

УДК 524.316.7

М. К. Кузнецов¹, Я. В. Павленко¹, М. К. Галвез-Ортиз²

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680

²Centro de Astrobiologia (INTA-CSIC), Spain

Моделирование распределения энергии в оптических и ИК-спектрах поздних карликов спектральных классов М4 М6

На основании распределения энергии в области $\lambda = 680...840$ нм определены спектральные классы (М4—М6), эффективные температуры $T_{\text{эф}}$ (2700—2900 К) и ускорения свободного падения $\lg g$ (4.0—4.5) для пяти М-карликов. Спектры звезд были получены на телескопе Вальтера Бааде (6.5 м, ESO) с помощью аппаратного комплекса IMACS с разрешением $R = 4000$. Проведена спектральная классификация по спектральным индексам и сделаны оценки эффективной температуры звезд. Значения $T_{\text{эф}}$ и $\lg g$ также определены путем сравнения наблюдаемых и теоретических распределений энергии, рассчитанных как для стандартных моделей атмосфер красных карликов из сетки NextGen, так и для квазиэмпирических моделей, учитывающих наличие пыли в звездных атмосферах по методике Я. В. Павленко и др. Для каждой звезды определены параметры пылевого компонента атмосферы и подтверждена необходимость учета эффекта уменьшения концентрации молекул TiO за счет их конденсации на пылинках для $T_{\text{эф}} < 3000$ К. Сделан вывод, что рассеяние излучения на пылевых частицах не оказывает существенного влияния на распределение энергии в спектрах рассмотренных звезд.

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ У СПЕКТРАХ ПІЗНІХ М-КАРЛИКІВ СПЕКТРАЛЬНИХ КЛАСІВ М4—М6 В ОПТИЧНОМУ І БЛИЗЬКОМУ ІЧ-ДІАПАЗОНАХ, Кузнецов М. К., Павленко Я. В., Галвез-Ортиз М. К. — Методом моделювання розподілу енергії в області $\lambda = 680...840$ нм визначено спектральні класи (М4—М6), ефективні температури $T_{\text{эф}}$ (2700—2900 К) і прискорення вільного падіння $\lg g$ (4.0—4.5) для п'яти М-карликів. Спектри зірок були отримані на телескопі Вальтера Бааде (6.5 м, ESO) за допомогою апаратного

комплексу IMACS з роздільною здатністю $R = 4000$. Проведено спектральну класифікацію за спектральними індексами та оцінено ефективну температуру зір. Значення T_{ef} і $\lg g$ визначено шляхом порівняння спостережуваних і теоретичних розподілів енергії, розрахованих як для стандартних моделей атмосфер червоних карликів з сітки NextGen, так і для квазіемпіричних моделей, в яких враховано наявність пилу в зоряних атмосферах за методикою Я. В. Павленка та ін. Для кожної зорі визначено параметри пилового компонента атмосфери і підтверджено необхідність врахування ефекту зменшення концентрації молекул TiO за рахунок їхньої конденсації на частинках пилу для $T_{\text{ef}} < 3000$ K. Зроблено висновок, що процеси розсіювання випромінювання на пилових частинках істотно не впливають на розподіл енергії у спектрах досліджуваних зір.

SIMULATION OF ENERGY DISTRIBUTION IN OPTICAL AND INFRA-RED SPECTRA OF LATE M-DWARFS OF SPECTRAL TYPES FROM M4 TO M6, by Kuznetsov M. K., Pavlenko Ya. V., Galvez-Ortiz M. C. — On the basis of energy distribution in the region from 6800 to 8400 Å, we determined spectral types (M4—M6) and values of effective temperature T_{eff} (2700—2900 K) and acceleration of gravity $\lg g$ (4.0—4.5) for five M-dwarfs. The stellar spectra were obtained on the Walter Baade Telescope (6.5 m, the ESO) with the help of the complex IMACS with the resolution $R = 4000$. We performed spectral classification based on the spectral indices and estimated effective temperatures of the stars using the spectral types. The values of T_{eff} and $\lg g$ were determined by comparing the observed and theoretical energy distributions. Synthetic spectra were calculated both for the dust-free atmosphere model of red dwarfs (NextGen) and for the semi-empirical atmosphere model of Pavlenko et al. The semi-empirical atmosphere model takes into account the effect of the dust presence in stellar atmospheres. We calculated dust parameters for each star and demonstrated the necessity of considering the effect of a decrease in the concentration of TiO molecules due to their condensation on dust grains for $T_{\text{eff}} < 3000$ K. We concluded that the scattering of radiation by dust particles scarcely affects the energy distribution for spectra of the stars considered.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение маломассивных звезд ($M \approx 0.6M_{\odot}$) является одним из приоритетных направлений современной астрофизики, поскольку они являются самым многочисленным населением в окрестностях Солнца и во всей Галактике и играют важную роль в эволюции галактического вещества. Доля звезд с массами $0.1M_{\odot} < M < 0.8M_{\odot}$ составляет примерно 70 % общего числа звезд Галактики [6]. Эти звезды формируют главную последовательность на диаграмме Герцшпрунга — Рессела вследствие их многочисленности и медленной эволюции [16]. Класс

М-карликов интересен также тем, что включает коричневые карлики — субзвездные объекты с массами $M \approx 0.077M_{\odot}$ [3, 19], которые занимают промежуточное положение между звездами и планетами-гигантами. Между тем, физика атмосфер холодных карликов до сих пор недостаточно изучена. Это связано с двумя основными причинами. Во-первых, низкая светимость и тот факт, что максимум излучаемой этими звездами энергии приходится на ИК-область спектра, усложняют получение качественных наблюдательных данных. Во-вторых, есть трудности при моделировании атмосфер холодных карликов. Они имеют сложный состав вкладчиков в поглощение, включая нейтральные и ионизованные атомы и двух- и трехатомные молекулы. Кроме того, низкие температуры и высокие давления в атмосферах делают возможным наличие вещества одновременно в виде газа и пыли, что также усложняет решение системы уравнений ионизационно-диссоциативного равновесия [1].

Для развития теории холодных карликов важны статистические данные для этого класса объектов. Целью нашей работы было моделирование распределения энергии в оптических и ИК-спектрах пяти выбранных звезд из каталога 2MASS и изучение на этой основе некоторых свойств атмосфер М-карликов. Использование красной и ближней ИК-области спектра для исследования атмосфер М-карликов наиболее эффективно, поскольку на эту область приходится максимум распределения их энергии.

НАБЛЮДЕНИЯ

Для изучения было выбрано пять холодных карликов из каталога 2MASS: J1146-4754, J1326-5022, J1433-5148, J1557-4350, J1618-3214. Выбор звезд обусловлен тем, что они имеют близкие спектральные классы [7] и значения $\lg g$ [8]. Спектры звезд были получены 4—6 мая 2010 г. на телескопе Вальтера Бааде (6.5 м, ESO) с помощью аппаратного комплекса IMACS в спектральном диапазоне $\lambda = 680\text{--}840$ нм (спектральное разрешение $R \sim 4000$). Обработка спектров была проведена с помощью стандартных процедур программного пакета IRAF*.

В табл. 1 приведены некоторые характеристики наблюдавшихся объектов: их имена, экваториальные координаты, расстояния до них, даты наблюдений, а также идентификатор MG ID динамической группы звезд со сходными кинематическими характеристиками, кандидатом в члены которой является соответствующий объект: PL — Pleades, CA — Castor, SI — Sirius, IC — IC2391. Для удобства мы будем пользоваться названиями объектов, которые были предложены в работе [8] (указаны в первой графе табл. 1).

* IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) распространяется National Optical Astronomy Observatory, которая находится под руководством Ассоциации университетов по исследованиям в области астрономии (AURA), согласно соглашению о сотрудничестве с Национальным научным фондом (National Science Foundation)

Таблица 1. Характеристики наблюдавшихся объектов

Объект	Имя в 2MASS			Дата май 2010 г.	Расстояние, пк		MG ID
11m47	J1146-4754	11 ^h 46 ^m 51.04 ^s	-47 54 38.17	04	51.7	15.5	SI
13m50	J1326-5022	13 26 53.48	-50 22 27.04	04	45.1	10.1	IC, CA
14m51	J1433-5148	14 33 41.95	-51 48 03.70	06	50.3	0.7	CA, PL, SI, IC
15m43	J1557-4350	15 57 27.39	-43 50 21.47	05	48.1	1.0	PL, CA, IC
16m32	J1618-3214	16 18 08.92	-32 14 36.17	06	70.2	1.0	IC, CA, SI

Для получения абсолютных распределений энергии был использован усредненный спектр четырех звезд-стандартов: HIP 077673, HIP 07987, HIP 094122 и HIP 065519. В связи с тем что дистанция до исследуемых объектов оценивается в 45—70 пк [8], межзвездное поглощение мы не учитывали.

СПЕКТРАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

Мы оценили спектральные классы исследуемых звезд по спектральным индексам, которые представляют собой отношения интегральных потоков F_1/F_2 в избранных узких спектральных полосах. Методика использования спектральных индексов для оценки спектральных классов холодных карликов подробно описана в работах [9, 12, 13, 18, 24]. В табл. 2 указаны длины волн спектральных полос, интегральные потоки в которых использовались нами для расчета спектральных индексов. В случае индексов VO-Kirk и VOa потоки F_1 рассчитывались по следующим формулам:

$$F_1^{(VO-Kirk)} = 0.5625 F(735...740) - 0.4375 F(751...756),$$

$$F_1^{(VOa)} = F(735...737) - F(755...757),$$

Таблица 2. Спектральные индексы в области = 700...840 нм и интервалы длин волн для расчета F_1 / F_2

Индекс	(F_1) , нм	(F_2) , нм	Литературный источник
TiO1	700—704	706—710	[18]
TiO2	838—842	844—848	[18]
VO1	754—758	742—746	[18]
VO2	799—803	790—794	[18]
VO-Kirk	735—740	742—747	[13]
	751—756		
CaH	702—705	696—699	[13]
TiO5	712.6—713.5	704.2—704.6	[24]
VOa	735—737	743—747	[24]
	755—757		[24]
PC3	823—827	754—758	[24]

Таблица 3. Спектральные классы и полученные по ним эффективные температуры исследованных М-карликов, полученные на основании анализа спектральных индексов и из работы [7]

Объект	TiO ₁ + TiO ₂	VO ₁ + VO ₂	VO – Kirk	CaH	TiO ₅	VOa	PC3	<i>Sp</i>	<i>Sp</i> [7]	<i>T</i> _{эф} , К	<i>T</i> _{эф} , К [7]
11m47	3.87	2.53	1.09	1.24	0.28	2.20	1.40	M6V	M8.6V	2800	2500
13m50	4.30	2.70	1.22	1.20	0.25	2.57	1.34	M5.5V	M9.1V	2800	2200
14m51	3.64	2.40	1.09	1.29	0.29	2.20	1.12	M4—5V	M8.9V	3200— 2900	2200
15m43	4.12	2.54	1.16	1.21	0.21	2.34	1.28	M5—6V	M9.8V	2900— 2800	2100
16m32	3.74	2.51	1.10	1.31	0.35	2.25	1.13	M5V	M7.2V	2900	2900

где $F()$ — интегральный поток в указанной в скобках полосе длин волн в нанометрах. В настоящей работе мы объединили потоки для расчета индексов TiO₁ и TiO₂, а также VO₁ и VO₂ для увеличения точности. Для определения спектрального класса по спектральным индексам мы использовали эмпирические формулы из работ [13, 18, 24]. Например, в случае PC3 для спектральных классов M2.5—L1 справедливо соотношение [18]

$$Sp = 6.685 - 11.715 (PC3) + 2.024 (PC3)^2$$

Оценки спектральных классов исследуемых карликов были проведены независимо двумя группами исследователей — в ГАО НАН Украины и в университете Вальпараисо (Чили). Существенных расхождений выявлено не было. Для оценки эффективных температур на основании спектральных классов исследуемых звезд мы использовали шкалу эффективных температур из работы [25].

Спектральные классы, полученные по спектральным индексам в ходе этой работы, и значения $T_{эф}$ для этих спектральных классов по данным из [25] приведены в табл. 3. Видно, что спектральные классы *Sp*, полученные нашей группой, более ранние, чем спектральные классы, которые были определены по фотометрии в работе [7], а эффективные температуры звезд более высокие. Согласно нашим оценкам все пять исследованных объектов имеют близкие спектральные классы M4—M6, что позволяет использовать единую методику для исследования всей группы объектов.

РАСЧЕТ СИНТЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА С ПОМОЩЬЮ КЛАССИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕР ХОЛОДНЫХ КАРЛИКОВ NextGen

Синтетические спектры М-карликов были рассчитаны при помощи программы WITA5 [20] для классических моделей звездных атмосфер NextGen [10], которые не учитывают пылевые эффекты в атмосферах звезд. Расчеты были сделаны в приближении локального термодина-

мического равновесия (ЛТР). Мы использовали списки атомных линий VALD [15] и списки молекулярных линий TiO из работы [23]. Вклад полос молекулы VO учитывался в приближении полностью смазанных линий (JOLA) [17]. Синтетические спектры были рассчитаны в области 680...840 нм для сетки моделей с температурами $T_{\text{эф}} = 2700...3200$ К с шагом 100 К, $\lg g = 4.0...5.5$ см/с² с шагом 0.5 см/с² и с металличностями $[M/H] = 0.0, 0.5$ и -1.0 dex. Здесь и далее $[M/H] = \lg[(M/H)_*/(M/H)_{\odot}]$ dex.

Все синтетические спектры были рассчитаны для скорости вращения звезд $V_{\sin i} = 10$ км/с и микротурбулентной скорости $V_{\text{turb}} = 3.0$ км/с.

УЧЕТ ПЫЛЕВЫХ ЭФФЕКТОВ В АТМОСФЕРАХ М-КАРЛИКОВ

Согласно современным представлениям, наличие пыли в фотосферах холодных карликов становится заметным при $T_{\text{эф}} < 2800$ К [26]. Однако, большинство исследователей достаточно осторожно относятся к значению $T_{\text{эф}}$, выше которого пылевыми эффектами можно пренебречь. Аллард [10] рекомендует использовать модели NextGen, которые не учитывают выпадение TiO на пылинках для $T_{\text{эф}} > 2700$ К. Вопрос о необходимости учета уменьшения концентрации TiO вследствие формирования пылинок в звездных фотосферах вплоть до эффективных температур $T_{\text{эф}} = 3000$ К был впервые поднят в работе [11], и до сих пор нет общепринятого решения этой проблемы. Это связано с трудностями моделирования неравновесного процесса взаимодействия между пылевой оболочкой и газовой составляющей атмосферы звезды. Здесь работают два процесса, которые находятся в динамическом равновесии — формирование пылинок в верхних (холодных) областях звездной атмосферы и их разрушение под действием высокой температуры, когда они «тонут», опускаясь в нижние (горячие) слои атмосферы. Учет наличия пыли позволяет ослабить полосы TiO, так как часть молекул окиси титана конденсируется на пылинках [22].

Нами были рассчитаны синтетические спектры для моделей атмосфер с учетом наличия пыли. Использованные в нашей работе модели являлись модификациями моделей NextGen [10]. По методике [22] предполагается, что в случае М-карликов пылевые облака находятся в самых верхних слоях звездной атмосферы и не влияют на распределение температуры и давления. В этом случае пыль может влиять на распределение энергии в спектре за счет понижения концентрации TiO и за счет рассеяния излучения в пылевых облаках. В наших модифицированных моделях понижение концентрации TiO в толще атмосферы учитывается с помощью двух свободных параметров: номера уровня модели, выше которого нет поглощения TiO (т. е. вся окись титана конденсируется на пылинках), и коэффициента уменьшения концентрации TiO для остальных точек модели. Рассеяние излучения в пылевых облаках также моделируется двумя параметрами: оптической

толщиной облака и его оптической глубиной в звездной атмосфере. Нами была рассчитана сетка моделей атмосфер с пылью для шести свободных параметров: эффективной температуры, $\lg g$ и четырех параметров, характеризующих влияние пыли. Температуры варьировались в пределах $T_{\text{эф}} = 2700 \dots 3200$ К с шагом 100 К, $\lg g = 4.0 \dots 5.5$ см/с² с шагом 0.5 см/с². Для всех моделей с пылью использовался солнечный химический состав из работы [4], скорости вращения звезд $V_{\sin i} = 10$ км/с и микротурбулентная скорость $V_{\text{turb}} = 3.0$ км/с. Списки атомных и молекулярных линий для квазиэмпирических моделей были аналогичны спискам для моделей NextGen.

Для выбора лучшего варианта синтетического спектра мы использовали подход, предложенный в работе [22]. Для каждой звезды определялся минимум функционала S , представляющего суммы квадратов отклонений синтетического спектра от наблюдаемого:

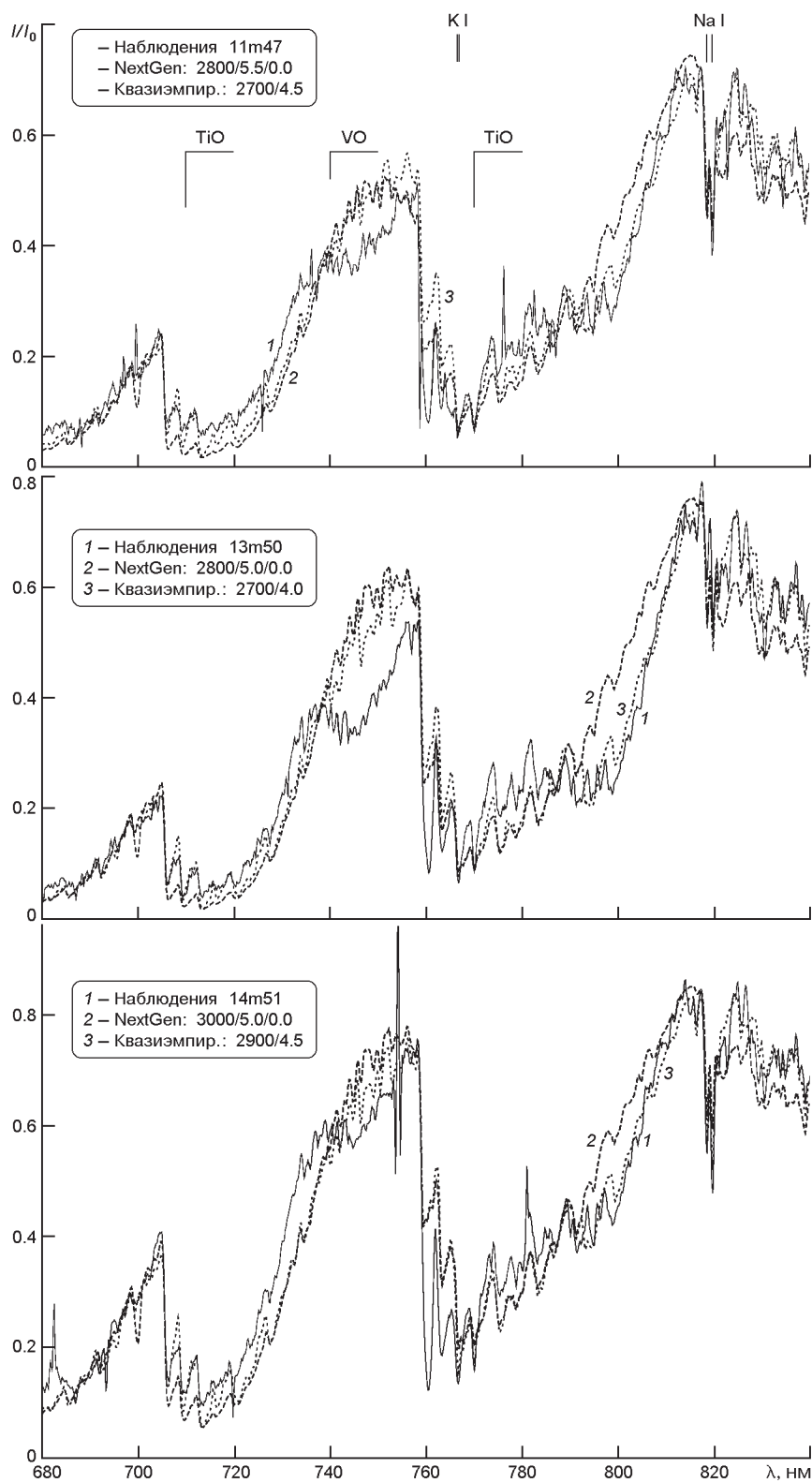
$$S = \sum (f_h H_{\text{synt}} - H_{\text{obs}})^2,$$

где f_h — нормировочный множитель, H_{synt} — синтетический поток, H_{obs} — наблюдаемый поток [22]. Мы полагаем, что параметры модели атмосферы звезды, которые обеспечивают минимум функционала S , наилучшим образом описывают атмосферу звезды.

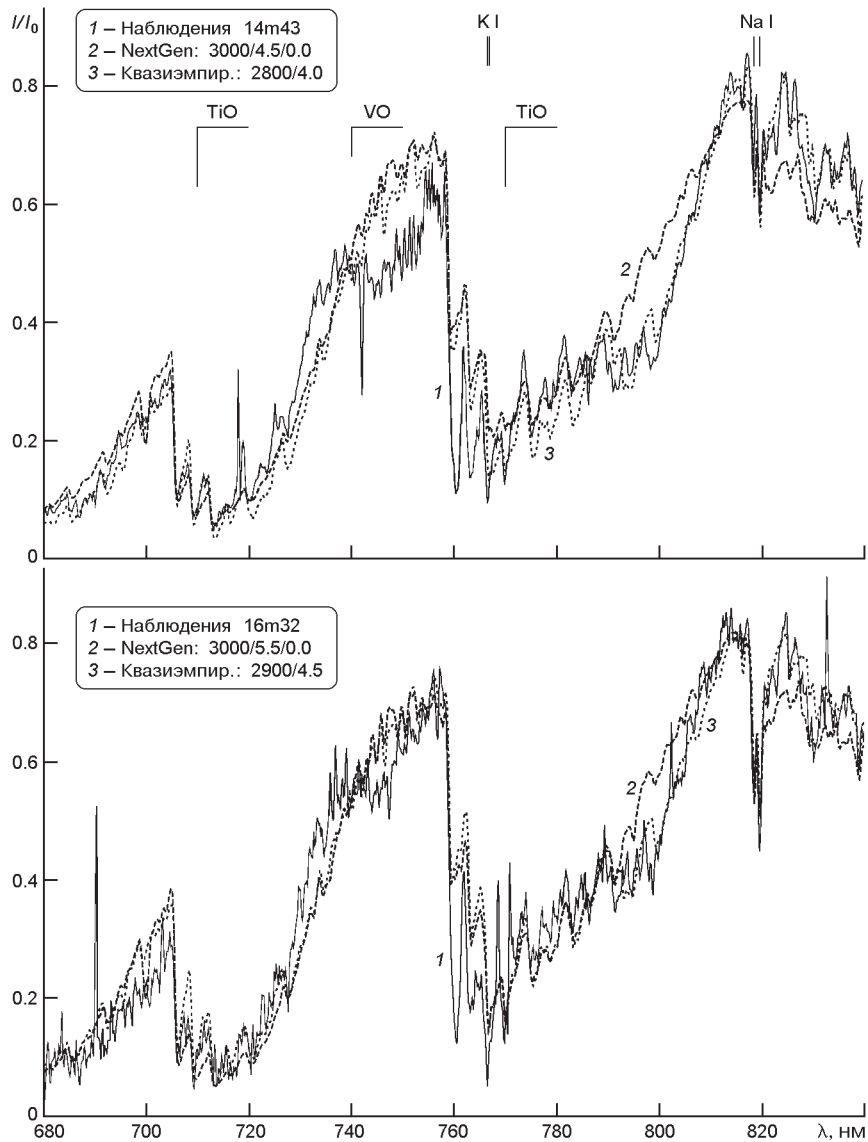
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭНЕРГИИ

На рисунке приведено сравнение спектров всех исследуемых звезд с синтетическими спектрами, которые были рассчитаны с помощью моделей, не учитывающих наличие пыли в атмосферах (NextGen), и с моделями, учитывающими пылевые эффекты (квазиэмпирические модели). Приведенные синтетические спектры являются лучшими по значениям величин функционала S . Видно, что для всех исследованных звезд теоретическое распределение энергии, рассчитанное без учета пыли, не обеспечивает удовлетворительной точности описания наблюдаемого спектра, тогда как использование моделей с пылью существенно улучшает описание. Нужно отметить, что в спектральном диапазоне $\lambda = 680 \dots 840$ нм есть несколько проблемных участков для всех использованных нами моделей. В областях $\lambda = 740 \dots 750$ и 800 нм есть абсорбционные полосы молекулы VO. Мы учитывали поглощение в полосах этой молекулы в приближении JOLA [17]. Важной деталью спектров М-карликов вблизи $\lambda = 760$ нм является резонансный дублет калия. В связи с влиянием НЛТР-эффектов на формирование этого дублета мы пока не можем описать его достаточно точно. Отметим, что чувствительный к температуре и величине $\lg g$ суборбитальный дублет натрия на $\lambda = 820$ нм хорошо описывается синтетическим спектром, рассчитанным с помощью моделей с учетом пыли.

В табл. 4 приведены полученные путем сравнения наблюдаемых и теоретических распределений энергии значения эффективных темпе-



Синтетические распределения энергии в спектрах М-карликов 11m47, 13m50 и 14m51, рассчитанные по моделям NextGen и по квазиэмпирическим моделям. Приведены полученные значения параметров $T_{\text{эф}}/lgg$ [М/Н]



Окончание рисунка для M-карликов 15m43 и 16m32

ратур, $\lg g$ и параметров, описывающих влияние пыли в атмосферах исследуемых звезд. Приведены также минимальные значения S_{\min} функционала для спектров, рассчитанных с разными моделями. Видно, что при использовании квазиэмпирических моделей достигается значительно лучшее соответствие между теоретическим и наблюдаемым распределением энергии в спектре звезды. Для синтетических спектров, рассчитанных с помощью моделей NextGen, использование солнечной металличности ($[M/H] = 0.0$) позволяет добиться лучшего описания спектров исследуемых объектов. Для обозначения параметров, описывающих влияние пыли, в седьмой графе табл. 4 использованы сокращения. Например, выражение A0.n15.8 означает: A0. — ра-

Таблица 4. Параметры M-карликов, определенные по моделям NextGen и квазиэмпирическим моделям

Объект	NextGen			Квазиэмпирические модели			
	$T_{эф}$, К	lgg	S_{min}	$T_{эф}$, К	lgg	Параметры пыли	S_{min}
11m47	2800	5.5	2.09	2700	4.5	A0.n15.8	0.64
13m50	2800	5.0	3.21	2700	4.0	A0.n25.8	0.84
14m51	3000	5.0	1.82	2900	4.5	A0.n25.8	0.74
15m43	3000	4.5	2.59	2800	4.0	A0.n25.8	0.81
16m32	3000	5.5	1.81	2900	4.5	A0.n15.8	1.29

счеты сделаны без учета рассеяния света на пылинках, n15 — выше 15-й точки модели нет поглощения молекулами TiO, .8 — ниже 15-й точки молекулярные концентрации уменьшаются на 0.8. Следует отметить, что синтетические спектры, рассчитанные для n15 и n25, мало отличаются друг от друга.

Таким образом, для всех исследованных объектов лучшее соответствие между наблюдаемым и синтетическим распределением энергии достигается при сходных наборах параметров пыли.

Анализ значений параметров пыли показывает, что примерно 20 % TiO в атмосферах исследованных карликов конденсируется на пылинках. При этом не выявлена корреляция между эффективной температурой и уровнем модели, выше которого нет поглощения TiO (см. табл. 4). Учет рассеяния излучения на пылинках, согласно нашему анализу, приводит к увеличению расхождений между наблюдаемым и синтетическим распределением энергии.

Значение $T_{эф}$, определенные методом синтетического спектра и методом спектральной классификации, хорошо согласуются между собой.

Различия значений lgg, определенных по разным моделям, обусловлены методикой исследований. В области 680...840 нм спектральными деталями, наиболее чувствительными к изменениям lgg, являются дублеты K I = 760 нм и Na I = 820 нм. Однако эти линии также чувствительны к изменениям эффективной температуры. Учет пылевых эффектов приводит к уменьшению поглощения в молекулярных полосах, что, в свою очередь, влияет на оценки температуры. Понижение значений lgg позволяет компенсировать изменение глубин атомных линий, связанные с $T_{эф}$, и сохранить хорошее соответствие между наблюдаемыми и синтетическими спектрами в линиях K I и Na I.

Анализ распределения энергии в большом спектральном диапазоне позволил нам использовать для определения параметров атмосфер как области с сильными молекулярными полосами, так и области с минимальным поглощением. Это увеличивает точность полученных результатов. С другой стороны, при $T_{эф}$ 2900 К полосы TiO в спект-

рах М-карликов насыщены и слабо чувствуют изменения фундаментальных параметров. Это снижает точность оценок. В конечном счете, исходя из шага сетки моделей, мы оцениваем нашу точность определения фундаментальных параметров атмосфер поздних М-карликов как $T_{\text{эф}} = 50 \text{ К}$, $l_{\text{gg}} = 0.25$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как было отмечено выше, спектральные классы исследуемых звезд, полученные в работе [7] по фотометрическим данным, более поздние, чем наши. Это можно объяснить тем, что в области фотометрических полос *I* и *J* в спектрах холодных карликов сильны полосы поглощения воды (которые мало чувствительны к изменениям температуры), и они приводят к занижению блеска звезды в указанных диапазонах. Вследствие этого искажаются оценки спектральных классов по этим фотометрическим полосам.

Как уже отмечалось, вопрос о необходимости и методиках учета наличия пыли в атмосферах М-карликов является на сегодняшний день дискуссионным [10, 26]. Согласно результатам настоящей работы пылевые эффекты нужно учитывать для $T_{\text{эф}} \approx 3000 \text{ К}$. Согласие наблюдаемых и теоретических распределений энергии в ближней ИК-области говорит о том, что квазиэмпирические модели, полученные по методике Я. В. Павленко и др. [22], достаточно хорошо описывают реальное влияние пыли в атмосферах М-карликов.

Поскольку лучшее описание спектров М-карликов синтетическими спектрами мы получили без учета рассеяния излучения на пылевых частицах, можем сделать вывод, что роль этого процесса для атмосфер исследуемых звезд невелика.

В заключение отметим, что точность оценок, сделанных нами, необходимо повышать. Требуется совершенствование методики учета присутствия пыли в атмосферах М-карликов, так как предположение, что пыль не влияет на структуру атмосфер М-карликов, слишком грубое. Следует заметить, что существующие списки молекулярных линий VO для ближнего ИК-диапазона недостаточно полные и точные. Полученные из наблюдений потоки калибруются с помощью звезд-стандартов. Этот процесс также является возможным источником ошибок. С другой стороны, метод синтетического спектра, предусматривающий подбор нескольких свободных параметров, может давать неоднозначные комбинации значений этих параметров. В этом случае необходимы дополнительные критерии, позволяющие выбрать наиболее реальный результат.

Теория атмосфер холодных М-карликов также еще далека от совершенства и требует дальнейшего совершенствования. В частности, на распределение энергии в спектре, помимо пыли, могут влиять эффекты, связанные с хромосферной активностью М-карликов, отклоне-

ния от ЛТР, наличие горячих регионов во внешних слоях звездных атмосфер.

Эти исследования выполнялись при поддержке гранта RoPACS: Rocky Planets Around Cool Stars. A Marie Curie Initial Training Network. Авторы благодарят Др. Р. Куруца за предоставленную версию ATLAS12 и списки молекулярных линий, группу VALD за работу по созданию базы данных о спектральных линиях, С. Фолкса за предоставленные данные о кинетических характеристиках исследуемых объектов. Работа выполнялась с использованием базы данных SIMBAD (Страсбург, Франция). Авторы благодарят Л. А. Яковину за внимание к работе и ряд полезных замечаний.

1. Любчик Ю. П. Моделирование спектров звезд поздних спектральных классов: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Киев, 2009.—138 с.—Машинопись.
2. Любчик Ю. П., Павленко Ю. В. Моделирование оптических спектров поздних М-карликов // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—**16**, № 4.—С. 324—335.
3. Adams F. C., Laughlin G. A dying universe: The long term fate and evolution of astrophysical objects // *Revs Mod. Phys.*—1997.—**69**, N 2.—P. 337—372.
4. Anders E., Grevesse N. Interstellar SiC in the Murchison and Murray meteorites — Isotopic composition of Ne, Xe, Si, C, and N // *Geochim. Cosmochim. Acta.*—1989.—**53**.—P. 3273—3290.
5. Allard F., Hauschildt P. H., Alexander D. R., et al. The limiting effects of dust in brown dwarf model atmospheres // *Astrophys. J.*—2001.—**556**.—P. 357—363.
6. Bochanski J. J., Hawley S. L., Covey K. R., et al. The luminosity and mass functions of low-mass stars in the galactic disk. II. The field // *Astron. J.*—2010.—**139**, N 6.—P. 2679—2699.
7. Dahn C. C., Harris H. C., Vrba F. J., et al. Astrometry and photometry for cool dwarfs and brown dwarfs // *Astron. J.*—2002.—**124**, N 2.—P. 1170—1189.
8. Folkes S. L. Discovery and characterisation of ultra-cool dwarfs in the galactic plane: in partial fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy. — University of Hertfordshire, 2008.
9. Galvez-Ortiz M. C., Clarke J. R. A., Pinfield D. J., et al. Spectroscopy and kinematics of low-mass members of young moving groups // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**409**, N 2.—P. 552—566.
10. Hauschildt P., Allard F., Baron E. The NextGen model atmosphere grid for 3000 T_{eff} 10000 K // *Astrophys. J.*—1999.—**512**, N 1.—P. 377—385.
11. Jones H. R. A., Tsuji T. Spectral evidence for dust in late-type M dwarfs // *Astrophys. J.*—1997.—**480**.—P. 1400—1411.
12. Kirkpatrick J. D., Heny T. J., McCathy D. W. A standard stellar sequence in the red/near-infrared: classes K5 to M9 // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1991.—**77**.—P. 417—440.
13. Kirkpatrick J. D., Heny T. J., Simons D. A. The solar neighborhood. 2: The first list of dwarfs with spectral types of M7 and cooler // *Astron. J.*—1995.—**109**, N 2.—P. 797—807.
14. Kirkpatrick J. D., Kelly D. M., Rieke G. H., et al. M dwarf spectra from 0.6 to 1.5 micron — A spectral sequence, model atmosphere fitting, and the temperature scale // *Astrophys. J.*—1993.—**402**, N 2.—P. 643—654.

15. *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.
16. *Laughlin G., Bodenheimer P., Adams F. C.* The end of the Main Sequence // *Astrophys. J.*—1997.—**482**.—P. 420—432.
17. *Lyubchik Yu., Pavlenko Ya.* Lithium abundances in atmospheres of PMS stars FN Tau and V927 Tau // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*—2000.—N 3.—P. 360—362.
18. *Martin E. L., Delfosse X., Basri G., et al.* Spectroscopic classification of late-M and L field dwarfs // *Astron. J.*—1999.—**118**.—P. 2466—2482.
19. *Martin E. L., Rebolo R., Zapatero-Osorio M. R.* Spectroscopy of new substellar candidates in the Pleiades: Toward a spectral sequence for young brown dwarfs // *Astron. J.*—1996.—**469**.—P. 706.
20. *Pavlenko Ya.* Analysis of the spectra of two Pleiades brown dwarfs: Teide 1 and Calar 3 // *Astrophys. Space Sci.*—1997.—**253**.—P. 43—53.
21. *Pavlenko Ya. V., Jones H. R. A., Lyubchik Yu., et al.* Spectral energy distribution for GJ406 // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**447**, N 2.—P. 709—717.
22. *Pavlenko Ya. V., Jones H. R. A., Martin E. L., et al.* Lithium in LP944-20 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**380**, N 3.—P. 1285.
23. *Plez B.* A new TiO line list // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**337**.—P. 495—500.
24. *Reid I. N., Cruz K. L.* Meeting the cool neighbors. I. Nearby stars in the NLTT catalogue: defining the sample // *Astron. J.*—2002.—**123**.—P. 2828—2840.
25. *Testi L.* A low-resolution near-infrared spectral library of M-, L-, and T-dwarfs // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**503**.—P. 639—650.
26. *Tsuji T., Ohnaka K., Aoki W.* Dust formation in stellar photospheres: a case of very low mass stars and a possible resolution on the effective temperature scale of M dwarfs // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**305**.—P. L1—L4.

Поступила в редакцию 17.01.12