23) и с их включением - HeI(29). Как видно из табл. 2 и рис. 1, они дают близкие результаты.

Для линий разных ионов и водорода (от H_{11} до H_{ϵ} включительно) как графики зависимости $v_r(\varphi)$ на рис. 2, так и ее параметры в табл. 2 различаются мало. Это позволило нам объединить их в одну группу - вариант $\Sigma H_{\epsilon} - Cr(25)$. Рис. 3 показывает кривые $v_r(\varphi)$ для бальмеровских линий от H_{δ} до H_{α} . Для H_{γ} и H_{α} получено по 2, практически равнозначных, периода при близких значениях амплитуд и \bar{v}_r .

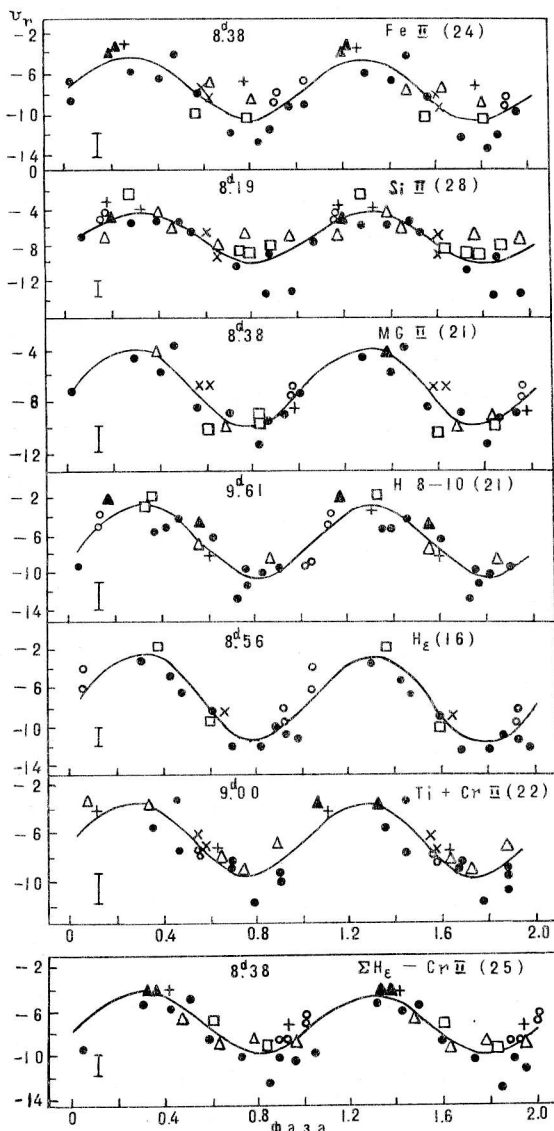


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для промежуточных слоев.

На рис. 4 и в табл. 2 представлены также противоречивые результаты, полученные по линиям NiII(4067) и H_{11-25} . Они приводятся для иллюстрации влияния на результат снижения точности измерений. Линия NiII очень слаба, а высшие члены серии Бальмера располагаются у краев спектрограмм и потому нередко оказываются недодержанными.

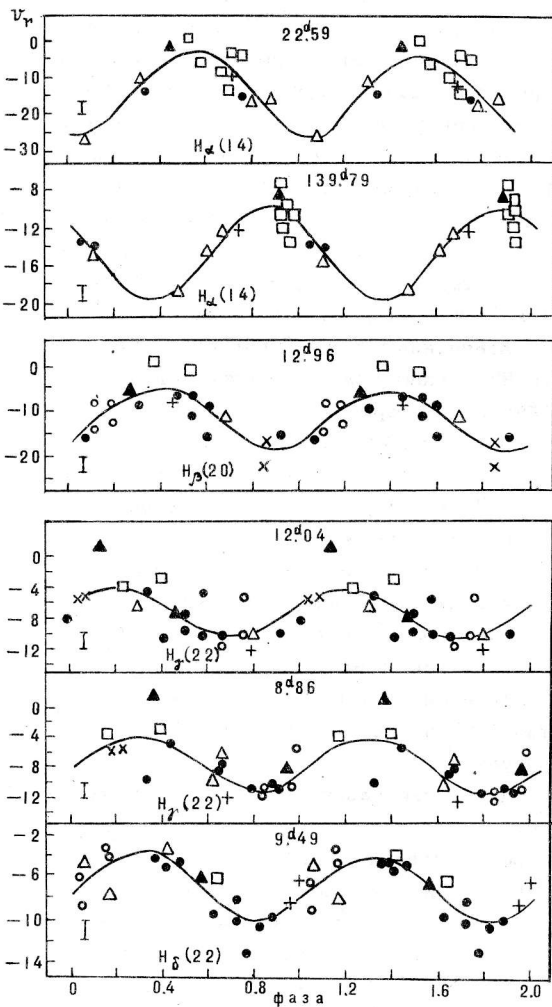


Рис.3. То же, что и на рис.1, для верхних слоев.

Рис.4. Кривые изменения лучевой скорости линии Ni II(4067) для трех значений периода.

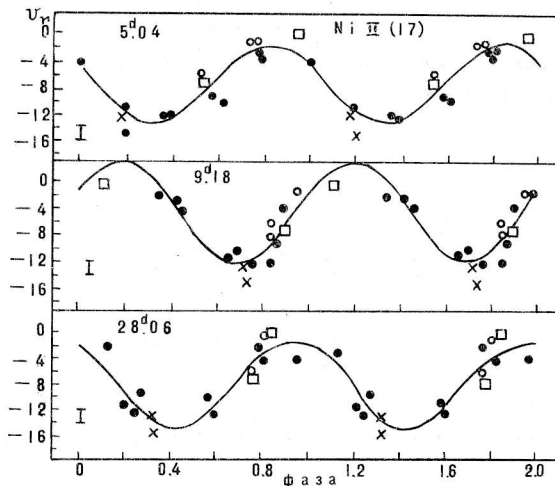


Таблица 2

Группа линий	Период (P ^d)	Амплитуда ΔV_r , km/s	Среднее зна- чение лучевой скорости, \bar{V}_r
H α (14)	139.79386000	24.3	-16.9
	22.59491200	22.1	-14.5
H β (20)	12.96008200	12.9	-11.4
H γ (22)	12.04643000	6.2	- 7.3
	8.86773790	6.6	- 7.2
H δ (22)	9.49397130	6.3	- 6.5
H ϵ (16)	8.56822840	8.9	- 7.2
H $_{8-10}$ (21)	9.61417910	7.7	- 6.7
Mg II (21) (4481)	8.38961360	6.0	- 6.9
Fe II (24)	8.38540530	5.9	- 7.3
Si II (28)	8.19832660	5.7	- 7.1
TiIII+CrII(22)	9.00199350	6.0	- 6.4
Σ H ϵ -CrII(25)	8.38822300	5.9	- 6.9
He I (14)	13.4131300	7.3	- 2.5
	6.8821940	6.6	- 3.5
	(15) 14.2946750	4.2	- 6.4
	(23) 13.5631420	6.0	- 5.3
(29) 13.6157230	6.1	- 4.8	
Ni II (17) (4067)	5.0409425	11.7	- 7.9
	9.1823823	15.1	- 4.7
	28.0630740	13.3	- 8.2
H $_{11-25}$ (16)	4.4898332	5.5	- 8.2
	4.5435208	5.3	- 8.2
	30.3831300	7.3	- 8.5

5. Обсуждение результатов

Если принять для HD 21389 по Талавера и Гомез де Кастро (1987) $M_B = -7.3^m$, $M = 16M_{\odot}$, $T_e = 9730$ K, $R = 99R_{\odot}$, а параметр основной радиальной моды $Q_0 \approx 0.04$, то фундаментальный период по Мадеру (1980a) будет $P_0 = 8.6^d$. При $Q_0 = 0.06$, принимавшемся для этой звезды Абтом (1957a), $P_0 = 12.9^d$. Оба значения можно найти

среди данных табл. 2. Это позволяет заключить, что найденные нами периодические изменения лучевых скоростей обусловлены радиальными пульсациями.

а) Линии HeI - нижние слои атмосферы

Здесь период пульсации близок к 13.6^d , амплитуда Δv_r равна 6 км/с, а среднее значение лучевой скорости составляет $\bar{v}_r \approx -4.8$ км/с. Поскольку лучевая скорость центра массы звезды заметно меньше последней величины (-6.8 км/с, см. Зверева и др., 1984), то оказывается, что слои, где формируются абсорбции HeI, совершая радиальные колебания, падают при этом к центру со скоростью около 2 км/с. Со временем эта скорость несколько меняется и, по-видимому, с ее увеличением растет и амплитуда.

б) Линии ионов и высшие члены серии Бальмера - промежуточные слои

Средний период здесь близок к 8.4^d , амплитуда та же, что и для более глубоких слоев $\Delta v_r \approx 6$ км/с, а $\bar{v}_r \approx -6.9$ км/с, т. е. не отличается от скорости центра массы звезды. Таким образом, в промежуточных слоях не заметно систематического сжатия либо расширения, они демонстрируют колебания в наиболее "чистом" виде.

Мы привлекли данные о лучевых скоростях HD 21389, относящиеся к этим же слоям, из работ Абта (1957а) и Денизмена и Хак (1988). Данные Абта были сняты с кривой лучевой скорости (рис. 1 в его статье), в эти данные вносилась поправка +2.6 км/с, компенсирующая различие наших систем лучевых скоростей. Результаты Денизмена и Хак (1988), усредненные в пределах ночей, были сведены в группу, аналогичную нашей. Рис. 5 показывает свертку данных этих работ, объединенных с нашими, с периодом 8.388223^d и начальной эпохой 2446680.5^d . Все данные неплохо аппроксимируются единой кривой. Это свидетельствует о том, что и период пульсации HD 21389 и ее амплитуда остаются неизменными, по крайней мере, 30 последних лет.

в) Линии H_δ , H_γ , H_β , H_α - верхние слои

Период пульсаций увеличивается с высотой в атмосфере: $P_\delta \approx 9.5^d$, $P_\gamma \approx 12.0^d$, $P_\beta \approx 13.0^d$, $P_\alpha \approx 22.6^d$. Амплитуда лучевой скорости для H_δ и H_γ такая же, как для нижних и промежуточных слоев - около 6 км/с, для H_β и H_α она увеличивается, достигая 13 и 22 км/с, соответственно. Слои H_δ и H_γ , как и промежуточные, в среднем, неподвижны относительно центра массы. Средние значения лучевых скоростей для H_β и H_α составляют -11.4 и -14.5 км/с, соответственно, что говорит о систематическом расширении соответствующих слоев.

Для линии H_α , кроме периода 22.6^d , обнаружен период 139.8^d . Так как последняя величина намного превосходит значение фундаментального периода P_0 , ее можно связать лишь с нерадиальной пульсацией, существующей, возможно, в самых верхних слоях атмосферы.

Сопоставление периодов, амплитуд и средних скоростей, найденных для разных слоев, показывает, что все эти параметры в той или иной степени зависят от глубины в атмосфере. Подобные зависимости для α Cyg A2Ia найдены Иноу (1979). Для HD 21389 они представлены графически на рис. 6, где использована шкала оптических глубин из работы Зверевой и др. (1984).

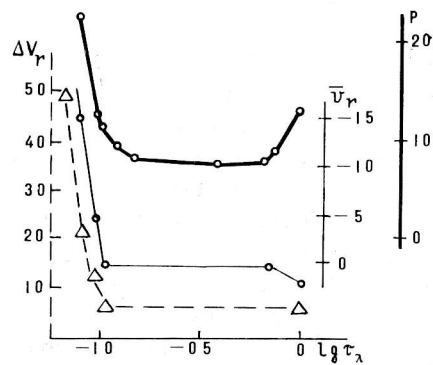
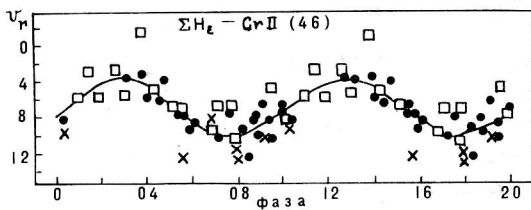


Рис.5. Зависимости $v_r(\varphi)$, свернутые с периодом $P=8.388223^d$ для промежуточных слоев. \odot - наши данные, \square - данные по Абту (1957а), \times - Денизмен и Хак (1988).

Рис.6. Период, амплитуда и среднее значение лучевой скорости как функция оптической глубины. Значение амплитуды 50 км/с - по УФ-наблюдениям.

5. Заключение

Итак, гармонический анализ длительных рядов наблюдений с 1976 по 1988 гг. показал, что вариации лучевых скоростей HD 21389 обусловлены радиальными пульсациями атмосферы.

Параметры колебаний заметно меняются с глубиной. Период пульсации нижних слоев, где формируются линии HeI - 13.61^d . В промежуточных слоях, где формируются линии, ионы и высшие члены серии Бальмера вплоть до H_ϵ , он снижается до 8.38^d и затем в верхних слоях вновь увеличивается: 9.49^d , 12.05^d , 12.96^d и 22.59^d для H_δ , H_γ , H_β и H_α , соответственно. Амплитуда имеет постоянное значение 6 км/с для нижних и промежуточных слоев вплоть до H_γ и возрастает только в самых верхних слоях: 13.0 и 22.0 км/с для H_β и H_α , соответственно. Средние значения лучевой скорости также различаются для разных слоев. Нижние слои падают на звезду, промежуточные - неподвижны относительно центра массы звезды, а верхние - расширяются.

Для самых верхних слоев, где формируется линия H_α , наблюдаются нерадиальные пульсации с периодом 139.79^d . В связи с этим очень полезными оказались бы длительные спектральные наблюдения HD 21389 в заатмосферном ультрафиолете.

Надо отметить, что результаты гармонического анализа не противоречат эмпирическим данным, представленным в виде зависимостей $v_r(\lg \tau_\lambda)$, "кинематических разрезов" и хорошо дополняют их. Этот эмпирический метод весьма эффективен, когда необходимо составить первое представление о нестационарности атмосферы некоторой звезды. Даже при небольшом количестве данных он позволяет описывать поле скоростей в атмосфере и ее стратификацию.

Авторы выражают искреннюю признательность Бычкову В. Д. за предоставление программы, помощь в вычислениях и обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- Абт (Abt H. A.): 1957a, *Astrophys. J.*, **126**, 138.
- Абт (Abt H. A.): 1957b, *Astrophys. J.*, **126**, 547.
- Андерхилл (Underhill A. B.): 1961, *IAU, Symp.* № 12.
- Андерхилл (Underhill A. B.): 1966, *The Early Type Stars*. D. Reidel. Publ. Co., Dordrecht, Holland.
- Андерхилл (Underhill A. B.): 1980, *Astrophys. J. Lett.*, **235**, L149.
- Айдын (Aydin G.): 1972, *Astron. Astrophys.*, **21**, 337.
- Айдын (Aydin G.): 1979, *Astrophys. Space Sci.*, **64**, 481.
- Бааде (Baade D.): 1984, *Theor. Probl. Stellar Stab. and Oscillat. Proc.* 25 th Liege Int. Astrophys. Colloq., Liege S. A., Discuss., **119**, 115.
- Бааде и Ферлат (Baade D., Ferlet R.): 1984, *Astron. Astrophys.*, **140**, 72.
- Барлоу и Кохен (Barlow M. J., Cohen M.): 1977, *Astron. Astrophys. J.*, **213**, 737.
- Бикмаев И. Ф., Панчук В. Е.: 1986, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **23**, 111.
- Билс (Beals C. S.): 1955, *Publ. Dom. Astron. Observ. Victoria*, **9**, 1.
- Бюрки и др. (Burki G., Rufener F., Mayor M.): 1980, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **42**, 383.
- Вогт и Пенрод (Vogt S. S., Penrod G. D.): 1983, *Astrophys. J.*, **275**, 661.
- Вольф и др. (Wolf B., Campusano L., Sterken C.): 1974, *Astron. Astrophys.*, **36**, 87.
- Гиес и Болтон (Gies D. R., Bolton C. T.): 1986, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **61**, 49.
- ван Гендерен и др. (van Genderen A. M., Alphenaar P., van der Bij M. D. P., Deul E. R., van Driel W., van Heerde G. M., de Lange L., van Leeuwen F., Meys J. J. M., Oppe J., The P. S. and Wiertz M. J. J.): 1985, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **61**, 213.
- ван Гендерен (van Genderen A. M.): 1989, *Astron. Astrophys.*, **208**, 135.
- ван Гендерен (van Genderen A. M.): 1974, *Inf. Bull. Variable Stars*, **877**.
- ван Гендерен (van Genderen A. M.): 1977, *Astron. Astrophys.*, **58**, 439.
- ван Гендерен (van Genderen A. M.): 1986, *Astron. Astrophys.*, **157**, 163.
- Гранес (Granes P.): 1975, *Astron. Astrophys.*, **45**, 343.
- Денизмен и Хак (Denizman L. and Hack M.): 1988, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **78**, 79.
- Добричев В. М., Ченцов Е. Л., Шхарошева З. У.: 1986, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **22**, 59.
- Зверева Е. Б., Зейналов С. К., Ченцов Е. Л.: 1984, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **18**, 29.
- Зейналов С. К., Мусаев Ф. А., Ченцов Е. Л.: 1985, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **21**, 3.
- Зейналов С. К., Рзаев А. Х.: 1988, *Тр. Каз. гор. АО*, **51**, 74.
- Иноу (Inoue M. O.): 1979, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **31**, 11.
- Конти и др. (Conti P. S., Leep E. M., Loope J. J.): 1977, *Astrophys. J.*, **214**, 759.
- Контисас и Контисас (Kontizas F., Kontizas M.): 1980, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **45**, 121.
- Куназ и др. (Kunasz P. B., Morrison N. D., Spressart B.): 1983, *Astrophys. J.*, **266**, 739.

- Люпи и Нордсiek (Lupie D. L., Nordsieck R. H.): 1987, *Astron. J.*, **93**, 214.
- Люси (Lucy L. B.): 1976, *Astrophys. J.*, **266**, 499.
- Мадер и Руфнер (Maeder A., Rufener F.): 1972, *Astron. Astrophys.*, **20**, 437.
- Мадер (Maeder A.): 1980a, *Astron. Astrophys.*, **90**, 311.
- Мадер (Maeder A.): 1980b, *Highlights of Astronomy*, **5**, 477.
- Мадер (Maeder D.): 1980c, *Variability Stars and Galaxies. Proc. 5th Eur. Reg. Meet. Astron., Liege*, B6/1.
- Мадер (Maeder A.): 1986, *Highlights of Astronomy*, **7**, 273.
- Мур (Moor J. H.): 1911, *Lick Obs. Bull.*, **6**, 140.
- Мур (Moor J. H.): 1924, *Lick Obs. Bull.*, **11**, 141.
- Мусаев Ф. А., Ченцов Е. Л.: 1989, *Письма в астроном. ж.*, **14**, 530.
- Паддок (Paddock G. F.): 1935, *Lick Obs. Bull.*, **17**, 99.
- Перси и Велч (Percy J. R., Welch D. L.): 1983, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **95**, 491.
- Прадери и др. (Praderie F., Talavera A., Lamers H.J.G.L.M.): 1980, *Astron. Astrophys.*, **86**, 271.
- Рожковский Д. Д., Курчаков А. В.: 1968, *Тр. Астрофиз. ин-та АН КазССР*, **11**, с.3.
- Розендаль и Сноуден (Rosendhal J. D. and Snowden M. S.): 1971, *Astrophys. J.*, **169**, 281.
- Рзаев А. Х., Зейналов С. К., Ченцов Е. Л.: 1989, *Кинем. физ. небес. тел*, **5**, 75.
- Рзаев А. Х., Ченцов Е. Л.: 1991, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **31** (в печати).
- Рзаев А. Х., Зейналов С. К., Ченцов Е. Л.: 1991, *Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв.*, **67**, 5.
- Рзаев А. Х., Зейналов С. К.: 1991, *Матер. Всесоюзн. совещ., Шамаха, сентябрь 1989* (в печати).
- Сквайз (Schwaiz H. E.): 1986, *Vistas Astron.*, **29**, 253.
- Сноу и Мортон (Snow Th. P., Morton D. C.): 1976, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **32**, 429.
- Соколов В. В., Ченцов Е. Л.: 1984, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **18**, 8.
- Стеркен (Sterken C.): 1977, *Astron. Astrophys.*, **57**, 361.
- Стеркен (Sterken C.): 1981, *The Most Massive Stars, ESO Workshop*, **147**.
- Стозерс (Stothers R.): 1976, *Astrophys. J.*, **209**, 800.
- Талавера и Гомез де Кастро (Talavera A., Gomez de Castro A. I.): 1987, *Astron. Astrophys.*, **181**, 300.
- Такеути и Аикава (Takeuti M., Aikawa T.): 1986, *Sendai Astron. Rap.*, **305**, 109.
- Ферро (Ferro A. A.): 1985, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **216**, 571.
- Ферни (Ferne J. D.): 1981, *Astrophys. J.*, **243**, 576.
- Ферни (Ferne J. D.): 1983, *Astrophys. J.*, **265**, 999.
- Хатчингс (Hutchings J. B.): 1976, *Astrophys. J.*, **203**, 438.
- Хатчингс и Ласкаридес (Hutchings J. B., Laskarides P. G.): 1973, *Publ. Dom. Astron. Observ.*, **14**, 107.
- Хемфриз (Humphreys R. M.): 1978, *Astrophys. J.*, **38**, 309.
- Ченцов Е. Л.: 1978, *Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв.*, **21**, 78.
- Шеффе Г.: 1963, *Дисперсионный анализ. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит.*, 512 с.
- Эббетс (Ebbets D.): 1982, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **48**, 399.
- де Ягер (de Jager C.): 1980, *The Brightest Stars. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland-Boston, USA-London, England.*