

УДК 524.316.7.082

Моделирование оптических спектров поздних М-карликов

Ю. П. Любчик, Я. В. Павленко

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

Обсуждаются результаты моделирования оптических спектров ($\lambda\lambda$ 600—900 нм) М-карликов: GJ51 (M5 V) и GJ1111 (M6.5 V) и молодого коричневого карлика Teide1 (V M8). Рассмотрена зависимость спектров звезд от эффективной температуры и ускорения свободного падения. Получены их эффективные температуры: 3100, 2900 и 2700 К соответственно. Для участков $\lambda\lambda$ 810.6—814.6 нм, 668.8—672.8 нм и 608.3—612.3 нм рассчитаны синтетические спектры с разными приближениями учета молекулярной непрозрачности — полностью перекрывающихся линий (JOLA) и «линия за линией» для списка линий TiO Плеза (1998). Показано, что для насыщенных молекулярных полос, определяющих вид спектра поздних М-карликов, эти приближения дают сравнимые результаты. Исследовано влияние хромосфероподобных структур на молекулярный спектр М-карликов.

МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ СПЕКТРІВ ПІЗНІХ М-КАРЛИКІВ, Любчик Ю. П., Павленко Я. В. — Обговорюються результати моделювання оптичних спектрів ($\lambda\lambda$ 600—900 нм) М-карликів: GJ51 (M5 V) та GJ1111 (M6.5 V) й молодого коричневого карлика Teide1 (V M8). Розглядається залежність спектрів зірок від ефективною температури та прискорення вільного падіння. Отримані їхні ефективні температури: 3100, 2900 та 2700 К відповідно. Для ділянок спектру $\lambda\lambda$ 810.6—814.6, 668.8—672.8 і 608.3—612.3 нм розраховані синтетичні спектри з різними наближеннями врахування молекулярної непрозорості — «ліній, що повністю перекриваються» (JOLA) та «лінія за лінією» для списку ліній TiO Плеза (1998). Було показано, що для насичених молекулярних полос, які визначають вигляд спектру пізніх М-карликів, ці наближення дають близькі результати. Досліджено вплив хромосфероподібних структур на молекулярний спектр М-карликів.

MODELING OF THE OPTICAL SPECTRA OF LATE M-DWARFS, by Lyubchik Yu. P., Pavlenko Ya. V. — We discuss the results of modeling of the optical spectra ($\lambda\lambda$ 600—900 nm) of two late M dwarfs, GJ51 (V M5) and GJ1111 (V M6.5), and the young brown dwarf Teide1 (V M8). The dependence of the spectra on effective temperature and gravity is studied. From the fit of the calculated spectra to the observed ones we determined the effective temperatures $T_{\text{eff}} = 3100$ K and 2900 K for GJ51 and GJ1111, respectively, and

$T_{\text{ef}} = 2700 \text{ K}$ for Teide1. The synthetical spectra at $\lambda\lambda$ 810.6—814.6 nm, 668.8—672.8 nm, and 608.3—612.3 nm were simulated using both the just-overlapping (JOLA) and the line-by-line (LBL) approximations for Plez's (1998) TiO line list. We show that these approximations give similar results for the saturated molecular bands which govern the optical spectra of late M-dwarfs. The impact of chromospheric-like structures on the molecular spectra of M-dwarfs was also considered.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение звезд поздних спектральных классов, в частности М-карликов, представляет несомненный интерес для современной астрофизики. Во-первых, эти звезды являются наиболее распространенными среди звездного населения Галактики. Во-вторых, среди них имеется подмножество молодых коричневых карликов — квазизвездных объектов, занимающих промежуточную область на диаграмме Герцшпрунга—Рессела между маломассивными звездами, т. е. космическими объектами с внутренними источниками энергии, и планетами-гигантами. В частности, интерес к изучению М-карликов в рассеянных скоплениях (Плеяды, Гиады, α Per) определяется тем, что вследствие их относительной близости существует вероятность среди М-карликов сравнительно молодых скоплений обнаружить коричневые карлики [24, 25].

Кроме того, эти звезды являются уникальными физическими объектами, позволяющими тестировать существующие гипотезы о звездной эволюции на основе исследования временных изменений содержания лития (а также дейтерия, бора, бериллия) в их атмосферах.

Отметим, что несмотря на довольно большое число работ, посвященных численному моделированию физических условий в атмосферах поздних М-карликов и интерпретации их спектров, все механизмы формирования спектров этих звезд еще далеко не выяснены [11, 13].

Одна из важных задач, решаемых в этой работе, состояла в проверке, насколько хорошо наша методика расчетов синтетических спектров [14] может быть применима для описания спектров М-карликов спектральных классов М5—М8. Для анализа в этой работе были выбраны два М-карлика Плеяд GJ1111 и GJ51. Известно, что спектры молодых коричневых карликов весьма схожи со спектрами поздних М-карликов спектральных классов М7—М8 (см. [12, 13]). В рамках этой работы мы рассчитали также теоретические спектры молодого коричневого карлика Teide 1 (V M8), используя новые данные о системах полос TiO [17, 19] и появившиеся недавно модели атмосфер, рассчитанные с учетом влияния пыли на их структуру [23]. Молодые коричневые карлики Плеяд лежат в области диаграммы Герцшпрунга—Рессела, где эти эффекты становятся значимыми.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

При расчетах синтетических спектров использовалась программа WITA6 [14]. Расчеты проводились в рамках обычных предположений: ЛТР, гидростатическое равновесие для одномерных моделей атмосфер, отсутствие стоков и источников энергии. Система уравнений ионизационно-диссоциативного равновесия рассчитывалась для среды, состоящей из атомов, ионов и молекул; учитывалось около 100 компонентов [15]. Необходимые данные брались из работы [21]. Для TiO мы приняли потенциал диссоциации $D_0 = 6.92$ эВ; зависимость наших результатов от величины D_0 незначительная вследствие проявления эффектов насыщения для этой молекулы.

Данные об атомных линиях брались из базы данных VALD [16]. Для областей линий Li $\lambda\lambda$ 610.3, 670.8, 812.6 нм расчеты молекулярной непрозрачности проводились в двух приближениях — «линия за линией» и в рамках модели полностью перекрывающихся линий JOLA (just overlapping line approximation) [4]. В расчетах «линия за линией» использовались списки молекулярных линий TiO [17]. При расчете оптических спектров М-карликов молекулярная непрозрачность рассчитывалась в приближении JOLA. В рамках этого приближения предполагается, что суммарный эффект блендирования множества вращательных линий можно представить в виде псевдоконтинуума. В общем случае монохроматический коэффициент молекулярного поглощения определяется суммой многих электронно-колебательных полос нескольких молекул. В нашем случае расчеты велись с учетом переходов между колебательными уровнями с $0 \leq v', v'' \leq 9$. В расчетах учтены 30 систем полос различных молекул, спектроскопические константы для них приведены в таблице.

Синтетические спектры М-карликов рассчитывались для моделей атмосфер с $2600 \text{ K} < T_{\text{эф}} < 3300 \text{ K}$, $\text{lg}g = 3.5, 5.0, 5.5$ и металличностями $[\mu] = 0$ из сетки [6], а также «dusty» модели Цудзи с $T_{\text{эф}} = 2600 \text{ K}$, $\text{lg}g = 5.0$ и $[\mu] = 0$ [23]. В последнем случае расчеты проводились для моделей атмосфер типа А, В, С. Согласно определению Цудзи [23] случай А соответствует расчетам без учета пыли, В-модели рассчитываются для условий динамического равновесия фазового перехода «пыль—газ», С-модели рассчитываются для случая отдельных пылевой и газовой составляющих («segregation phase»).

Данные о молекулярных полосах, учтенных в работе

Молекула	Система	Переход	Силы осцилляторов f_e		Источник данных о факторах Франка—Кондона Q_{ij}	$\lambda_1 \dots \lambda_2$, нм
VO		$B^4\Pi \leftrightarrow X^4\Sigma^-$	0.04	[5]	[5]	740 ... 930
VO	A – X		0.0026	[5]	[5]	946 ... 1280
TiO	φ	$b^1\Pi \rightarrow d^1\Sigma^+$	0.02	[8]	[3]	790 ... 1800
TiO	γ'	$B^3\Pi \leftrightarrow X^3\Delta$	0.08	[8]	[3]	480 ... 850
TiO	γ	$A^3\Phi \leftrightarrow X^3\Delta$	0.09	[8]	[3]	540 ... 1055
TiO	ε		0.0024	[8]	[3]	750 ... 947
TiO	δ	$b^1\Pi \leftrightarrow a^1\Delta$	0.02	[8]	[3]	645 ... 1280
TiO	β	$c^1\Phi \leftrightarrow a^1\Delta$	0.15	[8]	[3]	480 ... 700
TiO	α	$C^3\Delta \leftrightarrow X^3\Delta$	0.10	[8]	[3]	390 ... 775
SO		$A^3\Pi \leftrightarrow X^3\Sigma^-$	0.21	[2]	[3]	246 ... 380
SiO		$D^1\Pi \leftrightarrow X^1\Sigma^+$	0.16	[2]	[3]	207 ... 330
NO	$\pi 3p \delta$ bands	$C^2\Pi_r \leftrightarrow X^2\Pi$	0.015	[2]	[3]	207 ... 275
NO	β bands	$B^2\Pi_r \leftrightarrow X^2\Pi$	0.0035	[2]	[3]	200 ... 380
NO	$\sigma 3s \gamma$ bands	$A^2\Sigma^+ \leftrightarrow X^2\Pi_r$	0.0020	[2]	[3]	195 ... 340
MgO		$B^1\Sigma^+ \rightarrow X^1\Sigma^+$	0.048	[2]	[3]	454 ... 544
MgH		$A^2\Pi_r \leftrightarrow X^2\Sigma^+$	0.059	[2]	[3]	410 ... 640
CO		$A^1\Pi \leftrightarrow X^1\Sigma^+$	0.12	[2]	[3]	114 ... 280
CN		$A^2\Pi_i \leftrightarrow X^2\Sigma^+$	0.0011	[2]	[3]	400 ... 563
CN		$B^2\Sigma^+ \leftrightarrow X^2\Sigma^+$	0.036	[2]	[3]	240 ... 600
BO		$A^2\Pi \leftrightarrow X^2\Sigma^+$	0.035	[2]	[3]	290 ... 570
AlO		$B^2\Sigma^+ \leftrightarrow X^2\Sigma^+$	0.039	[2]	[3]	404 ... 580

Для сравнения с наблюдаемыми спектрами производилась свертка рассчитанных спектров и инструментального профиля с полушириной $\Delta_g = 0.3$ нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Молекулярный и атомный спектры М-карликов. На рис. 1 представлен теоретический спектр для модели атмосферы М-карлика $T_{эф}, I_{gg}, [\mu] = 2900, 5.0, 0$. На нем вертикальными линиями отмечены положения самых сильных линий щелочных металлов, имеющих относительно низкие потенциалы ионизации. Здесь же представлена идентификация отдельных деталей спектра, обусловленных молекулярным поглощением.

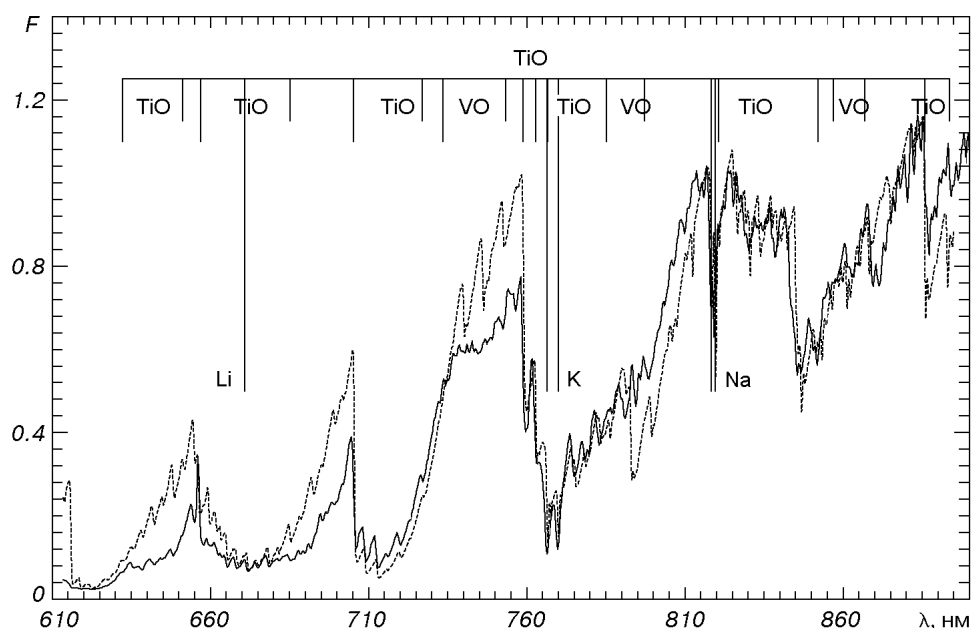


Рис. 1. Теоретический спектр, рассчитанный для модели атмосферы $T_{эф}, I_{gg}, [\mu] = 2900$ К, 5.0, 0 (штриховая линия) и наблюдаемый спектр М-карлика GJ1111 (сплошная линия). Отмечены положения сильных линий нейтральных щелочных металлов и полосы TiO и VO

Форма оптических спектров М-карликов определяется молекулярным поглощением полос TiO и VO, относительный вклад которых в формирование спектра исследовался в ряде работ (см. [15]). В то же время некоторые атомарные линии в спектрах достаточно сильны и вполне могут быть применены для количественного анализа. Особый интерес представляет субординатный дублет натрия Na $\lambda\lambda$ 818.3, 819.5 нм, который может быть использован для оценки ускорения свободного падения [15]. Далее, резонансный дублет лития Li $\lambda\lambda$ 670.8 нм используется для «литиевого теста», позволяющего выделить коричневые карлики из множества маломассивных звезд низкой светимости [18].

При определении параметров М-звезд ($T_{эф}, I_{gg}, [\mu]$), в отличие от звезд более ранних спектральных классов (см. [1]), весьма трудно подобрать количественные критерии, что обусловлено несколькими причинами. Во-первых, интенсивное молекулярное поглощение TiO и VO в спектрах этих звезд не позволяет выделить уровень континуума. Во-вторых, синтетиче-

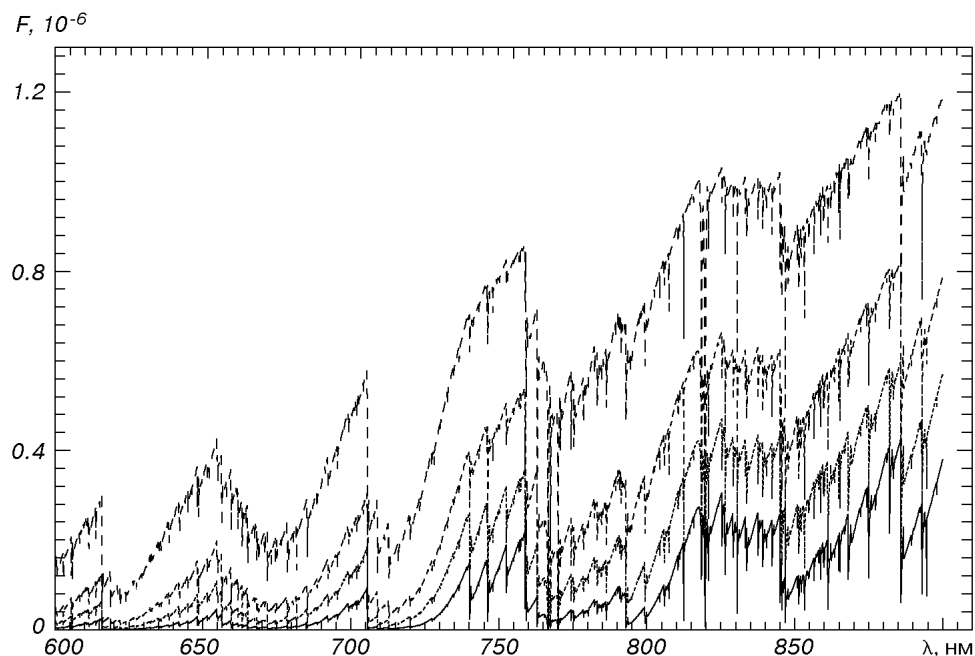


Рис. 2. Рассчитанные распределения энергии в спектрах М-карликов с $T_{\text{эф}} = 2500, 2700, 2900, 3100$ К (сплошная, пунктирная, короткие и длинные штрихи соответственно). Значения $\lg g = 5.0$

ские спектры очень чувствительны к изменению температуры (рис. 2), но зависимость от ускорения свободного падения в целом не очень сильная (рис. 5). В то же время отдельные детали спектра, например дублет Na $\lambda\lambda$ 818.3, 819.5 нм, сильно чувствительны к изменению g . Это может приводить к ошибкам $T_{\text{эф}}$ около 100–200 К и $\lg g$ около 0.5 (изменение металличности в этой работе не рассматривалось, так как исследуемые звезды заведомо имеют солнечный химический состав).

Определение $T_{\text{эф}}$ М-карликов. Для значения параметра $\lg g = 5.0$ были просчитаны синтетические спектры М-карликов с эффективными температурами от 2600 до 3300 К (рис. 2).

После процедуры нормализации, т. е. уравнивания потоков на λ 700 нм, рассчитанные потоки излучения F_{λ} сравнивались с наблюдаемыми распределениями энергии в спектрах исследуемых М-карликов. Эта процедура позволила определить их эффективные температуры.

Синтетические спектры М-карликов наилучшим образом совпадают с наблюдаемыми при $T_{\text{эф}} = 2900$ и $T_{\text{эф}} = 3100$ К для GJ1111 и GJ51 соответственно (рис. 3, а и 3, б). Эти оценки согласуются со значениями из работы [9], но несколько выше, чем в работах [5, 8, 21].

Расчеты для коричневого карлика Teidel велись также в рамках моделей Аллард и Хоушилда (АН5) [6] без учета влияния пыли. Получено значение $T_{\text{эф}} = 2700$ К (рис. 4, а). Как уже отмечалось выше, наличие пыли начинает сказываться на структуре модели атмосферы М-карлика при $T_{\text{эф}} < 2700$ К [23]. В настоящее время «dusty»-модели атмосфер рассчитаны для звезд с $T_{\text{эф}} < 3000$ К. Лучшее согласие рассчитанного распределения энергии для В-моделей Цудзи [23] и наблюдаемого спектра Teidel было получено для $T_{\text{эф}}, \lg g, [\mu] = 2600$ К, 5.0, 0 (рис. 4, б), т. е. меньшего значения $T_{\text{эф}}$, чем для классических моделей атмосфер [4]. Этот результат объясняется тем, что при учете влияния пылевого компонента температура в надфотосферных слоях моделей атмосфер с $T_{\text{эф}} < 2800$ К повышается.

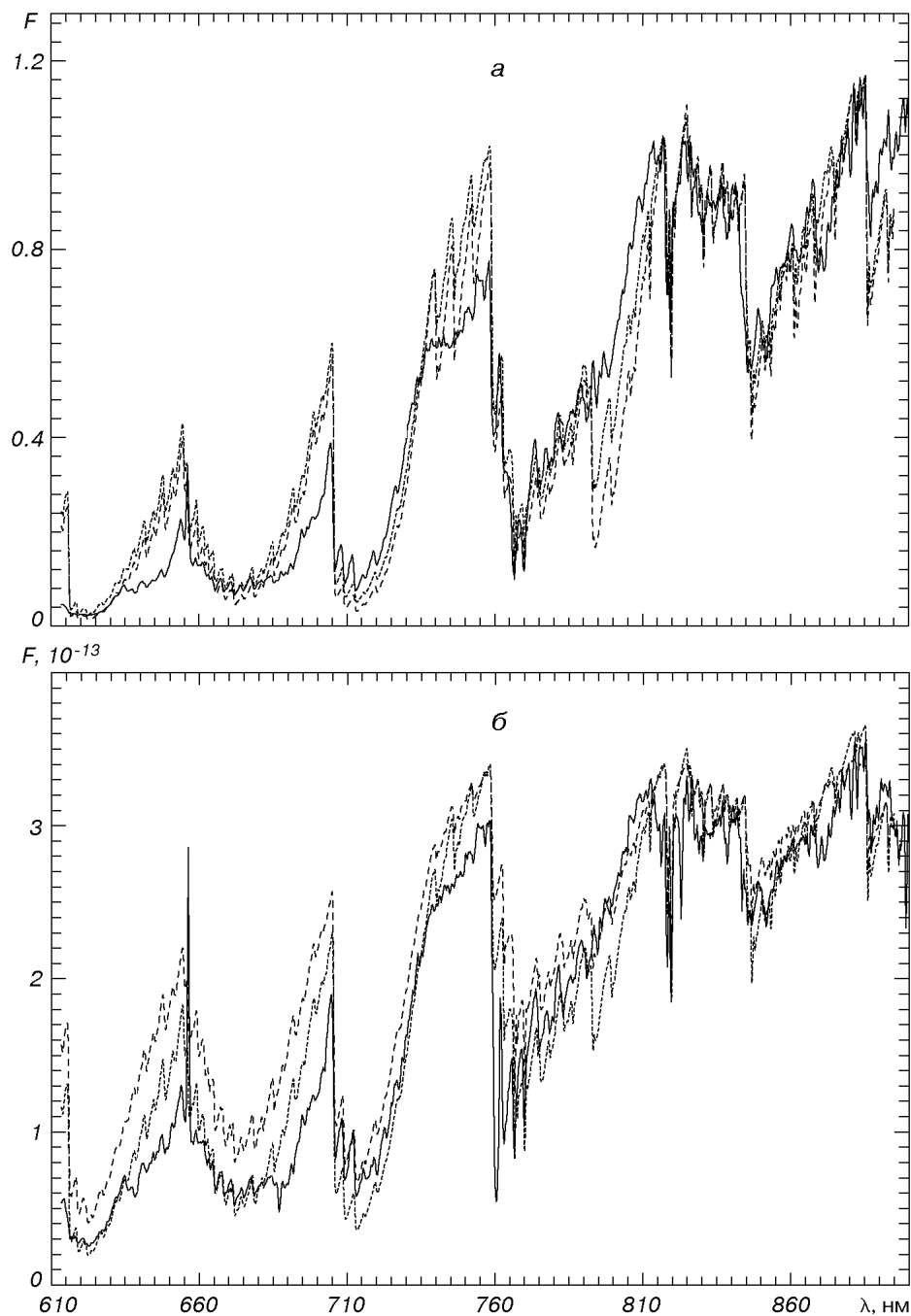


Рис. 3. Сравнение наблюдаемых (сплошная линия) и синтетических спектров GJ1111 (а) и GJ51 (б). Пунктир — модельный спектр для $T_{\text{эф}} = 2900$ К, штриховая — 2800 К (а) и 3100/5.0, 3300/5.0 (б) соответственно

Определение I_{gg} в атмосферах М-карликов. В целом распределение энергии в спектрах М-карликов очень слабо зависит от g (рис. 5). Для оценки g в атмосферах поздних М-карликов используют дублет Na $\lambda\lambda$ 818.3, 819.5 нм.

Профиль спектральной области $\lambda\lambda$ 810—830 нм в значительной степени определяется линиями полос поглощения TiO. Однако в коротковолновую часть этой области попадает «хвост» полосы $(0, 0)$ системы $B^4 \Pi_{(r)} - X^4 \Sigma^-$

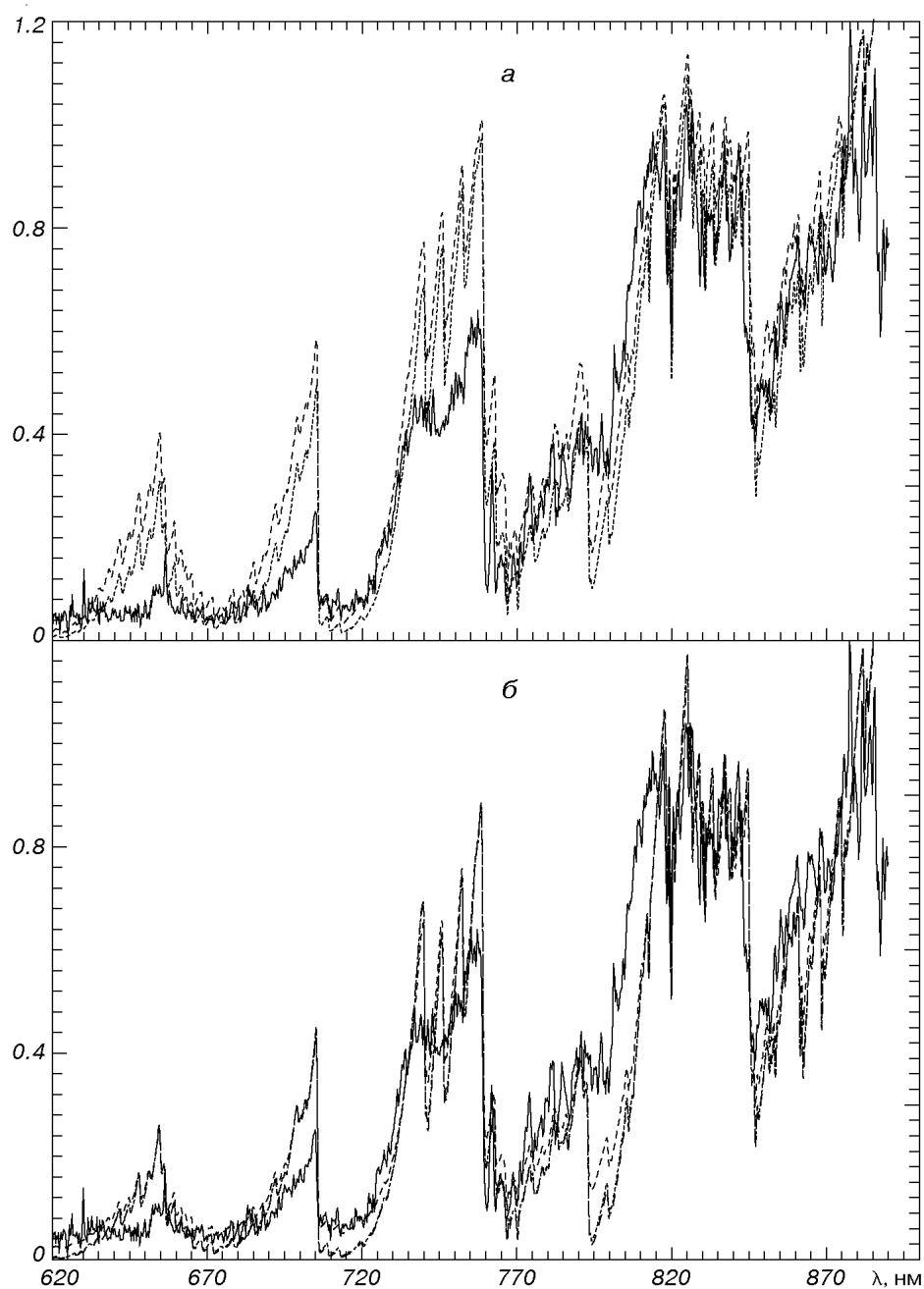


Рис. 4. Сравнение наблюдаемого распределения энергии в спектре Teidel (сплошная линия) и рассчитанных для моделей атмосфер Аллард и Хоушилда 2700, 5.0, 0 (пунктирная линия) и 2800, 5.0, 0 (штриховая линия) (а) и моделей атмосфер 2600, 5.0, 0 (б) из сетки Судзи [23]: А — модель без пыли, В — динамическое равновесие фазового перехода «пыль-газ», С — пыль и газ существуют независимо (пунктирная, короткая штриховая и длинная штриховая линии соответственно)

молекулы VO [13], так что расчет синтетических спектров с учетом только линий TiO дает завышенные значения потоков на $\lambda\lambda$ 810–818 нм (рис. 6, а). Чтобы учесть эти факторы для расчета поглощения TiO использовалось приближение «линия за линией», а поглощение полосой $B^4\Pi_{(r)} - X^4\Sigma^-$ молекулы VO рассчитывалось в приближении JOLA.

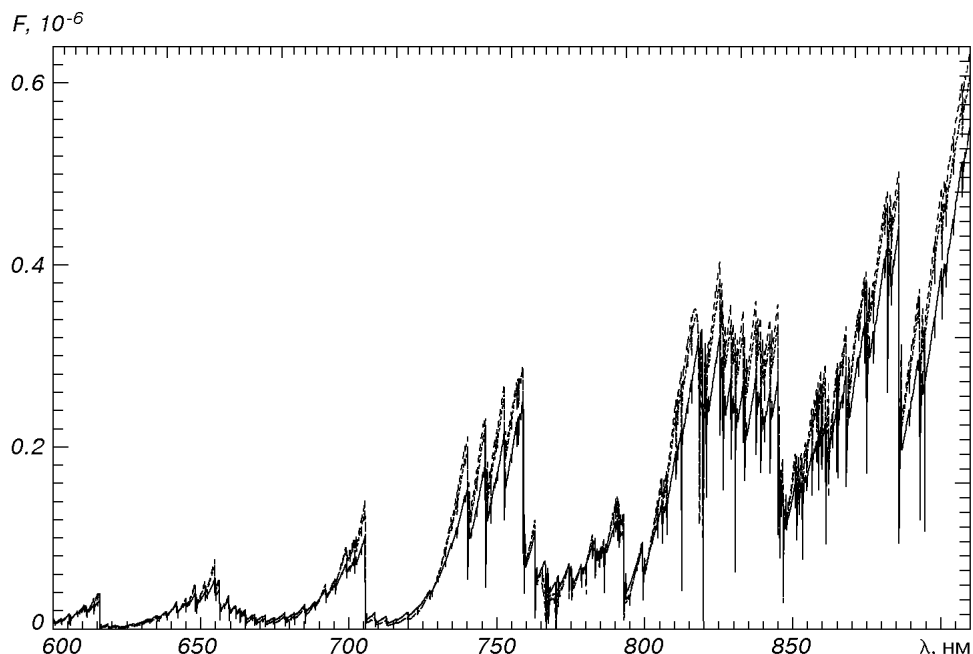


Рис. 5 Синтетические спектры, рассчитанные для моделей атмосфер Аллард и Хоушилда $T_{\text{эф}} = 2700$ и $\lg g = 3.5, 5.0, 5.5$ (сплошная, пунктирная и штриховая линии соответственно)

Причина сильной чувствительности линий дублета Na I $\lambda\lambda$ 818.3, 819.5 нм к $\lg g$ объясняется в первую очередь тем, что они находятся в спектральной области, где молекулярное поглощение не столь интенсивно (рис. 1). Поэтому крылья этого дублета в спектрах карликов не исчезают под молекулярными полосами. С другой стороны, в спектрах М-субгигантов и М-гигантов крылья дублета сильно ослаблены или полностью пропадают под усиливающимися молекулярными полосами (рис. 6, б). Заметим, что интенсивность молекулярного поглощения с уменьшением $\lg g$ в этой области усиливается, в то время как крылья линий дублета натрия ослабевают.

Для модели атмосферы с $T_{\text{эф}} = 2900$ К и $\lg g = 3.5, 5.0$ и 5.5 были рассчитаны синтетические спектры в области $\lambda\lambda$ 810–830 нм. Результаты расчетов после свертки с инструментальным профилем $\Delta\lambda = 0.45$ нм и процедуры их нормировки представлены на рис. 7, а. Лучшее согласие рассчитанных и наблюдаемого в спектре GJ51 профилей субординатного дублета Na I получено при $\lg g = 5.0$.

На рис. 7, б представлено сравнение наблюдаемого спектра коричневого карлика Teide 1 и синтетических спектров, рассчитанных для $T_{\text{эф}} = 2700$ К и $\lg g = 4.5, 5.0, 5.5$. Ширина инструментального профиля $\Delta\lambda = 0.4$ нм. Лучшее согласие спектров получено при $\lg g = 5.0$, как и в предыдущем случае.

Мы оцениваем погрешность определения $\lg g$ в рамках нашего подхода значением ± 0.5 dex. Эта оценка выглядит вполне удовлетворительной, так как точность определения $\lg g$ спектроскопическими методами, как правило, невысока.

Влияние хромосфероподобных структур на формирование молекулярного спектра. В общем случае отличия рассчитанных спектров от наблюдаемых могут определяться рядом факторов. Одним из них является неопределенность структуры внешних слоев моделей атмосфер. Известно, что поздние М-карлики обладают мощными конвективными оболочками, кото-

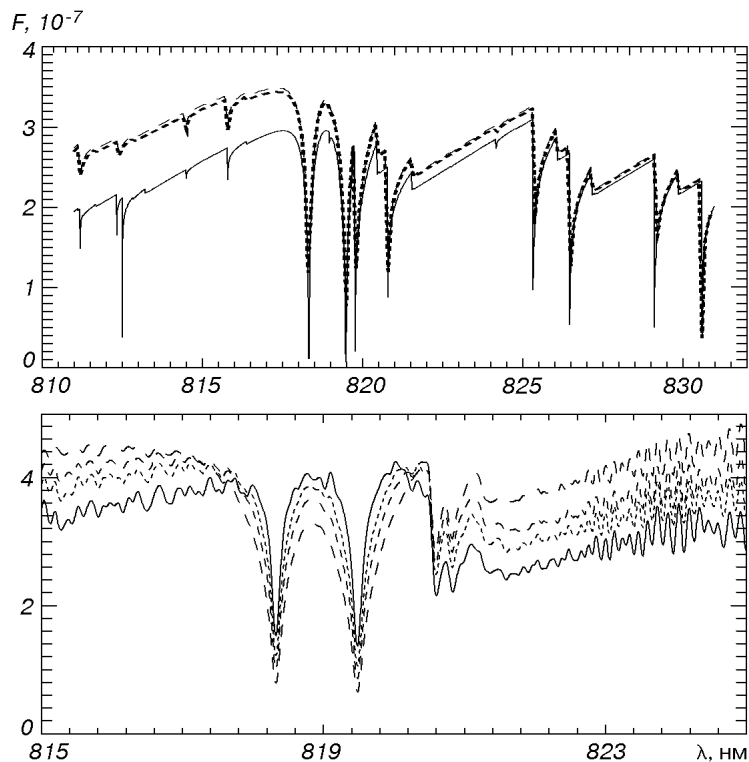


Рис. 6. *a* — распределения энергии в области субординатного дублета натрия, рассчитанные для модели атмосфер Аллард и Хоушилда 2700/5.0, с учетом различных систем молекул (приближение JOLA): сплошная линия — учтены 30 систем полос молекул, жирные штрихи — то же без молекулы VO, длинные штрихи — только молекула TiO; *b* — зависимость рассчитанных потоков излучения в области 820 нм от параметра lgg

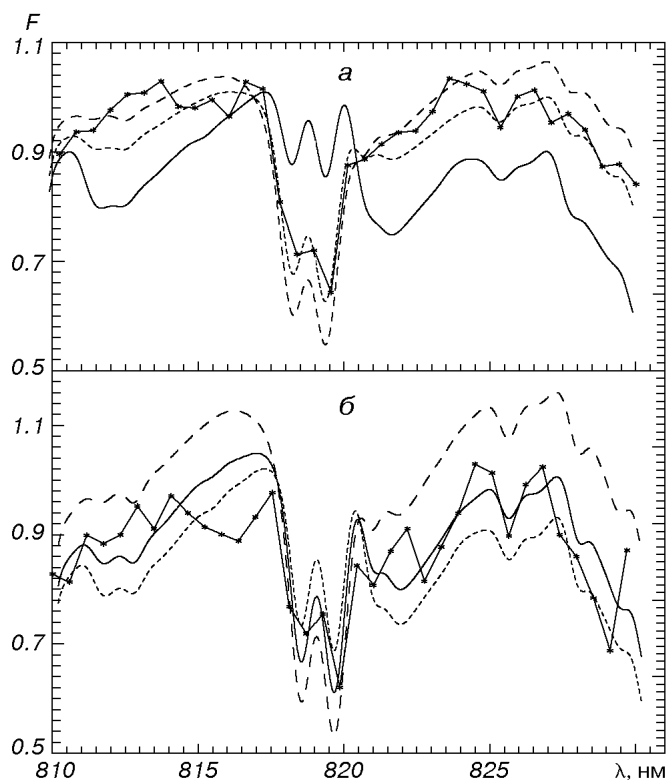


Рис. 7. Сравнение наблюдаемого спектра GJ1111 и Teide1 (сплошная линия со звездочками) с теоретическими для моделей атмосферы $T_{эф} = 2900K$, $lgg = 3.5, 5.0, 5.5$ (сплошная, пунктирная и штриховая линии соответственно) (*a*) и $T_{эф} = 2700$, $lgg = 4.5, 5.0, 5.5$ (пунктирная, сплошная и штриховая линии соответственно) (*b*), на участке $\lambda\lambda$ 810—830 нм

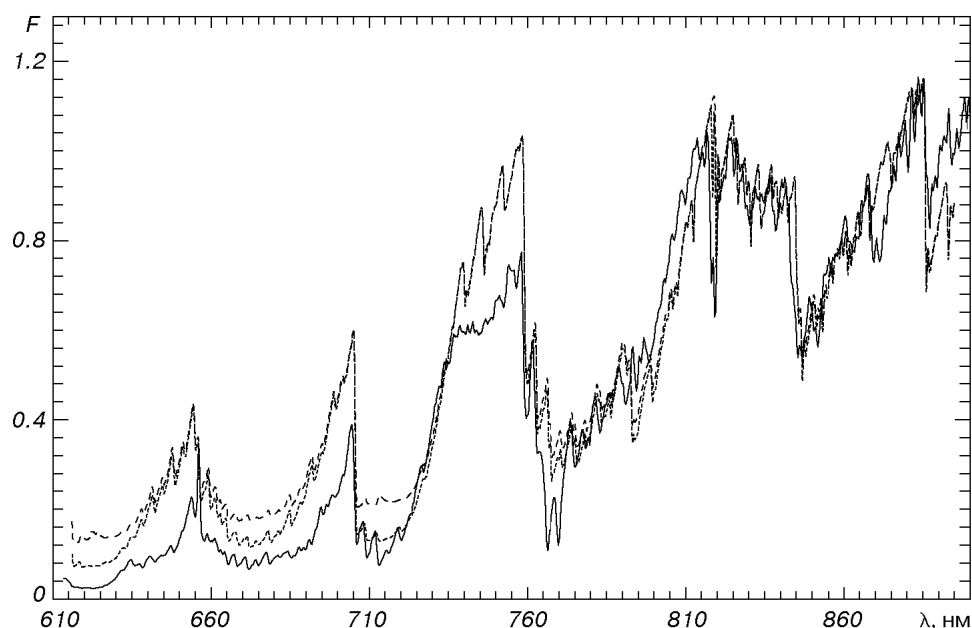


Рис. 8. Спектр GJ1111 (сплошная линия) и теоретические спектры, рассчитанные с ХПС $T_{\min} = 2400$ К и $\partial T/\partial \lg m = -50$ (пунктирная) и -400 (штриховая)

рые могут генерировать потоки различного типа волн, диссипация которых во внешних слоях атмосфер приводит к появлению здесь температурных инверсий (хромосфероподобных структур, ХПС), в которых температура увеличивается с радиусом звезды. К сожалению, подобные явления изучены пока недостаточно, однако опосредованно они проявляются в виде эмиссионных линий (H_{α}) в спектре М-карликов. В частности, такая линия есть как в спектрах GJ51 и GJ1111, так и в спектре Teidel (рис. 1 и 4). Естественно, ХПС могут влиять как на атомный, так и на молекулярные спектры поздних М-карликов. В рамках этой работы численные эксперименты для модели атмосферы 2900, 5.0, 0 из сетки АН95 проводились для простейших моделей ХПС. Модель ХПС определялась, как в работах [14, 15], посредством определения минимального значения $T = 2400$ К и градиента температуры $\partial T/\partial \lg m = -50$ и -400 .

Как видно из сравнения рассчитанных и наблюдаемого распределений энергии в спектрах М-карлика (рис. 8), достаточно хорошее согласие получено в длинноволновой области ($\lambda > 775$ нм). В области $\lambda < 775$ нм, где доминируют γ - и γ' -полосы TiO, рассчитанные потоки больше наблюдаемых.

Для значения $\lg g = 5.0$ расчеты проводились также для моделей атмосфер с постоянной температурой T_c в их внешних слоях: начиная с некоторой глубины, значение температуры оставалось постоянным. Расчеты проводились для моделей атмосфер с $T_c = 2250, 2400$ К. В длинноволновой области рассчитанные спектры почти совпадают с полученными для оригинальных моделей атмосфер, соответствие с наблюдаемым спектром здесь достаточно хорошее. В области длин волн $\lambda \lambda$ 610—730 нм рассчитанные потоки больше, чем в наблюдаемом спектре.

Синтетические спектры: JOLA и «линия за линией». Для трех участков спектра, в которых могут наблюдаться линии поглощения нейтрального лития ($\lambda \lambda$ 608.5—612.5, 668.8—672.8 и 810.6—814.6 нм), сравнены расчеты синтетических спектров по методикам JOLA и ЛЗЛ с использованием

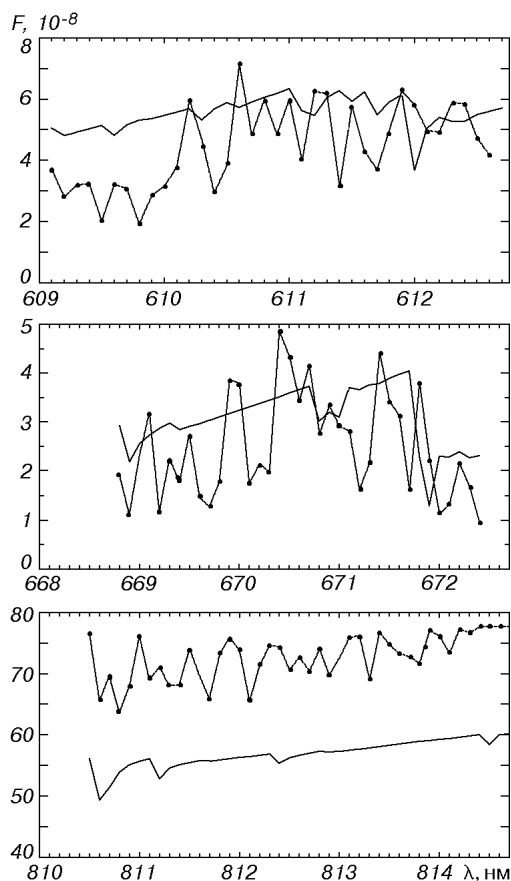


Рис. 9. Потоки излучения F_λ рассчитанные с учетом молекулярной непрозрачности по методике JOLA и «линия за линией» для списка линий TiO Плезе [17]

списков линий TiO [17]. Абсолютные значения потоков излучения F_λ представлены на рис. 9. Процедура нормировки рассчитанных потоков излучения в этом случае не применялась. Оказалось, что обе модели учета молекулярной непрозрачности дают сравнимые значения потоков.

Эти расчеты также показывают, насколько совпадают системы сил осцилляторов систем полос TiO, использованные как в расчетах JOLA, так и «линия за линией». Для областей $\lambda\lambda$ 610.3 и 670.8 нм согласие вполне удовлетворительное. Для области λ 812.6 нм различия достигают 20 %, однако следует отметить, что в этом случае моделировались сравнительно слабые молекулярные полосы TiO, для которых JOLA по определению дает несколько *завышенные* непрозрачности [22]. Окончательные выводы для этой области можно было бы сделать после расчетов со списками линий Швенке.

Авторы благодарят М. Р. Запатеро Осорио за предоставленные спектры М-карликов GJ51, GJ1111 и коричневого карлика Teide1, а также Ф. Аллард, П. Хоушилда и Т. Цудзи за предоставленные модели атмосфер в численном виде.

Работа выполнена при частичной поддержке SRG Американского астрономического общества.

1. Комаров Н. С., Белик С. И., Драгунова А. В. Определение характеристик звезд спектральных классов F, G, K. Эффективные температуры // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 3.—С. 215—222.

2. Кузнецова Л. А., Кузьменко Н. Е., Кузяков Ю. А., Пластинин Я. А. Вероятности оптических переходов двухатомных молекул. — М.: Наука, 1980.—316 с.
3. Кузьменко Н. Е., Кузнецова Л. А., Кузяков Ю. А. Факторы Франка—Кондона двухатомных молекул. — М.: Изд-во МГУ, 1984.—342 с.
4. Нерсисян С. Е., Шаврина А. В., Яремчук А. А. Анализ молекулярного спектра N-звезд на основе моделей атмосфер // *Астрофизика*.—1989.—30, № 2.—С. 249—258.
5. Allard F. Model atmospheres of M-dwarfs: PhD Thesis. — Heidelberg: Univ. of Heidelberg, 1990.—209 p.
6. Allard F., Hauschildt P. Model atmospheres for M(sub)dwarf stars. I. The base model grid // *Astrophys. J.*—1995.—445.—P. 433—450.
7. Bessel M. S., Stringfellow G. S. The faint end of the stellar luminosity function // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1993.—31.—P. 433—471.
8. Brett J. M. Simple model atmospheres incorporating new opacities of VO and TiO // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1989.—241.—P. 247—257.
9. Brett J. M. Opacity sampling model photospheres for M dwarfs. I. Computations, sensitivities and comparisons // *Astron. and Astrophys.*—1995.—295.—P. 736—754.
10. Brett J. M., Smith R. C. A model atmosphere investigation of the effects of irradiation on the secondary star in a dwarf nova // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1993.—264.—P. 641—653.
11. Kirkpatrick D., Kelly D. M., Reike G. H., et. al. M dwarf spectra from 0.6 to 1.5 microns: a spectral sequence model atmosphere fitting and the temperature scale // *Astrophys. J.*—1993.—402.—P. 643—654.
12. Martin E. L., Rebolo R., Magazzu A. Constraints to the masses of brown dwarf candidates from the lithium test // *Astrophys. J.*—1994.—436.—P. 262—269.
13. Pavlenko Ya. V. Analysis of the spectra of two Pleiades brown dwarfs: Teidel and Calar3 // *Astron. and Space Sci.*—1997.—253.—P. 43—53.
14. Pavlenko Ya. V. Lithium lines in the spectra of late M dwarfs: the effect of chromosphere-like structures // *Astron. Reports.*—1998.—42.—P. 501—507.
15. Pavlenko Ya. V., Rebolo R., Martin E. L., et. al. Formation of lithium lines in very cool dwarfs // *Astron. and Astrophys.*—1995.—303.—P. 807—818.
16. Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., et. al. VALD: the Vienna atomic line data base // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—112.—P. 525—535.
17. Plez B. A new TiO line list // *Astron. and Astrophys.*—1998.—337.—P. 495—500.
18. Rebolo R., Martin E., Magazzu A. Spectroscopy of a brown dwarf candidate in the alpha Per open cluster // *Astrophys. J.*—1992.—389.—P. L83—L86.
19. 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.
20. Tinney C. G., Mould J. R., Reid I. N. The faintness stars: IR photometry, spectra and bolometric magnitudes // *Astron. J.*—1993.—105.—P. 1045—1059.
21. Tsuji T. Molecular abundances in stellar atmospheres. II // *Astron. and Astrophys.*—1973.—23.—P. 411—431.
22. 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, Denmark., 1993.*
23. Tsuji T. Dust in very cool dwarfs // *Low mass stars and brown dwarfs in stellar clusters and associations, La Palma, CUP, 1999.*
24. Zapatero Osorio M. R. Photometric surveys in open clusters // *Low mass stars and brown dwarfs in stellar clusters and associations: Proc. Euroconference, Los-Cancajos, La Palma, Spain, May 11—15, 1998.*
25. Zapatero Osorio M. R., Rebolo R., Martin E. L., et. al. New brown dwarfs in the Pleiades cluster // *Astrophys. J.*—1997.—491, N 1.—P. L81—L85.

Поступила в редакцию 05.04.00