

УДК 524.316.7, 535.34

Я. В. Павленко^{1, 2}, М. Шмидт²

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
ур@tao.kiev.ua

²Астрономический центр им. Коперника
Торунь, Польша

Системы полос молекул VO и CaH в спектрах звезд спектрального класса M

Моделируется поглощение излучения системами полос молекул CaH и VO в атмосферах звезд-карликов спектрального класса M. Эти полосы формируют заметные спектральные детали. В расчетах использованы подробные списки линий, рассчитанные разными исследователями. Для молекулы CaH исследована зависимость рассчитанных синтетических спектров от принятого значения потенциала диссоциации. Воспроизведены распределения энергии в спектрах звезд 2MASS2242-2859 (M5.5 V) и SIPS2039-1126 (M7 IV-V). Показано, что наблюдаемые распределения энергии достаточно уверенно описываются теоретическими спектрами, рассчитанными для моделей атмосфер с $T_{\text{эф}}/lgg/[Fe/H] = 3000/4.5/0$ и $2700/4.5/0$ соответственно. Эти оценки согласуются с другими известными результатами.

СИСТЕМИ СМУГ МОЛЕКУЛ VO і CaH У СПЕКТРАХ ЗІР СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАСУ M, Павленко Я. В., Шмідт М. — Моделюється поглинання випромінювання системами смуг молекул CaH і VO в атмосферах зір-карликів спектрального класу M. Ці смуги формують помітні спектральні деталі. У розрахунках використано детальні списки ліній, розраховані різними дослідниками. Для молекули CaH досліджено залежність розрахованих синтетичних спектрів від прийнятого значення потенціалу дисоціації. Розраховані розподіли енергії порівнюються з спостережуваними потоками від двох відомих M-карликів. Відтворено розподіли енергії в спектрах 2MASS2242-2859 (M5.5 V) і SIPS2039-1126 (M7 IV-V). Показано, що спостережувані розподіли енергії досить впевнено описуються теоретичними спектрами, розрахованими для моделей атмосфер з параметрами

$T_{\text{eff}}/l_{\text{gg}}/[Fe/H] = 3000/4.5/0$ і $2700/4.5/0$ відповідно. Ці оцінки узгоджуються з іншими відомими результатами.

SYSTEMS OF VO AND CaH MOLECULE BANDS IN SPECTRA OF STARS OF SPECTRAL TYPE M, by Pavlenko Ya., Schmidt M. — The absorption of radiation by the CaH and VO molecule band systems in atmospheres of dwarf stars of spectral type M is simulated. These bands form visible spectral details in their spectra. Our calculations used detailed line lists obtained by various investigators. For the CaH molecule, we investigated the relationship between the calculated synthetic spectra and accepted value of dissociation potential. The theoretical energy distributions are compared with the observed fluxes from two known M-dwarfs. The energy distributions for spectra of 2MASS2242-2859 (M5.5 V) and SIPS2039-1126 (M7 IV-V) are reproduced. It is found that the observed energy distributions can be fitted well enough with theoretical spectra calculated for atmosphere models with $T_{\text{eff}}/l_{\text{gg}}/[Fe/H] = 3000/4.5/0$ and $2700/4.5/0$, respectively. These estimates are consistent with known results of other investigators.

ВВЕДЕНИЕ

Учет поглощения линиями систем полос молекул CaH и VO представляет интерес при решении многих задач современной астрофизики. Полосы этих молекул появляются в спектрах разнообразных относительно холодных объектах от солнечных пятен до плотных молекулярных облаков межзвездной среды [14, 27]. Эти молекулы обнаруживаются в относительно больших количествах в атмосферах звезд спектрального класса M и более поздних классов, где они являются важными источниками непрозрачности. Тем не менее, отсутствие точных и достаточно полных списков линий для этих молекул налагало до последнего времени серьезные ограничения как на достоверность надежных моделей атмосфер холодных звезд, так и теоретически рассчитанных спектров, которые используются при анализе их наблюдаемых спектров. В ряде случаев это сказывалось на результатах сравнения наблюдаемых и рассчитанных спектров, что необходимо для определения физических параметров звезд, таких как химический состав атмосфер, их эффективные температуры и др.

До недавнего времени информация о структуре электронных состояний и переходах между ними была весьма ограниченной [19]. Например, структура вращательно-колебательных энергетических уровней нижних электронных состояний CaH была исследована уже в первой половине 20 столетия, однако более полная картина электронной структуры переходов этой молекулы сформировалась относительно недавно в результате многочисленных экспериментальных и теоретических исследований. Это объясняется тем, что для возбужденных

уровней CaH весьма существенным фактором является наличие эффектов сильного возмущения различных типов, от локальных сдвигов до относительно сильных взаимодействий между электронными состояниями [31].

Сложность теоретических расчетов молекулы VO достаточно детально описана в работе Альвареса и Плеза [5]. Проблемы расчетов спектра поглощения этой молекулы известны давно [23], тем более что поглощение линиями систем этой молекулы во многом определяет вид оптических спектров M-звезд [24]. До некоторой степени ситуацию спасало то обстоятельство, что у молекулы VO относительно большая приведенная масса $\mu = m_O m_V / (m_O + m_V) = 12.176$, так что для описания поглощения излучения полосами этой молекулы приближение полностью смазанных линий является достаточно хорошим [24]. Однако в большей мере это приближение пригодно для анализа спектров с низким и умеренным разрешением. Для анализа высокодисперсионных спектров требуется применение синтетических спектров, рассчитанных с детальными списками линий поглощения.

ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТОВ

При расчетах синтетических спектров M-звезд мы использовали модели атмосфер из сетки NextGen [15]. Заметим, что по сути в этой работе рассчитываются распределения энергии в спектрах холодных звезд, однако для простоты изложения материала здесь и дальше будет использоваться определение «синтетические спектры». Синтетические спектры рассчитывались в рамках классических приближений по программе WITA618 [23].

Все расчеты в этой работе производились для солнечного химического состава по данным [6]. Система источников непрозрачности в континууме описана в работе [25]. Непрозрачности, определяемые связанно-связанным поглощением атомов и молекул, будут описаны в следующем разделе. Все расчеты синтетических спектров проводились с шагом по длине волны 2.5 пм, эффекты инструментального уширения моделировались посредством свертки рассчитанных спектров с гауссианой, при наличии вращения учитывалась дополнительная свертка с профилем вращения, описанная в работе [1].

Списки линий, использованные в расчетах. Основное внимание в нашей работе уделено расчетам синтетических спектров с учетом списков линий VO и CaH. Были использованы ставшие доступными следующие списки линий этих молекул.

1. Список линий CaH, рассчитанный Веком и др. [31], содержит детальные списки линий поглощения для электронных переходов $A^2 \Sigma^+ - X^2 \Sigma^+$, $B^2 \Sigma^+ - X^2 \Sigma^+$, $C^2 \Sigma^+ - X^2 \Sigma^+$, $D^2 \Sigma^+ - X^2 \Sigma^+$, $E^2 \Sigma^+ - X^2 \Sigma^+$. Эти списки линий поглощения молекулы CaH включают энергии нижних уровней и силы осцилляторов для всех возможных

разрешенных переходов и были получены с использованием самых последних на то время (2003 г.) наборов теоретических кривых потенциальной энергии и дипольных моментов перехода, скорректированных с учетом экспериментальных энергий диссоциации.

2. Новый список линий CaH, рассчитанный недавно (2013 г.) Куроцем [см. сайт <http://kurucz.harvard.edu/molecules/>] для систем полос $A^2 \text{ } ^r X^2$, $B/B^2 \text{ } X^2$, $D^2 \text{ } X^2$. (Далее этот список будем обозначать аббревиатурой WEBK). Кроме того, на этом сайте приведены данные о линиях системы полос $E^2 \text{ } X^2$, рассчитанные в работе [20], а также список вращательных линий системы $X^2 \text{ } X^2$, рассчитанный Ядиным и др. [32]. В отличие от работы [31] спектроскопические константы для электронных переходов $A^2 \text{ } ^r X^2$ и $B/B^2 \text{ } X^2$ были взяты Куроцем из работы [29], а линии системы $D^2 \text{ } X^2$ были рассчитаны с использованием данных [31]. Заметим, что линии поглощения системы полос $X^2 \text{ } X^2$ [32] были формально включены в наши расчеты, однако поскольку они расположены в далеком инфракрасном диапазоне, их анализ выходит за рамки этой работы.

3. Список линий VO, рассчитанный Плезом по методике, применявшейся для расчета списков линий TiO [26]. Детальное описание спектроскопических параметров электронных состояний VO приводится в работе [6].

4. Список WEBK линий поглощения VO, рассчитанный Куроцем; при расчетах систем полос $A^4 \text{ } X^4$, $B^4 \text{ } X^4$, $C^4 \text{ } X^4$ молекулы VO использовались данные о структуре электронных состояний из работ [9—11, 21].

Системы полос CaH и VO молекул в спектрах M-звезд формируются на фоне поглощения других молекул и сильных линий поглощения нейтральных щелочных металлов, среди которых непрозрачность, обусловленная системой полос TiO, доминирует (см. [24]). Поэтому при расчетах синтетических спектров в приближении «линия за линией» ниже мы учитывали поглощение атомными линиями и линиями молекул, рассчитанными в разных исследованиях:

- список атомных линий из базы данных VALD [17];
- линии TiO, рассчитанные Плезом [26];
- список линий CN и MgH были взяты из CD 18 Куроца [18];
- списки линий SrH и FeH, рассчитанные Буровсом и др. [8] и Дуликом и др. [12];
- список линий поглощения H₂O, рассчитанный Барбером и др. [7].

Профили линий поглощения определялись посредством функции Фойгта, постоянные затухания определялись в приближении Унзольда [30]. Микротурбулентная скорость при этом задавалась постоянной по глубине атмосферы и равной $V_t = 2$ км/с.

Критерий наилучшего воспроизведения наблюдаемых спектров. Рассчитанный спектр, наилучшим образом воспроизводящий наблюдаемые потоки в спектре звезды, находился из условия минимума функционала

$$S(f_h) = (F - f_h F^x)^2,$$

где F и F^x — потоки в наблюдаемом и рассчитанном спектрах, f_h — параметр нормировки.

Процедура сравнения наблюдаемых распределений энергии с рассчитанными производилась в интервале длин волн 670.2—849.5 нм, за исключением узкого спектрального диапазона 758.4—766.0 нм. В наблюдаемом спектре на этих длинах волн проявляются сильные молекулярные полосы теллурического спектра.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Положение систем полос CaH и VO в спектрах звезд. Положения и относительная интенсивность молекулярных полос поглощения CaH и VO в теоретическом спектре M-карлика $T_{\text{эф}}/\text{lgg}/[\text{Fe}/\text{H}] = 2600/4.0/0.0$ показаны на рис. 1. Эти синтетические спектры рассчитаны для списков линий Куроца WEBK. На этом рисунке показаны также теоретические потоки, рассчитанные с учетом только полос TiO [26]. Все эти синтетические спектры были свернуты с гауссианой, соответствующей спектральному разрешению $R = \lambda/\Delta\lambda = 3000$. Как уже отмечалось выше, поглощение линиями TiO доминирует в широком спектральном диапазоне. При этом самые сильные системы полос CaH и VO лежат на $\lambda = 690$ и 790 нм соответственно, они также могут быть заметными в спектрах даже в случае солнечной металличности, когда сильное поглощение TiO доминирует. Особый интерес для нас представляет область спектра на $\lambda = 740$ нм, которая попадает между двумя сильными системами полос и молекулы TiO [24]. Здесь находятся головы полос $v = -1$ и $v = +1$ молекул CaH и TiO соответственно. Учет поглощения этими полосами представляется крайне важным для воспроизведения наблюдаемых распределений энергии в спектрах M-карликов солнечной металличности (см. ниже).

Зависимость молекулярных спектров CaH от принятого значения потенциала диссоциации D_0 . В самом общем случае интенсивность молекулярных полос в теоретических спектрах зависит от совокупности задаваемых входных параметров: сил осцилляторов электронных полос, вероятностей вращательно-колебательных переходов, химического состава и др. Использование «правильных» потенциалов диссоциации для молекул при решении системы уравнений химического равновесия также является важным фактором проведения корректного анализа физических условий в звездных атмосферах. В общем случае потенциал диссоциации определяется в результате специальных измерений в физических лабораториях. Однако и здесь есть известная неопределенность. В результате даже самые авторитетные источники зачастую дают отличающиеся значения потенциала диссоциации, в том числе и для относительно простых молекул. На-

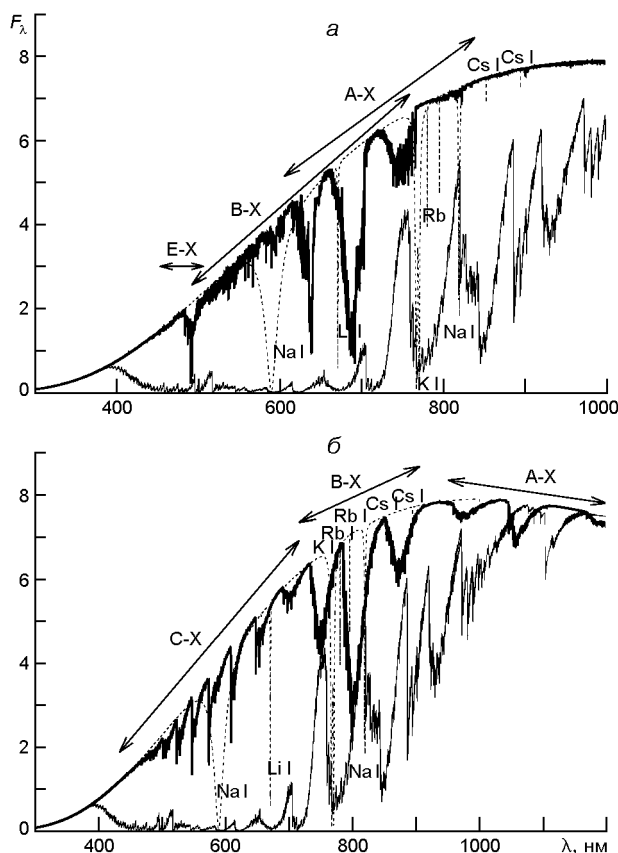


Рис. 1. Положение и интенсивность полос поглощения молекулы CaH и VO (жирные линии на фрагментах а и б соответственно) в теоретическом спектре звезды спектрального класса M2 IV ($T_{\text{эф}}/\lg g/[Fe/H] = 2600/4.0/0.0$) относительно полос поглощения TiO (тонкая линия) и основных линий поглощения нейтральных атомов щелочных металлов (штриховые линии), которые могут наблюдаться в спектрах карликов и субгигантов поздних спектральных классов

пример, для молекулы CaH известны оценки $D_0 = 1.686$ эВ [2], 1.835 эВ [16], 1.974 эВ [32]. Последнее значение, скорее всего, лежит на верхней границе возможных значений D_0 для молекулы CaH (J. Tennyson, частное сообщение).

Основная проблема состоит в том, что использование разных D_0 в расчетах приводит к различиям рассчитанных концентраций молекул, а следовательно, и различиям интенсивностей их полос. Заметим, что такой же эффект может быть получен при изменении сил осцилляторов электронных переходов. Наши расчеты показывают, что изменение D_0 для CaH сказывается на рассчитанных концентрациях этой молекулы по всей толще атмосферы. В конечном счете изменение потенциала диссоциации на 0.5 эВ приводит к эффектам в спектре, которые получаются при увеличении сил осцилляторов электронных переходов CaH на порядок.

Ситуация усугубляется тем, что зачастую с расчетах используются «астрофизически нормированные» значения сил осцилляторов от-

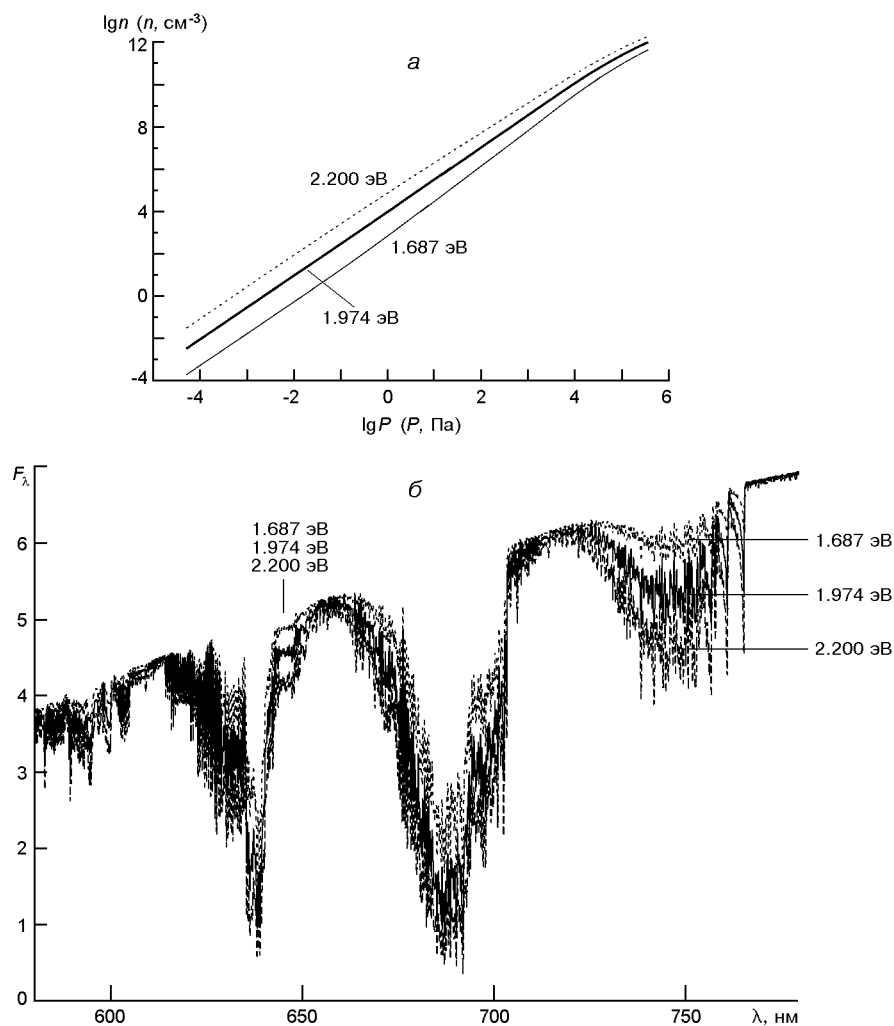


Рис. 2. Зависимость молекулярных концентраций CaH (а) и интенсивности полос системы А-Х (б) от значения принятого потенциала диссоциации (числа возле кривых) и отклики рассчитанных потоков на эти изменения

дельных полос. Естественно, такие по сути эмпирические определения спектроскопических характеристик молекул целесообразно производить при наличии минимального числа неопределенностей в других входных параметрах расчетов.

Сравнение спектров, рассчитанных с использованием различных списков линий. Сравнение синтетических спектров, рассчитанных на основе списков молекулярных линий разных исследователей, представляет самостоятельный интерес. В самой процедуре расчетов таких списков, как правило, допускается ряд упрощений и предположений, так что даже при использовании одинаковых наборов входной информации списки получаются не одинаковыми в разных исследованиях. Конечно, в ряде случаев эти различия не столь значительны, как это получено для списков Швенке [28] и Плезза [26] для молекулы TiO

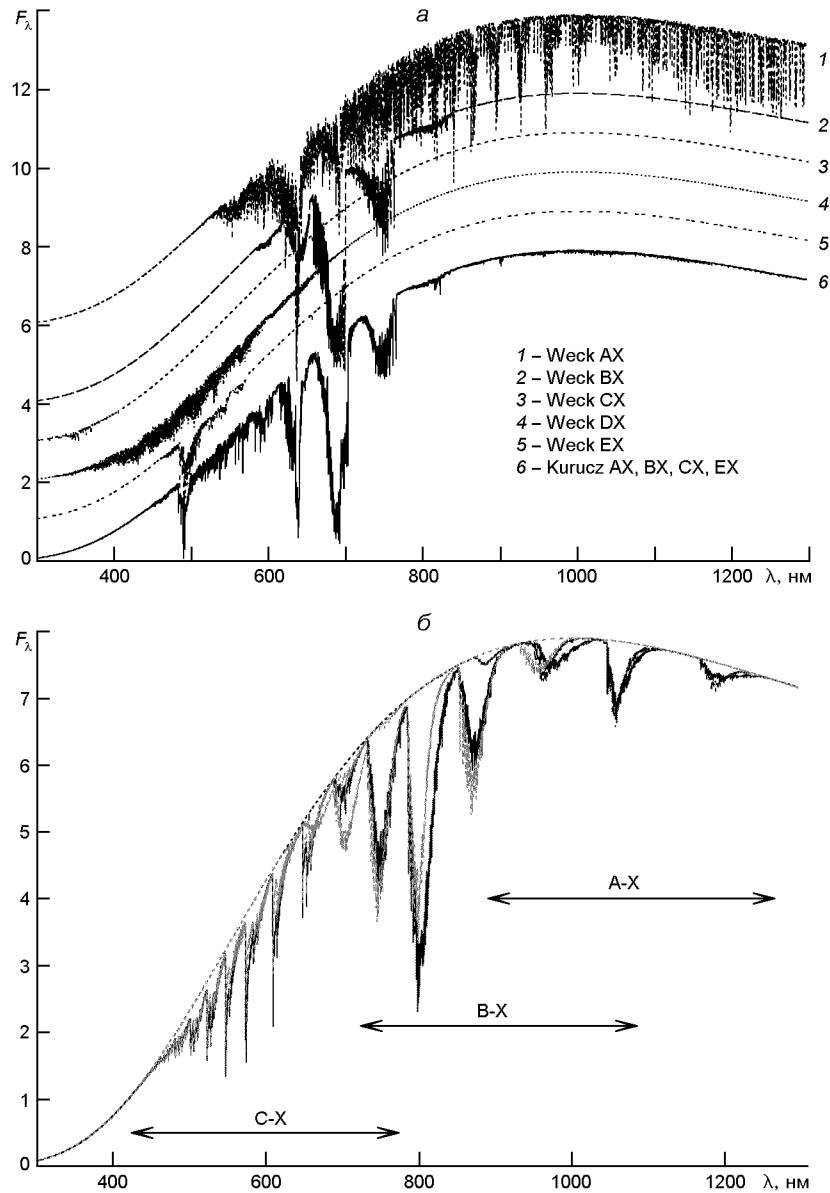


Рис. 3. Значения интенсивности F : *a* — молекулярных полос CaH, рассчитанных для списков линий Куроца (WEBK) и Века [31] для модели атмосферы NextGen [15] с параметрами 2600/4.0/0 (для удобства сравнения данные, полученные для разных списков линий, смещены по вертикали); *б* — то же для списков WEBK линий молекулы VO, рассчитанных Куроцем (черная линия) и Плезом [5] (серая линия)

(см. работу [3]). Для других молекул, например C_2 , приемлемое решение не удалось получить до сих пор никому [33].

Пример сравнения интенсивностей полос CaH в синтетических спектрах М-карлика 2600/4.0/0, рассчитанных для списков линий поглощения Века и др. [31] и Куроца (WEBK), показан на рис. 3. Естественно, в этих расчетах все входные параметры задачи не изменялись, за исключением списков линий. Хорошее согласие получено для по-

ложения и интенсивности спектральных деталей, сформированных линиями поглощения полосами $\nu = 0$ системы B/B^2 X^2 . При этом суммарное поглощение полосами $\nu = +1$ и -1 этой системы по данным [31] больше. Хорошее согласие потоков получено для системы полос E^2 X^2 . Полосы системы C^2 X^2 для списков линий [31] получились интенсивнее. Но самые большие различия получены для системы A^2 X^2 : полосы, рассчитанные со списками [31], заметно превосходят по интенсивности полосы, полученные со списками Куроца.

На рис. 3, б приведены профили систем полос A^4 X^4 , B^4 X^4 , C^4 X^4 молекулы VO, рассчитанные со списками Куроца (WEBK) и Плезе [5]. Профили спектральных деталей, сформированные поглощением полос $\nu = +1, -1$ системы B^4 X^4 , согласуются весьма удовлетворительно. Полосы этой системы $\nu = 0$ сильнее для списков WEBK, но при этом полосы $\nu = +2, -2$, рассчитанные со списками [5], заметно интенсивнее.

Воспроизведение наблюдаемых спектров детальными синтетическими спектрами. До недавнего времени мы использовали для расчета достаточно сильного поглощения системами полос VO приближение «смазанных линий» в версии, описанной в работе [22]. В рамках этого приближения предполагается, что тонкая структура молекулярной полосы, обусловленная поглощением в линиях, которые формируются вследствие переходов между вращательными уровнями, может быть представлена усредненным поглощением. Известно, что это приближение применимо в большей степени для описания профиля поглощения полос двухатомных молекул с большой приведенной массой, таких как TiO и VO. В то же время CaH принадлежит к числу легких молекул (приведенная масса = 0.983), и для нее расчеты с применением детальными списками должны давать лучшие результаты.

Мы применили новые списки линий VO и CaH в наших расчетах при воспроизведении наблюдаемых распределений энергии двух M-карликов 2MASS2242-2859 и SIPS2039-1126. Анализ спектров этих звезд уже проводился в работе [13], где были получены оценки параметров 3000/4.5/0 и 2600/4.5/0, а поглощение полосами TiO и VO рассчитывалось в рамках приближения JOLA. В настоящей работе мы воспроизвели наблюдаемые распределения энергии в спектрах этих двух M-карликов при учете детального поглощения линиями поглощения молекул TiO и VO, расчеты производились с новыми списками Куроца (WEBK). Получено хорошее согласие рассчитанных и наблюдаемых спектров двух M-карликов с различными эффективными температурами. Более того, формальное определение этих параметров посредством процедуры поиска минимальных различий между наблюдаемыми и теоретическими спектрами показало согласие с данными работы [13], в которой использована отличная от нашей методика учета поглощения CaH и VO.

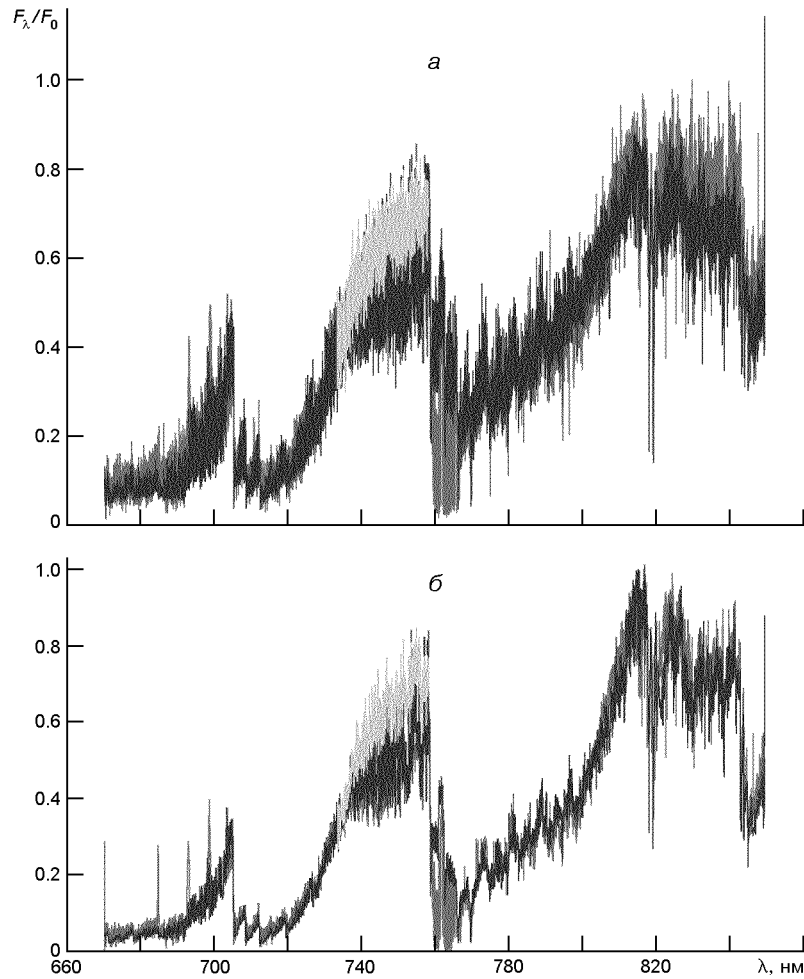


Рис. 4. Значения наблюдаемых и рассчитанных потоков излучения: *а* — в спектре 2MASS2242-2859 (темно-серые линии — наблюдения, светло-серые линии — модель 3000/4.5/0, $c_e = 1$, черные линии — модель 3000/4.5/0, $c_e = 10$); *б* — в спектре SIPS2039-1126 (темно-серые линии — наблюдения, светло-серые линии — модель 2600/4.5, $c_e = 1$, черные линии — модель 2600/4.5, $c_e = 10$)

Представляется уместным отметить ряд результатов, которые были получены при воспроизведении наблюдаемых спектров. В основном они имеют отношение к воспроизведению спектрального распределения энергии в спектрах М-карликов в области $\lambda = 740$ нм. Эта область попадает на промежуток между сильными полосами поглощения и молекулы TiO, где теоретические расчеты показывали избыток потока по сравнению с наблюдениями [24]. На эту спектральную область попадают как полосы $\nu = +1$ системы $B^4 \quad X^4$ молекулы VO, так и полосы $\nu = -1$ системы $A^2 \quad X^2$ молекулы CaH. Учет поглощения этих молекул с оригинальными списками Куроца не позволяет решить эту проблему. Однако ситуация улучшается, если увеличить на порядок силы осцилляторов линий поглощения полос $\nu = -1$ системы $A^2 \quad X^2$ молекулы CaH или увеличить в четыре ра-

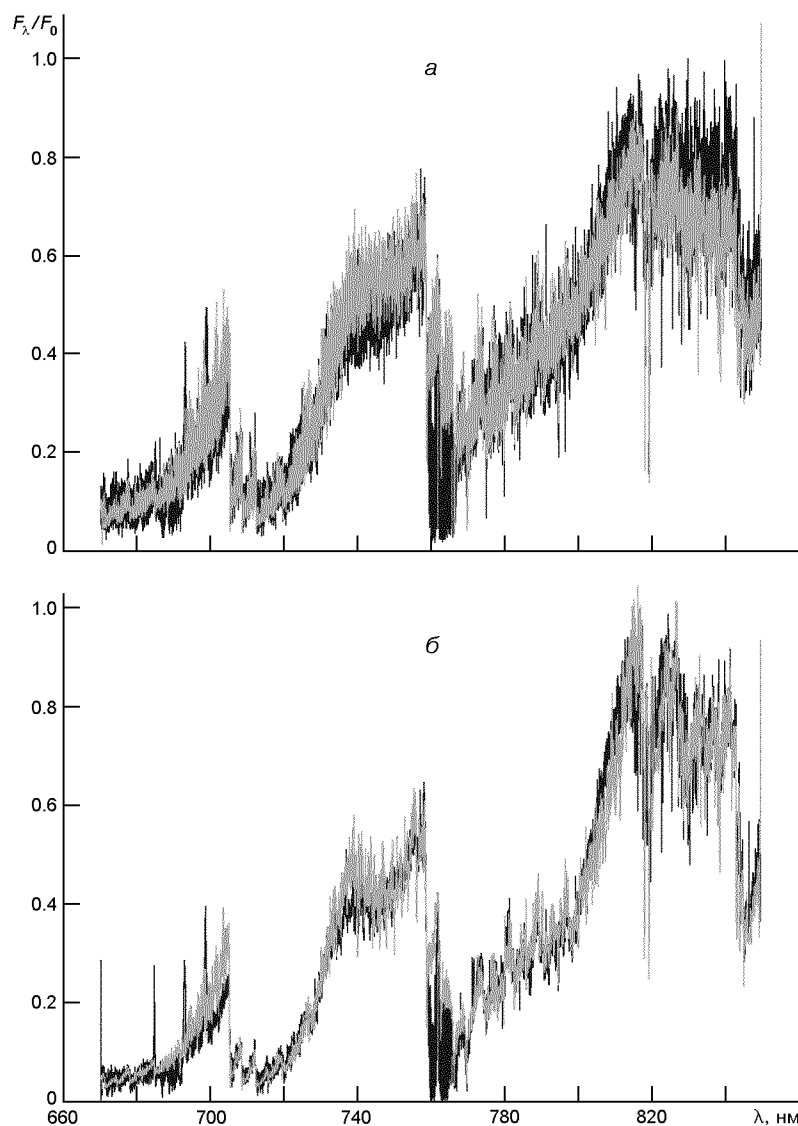


Рис. 5. Значения наблюдаемых (темно-серые линии) и рассчитанных (светло-серые линии) потоков излучения в спектрах 2MASS2242-2859 (*а*, модель 3000/4.5/0) и SIPS2039-1126 (*б*, модель 2700/4.5/0). Силы осцилляторов полос $\nu=+1$ молекулы VO увеличены в четыре раза

за силы осцилляторов линий поглощения полос $\nu = +1$ системы $B^4 - X^4$ молекулы VO (см. рис. 4 и 5 соответственно). При этом улучшение воспроизведения заметно как визуально, так и подтверждается расчетом параметра минимизации S (см. рис. 6 для случая увеличения интенсивности полос молекулы CaH).

ОБСУЖДЕНИЕ

Основной задачей этой работы был сравнительный анализ разных списков линий CaH и VO, и проверка их применимости при воспроиз-

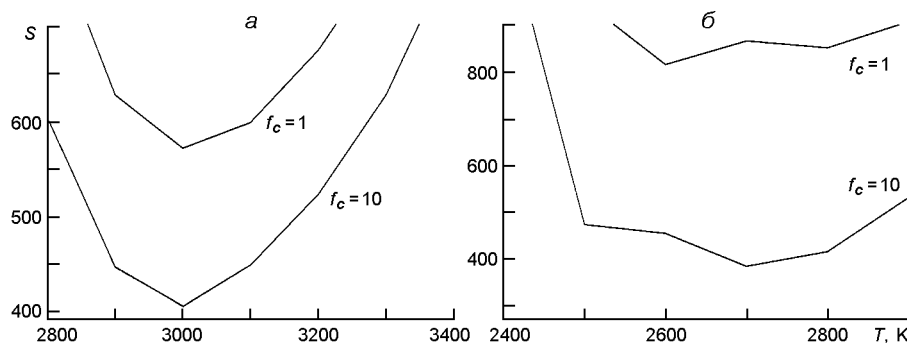


Рис. 6. Значения параметра S для спектров 2MASS2242-2859 (а) и SIPS2039-1126 (б) при двух значениях $f_c = 1$ и 10 сил осцилляторов системы полос B / B^2 X^2 молекулы CaH (см. спектры на рис. 4)

ведении наблюдаемых спектров звезд спектрального класса M. Наши расчеты производились для случая атмосфер солнечного химического состава, так что рассмотрение экзотических объектов низкой металличности с экстремально сильными полосами CaH осталось за рамками работы. Мы предполагаем провести их исследование в следующих работах.

В наших расчетах мы использовали разные оригинальные списки линий. Проведен ряд численных экспериментов с ними, чтобы выяснить потенциальные возможности их модификации с целью улучшения воспроизведения наблюдаемых спектров. Например, формальное увеличение на порядок силы осцилляторов системы полос B / B^2

X^2 позволило улучшить согласие рассчитанных и наблюдаемых спектров в области 740.0 нм. В любом случае этот результат показывает необходимость дальнейшего улучшения списков линий. Об этом говорят также существенные различия интенсивностей отдельных систем полос, рассчитанных в разных исследованиях.

Однако при всем этом наши определения эффективных температур двух M-карликов, которые были найдены посредством сравнения рассчитанных спектров с детальными списками линий CaH и VO, показало их хорошее согласие с известными величинами, определенными другими методами. Это показывает применимость новых списков линий в подобного рода расчетах.

Работа выполнялась в рамках исследований и при поддержке гранта FP7 POSTAGBinGALAXIES (N 269193), International Research Staff Exchange Scheme с использованием баз данных SIMBAD, VALD, ADS. Авторы благодарны Р. Куроцу, П. Веку, Б. Плезу и группе EXOMOL под руководством Дж. Теннисона за проведение расчетов молекулярных списков линий. Особая благодарность Дж. Кларку и М. К. Галвез-Ортис за предоставленные спектры 2MASS2242-2859 SIPS2039-1126, а также Л. Яковине за ряд полезных советов.

1. Грей Д. Ф. Наблюдения и анализ звездных фотосфер. — М.: Мир, 1980.—248 с.
2. Гурвич Л. В., Вейц И. В., Медведев В. А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: В 4-х т. — М.: Наука, 1982.— 560 с.
3. Любчик Ю. П., Павленко Я. В. Моделирование спектров молодых М-карликов // Кинематика и физики небес. тел.—2001.—17, № 1.—С. 17—23.
4. Adam A., Barnes M., Berno B., et al. Rotational and hyperfine structure in the $B^4 X^4$ (0,0) band of VO at 7900 Å: Perturbations by the a^2 , $v = 2$ level // J. Mol. Spectrosc.—1995.—170.—P. 94—130.
5. Alvarez R., Plez B. Near-infrared narrow-band photometry of M-giant and Mira stars: models meet observations // Astron. and Astrophys.—1998.—330.—P. 1109—1119.
6. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar // Geochim. Cosmochim. Acta.—1989.—53.—P. 197—214.
7. Barber R. J., Tennyson J., Harris G. J., Tolchenov R. A high-accuracy computed water line list // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2006.—368.—P. 1087—1094.
8. Burrows A., Ram S. R., Bernath P., et al. New CrH opacities for the study of L and brown dwarf atmospheres // Astrophys. J.—2002.—577.—P. 986—992.
9. Cheung A., Hajigeorgiou P., Huang G., Huang S. Rotational structure and perturbations in the $B^4 X^4$ (1, 0) band of VO // J. Mol. Spectrosc.—1994.—163.—P. 443—458.
10. Cheung A., Hansen R., Merer A. Laser spectroscopy of VO: Analysis of the rotational and hyperfine structure of the $C^4 X^4$ (0, 0) band // J. Mol. Spectrosc.—1982.—91.—P. 165—208.
11. Cheung A., Taylor A., Merer A. Fourier transform spectroscopy of VO: Rotational structure in the $A^4 X^4$ system near 10 500 Å // J. Mol. Spectrosc.—1982.—92.—P. 391—409.
12. Dulick M., Bauschlincher C. W., Burrows A. Line intensities and molecular opacities of the $FeH F^4_i X^4_i$ transition // Astrophys. J.—2003.—594.—P. 651—663.
13. Galvez Ortiz M. C., Kuznetsov M., Clarke J. R. A., et al. Spectroscopic signatures of youth in low-mass kinematic candidates of young moving groups // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2014.—439.—P. 3890—3907.
14. Gray D. F. A Digital spectral classification atlas. — Appalachian State University, 2009.—58 p.
15. Hauschildt P. H., Allard F., Baron E. The NextGen model atmosphere grid for 3000 T_{ef} 10000 // Astrophys. J.—1999.—512.—P. 377—385.
16. Huber K. P., Herzberg G. Constants of diatomic molecules. — N. Y.: Van Nostrand Reinolds, 1979.—716 p.
17. Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., et al. VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1999.—138.—P. 119—133.
18. Kurucz R. L. Data Bank.—1993.—CD-ROM N 1 23. — Cambridge, MA: Smithsonian. Astrophys. Obs.
19. Leininger T., Jeung G.-H. Ab initio calculation of rovibronic transition spectra of Ca H // J. Chem. Phys.—1995.—103.—P. 3942—3949.
20. Li G., Harrison J. J., Ram R. S., et al. Einstein A coefficients and absolute line intensities for the $E^2 X^2$ transition of CaH // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.—2012.—113.—P. 67—74.
21. Merer A., Huang G., Cheung A., Taylor A. New quartet and doublet electronic transitions in the near-infrared emission spectrum of VO // J. Mol. Spectrosc.—1987.—

- 125.—P. 465—503.
22. *Nersisyan S. E., Shavrina A. V., Yaremchuk A. A.* Analysis of the molecular spectra of N stars on the basis of model atmospheres // *Astrophysics*.—1989.—**30**.—P. 147—174.
23. *Pavlenko Ya. V.* Analysis of the spectra of two Pleiades brown dwarfs: Teide 1 and Calar 3 // *Astrophys. and Space Sci.*—1997.—**253**.—P. 43—53.
24. *Pavlenko Ya. V.* Молекулярные полосы в спектрах звезд спектрального класса M // *Astron. Rept.*—2014.—**58**, N 11.—P. 825—834.
25. *Pavlenko Y., Zapatero Osorio M. R., Rebolo R.* On the interpretation of the optical spectra of L-type dwarfs // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**355**.—P. 245—255.
26. *Plez B.* A new TiO line list // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**337**.—P. 495—500.
27. *Richardson R. S.* An investigation of molecular spectra in sun-spots // *Astrophys. J.*—1931.—**73**.—P. 216—249.
28. *Schwenke D.* Chemistry and physics of molecules and grains in space // *Faraday Discussions*. — London: The Faraday Division of the Royal Society of Chemistry, 1998.—N 109.—321 p.
29. *Shayesteh A., Ram S. R., Bernath P. F.* Fourier transform emission spectra of the $A^2 \Sigma^+ \rightarrow X^2 \Sigma^+$ and $B^2 \Sigma^+ \rightarrow X^2 \Sigma^+$ band systems of CaH // *J. Mol. Spectrosc.*—2013.—**288**.—P. 46—51.
30. *Unsold A.* Physik der Sternatmosphären: 2nd ed. — Berlin: Springer, 1955.—461 p.
31. *Weck P. F., Stancil P. C., Kirby K.* Theoretical study of the rovibrationally-resolved spectra of CaH // *J. Chem. Phys.*—2003.—**118**.—P. 9997—10005.
32. *Yadin B., Veness T., Conti P., et al.* ExoMol line lists. I. The rovibrational spectrum of BeH, MgH and CaH in the $X^2 \Sigma^+$ state // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2012.—**425**.—P. 34—43.
33. *Yakovina L. A., Pavlenko Ya. V.* Atmospheric lithium abundances of the carbon giants AQ And, HK Lyr, UX Dra, and WZ Cas // *Astr. Rept.*—2012.—**56**.—P. 63—76.

Статья поступила в редакцию 07.07.14