

УДК 524.316—64

Глубина образования линий поглощения γ -системы TiO в атмосфере гиганта спектрального класса M3

Я. В. Павленко

В области $\lambda\lambda$ 670.67—670.75 нм рассчитан синтетический спектр красного гиганта с $T_{\text{эф}}=3600$ К, $\lg g=0.5$. Глубина формирования линий поглощения γ -системы TiO оценивалась разными методами. Сделан вывод о том, что линии поглощения TiO формируются на значительном интервале глубин в атмосфере M-гиганта, выше уровня образования непрерывного спектра. Линии γ -системы TiO чувствительны к проявлению хромосферных эффектов — увеличение температуры во внешней части модели атмосферы красного гиганта ($\tau_{\text{Ross}} \leq 10^{-4}$) приводит к существенным изменениям их интенсивностей.

THE FORMATION DEPTH OF TiO γ -SYSTEM ABSORPTION LINES IN THE ATMOSPHERE OF RED GIANT OF TYPE M3, by Pavlenko Ya. V.— In the spectral region $\lambda\lambda$ 670.67-670.75 nm the synthetic spectrum of red giant ($T_{\text{eff}}=3600$ K, $\lg g=0.5$) was calculated. The formation depth of TiO γ -system absorption lines was evaluated by different methods. A conclusion is drawn that the lines of TiO are formed in a wide range of heights in the M-giant atmosphere above the region of continuum formation. The lines of TiO γ -system are sensitive to temperature in the outer part of atmospheric model — the rise of the temperature at $\tau_{\text{Ross}} \leq 10^{-4}$ leads to the significant changes of their intensities.

Численное моделирование сложных атомно-молекулярных спектров применяется при определении химического состава атмосфер звезд поздних спектральных классов, их физических характеристик. Вид спектров красных гигантов кислородной последовательности во многом определяют линии поглощения TiO. При количественном анализе таких спектров большой интерес представляет вопрос о глубине образования этих линий.

В атмосферах сравнительно горячих красных гигантов ($T_{\text{эф}} > 4000$ К) молекулярные линии TiO формируются на малых глубинах. В работе [9] показано, что вид теоретического спектра α Boo ($T_{\text{эф}}=4400$ К) существенно зависит от физических условий во внешней части атмосферы. В самосогласованной модели атмосферы Арктуря температура монотонно уменьшается к внешней границе, что приводит к увеличению концентрации TiO на $\tau_{\text{Ross}} < 10^{-4}$. Расчеты показывают, что в спектре α Boo должны присутствовать достаточно сильные линии поглощения TiO, которые не обнаруживаются или очень слабы в наблюдаемом спектре. При наличии хромосферы концентрация TiO во внешней части атмосферы Арктуря уменьшается — рассчитанные в рамках ЛТР линии поглощения в этом случае заметно слабее.

У звезд с меньшими $T_{\text{эф}}$ максимум концентрации TiO расположен во внутренних областях атмосфер, строение которых известно с большей точностью (на малых глубинах возможны проявления хромосферной активности, звездного ветра, значительны эффекты отклонения от ЛТР).

Настоящая работа посвящена определению глубины формирования линий поглощения умеренной интенсивности γ -системы TiO ($A^3\Phi - X^3\Delta$) в атмосфере нормального гиганта спектрального класса M3 ($T_{\text{эф}}=3600$ К, $\lg g=0.5$). Для ряда M-гигантов с такими же $T_{\text{эф}}$ и $\lg g$ в работе [1] методом синтетического спектра определено содержание лития.

В области дублета лития ($\lambda\lambda$ 670.76 и 670.91 нм) линии поглощения TiO более сильные, чем линии других молекул. В нашей работе определение глубины их формирования проводилось в рамках ЛТР. Населенности колебательно-вращательных уровней TiO соответствовали распределению Больцмана, так что функция источников в спектральных линиях определялась функцией Планка. Мы использовали две модели атмосферы M-гиганта: A1 и A2.

Модель A1 — самосогласованная модель атмосферы, рассчитанная в рамках классических предположений (ЛТР, плоскопараллельность, гидродинамическое равновесие,

отсутствие в атмосфере источников и стоков энергии). Модель атмосферы А1 гиганта с $T_{\text{эф}}=3600$ К, $\lg g=0.5$ и солнечным содержанием химических элементов рассчитана автором с помощью гартуской версии программы SAM 1 [16]. Учитывались молекулярные источники непрозрачности (см. [10]). Эта модель практически не отличается от модели атмосферы с теми же параметрами из сетки Цудзи [15]. Верхние границы моделей атмосфер определены на уровне

$$\tau_{\text{Ross}} = 5 \cdot 10^{-5}, \quad m = \int_0^H \rho(x) dx = 1,75, \quad (1)$$

где $\rho(x)$ — плотность вещества на геометрической глубине x . На таких глубинах излучение практически не взаимодействует с веществом, за исключением частот, на которых расположены самые сильные атомные и молекулярные линии поглощения. Состояние вещества здесь описывается уравнением политропы. С другой стороны, на $\tau_{\text{Ross}} < 10^{-4}$ может проявляться действие нетепловых источников нагрева атмосферы [2].

Модель атмосферы А2 с нагретыми внешними слоями (хромосферой). В верхней части этой модели атмосферы, начиная с глубины $\tau_{\text{Ross}} = 4 \cdot 10^{-4}$ ($m_{\text{min}}=8$), задавалось повышение температуры с градиентом

$$\frac{\partial T}{\partial (\lg m)} = G_* = 970. \quad (2)$$

Принятое значение G_* близко к температурному градиенту в модели атмосферы Солнца HSRA [7] и модели хромосферы Аркура [6]. Согласно современным представлениям, в атмосферах гигантов с хромосферами отношение $T_{\text{min}}/T_{\text{эф}}$ составляет 0.65—0.89 с очень слабой тенденцией уменьшения этого отношения при уменьшении $T_{\text{эф}}$ (см. [2]). В модели А2 оно равно 0.75.

Для последующего анализа выбран участок спектра $\lambda\lambda$ 670.67—670.75 нм. Здесь доминируют линии поглощения TiO. Линии других молекул (CN, ZrO), а также Ti I, Cl I, Rb I, Fe I, которые учитывались при расчете синтетического спектра, намного слабее (рис. 1).

При расчете синтетического спектра уравнение переноса излучения решалось по методу Эрмита [5]. Профиль коэффициента поглощения в спектральной линии представлялся функцией Фойгта $H(a, v)$. Методика расчета постоянной затухания описана в [3]. Микротурбулентная скорость выбрана равной 2 км/с. Концентрации атомов, ионов и молекул определялись из решения системы уравнений ионизационно-диссоциативного равновесия по методике, реализованной в программе SAM 1 [16]. При этом

$$n_A n_B / n_{AB} = \exp[-D_0/(kT) + b - cT + dT^2 - eT^3 + fT^4 - 1.5 \ln T], \quad (3)$$

где n_A , n_B и n_{AB} — концентрации атомов A , B и молекулы AB ; T — температура; D_0 — потенциал ионизации. Принято: $D_0(\text{TiO})=6.84$ эВ; $D_0(\text{CN})=7.6$ эВ; $D_0(\text{ZrO})=7.89$ эВ. Другие константы в формуле (3) получены на основе данных Цудзи [14].

Характерная особенность исследуемого спектра — практически полное отсутствие неблендированных молекулярных линий TiO. Для дальнейшего анализа выбраны две точки спектра (рис. 1): $W_1(\lambda=670.713$ нм) и $W_2(\lambda=670.725$ нм). Точка спектра W_1 попадает на центр трех линий поглощения γ -системы TiO [12]: одна из них принадлежит к ветви R_2 полосы (1, 0), энергия возбуждения и вращательное квантовое число нижнего уровня равны соответственно $E''=0.301$ эВ и $J''=58$, а величина $gf=5.50$; вторая линия принадлежит к ветви Q_2 полосы (4, 2) ($E''=1.31$ эВ, $J''=127$, $gf=8.91$); третья — к ветви R_1 полосы (5, 3) ($E''=1.37$ эВ, $J''=117$, $gf=13.5$). Первая линия значительно сильнее, чем две другие. На длине волны W_2 поглощение линиями TiO практически отсутствует. Поскольку все линии умеренной интенсивности γ -системы TiO имеют сходные значения gf и E'' (близкие к 1 эВ), выводы настоящей работы могут быть распространены и на них.

Результаты. В первом приближении можно считать, что линии поглощения TiO формируются в области атмосферы, где концентрация этой молекулы значительна. Максимум концентрации TiO ($\tau_{\text{Ross}} \approx 10^{-2}$, $m=80$) и область формирования непрерывного спектра ($\tau_{\text{Ross}} \approx \tau(W_2) \sim 1$, $m=500$) достаточно разнесены по глубине в атмосфере

ре М-гиганта (рис. 2). Следовательно, образование непрерывного спектра и линий поглощения γ -системы TiO происходит в разных областях атмосферы.

Точнее определить область формирования линий поглощения TiO можно, если исследовать изменение с глубиной коэффициентов поглощения в непрерывном спектре χ_c и в линии χ_l . Из достаточно общих соображений следует, что область формирования линий поглощения находится выше уровня в атмосфере звезды, где $\chi_l = \chi_c$. На глуби-

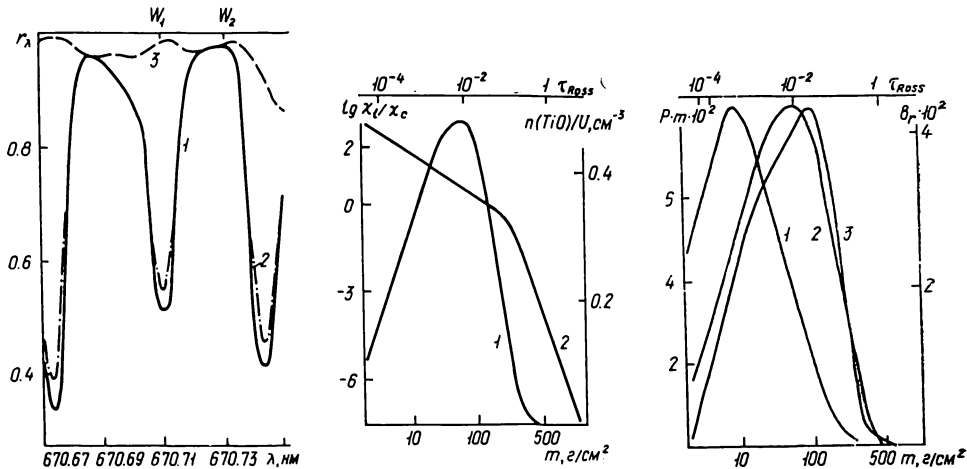


Рис. 1. Синтетические спектры красного гиганта ($T_{\text{эф}} = 3600$ К, $\lg g = 0.5$): 1 — модель атмосферы без хромосферы; 2 — модель с хромосферой; 3 — теоретический спектр, рассчитанный без учета поглощения излучения линиями TiO

Рис. 2. Изменения с глубиной в атмосфере $n(\text{TiO})/U$ (кривая 1), $\chi_l/\chi_c = f(m)$ (кривая 2)

Рис. 3. Функция вклада b_r (кривая 1), депрессионная функция вклада (кривая 2); $n(\text{TiO})/U$ (в масштабе рис. 2, кривая 3)

нах в атмосфере, где $\chi_c > \chi_l$, радиативные процессы в непрерывном спектре «замывают» линию поглощения. Из рис. 2 следует, что область максимальных значений концентрации TiO находится выше уровня, где $\chi_l = \chi_c$.

В настоящее время для определения глубины формирования линий поглощения предложены методики функций отклика и депрессионных функций вклада. Эти методики обсуждены в работе [11].

Согласно А. П. Сарычеву [4], в качестве средней глубины формирования линий поглощения в звездной атмосфере можно принять математическое ожидание

$$\bar{m} = \int_0^{\infty} mP(m) dm = \int_{-\infty}^{\infty} m^2 P(m) d(\ln m). \quad (4)$$

где $P(m)$ — депрессионная функция вклада [8];

$$P(m) = \left[\chi_l \int_{\tau_c}^{\infty} S_c(y) E_2(y + \tau_c) dy - S_c(\tau_c) E_2(\tau_c + \tau_l) \right] \left[\int_0^{\infty} S_c(\tau_c) E_2(\tau_c) d\tau_c \right]^{-1}. \quad (5)$$

Глубина линии поглощения

$$d_v = 1 - r_v = (H_v^c - H_v^l) / H_v^c = \int_{-\infty}^{\infty} P(m) m d(\ln m). \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) величины S_v и H_v — соответственно функция источников и поток излучения; другие обозначения общепринятые.

В нашем случае зависимость $f = P(m)m$ определяется в основном распределением поглощающих частиц в атмосфере (рис. 3). При этом максимумы $n(\text{TiO})/U$ и $P(m)m$ разнесены по глубине атмосферы М-гиганта; максимум функции вклада расположен выше. Рассчитанная по формуле (4) величина $\bar{m} = 70$ ($\tau_{\text{ross}} = 0.013$).

Для определения глубины образования линий поглощения использовалась также методика [11]. Формулы из [11] в терминах выходящего из атмосферы потока излучения имеют следующий вид:

$$d_v = (H_v^c - H_v^l) / H_v^c = \int b_r d(\ln m), \quad (7)$$

где

$$b_r = \chi_l (1 - B/J_c) E_2(\tau_r) m, \quad (8)$$

$$\tau_r = (\chi_l + \chi_c S_c / J_c) dm. \quad (9)$$

Здесь J_c и B — средняя интенсивность излучения в непрерывном спектре на частотах спектральной линии и функция Планка соответственно (на глубине m). В трактовке депрессионной функции вклада b_r в [11] более последовательно учтено, что в частотах спектральной линии поглощается излучение, которое формируется в более глубоких слоях атмосферы на уровне $\tau_c \approx 1$. Поскольку множитель $1 - B/J_c$ в формуле (8) максимален на внешней границе классической модели атмосферы М-гиганта, то для слабых линий поглощения и линий умеренной интенсивности максимум b_r расположен на меньших глубинах, чем максимум $P(m)m$ (рис. 3). Для сильных линий поглощения $\tau_l \approx \tau_r \gg \tau_c$, и функция вклада [11] практически совпадает с депрессионной функцией вклада [8].

Концентрация TiO значительна и на внешней границе классической модели A1 атмосферы М-гиганта, т. е. на $\tau_{Ross} \approx 5 \cdot 10^{-5}$. Линии γ -системы TiO должны быть чувствительными к физическим условиям на внешней границе атмосферы. Это предположение подтверждено численными расчетами синтетического спектра в той же области длин волн $\lambda\lambda$ 670.67—670.75 нм для модели атмосферы A2. Отметим, что максимум функции вклада b_r для линий поглощения γ -системы TiO находится в модели A2 глубокие области температурного минимума (рис. 3). Влияние неопределенности температурной структуры внешних слоев модели атмосферы М-гиганта на теоретический спектр в этом случае меньше, чем для α Воо (см. [9]). Все же появление нагретых внешних слоев в модели атмосферы М-гиганта привело к уменьшению глубин линий поглощения γ -системы TiO на 10%. Для линий умеренной интенсивности эта величина сопоставима с точностью представления наблюдаемых спектров, которые использовались в работе [1].

Наши расчеты, как и расчеты [9], только продемонстрировали чувствительность спектра TiO к строению внешних моделей атмосфер красных гигантов. Наблюдаемые явления в случае М-гигантов оказываются сложнее. Существуют свидетельства в пользу того, что интенсивность полос TiO коррелирует с интенсивностью линий h и k Mg II, т. е. с мощностью хромосфер М-гигантов [13]. По-видимому, процесс формирования линий поглощения TiO в атмосфере М-гиганта с хромосферой не может быть описан в рамках классических представлений, главным из которых является предположение о ЛТР. Наши расчеты показывают, что даже у гигантов с $T_{\text{эф}} = 3600$ К в области формирования линий поглощения TiO радиационная температура, характеризующая распределение энергии в непрерывном спектре, отличается от электронной температуры, которая соответствует равновесному состоянию вещества на таких глубинах. Детальное рассмотрение эффектов отклонения от ЛТР в линиях TiO выходит за рамки настоящей работы.

Автор благодарен А. В. Шавриной и Л. А. Яковине за информацию о молекулярных линиях, которая использована в настоящей работе.

1. Боярчук М. Е., Шаврина А. В., Яковина Л. А. Содержание лития в атмосферах М-гигантов с учетом молекулярного поглощения // *Астрофизика*.— 1982.—19, вып. 2.— С. 265—272.
2. Гурздян Г. А. Звездные хромосферы или дублет 2800 А Mg II в астрофизике.— М.: Наука, 1984.—424 с.
3. Павленко Я. В., Шаврина А. В. О постоянной затухания в атмосферах К-гигантов // *Кинематика и физика небес. тел.*— 1986.—2, № 4.— С. 54—56.
4. Сарычев А. П. Физический смысл функций вклада и глубина формирования линий поглощения // *Астрон. журн.*— 1986.—63, вып. 3.— С. 556—562.
5. Auer L. An Hermithian method for solution of radiative transfer problem // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.*— 1976.—16, N 3.— P. 931—937.
6. Ayres T. R., Linsky J. L. Stellar model chromospheres. III. Arcturus (K5 III) // *Astrophys. J.*— 1975.—200, N 3.— P. 660—674.

7. *Gingerich O., Noyes R. W., Kalkoffen W., Gony Y.* The Harvard-Smithsonian reference atmosphere // *Solar Phys.*—1971.—18, N 2.— P. 347—365.
8. *Gurtovenko E., Ratnikova V., de Jager C.* On the average optical depth of formation of Fraunhofer lines // *Ibid.*—1974.—37, N 1.— P. 43—47.
9. *Hänni L., Sitska J.* An analysis of the absorption bands in K-giant stars // *Публ. Тарт. астрофиз. обсерватории.*—1986.—51.— С. 159—180.
10. *Kipper T., Kipper M., Sitska J.* Analysis of the spectrum of Arcturus // *Atmospheres of late-type stars.*—Tallinn: Valgus, 1981.— P. 3—14.
11. *Magain P.* Contribution functions and the depth of formation of spectral lines // *Prepr. ESO.*—1986.— N 443.— P. 1—15.
12. *Phillips J. G.* Molecular constants of the TiO molecules // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1973.—26, N 2.— P. 313.
13. *Steinman-Cameron Th., Johnson H. R., Honeycutt R. K.* Chromospheric activity and TiO bands in M-giants // *Astrophys. J.*—1985.—291, N 2.— P. L51—L54.
14. *Tsuji T.* Molecular abundance in stellar atmospheres // *Astron. and Astrophys.*—1973.—23, N 3.— P. 411—431.
15. *Tsuji T.* Spectral energy distribution and effective temperature scale in M-giant stars // *Ibid.*—1978.—62, N 1.— P. 29—50.
16. *Wright S. L., Argyros J. D.* ATLAS5 at the University of London (SAM 1). I. Programming and implementation // *Communs Univ. London Observ.*—1975.— N 75.— P. 43.

Глав. астроном. обсерватория АН УССР,
Киев

Поступила в редакцию 06.04.87,
после доработки 13.10.87

РЕФЕРАТ ДЕПОНИРОВАННОЙ РУКОПИСИ

УДК 523.9—36

СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ. СОСТОЯНИЕ НА 1986 ГОД / Рикалюк Р. Е.

(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 8589-В87)

Приведены содержания химических элементов в атмосфере Солнца, полученные разными исследователями за последние десять лет. Особый интерес представляют работы, в которых впервые оценены содержания тербия и технеция, а также посвященные определению содержания с использованием прецизионных лабораторных сил осцилляторов. Предложены новые значения содержаний химических элементов в солнечной атмосфере, которые можно рекомендовать для теоретических исследований.