

УДК 524.316.7.082

**Я. В. Павленко, Ю. П. Любчик**Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680, ГСП, Киев-127, Голосиив**Содержание лития в атмосферах молодых звезд  
V927 Tau и FN Tau**

*Обсуждаются результаты численного моделирования спектров молодых звезд V927 Tau (M5.5IV) и FN Tau (M5IV). В рамках ЛТР рассчитаны синтетические спектры областей ( $\lambda\lambda$  768.5—772.5 нм, 668.5—672.5 нм, 810.5—814.5 нм), в которых расположена линия нейтрального калия K I  $\lambda$  769.9 нм, а также линии резонансного и субординатного дублетов лития Li I  $\lambda\lambda$  670.8 и 812.6 нм. Эффективные температуры обеих звезд оказались равными ( $T_{\text{эф}} = 3100$  К). Значения ускорения свободного падения составляют  $\lg g = 4.0$  для V927 Tau и 3.5 для FN Tau. Обе звезды показывают заметное вращение: для FN Tau  $v \sin i = 13$  км/с, для V927 Tau — 22 км/с. Определены содержания лития у V927 Tau  $\lg N(\text{Li}) = 2.5 \pm 0.2$  для  $\lambda$  670.8 нм и  $2.7 \pm 0.2$  для 812.6 нм. У FN Tau соответствующие оценки составляют  $\lg N(\text{Li}) = 3.2 \pm 0.4$  и  $3.3 \pm 0.3$ .*

*ВМІСТ ЛІТІЮ В АТМОСФЕРАХ МОЛОДИХ ЗІР V927 Tau та FN Tau, Павленко Я. В., Любчик Ю. П. — Обговорюються результати чисельного моделювання спектрів молодих зір V927 Tau (M5.5IV) та FN Tau (M5IV). В наближенні ЛТР розраховані синтетичні спектри ділянок ( $\lambda\lambda$  768.5—772.5 нм, 668.5—672.5 нм, 810.5—814.5 нм), в межах яких розташовані лінії нейтрального калію K I  $\lambda$  769.9 нм, а також лінії резонансного та субординатного дублетів літію Li I  $\lambda$  670.8 та 812.6 нм. Ефективні температури обох зірок виявились однаковими ( $T_{\text{эф}} = 3100$  К). Значення прискорення вільного падіння складають  $\lg g = 4.0$  для V927 Tau і 3.5 для FN Tau. Обидві зорі мають помітне обертання: для FN Tau  $v \sin i = 13$  км/с, для V927 Tau — 22 км/с. Визначено вміст літію у V927 Tau  $\lg N(\text{Li}) = 2.5 \pm 0.2$  для  $\lambda$  670.8 нм і  $2.7 \pm 0.2$  для  $\lambda$  812.6 нм. Для FN Tau відповідні оцінки складають  $\lg N(\text{Li}) = 3.2 \pm 0.4$  і  $3.3 \pm 0.3$ .*

*LITHIUM ABUNDANCE IN THE ATMOSPHERES OF THE YOUNG STARS V927 TAU AND FN TAU, by Pavlenko Ya. V., Lyubchik Yu. P. — Results of modeling the spectra of the young stars V927 Tau (M5.5 IV) and FN Tau (M5 IV) are discussed. In the frame work of the LTE approach we computed a grid of synthetical spectra in  $\lambda\lambda$  768.5—772.5 nm, 668.5—672.5 nm, 810.5—814.5 nm where the resonance line K I  $\lambda$  769.9 nm and the resonance and subordinate Li I lines  $\lambda\lambda$  670.8 u 812.6 nm are located. The effective temperature  $T_{\text{ef}}$  and gravity  $\log g$  were determined from the fit of the*

*synthetic spectra to the observed data. We determine  $T_{\text{ef}} = 3100$  K for both stars, and  $\log g = 4.0$  for V927 Tau and  $\log g = 3.5$  for FN Tau. The stars show rotation:  $v \sin i = 13$  km/s for FN Tau, 22k m/s V927 Tau. For V927 Tau the determined lithium abundances are  $\log N(\text{Li}) = 2.5 \pm 0.2$  for  $\lambda$  670.8 nm and  $2.7 \pm 0.2$  for  $\lambda$  812.6 nm. Corresponding abundances for resonance and subordinate lithium lines of FN Tau are  $\log N(\text{Li}) = 3.2 \pm 0.4$  and  $3.3 \pm 0.3$ .*

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование эволюционных изменений содержания лития в атмосферах звезд типа Т Тау представляется важным при решении многих задач современной астрофизики. Это сравнительно молодые (возраст до нескольких десятков миллионов лет) маломассивные (массы 1—2  $M_{\odot}$  и меньше) звезды умеренных светимостей (до 2  $L_{\odot}$ ). Как правило, они наблюдаются рядом с мощными газопылевыми комплексами. Звезды типа Т Тау группируются в так называемые Т-ассоциации, генетически связанные с группировками более массивных звезд (О-ассоциациями). Впервые этот наблюдаемый факт был отмечен В. А. Амбарцумяном [1]. После стадии Т Тау (ТТS) звезды вступают в более длительную фазу эволюции post Т-Тау (РТТS) (см. [23]). Обе эти группы звезд объединяют в класс «Pre-Main sequence stars» (PMS).

Поскольку эти звезды претерпевают быстрые эволюционные изменения, а также вследствие различий в начальных стадиях их формирования и эволюции (кратность, вращение, магнитное поле и пр.), провести строго обоснованную классификацию этих звезд не удастся. Все же, используя качественные и частично количественные характеристики спектров звезд типа Т Тау, их разделяют на две группы. Классические Т-Тау-звезды (СТТS) показывают сильную эмиссию в водородной линии  $H_{\alpha}$ , в спектре наблюдаются сильные эмиссионные линии и других элементов. Звезды с относительно слабыми эмиссионными  $H_{\alpha}$  ( $W_{\lambda} < 0.5$ —1 нм) относят ко второй группе (WTТS — weak T Tau stars).

Отметим, что дополнительное поле излучения (вуалирование спектра) в спектрах молодых звезд может проявиться как в виде аномального изменения центральных глубин отдельных линий, так и в виде дополнительного континуума [22]. Интенсивность вуалирующего непрерывного спектра может изменяться в широких пределах (до 1000 %, см. [19]). Особенно эффектны его проявления в ультрафиолетовой части спектра [36].

Молодые звезды на ранних стадиях своего существования интенсивно обмениваются веществом с газопылевым облаком, их породившим, что подтверждается, в частности, прямыми спектрофотометрическими исследованиями областей звездообразования [9, 24]. Наличие макродвижений в окрестностях молодых звезд находит отражение и в вариациях профилей их эмиссионных линий. При этом они могут иметь как прямые профили типа Р Суг, так и обратные. Классические профили типа Р Суг имеют около 30 % самых активных звезд типа Т Тау [24]. В целом представляется возможным построить многокомпонентную модель активности молодых звезд [17].

Вследствие сложности спектров звезд типа Т Тау их фундаментальные характеристики до сих пор определены с недостаточной точностью [22]. Другим обстоятельством, которое затрудняет исследование этих звезд, является то, что в том месте диаграммы Герцшпрунга—Рессела, где расположена область Т Тау, находятся также звезды, которые уже покидают главную последовательность. Естественно, их эволюционный статус,

структура, уровень активности существенно отличаются от более молодых звезд.

**Эволюция содержания лития в атмосферах молодых звезд.** Теоретические расчеты показывают, что в звездах с  $Z = 0.02$  и массами  $M < 0.9M_{\odot}$  степень дилуции лития (т. е. уменьшения его содержания вследствие выгорания внутри звезды) зависит от массы звезды [14]. Более массивные звезды начинают исчерпывать свой литий раньше. С другой стороны, звезды с меньшими массами имеют более протяженные конвективные оболочки, что и является причиной эффективной дилуции лития в их атмосферах.

Расчеты степени выгорания лития на стадии PMS [13—15, 29] показали, что для звезд с массами  $M > 1.7 M_{\odot}$  выгорание лития на фазе PMS незначительно ( $< 0.1$  dex), в то же время существенное выгорание имеет место для звезд с массами  $M < 0.8 M_{\odot}$ . В атмосферах звезд солнечной массы и возраста  $t < 3 \cdot 10^6$  лет уменьшение содержания лития не столь существенно. Таким образом, наблюдения PMS звезд дают возможность независимым образом определить современное содержание лития в галактической среде.

Из сказанного выше также следует, что результаты количественного анализа линий лития в звездах типа Т Тау представляют несомненный интерес для понимания их природы. При этом следует учитывать, что временные шкалы эволюции звезд до главной последовательности сравнимы с характерными временами эволюции лития в их атмосферах. Заппала [38] показал, что в самых молодых звездах рассеянного скопления NGC 2264  $\lg N(\text{Li}) = 3.0$ . Более поздние исследования выявили, что содержание лития в атмосферах молодых маломассивных звезд типа Т Тау зависит как от возраста, так и (в большей степени) от массы звезды [23]. Гарсия Лопез [16] и Запатеро Озорио с сотрудниками [37] показали, что в М-звездах в скоплениях Плеяд и Персея (возраст 70 и 50 млн лет соответственно) лития содержится в 1000 раз меньше, чем в окружающем межзвездном пространстве. При этом, как отмечалось выше, скорость выгорания лития зависит от времени эволюции звезды. Однако в маломассивных PMS-звездах во время нескольких первых миллионов лет их существования сохраняется первоначальное содержание лития [14, 22]. Этот результат, в частности, был подтвержден Оппенгеймером и др. [25].

Таким образом, за последние несколько лет благодаря новым наблюдательным данным и теоретическим расчетам был достигнут значительный прогресс в изучении процесса выгорания лития в молодых звездах. Заметим, однако, что основной массив определений содержаний лития был получен в рамках так называемого метода моделей атмосфер, представляющего по сути модификацию классического метода кривых роста. В рамках этого подхода рассчитанные эквивалентные ширины сравнивались с наблюдаемыми. Проблема заключается в том, что в спектрах маломассивных молодых звезд ( $T_{\text{эф}} < 3000$  К) линии лития формируются на фоне сильных молекулярных полос. Основную роль при этом играют линии поглощения TiO. Молекулярные полосы TiO в этом случае формируют псевдоконтинуум для линий лития [26]. Это существенно усложняет задачу численного моделирования таких спектров. Результат такого анализа оказывается зависимым от полноты используемых списков молекулярных линий. Недоучет молекулярной непрозрачности в области спектра, где формируются линии лития, приводит к заниженным оценкам  $\lg N(\text{Li})$  [7].

Только в последнее время появились два списка линий молекулы TiO [31, 32], которые, как показывает наш опыт, могут с успехом использоваться при численном моделировании спектров М-звезд. В целом их применение дает схожие результаты [5]).

В этой работе мы представляем результаты численного анализа наблюдаемых эшелельных спектров двух PMS-звезд V927 Тау (M5.5IV) и FN Тау (M5IV). Обе эти звезды являются субгигантами и лежат выше главной последовательности. При этом звезда FN Тау моложе, ее коротковолновый спектр более подвержен влиянию «вуалирования» [21].

#### МАТЕРИАЛ НАБЛЮДЕНИЙ

Спектры двух звезд были получены на телескопе КЕСК 12, 13 и 14 октября 1994 г. с разрешением  $\lambda/\delta\lambda = 45000$ . Методика редукции этих эшелельных спектров описана в [25]. Редуцированные спектры были любезно предоставлены нам др. Б. Оппенгеймером. Для расчетов взяты только области, содержащие линии лития  $\lambda\lambda$  670.8 и 812.6 нм, а также область линии калия  $\lambda$  769.9 нм.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Для расчетов синтетических спектров использовалась программа WITA6 [7]. Расчеты проводились в рамках классических приближений: ЛТР, гидростатическое равновесие для одномерной модели атмосферы, отсутствие источников и стоков энергии. Уравнения ионизационного-диссоциативного равновесия решались для среды, состоящей из атомов, ионов и молекул. При расчетах учитывалось около 100 компонентов [28]. Молекулярные данные были взяты из работы [35]. Мы приняли потенциал ионизации молекулы TiO  $D_0 = 6.92$  эВ [33]; необходимо отметить, что зависимость наших результатов от  $D_0$  незначительная вследствие эффектов насыщения для этой молекулы [35]. Списки атомных линий были взяты из базы данных VALD [30].

В спектрах M-звезд хорошо проявляются обе линии резонансного дублета K I. Однако из-за «провала» в наблюдательных данных в области  $\lambda$  766.5 нм, в данной работе мы рассматриваем только линию нейтрального калия  $\lambda$  769.9 нм. К тому же коротковолновый компонент резонансного дублета калия сильно блендируется суперсильной телурической полосой. Расчеты профилей линий поглощения лития Li  $\lambda\lambda$  670.8 и 812.6 нм производились с учетом их мультиплетной структуры, несмотря на то, что при больших содержаниях лития они проявляются как одиночные линии. Расстояния между отдельными компонентами этих дублетов одного порядка с разрешением наблюдаемых спектров, и мы не можем разделить их уже при  $W_\lambda > 5$  пм. В тексте статьи для удобства эти дублеты будут называться просто линиями Li  $\lambda\lambda$  670.8 и 812.6 нм.

Расчеты молекулярной непрозрачности проводились в приближении «линия за линией» со списком линий TiO Швенке [32]. Расчеты длин волн и сил осцилляторов произведены Я. Павленко отдельно для каждой из молекул окиси титана, содержащих различные изотопы титана, с использованием базы данных, любезно предоставленной др. Д. Швенке. В процессе расчетов синтетических спектров (рис. 1—6) использовались данные о солнечном распределении изотопов Ti (таблица). Эти списки воспроизводят

Содержание изотопов Ti [3]

Изотоп	$^{46}\text{Ti}$	$^{47}\text{Ti}$	$^{48}\text{Ti}$	$^{49}\text{Ti}$	$^{50}\text{Ti}$
Содержание	220	202	2050	153	148

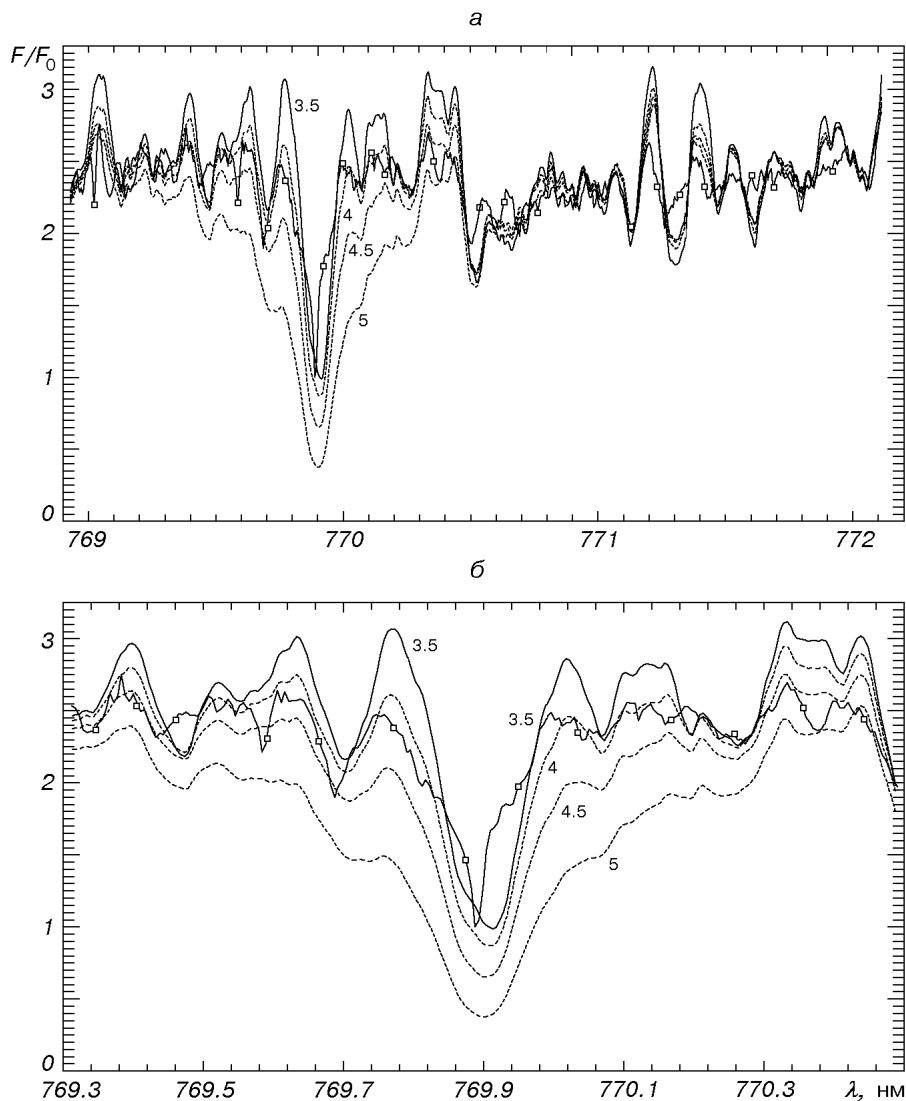


Рис. 1. Зависимость синтетического спектра V927 Тау ( $T_{\text{эф}} = 3100$  К,  $\lg g = 4.0$ ,  $\mu = 0$ ) от параметра  $\lg g$  в области линии К I  $\lambda$  769.9 нм. Квадратиками помечен наблюдаемый спектр. Возле расчетных кривых приведены значения  $\lg g$ . Здесь и ниже на рис. 2—6 на фрагментах б приведены участки спектра а с большим разрешением

наблюдаемые спектры поздних М-звезд в целом несколько точнее, чем аналогичные списки Плеза (см. [5, 12]).

Расчеты производились для моделей атмосфер Аллард и Хоушилда [8] при  $T_{\text{эф}} = 3000\text{—}3300$  К,  $\lg g = 3.5\text{—}5.0$  и металличности  $[\mu] = 0$ . Синтетические спектры сворачивались с профилем вращения по методике [2]. По сути мы подтвердили скорости вращения этих звезд, которые были определены в [27]:  $v \cdot \sin i = 13$  км/с и 22 км/с для для FN Тау и V927 Тау соответственно.

В спектрах М-звезд практически невозможно определить уровень истинного континуума. Здесь приходится сравнивать нормализованные потоки, т. е. рассчитанные и наблюдаемые спектры приводятся к одному значению на выбранной длине волны. Ряд специальных численных экспериментов показал, что основные результаты этой работы практически не зависят от выбора точки нормализации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Профиль линии калия.** Вследствие низкого потенциала ионизации ( $\chi = 4.34$  эВ) атомы калия находятся в атмосферах поздних М-звезд преимущественно в форме ионов К II. Поэтому линии поглощения нейтрального калия могут показывать существенную зависимость от эффективной температуры звезды. С другой стороны, в спектрах М-звезд резонансные линии К I насыщены, а их крылья существенно блендированы сильными полосами TiO. При анализе зависимости формы рассчитанных потоков излучения  $F_\lambda$  от эффективной температуры в районе линии калия К I  $\lambda$  769.9 нм мы нашли, что профиль резонансной линии калия относительно слабо зависит от  $T_{\text{эф}}$ .

Гораздо более существенной оказалась зависимость профиля этой линии от  $\lg g$ . Для обеих звезд мы проводили расчеты спектров с различными значениями  $\lg g$ . Были рассчитаны синтетические спектры для ряда моделей

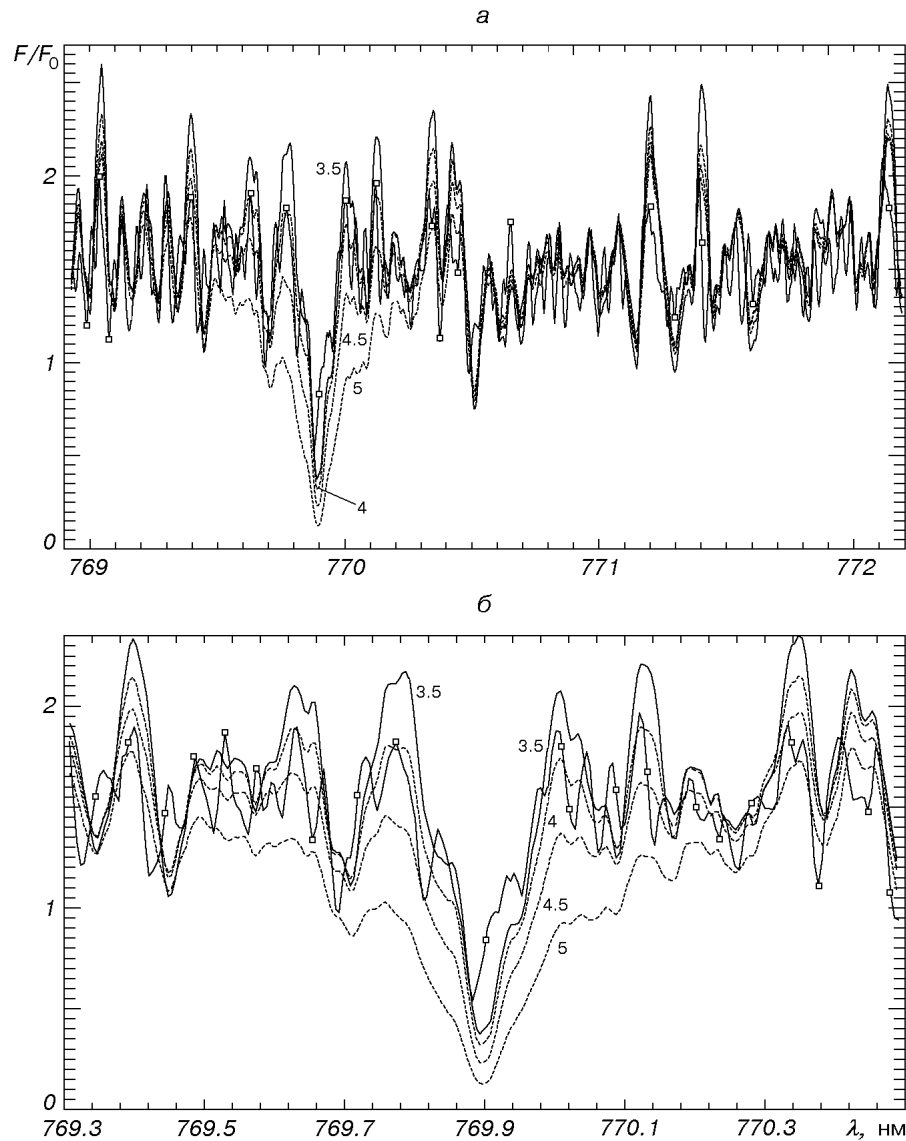


Рис. 2. То же для звезды FN Тау

атмосфер с  $T_{\text{эф}} = 3100$  К и  $\lg g = 3.5, 4.0, 4.5$  и  $5.0$ . Сравнение с рассчитанными спектрами показало, что эта линия может использоваться для определения ускорения силы тяжести в атмосферах звезд наряду с субординатным триплетом  $\lambda\lambda 818.3, 819.479, 819.482$  нм [28]. При  $T_{\text{эф}} = 3100$  К наблюдаемые спектры лучше описываются синтетическими спектрами с  $\lg g = 4.0$  для V927 Tau (рис. 1) и  $\lg g = 3.5$  для FN Tau (рис. 2).

Насыщенная линия К I  $\lambda 769.9$  нм формируется во внешних слоях атмосферы. Но как раз эта область более всего подвержена влияниям различных неравновесных процессов (потоки вещества, аккреция из диска [10], сильная магнитная активность, активные хромосферы [11] и др.). Эти процессы, естественно, оказывают влияние на профили сильных линий. Строго говоря, нам не удалось описать одинаково хорошо весь профиль линии калия в рамках нашей относительно простой модели. Мы могли

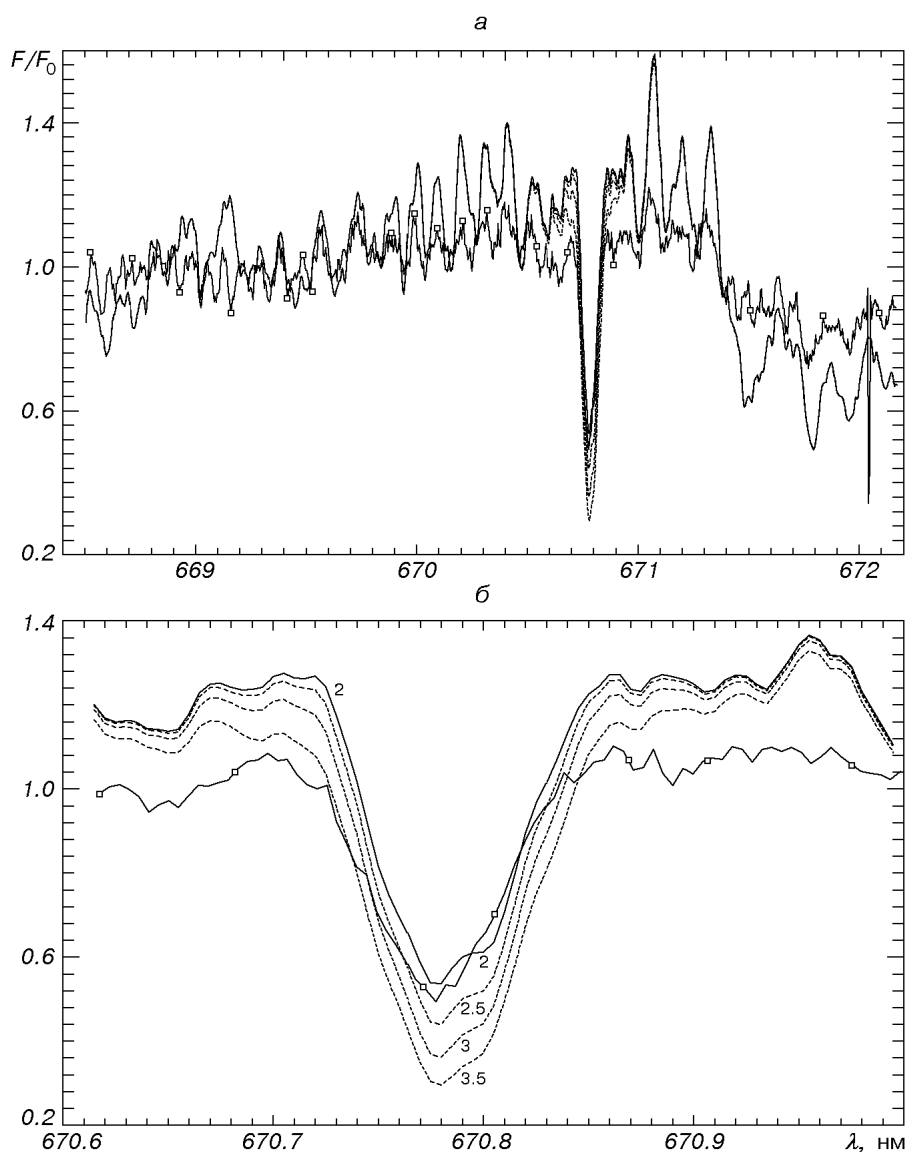


Рис. 3. Зависимость синтетического спектра V927 Tau ( $T_{\text{эф}} = 3100$  К,  $\lg g = 4.0$ ,  $\mu = 0$ ) от содержания лития в области линии Li I  $\lambda 670.8$  нм. Возле расчетных кривых приведены значения  $\lg N(\text{Li})$

использовать для анализа только части профиля линии, которые формируются достаточно глубоко в атмосфере.

**Содержание Li в атмосферах V927 Tau и FN Tau.** Резонансные и субординатные атомные линии в спектрах холодных M-звезд блендированы молекулярными линиями. При этом резонансная  $\lambda$  670.8 нм и субординатная  $\lambda$  812.3 нм линии лития находятся в областях с различным блендированием [26]. Более слабая линия  $\lambda$  812.3 нм расположена в области, где молекулярное поглощение не столь значительно. В то же время в области резонансного дублета поглощение полос  $\gamma$  и  $\gamma'$  систем TiO очень сильное [26]. Естественно, в этих условиях определяющим фактором при определении содержания лития является полнота молекулярных списков линий, которые используются в расчетах синтетических спектров [7, 34].

Как было отмечено выше, для расчетов молекулярной непрозрачности мы использовали список линий TiO Швенке [32], который, на наш взгляд, является наиболее полным на сегодняшний день. Помимо этого, в области

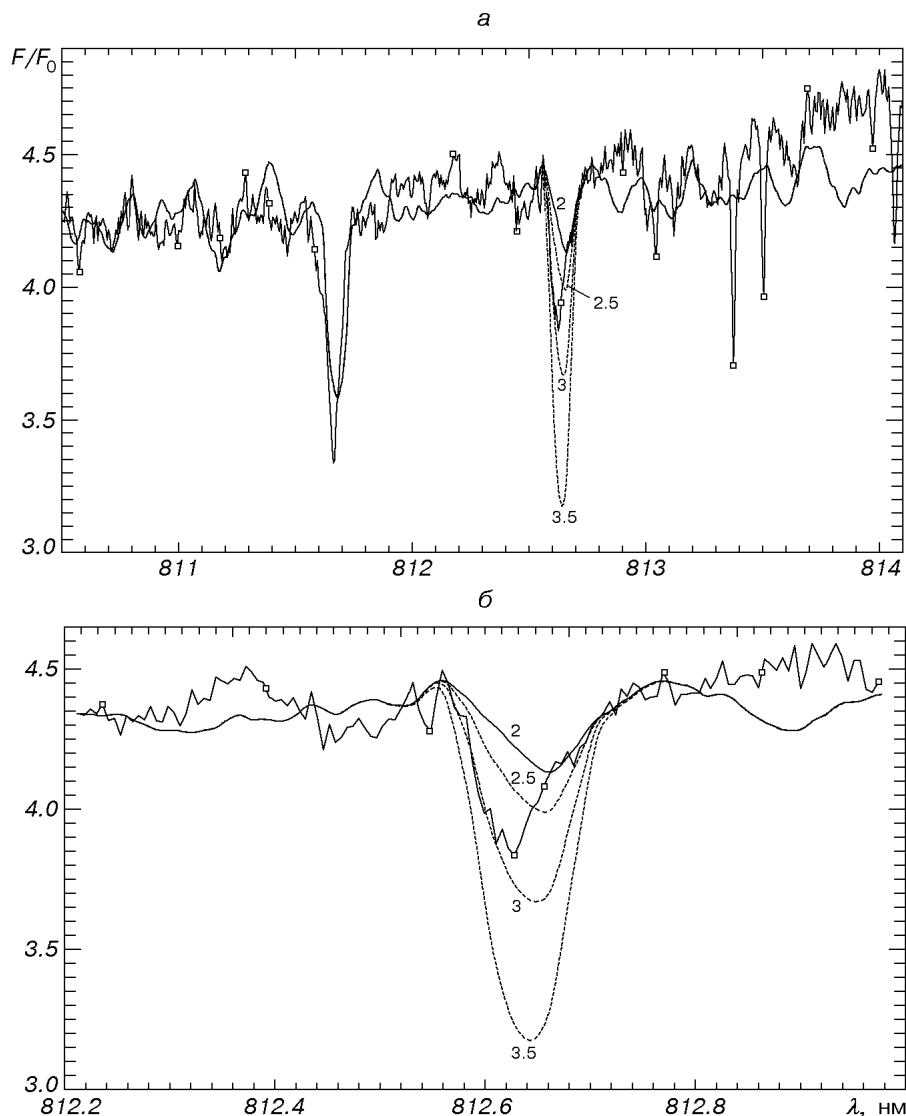


Рис. 4. То же для линии Li I  $\lambda$  812.6 нм



$\lambda$  812.6 нм мы учитывали поглощение полосы (0, 0) системы ( $B^4\Pi_{(r)} - X^4\Sigma^-$ ,  $f_e = 0.04$ ) молекулы VO в приближении JOLA [4]. Поглощение VO влияет главным образом на коротковолновый участок спектра [4].

При определении содержания лития использовались модели атмосфер  $T_{эф}/\lg g/[\mu] = 3100/4.0/0$  для V927 Тау и  $3100/3.5/0$  для FN Тау. Отметим, что профили линий лития довольно слабо зависят от  $\lg g$ , в отличие от резонансных линий калия. Для V927 Тау мы определили содержание лития  $\lg N(\text{Li}) = 2.5 \pm 0.2$  по линии  $\lambda$  670.8 нм (рис. 3) и  $\lg N(\text{Li}) = 2.7 \pm 0.2$  по линии  $\lambda$  812.6 нм (рис. 4).

В спектрах заметна асимметрия профиля линии Li  $\lambda$  670.8 нм, которая может быть обусловлена крупномасштабными движениями в атмосферах звезд из-за наличия в них потоков поднимающегося и опускающегося вещества [12]. Отметим, что этот эффект не представляется возможным

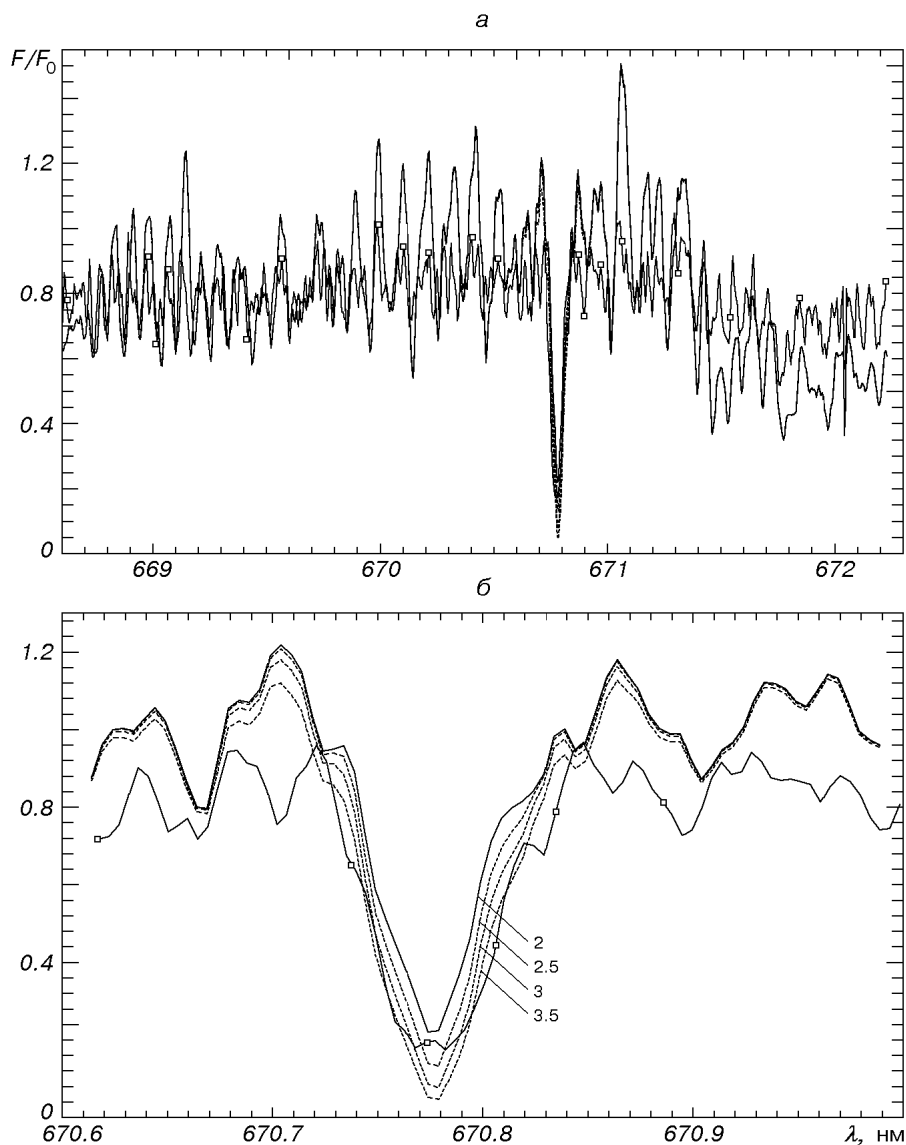


Рис. 5. Зависимость синтетического спектра FN Тау ( $T_{эф} = 3100$  К,  $\lg g = 3.5$ ,  $\mu = 0$ ) от содержания лития в области линии Li I  $\lambda$  670.8 нм. Возле расчетных кривых приведены значения  $\lg N(\text{Li})$

объяснить дополнительным (неучтенным) молекулярным поглощением, так как ядро линии  $\text{Li } \lambda 670.8 \text{ нм}$  образуется явно выше области формирования молекулярных линий.

Спектр FN Тау является более сложным с точки зрения его моделирования. Мы не смогли для этой звезды получить единственного решения по обеим линиям лития. Особенно проблематичным выглядит описание профиля линии резонансного дублета лития  $\lambda 670.8 \text{ нм}$ . Линия очень насыщенная, поэтому достаточно трудно выбрать лучший вариант между  $\text{lg}N(\text{Li}) = 3.0$  и  $3.5$  (рис. 5). С другой стороны, дублет  $\text{Li } \lambda 812.6 \text{ нм}$  хорошо описывается значением  $\text{lg}N(\text{Li}) = 3.3$  (рис. 6).

**Отклонения от классических приближений.** В отличие от калия, литий в атмосферах холодных звезд существует преимущественно в форме нейтральных атомов. Недавние исследования [28] показали, что, в принципе, НЛТР-эффекты в сильных линиях  $\text{Li I}$  не могут быть очень значительными. В рамках этой работы мы также провели соответствующие НЛТР-расчеты. При расчетах использовалась 20-уровневая модель лития, в частот-

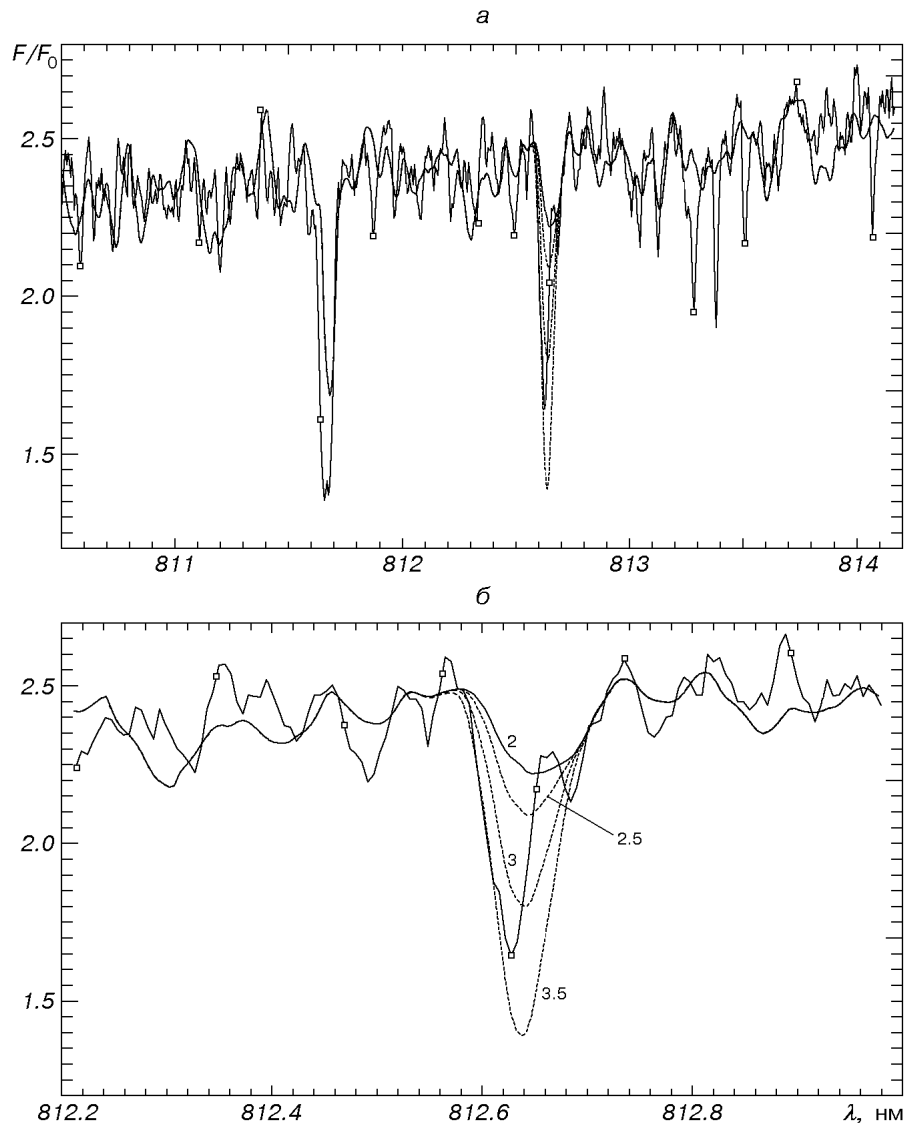


Рис. 6. То же для линии  $\text{Li I } \lambda 812.6 \text{ нм}$

тах связанно-свободных переходов учитывались непрозрачности, обусловленные атомными линиями и молекулярными полосами в приближении JOLA (для более детальной информации см. [6]).

Эти расчеты подтвердили, что НЛТР эффекты в линиях Li I, формирующихся в атмосферах поздних М-субгигантов с  $T_{\text{эф}} \approx 3100$  К, довольно слабые: изменение эквивалентных ширин резонансного и субординатного дублетов Li I вследствие НЛТР-эффектов не превышало 1 %. При этом ЛТР- и НЛТР-профили резонансного дублета практически идентичны для широкого интервала содержаний Li:  $3.5 > \lg N(\text{Li}) > 2.5$ . Далее, НЛТР-поправка содержания лития для субординатного дублета отрицательна, т. е.  $\Delta_{\text{НЛТР}} = \lg N_{\text{НЛТР}}(\text{Li}) - \lg N_{\text{ЛТР}}(\text{Li}) \approx -0.1$  dex.

Линии K I  $\lambda$  769.9 нм в спектрах М-субгигантов насыщены, поэтому НЛТР эффекты для нее не будут большими. Впрочем, ядро этой линии формируется над областью формирования молекулярных линий, и следовательно, может быть подвержено эффектам НЛТР [23]. Более того, как было отмечено выше, в атмосферах звезд с  $T_{\text{эф}} \geq 2900$  К калий преимущественно ионизован. НЛТР анализ формирования линии K I в атмосферах карликов поздних спектральных классов будет проведен в одной из следующих работ.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы провели комплексный анализ резонансной линии калия K I  $\lambda$  769.9 нм и резонансной  $\lambda$  670.8 нм и субординатной  $\lambda$  812.6 нм линий лития Li I с использованием синтетических спектров.

Наши исследования показали, что спектры молодых звезд поздних спектральных классов могут исследоваться с применением синтетических спектров. Естественно, в рамках принятых нами относительно простых предположений трудно получить совершенное воспроизведение наблюдаемых профилей сильных линий лития и калия. Тем не менее, отметим ряд результатов:

- зависимость синтетических спектров в области линии калия  $\lambda$  769.9 нм от эффективной температуры не является сильной. Вариации  $T_{\text{эф}} \approx 100$  К не оказывают серьезного влияния на спектры этих звезд. Мы использовали в расчетах  $T_{\text{эф}} = 3100$  К, хотя в работе [21] для V 927 Тау и FN Тау были определены эффективные температуры 3145 К и 3240 К;
- профиль линии калия K I  $\lambda$  769.9 нм довольно сильно зависит от  $\lg g$ . Мы определили ускорение свободного падения  $\lg g = 4.0$  для V927 Тау и 3.5 для FN Тау;
- по двум областям спектра  $\lambda$  670.8 нм и  $\lambda$  812.6 нм определены содержания лития:  $\lg N(\text{Li}) = 2.5 \pm 0.2$  и  $2.7 \pm 0.2$  для V927 Тау и  $3.2 \pm 0.4$  и  $3.3 \pm 0.3$  для FN Тау.

Спектры исследованных звезд уширены вращением. Для V927 Тау значение  $v \cdot \sin i$  больше и достаточно уверенно определяется из анализа профилей сильных атомных линий. Для FN Тау  $v \cdot \sin i$  ниже, и точность его определения меньше.

В ядре резонансного дублета лития Li  $\lambda$  670.8 нм наблюдается инверсия. Как было показано Павленко [28] и независимо Хоудебайном и др. [20], эта инверсия в ядре линии может быть смоделирована путем задания температурной инверсии в звездной атмосфере (так называемой хромосфероподобной структуры). Заметим, что ядра сильных молекулярных линий формируются в верхних слоях атмосферы, и их профили также могут быть подвержены влиянию хромосфероподобных структур.

Профили сильных линий в наблюдаемых спектрах имеют заметную асимметрию — сдвиг ядра линии в коротковолновую часть спектра, что

указывает на вытекание вещества из атмосфер этих двух молодых PMS-звезд.

В области субординатного дублета лития  $\lambda$  812.6 нм мы не смогли смоделировать атомную линию V I  $\lambda$  811.6 нм. Вероятно, проблема возникла из-за неточностей в атомных данных для этой линии.

Более молодая звезда FN Tau (2-3 млн лет) [28] показывает более высокое содержание лития, что соответствует теоретическим предсказаниям. Однако точность определения содержания лития этой звезды ниже из-за более интенсивных динамических процессов в ее атмосфере.

Авторы благодарят Б. Оппенгеймера за предоставленные спектры звезд, Ф. Аллард и П. Хоушилда за модели атмосфер в численном виде, Д. Швенке за базу данных TiO, создателей базы данных VALD за качественный сервис.

Авторы благодарят рецензента за ряд полезных замечаний.

Работа выполнена при частичной поддержке SRG Американского астрономического общества.

1. Амбарцумян В. А. Эволюция звезд и астрофизика. — Ереван: Изд-во Акад. наук Арм. ССР, 1947.—35 с.
2. Грей Д. Ф. Наблюдения и анализ звездных фотосфер. — М.: Мир, 1980.—496 с.
3. Ленг К. Астрофизические формулы. Руководство для физиков и астрофизиков. — М.: Мир, 1978.—Ч. 1.—448 с.;—Ч. 2.—384 с.
4. Любчик Ю. П., Павленко Я. В. Моделирование оптических спектров поздних М-карликов // Кинематика и физика небес. тел.—2000—16, № 4.—С. 324—335.
5. Любчик Ю. П., Павленко Я. В. Моделирование спектров молодых М-звезд // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 1.—С. 17—23.
6. Павленко Я. В. Линии лития в спектрах поздних М-карликов: влияние хромосфероподобных структур // Астрон. журн.—1998.—75, вып. 4.—С. 567—574.
7. Павленко Я. В. Линия лития в спектрах поздних М-карликов. Случай UX Tau C // Астрон. журн.—2000—77, вып. 4.—С. 254—263.
8. 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.
9. Bertout C. T Tauri stars:wild as dust // Ann. Rev. Astron. Astrophys.—1989.—27.—P. 351—395.
10. Bertout C., Basri G., Bouvier J. Accretion disks around T Tauri stars // Astrophys. J.—1988.—330, N 1.—P. 350—373.
11. Calvet N., Basri G., Kuhl L. V. The chromospheric hypothesis for the T Tauri phenomenon // Astrophys. J.—1984.—277, N 2.—P. 725—737.
12. 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.
13. D'Antona F. Lithium burning and N(Li)— Teff correlation in population I and II // Mem. Soc. Astron. Italy.—1991.—62.—P. 165—171.
14. D'Antona F., Mazzitelli A. Lithium depletion in stars. Pre-main sequence burning and extra-mixing // Astron. and Astrophys.—1984.—138, N 2.—P. 431—442.
15. Forestini M. Low-mass stars: pre-main sequence evolution and nucleosynthesis // Astron. and Astrophys.—1994.—285.—473, N 2.—P. 488.
16. Garcia Lopez R. J., Rebolo R., Martin E. L. Pre-main sequence lithium burning. II. Pleiades low mass stars // Astron. and Astrophys.—1994.—282, N 2.—P. 518—528.
17. Giampapa M. S., Basri G. B., Johns C. M., Imhoff C. L. A synoptic study of H $\alpha$  line profile variability in the T Tauri star SU Aurigae // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1993.—89, N 1.—P. 321—344.
18. Grey D. F. Lectures of spectral-line analysis: F, G and K stars. — Ontario: The publ., 1988.
19. Hartigan P, Kenyon S. J., Hartman L., et. al. Optical excess emission in T Tauri stars // Astrophys. J.—1991.—382, N 2.—P. 617—635.
20. Houdebine E. R., Doyle J. G. Observation and modelling of main sequence star chromospheres. IV. The chromospheric contribution to LiI lines in active dwarfs // Astron. and Astrophys.—1995.—302, N 3.—P. 861—869.
21. Kenyon S. J., Hartman L. Pre-main sequence evolution in the Taurus-Auriga molecular cloud // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1995.—101, N 1.—P. 117—171.
22. 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.
23. *Martin E. L., Rebolo R., Magazzu A., Pavlenko Ya.* Pre-main sequence lithium burning. I. Weak T Tauri stars // *Astron. and Astrophys.*—1994.—282, N 2.—P. 503—517.
  24. *Natta A.* Outflows and infall of matter in T Tau stars // *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.*—1992.—22.—P. 18—26.—(Nonisotropic and variable outflows from stars / Eds L. Drissen et al.).
  25. *Oppenheimer B. R., Basri G., Nakajima T., Kulkarni S. R.* Lithium in very low-mass stars in the Pleiades // *Astron. J.*—1997.—113, N 1.—P. 296—305.
  26. *Pavlenko Ya. V.* Analysis of the spectra of two Pleiades brown dwarfs: Teidel and Calar3 // *Astrophys and Space Sci.*—1997.—253.—P. 43—53.
  27. *Pavlenko Ya. V., Oppenheimer B.* Lithium abundances in the young PMS stars FN Tau and V927 Tau: An interplay of observations and theory // *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.*—1998.—154.—P. 1764—1770.—(Cool stars, stellar systems and the Sun / Ed. K. Dupree).
  28. *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.
  29. *Pinsonneault M. H., Kawaler S. D., Sofia S., Demarque P.* Evolutionary models of the rotating stars // *Astrophys. J.*—1989.—338, N 1.—P. 424—452.
  30. *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.
  31. *Plez B.* A new TiO line list // *Astron. and Astrophys.*—1998.—337, N 1.—P. 495—500.
  32. *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.
  33. *Smith V. V., Lambert D. L.* The chemical composition of red giants. III. Further CNO isotopic and s-process abundances in thermally asymptotic giant branch stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1990.—72, N 2.—P. 387—416.
  34. *Smith V., Plez B., Lambert D., Lubowich D.* A survey of lithium in red giants of the magellanic clouds // *Astrophys. J.*—1995.—441, N 2.—P. 735—746.
  35. *Tsuji T.* Molecular Abundances in Stellar Atmospheres. II // *Astron. and Astrophys.*—1973.—23.—P. 411—431.
  36. *Valenti J. A., Basri G., Jones C. M.* T Tauri in blue // *Astron. J.*—1993.—106, N 5.—P. 2024—2050.
  37. *Zapatero Osorio M. R., Rebolo R., Martin E. L., Garcia Lopez B. J.* Stars approaching the substellar limit in the a Persei open cluster // *Astron. and Astrophys.*—1996.—305, N 2.—P. 519—526.
  38. *Zappala R. R.* Lithium abundances of stars in open clusters // *Astrophys. J.*—1972.—172, N 1.—P. 57—74.

Поступила в редакцию 06.02.01