

УДК 524.316.7.082

Моделирование спектров молодых М-звезд

Ю. П. Любчик, Я. В. Павленко

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680, ГСП, Киев-127, Голосиив

Обсуждаются результаты моделирования оптических спектров звезд поздних спектральных классов с использованием различных списков линий молекулы TiO. Для участков $\lambda\lambda$ 668.5–672.5, 768.5–772.5 и 810.5–814.5 нм рассчитаны синтетические спектры с разными приближениями учета молекулярной непрозрачности — полностью перекрывающихся линий и «линия за линией» для списков линий TiO Плеза и Швенке. На основании сравнения спектров молодых звезд V927 Tau и FN Tau с синтетическими показано, что расчеты по спискам TiO Швенке лучше воспроизводят наблюдаемые спектры.

МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРІВ МОЛОДИХ М-ЗІРОК, Любчик Ю. П., Павленко Я. В. — Обговорюються результати моделювання оптичних спектрів зір пізніх спектральних класів із застосуванням різних списків ліній молекули TiO. Для ділянок $\lambda\lambda$ 668.5–672.5, 768.5–772.5 та 810.5–814.5 нм розраховані синтетичні спектри з різними наближеннями врахування молекулярної непрозорості — ліній, що повністю перекриваються, та «лінія за лінією» для списків ліній TiO Плеза та Швенке. На підставі порівняння спектрів молодих зір V927 Tau та FN Tau з синтетичними показано, що розрахунки по списках TiO Швенке краще відтворюють спостережувані спектри.

MODELING THE SPECTRA OF YOUNG M DWARFS, by Lyubchik Yu. P., Pavlenko Ya. V. — We discuss the results of modeling the optical spectra of late type stars for different molecular line lists of TiO. The synthetic spectra at $\lambda\lambda$ 668.5–672.5, 768.5–772.5 and 810.5–814.5 nm were simulated using both the just overlapping line (JOLA) and «line by line» (LBL) approximations for Plez's and Shwenke's TiO line lists. From the fit of the calculated spectra to the observed ones — young PMS stars V927 Tau and FN Tau — we show that the synthetic spectra based on the Shwenke's TiO line list reproduce the observations more accurately.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические спектры ($\lambda\lambda$ 400–1000 нм) поздних М-звезд формируются в основном в результате поглощения молекулярными полосами TiO и VO (см. [6]). Поэтому для изучения процессов, происходящих в атмосферах этих звезд, важно корректно описывать молекулярное поглощение. Есть несколько подходов для учета молекулярной непрозрачности. Прежде всего метод,

предполагающий учет всех линий поглощения молекул и атомов (метод «линия за линией»). Для точного расчета линий молекулярной непрозрачности требуются данные об энергетических уровнях молекулы, вероятности соответствующих переходов. Известно несколько списков линий для различных молекул, среди них — списки Джоргенсена [5], Куруца [7], Плеза [12], Швенке [13].

В ряде случаев возможно применение различных методов, использующих упрощенную структуру молекулярной полосы (приближения полос, состоящих из равноотстоящих линий и полностью перекрывающихся линий [15]). Несмотря на более или менее существенные упрощения в описании физических процессов поглощения квантов молекулами, эти методы оказываются достаточно точными и могут использоваться при решении некоторых астрофизических задач. Естественно, их использование является более оправданным при интерпретации спектров поздних звезд, полученных с низким разрешением, когда вращательная структура молекулярных полос не разрешается. При этом применение приближенных методов расчета молекулярной непрозрачности позволяет существенно сократить время численного расчета синтетических спектров.

В данной работе мы рассмотрели, насколько точно синтетические спектры, рассчитанные по спискам линий TiO [12] и [13], воспроизводят спектры поздних M-звезд и проверили, как совпадают расчеты, использующие различные приближения учета молекулярной непрозрачности. Для расчетов выбраны три характерных участка спектра, представляющие интерес для многих задач (таблица).

Характеристики выбранных участков спектра

λ , нм	Главные вкладчики в молекулярную непрозрачность	Астрофизически интересная деталь	Представляет интерес для
670.8	TiO	резонансная линия лития	определения содержания лития
812.6	TiO и VO	субординатная линия лития	определения содержания лития
769.9	TiO	резонансная линия калия	определения lgg

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Методика расчетов синтетических спектров подробно описана в работе [1]. Расчеты проводились с помощью программы WITA6 [2]. Синтетические спектры рассчитывались в рамках классических приближений (ЛТР, плоскопараллельность среды, отсутствие стоков и источников энергии, перенос энергии осуществляется только конвекцией и полем излучения) для моделей атмосфер M-субгигантов с $T_{\text{эф}} = 3000, 3100, 3300\text{K}$, $\text{l}g g = 3.5, 4.0, 4.5, 5.0$ и металличностями $[\mu] = 0$ из сетки моделей [3].

В работе использованы высокодисперсионные спектры ($R \approx 50000$) двух молодых M-звезд V 927 Тау и FN Тау, полученные на телескопе КЕСК и любезно предоставленные авторам Б. Оппенгеймером (Caltech).

Списки линий. Список линий TiO Плеза включает вращательно-колебательные линии девяти электронных переходов ($\alpha, \beta, \gamma, \gamma', \delta, \epsilon, \varphi, a-f$ и $E-B$). Расчеты проводились для изотопов — ^{16}O и $^{46-50}\text{Ti}$ и значений вращательного квантового числа до $J = 200$ и колебательного квантового числа до $v = 15$. В список не включались линии сила которых была меньше чем 10^{-7} от значения самой сильной линии; силы осцилляторов gf рассчитывались Плезом для значения $T = 4000\text{ K}$. Интенсивности линий расчи-

тывались с использованием моментов переходов, рассчитанных Лангхофом [8]. Для согласования с экспериментальными значениями gf для всех линий полосы δ были уменьшены вдвое. Также для лучшего соответствия с экспериментальными данными при расчетах уровней энергии и силы линий были взяты молекулярные константы, отличающиеся от использованных Джоргенсенем [5], и были добавлены переходы системы $a-f$. Эти усовершенствования, наряду с использованием моментов переходов, зависящих от межъядерных расстояний, сделали этот список линий более полным по сравнению со списками Куруца [7] и Джоргенсена [5].

База данных Швенке [13] содержит данные об уровнях 13 нижних электронных состояний, которые определяются из расчетов. Кривые потенциальных энергий, спин-орбитальное расщепление, спин-орбитальное взаимодействие и параметры вращения определялись из сравнения с имеющимися экспериментальными данными методом наименьших квадратов. Моменты перехода и дипольные моменты были получены из теоретических расчетов. Хорошее согласие рассчитанных и наблюдаемых значений было получено для всех уровней, кроме B и C . Учет перекрытия некоторых электронных уровней позволил учесть в расчетах несколько запрещенных полос. Рассматривались перекрытия уровней X , a , E и D ; A и g ; B , b , D и h ; C , c и f .

Расчеты списков линий с использованием данных из базы данных Швенке проводились Я.Павленко для молекул TiO, состоящих из изотопов ^{16}O и $^{46-50}\text{Ti}$. Использовались значения вращательного квантового числа до $J = 300$ и колебательного квантового числа до $v = 19$. Для уменьшения числа линий использовалась стандартная процедура. Полное число линий было сгруппировано по 2.5 миллиона в порядке увеличения длины волны; сила линии рассчитывалась для температуры 2500 К. Далее отбрасывались все линии, сила которых была меньше 10^{-8} максимальной силы линии в группе.

Отметим, что в случае молекулы TiO достаточно тяжело получить высококачественные экспериментальные спектроскопические данные — они в значительной степени зависят от экспериментальных методик. Таким образом, на сегодняшний день тяжело делать выводы о точности сравнения лабораторных и рассчитанных списков линий TiO. Одним из важных критериев полноты списков линий может быть сравнение рассчитанных с этими данными синтетических спектров и наблюдаемых спектров звезд поздних спектральных классов.

Плез в своей работе [12] сравнивал рассчитанные по своим спискам линий TiO спектры с наблюдаемыми спектрами двух М-гигантов HD 141477 (M0III) и HD 123657 (M5III) и сделал вывод о том, что эти списки достаточно хорошо воспроизводят спектры с высоким и низким разрешением. Списки линий TiO Швенке для случая молодых звезд спектральных классов M5 и M5.5 несколько лучше согласуются с наблюдениями. То, что списки TiO Швенке являются наиболее полными на сегодняшний день, отмечалось и в других работах (см. [4]).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение теоретических потоков F_λ . На первом этапе работы мы сравнили рассчитанные методами «линия за линией» (ЛЗЛ) и JOLA потоки излучения в выбранных областях. Кроме молекулярного поглощения, здесь учитывалось также поглощение в атомных линиях из базы данных VALD [11]. Результаты расчетов для модели атмосферы 3100/4.0 [3] приведены на рис. 1. Рассчитанные потоки излучения ЛЗЛ и JOLA в выбранных спектральных областях в среднем согласуются достаточно хорошо. Это

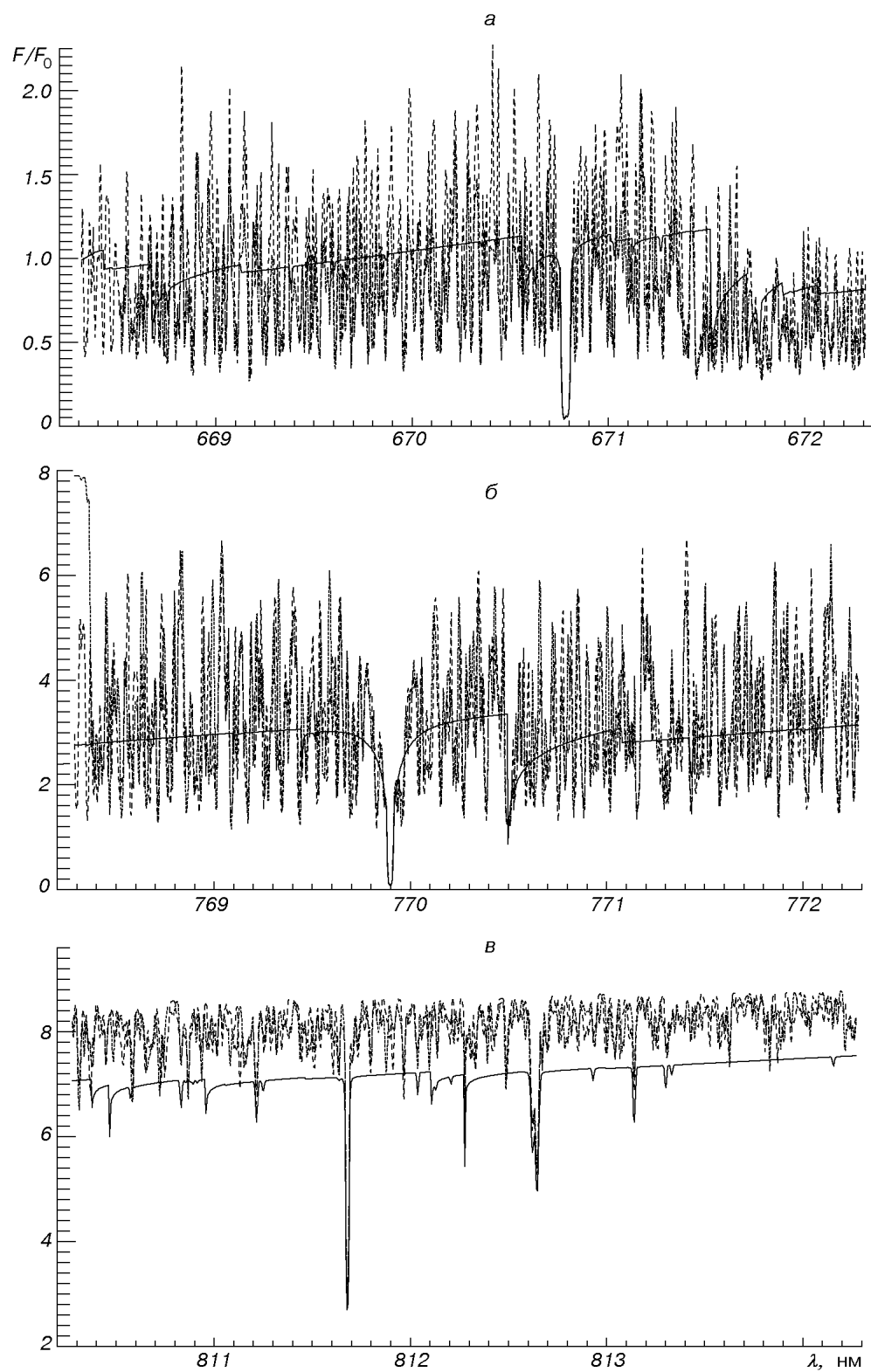


Рис. 1. Синтетические спектры, рассчитанные для различных приближений молекулярной непрозрачности: сплошная линия — метод JOLA, короткие и длинные штрихи — метод ЛЗЛ для списков [12] и [13] соответственно. Модель атмосферы 3100/4.0/0 из [3], атомные списки линий из [11]

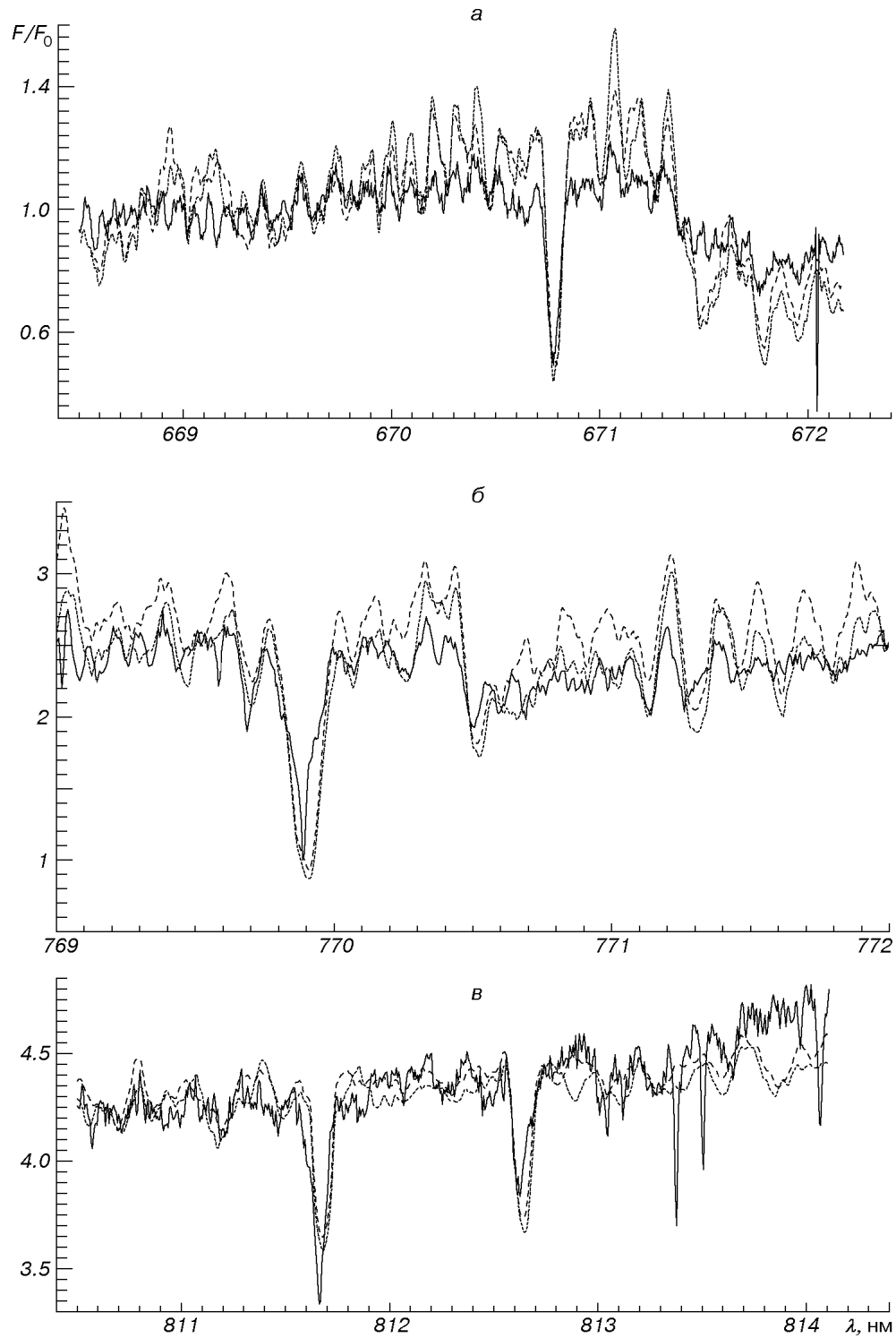


Рис. 2. Наблюдаемый спектр V927 Тау (сплошная линия) и синтетические спектры, рассчитанные для различных списков линий TiO: короткие штрихи — для списков [13], длинные штрихи — для списка [12]. Модель атмосферы 3100/4.0/0 [3], $v \sin i = 22$ км/с. Содержания лития в рассчитываемых моделях составляет $\lg N_{\text{Li}} = 2.5$ для области $\lambda\lambda$ 668.5—672.5 нм и 3.0 для области $\lambda\lambda$ 810.5—814.5 нм

свидетельствует о том, что наша система сил осцилляторов полос TiO (данные о силах осцилляторов приведены в [10]) хорошо согласуется с использованными в работе Плеза [12]. В области $\lambda = 812.6$ нм, где сильных полос TiO нет, приближение JOLA дает несколько завышенные непрозрачности — соответствующие потоки здесь меньше примерно на 20 %. Строго говоря, такие разногласия рассчитанных потоков можно объяснить как различиями использованных сил осцилляторов, так и особенностями используемого приближения JOLA. Известно, что для слабых молекулярных полос JOLA дает завышенные значения непрозрачности.

Как показано в работе [1], расчеты синтетических спектров в коротковолновой области участка $\lambda\lambda$ 800—812 нм, учитывающие только линии молекулы TiO, дают завышенные значения потоков F_λ . Здесь значимо также поглощение излучения полосой (0, 0) системы $B^4\Pi_{(c)} - X^4\Sigma^-$ молекулы VO. Поэтому для расчетов молекулярной непрозрачности в полосах VO на этих длинах волн мы использовали приближение JOLA. При этом профиль полос TiO рассчитывался в приближении ЛЗЛ.

Сравнение с наблюдениями. Синтетические спектры сравнивались с наблюдаемыми данными — спектрами двух молодых звезд V927 Tau и FN Tau, которые еще не вышли на главную последовательность.

На рис. 2, а—в показано сравнение рассчитанных синтетических спектров в интересующих нас областях со списками линий TiO Плеза и Швенке и наблюдаемого спектра звезды V927 Tau (результаты для звезды FN Tau аналогичны). При сравнении наблюдаемых и теоретически рассчитанных спектров использовалась процедура нормализации, т. е. потоки излучения в выбранной длине волны λ_0 проводились к одному значению. В общем случае выбор λ_0 весьма слабо сказывался на окончательных результатах.

Рассчитанные с этими списками линий TiO спектры неплохо воспроизводят наблюдаемые спектры. Однако использование списков Швенке точнее воспроизводят характерные наблюдаемые детали спектра. Действительно, список Швенке является более полным, так как в нем учтено больше слабых линий.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, на основании сравнения рассчитанных синтетических спектров и наблюдаемых спектров звезд поздних спектральных классов можно сделать вывод о том, что на данное время расчеты со списками линий TiO Швенке наиболее точно воспроизводят наблюдаемые спектры М-субгигантов.

Заметим, что при оценке качества моделирования спектров молодых звезд следует учитывать, что:

- наблюдаемые спектры молодых звезд формируются в атмосферах, где достаточно развиты процессы нестационарной активности — вспышки, хромосферы, истечение вещества и др., которые влияют на их структуру. Известно, что процессы звездной активности проявляются именно во внешних слоях атмосферы, где и формируется спектр поздних М-субгигантов, состоящих из насыщенных молекулярных полос и сильных атомных линий. Проявления звездной активности заметны в спектрах V927 Tau и FN Tau: профили резонансных линий K I и Li I несимметричны, они явно формируются во внешней части атмосферы, где имеется поле разносторонних движений;

- спектры молодых звезд подвержены эффектам вуалирования — на спектры их фотосфер накладываются дополнительное поле излучения,

имеющее вид континуума, формирующееся во внешних слоях атмосферы. Это приводит к уменьшению глубин наблюдаемых линий, что также необходимо учитывать при их анализе (см. [9]). В нашей работе оценка вклада вуалирования в изменение профилей сильных линий поглощения не производилась. Представляется, что часть несовпадений рассчитанных и теоретических профилей линий и молекулярных полос определялась именно этими эффектами.

Наша работа является одним из первых исследований спектров PMS-звезд методом синтетических спектров (см. также [2, 3, 10]). Улучшение списков линий TiO дало бы новые возможности для многих исследований — изучения особенностей их химического состава, структуры и поля скоростей в атмосферах молодых звезд, их изменения в процессе достаточно быстрой эволюции этих объектов.

Авторы благодарят Б. Оппенгеймера за предоставленные спектры звезд V927 Тау и FN Тау, а также Ф. Аллард, П. Хоушилда за предоставленные модели атмосфер в численном виде.

Работа выполнена при частичной поддержке программы SRG Американского астрономического общества.

1. Любчик Ю. П., Павленко Я. В. Моделирование оптических спектров поздних М-карликов // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 4.—С. 324—335.
2. Павленко Я. В. Линия лития в спектрах поздних М-карликов. Случай UX Tau C // Астрон. журн.—2000.—77, № 4.—С. 254—263.
3. Allard F., Hauschildt P. Model atmospheres for M(sub) dwarf stars. I. The base model grid // Astrophys. J.—1995.—445, N 1.—P. 433—450.
4. Chabrier G., Baraffe I., Allard F., Hauschildt P. Evolutionary models for very-low-mass stars and brown dwarfs with dusty atmospheres // Astrophys. J.—2000.—542, N 1.—P. 464—472.
5. Jorgensen U. G. Effects of TiO in stellar atmospheres // Astron. and Astrophys.—1994.—284, N 1.—P. 179—186.
6. Kirkpatrick D. J., Henry T. J., McCathy D. W. A standard stellar spectral sequence in the red/near infrared: classes K5 to M9 // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1991.—77, N 3.—P. 417—440.
7. Kurucz R. L. // 1994.—CD-ROM N 23.
8. Langhoff S. R. Theoretical study of the spectroscopy of TiO // Astrophys. J.—1997.—481.—P. 1007—1015.
9. Magazzu A., Rebolo R., Pavlenko Ya. V. Lithium abundances in classical and weak T Tauri stars // Astrophys. J.—1992.—392, N 1.—P. 159—171.
10. Pavlenko Ya. V., Rebolo R., Martin E. L., Garcia Lopez R. J. Formation of lithium lines in very cool dwarfs // Astron. and Astrophys.—1995.—303, N 3.—P. 807—818.
11. Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., et al. VALD: the Vienna atomic line data base // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1995.—112, N 3.—P. 525—535.
12. Plez B. A new TiO line list // Astron. and Astrophys.—1998.—337, N 1.—P. 495—500.
13. Schwenke D. Opacity of TiO from a coupled electronic state calculation parametrized by ab initio and experimental data // Faraday Discuss.—1998.—109.—P. 321—334.
14. Tsuji T. Molecular Abundances in Stellar Atmospheres. II // Astron. and Astrophys.—1973.—23.—P. 411—431.
15. Tsuji T. Astrophysical applications of approximate methods for molecular opacities — from stars to substellar brown dwarfs // Molecules in the Stellar Environment: Proc. IAU Colloquium N 146. — Copenhagen: Springer, 1993.—P. 79—97.

Поступила в редакцию 04.12.00