

УДК 524.3

**В. А. Шеминова**

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

### **Температурная стратификация атмосферы Арктур**

*Представлен краткий обзор результатов по изучению красного гиганта Арктур. Выполнено одномерное ЛТР-моделирование атмосферы Арктур и Солнца как звезды на основании расчетов протяженных крыльев линий Ca II H и K. В этой спектральной области обнаружено занижение локального континуума в среднем на 12 % в атласах Арктур. Дефицит УФ-поглощения составляет в среднем 43 % для Арктур и 9 % для Солнца. Поправочный множитель к непрозрачности в континууме для длин волн 390.0, 392.5, 395.0, 398.0, 400.0 нм равен соответственно 2.2, 1.9, 1.7, 1.55, 1.45 для Арктур и 1.2, 1.2, 1.2, 1.17, 1.15 для Солнца. Модельные расчеты полностью согласуются с оценками параметров атмосферы Арктур  $T_{\text{эф}} = 4286$  К,  $lgg = 1.66$  и значениями содержания химических элементов, полученными в работе Рамирес, Альенде Пр'ето [Aph. J.—2011.—743, N 2.—P. 135]. Модель атмосферы Арктур представлена в табличном виде.*

*ТЕМПЕРАТУРНА СТРАТИФІКАЦІЯ АТМОСФЕРИ АРКТУРА, Шеминова В. А. — Подано короткий огляд результатів вивчення червоного гіганта Арктур. Виконано одновимірне ЛТР-модельювання атмосфери Арктур і Сонця як зірки на основі розрахунків протяжних крил ліній Ca II H і K. У цій спектральній області виявлено заниження локального континууму в середньому на 12 % в атласах Арктур. Дефіцит УФ-поглинання складає в середньому 43 % для Арктур і 9 % для Сонця. Поправковий множник до непрозорості в континуумі для довжин хвиль 390.0, 392.5, 395.0, 398.0, 400.0 нм дорівнює відповідно 2.2, 1.9, 1.7, 1.55, 1.45 для Арктур і 1.2, 1.2, 1.2, 1.17, 1.15 для Сонця. Модельні розрахунки повністю узгоджуються з оцінками параметрів атмосфери Арктур  $T_{\text{эф}} = 4286$  К,  $lgg = 1.66$  та значеннями вмісту хімічних елементів, отриманих в роботі Рамірес, Альєнде Пр'єто*

[*Aph. J.*—2011.—743, N 2.—P. 135]. Модель атмосферы Арктура представлено в табличному вигляді.

*TEMPERATURE STRATIFICATION OF THE ARCTURUS ATMOSPHERE, by Sheminova V. A. — A brief overview of recent results of the red giant Arcturus study is given. Based on the synthesis of extended wings of the H and K Ca II lines, the LTE one-dimensional modeling for the atmospheres of the Arcturus and the Sun as a star is performed. For this spectral region, the local continuum is found to be underestimated, in the average, by 12 % in the Arcturus atlases. The missing opacity effect is, on average, 43 % for Arcturus and 9 % for the Sun. The fudge factor to the continuum opacity at 390.0, 392.5, 395.0, 398.0, 400.0 nm is 2.2, 1.9, 1.7, 1.55, 1.45 for Arcturus and 1.2, 1.2, 1.2, 1.17, 1.15 for the Sun. The simulation results confirmed conclusively the validity of the basic atmospheric parameters for Arcturus, such as  $T_{\text{eff}} = 4286$  K,  $\lg g = 1.66$ , and the estimates for chemical element abundances derived by Ramirez I., Allende Prieto C. [*Aph. J.*—2011.—743, N 2.—P. 135]. The obtained model of the Arcturus atmosphere is presented in tabular form.*

## ВВЕДЕНИЕ

Звезда Арктур ( Boo, HR530, HD124897, HIP69673) — это красный гигант спектрального класса K1.5 IIIp, его возраст  $7_{-1.2}^{1.5}$  млрд лет [56]. Визуально Арктур в 110 раз ярче Солнца, а общая его светимость в 180 раз превосходит солнечную. Это вторая ярчайшая звезда северного неба ( $V = -0.051 \pm 0.013^m$ ,  $M_v = 0.313 - 0.016^m$  [56]), которая удалена от нас на 36.7 св. лет, или на  $1126_{0.07}^{0.05}$  пк [53]. Ее параллакс равен  $0.08883 \pm 0.00053$  [75]. Арктур относится к переменным звездам. В общем каталоге переменных звезд (GCVS, <http://www.sai.msu.su/gcvs/gcvs/>) в разделе «Ожидаемые переменные звезды» его видимая звездная величина имеет два значения:  $V_{\text{max}} = -0.13^m$  и  $V_{\text{min}} = -0.03^m$ . Арктур — пульсирующая звезда со сложными многопериодическими изменениями радиальной скорости. Полагают, что краткопериодическая переменность (1.8, 2.5, 4.0, 8.3, 46 сут) обусловлена радиальными пульсациями и осцилляциями [31], а период в два года обусловлен модуляцией вследствие вращения [24]. Кроме того, обнаружен цикл магнитной активности с периодом более 14 лет [15].

Относительно низкое склонение (+19°) позволяет проводить наблюдения Арктура из обоих полушарий Земли. Его собственное движение и лучевая скорость составляют 2.3 в год и −5 км/с соответственно. Его скорость в пространстве относительно Солнца составляет 120 км/с. Высокая пространственная скорость и низкая металличность ( $[A/H] = -0.5$ ) указывают на принадлежность Арктура к старым звездам, располагающихся в толстом диске галактики в окрестности Солнца [56]. Эта звезда является членом кинематической группы Арк-

тура [19], которая содержит 53 звезды. Предполагают, что эта группа имеет внегалактическое происхождение. Согласно выводам [48] все свойства группы Арктур лучше всего согласуются с теми, которые могли бы наблюдаться у группы звезд, являющейся останками некогда поглощенной и разрушенной Млечным Путем небольшой галактики. Именно поглощенные галактики могли привнести в диск Млечного Пути значительную долю старых звезд с низкой металличностью. Безусловно, что это экзотическое предположение требует дальнейшего анализа.

Атмосферные параметры Арктур определялись многократно с использованием различных методов. Постоянный интерес астрофизиков к этой звезде определяется прежде всего тем, что она представляет собой отличный эталон для спектроскопических исследований красных гигантов. Дифференциальный анализ гигантов относительно Арктур дает возможность минимизировать систематические ошибки оценок фундаментальных параметров [6].

Наиболее полный обзор полученных результатов исследования атмосферы Арктур был представлен в работе [71]. Главной проблемой до сих пор остается недостаточно достоверное значение массы звезды. Ее пока не удастся определить прямым путем из-за отсутствия наблюдений второго компонента звезды. Долгое время все были уверены, что Арктур одиночная звезда. Сравнительно недавно по результатам наблюдений космического астрометрического спутника HIPPARCOS [53] была обнаружена двойственность Арктур (с пометкой «ненадежный результат»). Согласно данным [53] второй компонент на  $3.33 \cdot 0.31''$  слабее (по оценкам спектра вблизи  $\lambda = 460$  нм) и находится на расстоянии всего  $0.255 \cdot 0.039$  от Арктур. Затем были проведены наземные наблюдения с адаптивной оптикой на 100-дюймовом телескопе Mount Wilson в видимом диапазоне [73], но полученные результаты не подтвердили двойственность Арктур. Интерес к этой интригующей проблеме снова возник при интерпретации интерферометрических наблюдений в ближнем ИК-диапазоне [76]. Систематические различия между результатами наблюдений и вычислений удалось объяснить только в предположении двойной системы, в которой вторым компонентом является субгигант спектрального класса G. В работе [56] предлагается использовать идею двухкомпонентности Арктур для объяснения избыточного потока излучения в УФ-диапазоне, предсказываемого современными моделями атмосферы Арктур. В настоящее время двойственность Арктур остается еще под вопросом. В этой работе Арктур рассматривается как одиночная звезда.

Новая база данных об эффективных температурах  $T_{\text{эф}}$ , ускорении свободного падения на поверхности  $lgg$  и металличности  $[A/H]$  в каталоге PASTEL [17] свидетельствует, что количество работ по определению атмосферных параметров Арктур продолжает расти. Разброс значений  $T_{\text{эф}}$  и  $lgg$  значительно уменьшился за последние десятилетия (рис. 1). Начиная с 1982 г. значения  $T_{\text{эф}}$  находятся в пределах от 4226

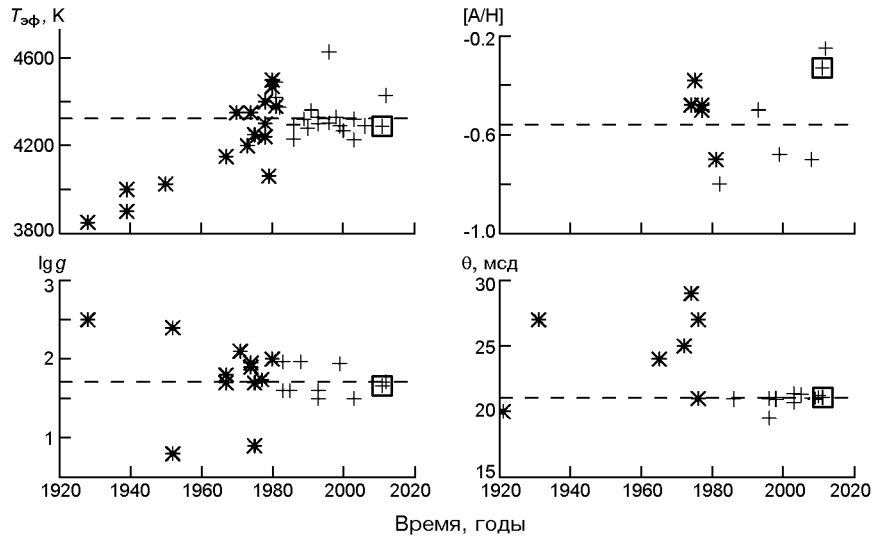


Рис. 1. Оценки эффективной температуры  $T_{\text{эф}}$ , ускорения свободного падения  $\lg g$ , металличности  $[A/H]$  и углового диаметра Арктура, сделанные в разные годы. Данные до 1981 г. (звездочки) взяты из работы [71]. Новые результаты [56] отмечены квадратиками. Штриховая линия — средние значения согласно базе данных PASTEL

до 4362 К, если исключить интерферометрическое измерение [18], которое дает высокое значение 4628 ± 133 К. Значения  $\lg g$  находятся в пределах от 1.5 до 1.94. Разброс значений  $[A/H]$  за это время практически не уменьшился, хотя определение металличности на основании спектров с высоким разрешением выполнено более чем в 20 работах. Величина металличности варьирует от  $-0.25$  до  $-0.8$ . Существенно улучшилась точность измерения углового диаметра. В среднем ошибка его измерения достигает 0.0002.

Недавно в работе [56] были обобщены результаты исследования фундаментальных параметров Арктура. Был выполнен новый спектральный анализ Арктура на основе наиболее надежных данных и методов и получены значения  $T_{\text{эф}} = 4286 \pm 30$  К,  $\lg g = 1.66 \pm 0.05$ ,  $[Fe/H] = -0.52 \pm 0.04$ ,  $M = (1.08 \pm 0.06)M_{\odot}$ ,  $R = (25.4 \pm 0.2)R_{\odot}$  и содержание химических элементов по эквивалентным ширинам спектральных линий. Значения фундаментальных параметров [56] в пределах ошибок совпадают с усредненными данными [17]:  $T_{\text{эф}} = 4324 \pm 90$  К,  $\lg g = 1.71 \pm 0.29$ ,  $[A/H] = -0.56 \pm 0.10$ .

Что касается распределения температуры с глубиной в атмосферах звезд, то его получают либо теоретическим путем на основе постоянства потока излучения на каждой глубине, либо методом масштабного множителя, применяемого к данным, полученным для Солнца. Реже применяется полуэмпирический подход, основанный на данных наблюдений распределения энергии в спектре звезды или большого количества избранных спектральных линий с высоким разрешением.

Наиболее распространенным является теоретический путь. В рассчитанных теоретических моделях нет свободных параметров. Общая непрозрачность вычисляется с учетом всевозможных источников поглощения, включая все линии поглощения. Полный список линий поглощения, необходимый для более точного учета непрозрачности, постоянно модифицируется [27]. Сегодня он насчитывает миллионы атомных линий, которые аккумулированы в базе данных VALD (<http://www.astro.uu.se/~vald>) [55] с указанием атомных параметров. Также постоянно модифицируется и список молекулярных линий [39]. После расчета непрозрачности вычисляется стратификация температуры и давления, определяемая законом сохранения энергии. Для расчета теоретических моделей звездных атмосфер наиболее часто используются программные комплексы ATLAS [44] и MARCS [30]. Эти комплексы постоянно совершенствуются для применения к более широкому классу звезд. Комплекс MARCS был недавно успешно адаптирован к операционной системе Linux [59] и сейчас является доступным для всех. С помощью ATLAS и MARCS рассчитаны сетки теоретических моделей с большим диапазоном значений для основных параметров  $T_{\text{эф}}$ ,  $\log g$ ,  $[A/H]$  и микротурбулентной скорости  $V_{\text{mic}}$ . Модель атмосферы индивидуальной звезды можно легко получить путем интерполяции нескольких моделей, взятых из сетки ATLAS (<http://kurucz.harvard.edu/>) или MARCS (<http://marcs.astro.uu.se/>).

Следует отметить значительный прогресс в развитии теоретического моделирования физически самосогласованных моделей. Традиционные приближения плоско параллельной стратификации в горизонтально однородных слоях, стационарного гидростатического равновесия, длины перемешивания для учета конвекции и локального термодинамического равновесия (ЛТР) постепенно уступают место реальной физике. Для решения неЛТР-проблем в звездных атмосферах разработан код PHOENIX [32] и созданы сетки 1DнеЛТР-моделей [33] и 3D-моделей (код CO5BOLD [46]) для звезд поздних классов. Трехмерное гидродинамическое (3DГД) моделирование включает значимые физические процессы, такие как сжимаемость среды, частичная ионизация, не серый перенос излучения, но эффективная температура не является входным параметром. Ее приходится подбирать, изменяя состояния входящего газа у основания моделируемой области, пока средняя температура не достигнет значения эффективной температуры. Для красных гигантов выполнено 3DГД-моделирование конвекции поверхностных слоев с помощью кода Optim3D [57]. Кроме того, создан новый код BIFROST для 3DГД-моделирования звездной конвекции с учетом рассеяния в уравнении переноса излучения [34]. Изучение взаимодействия конвективных движений с магнитными полями в звездах выполняется с помощью магнитогидродинамического (МГД) 3D-моделирования верхней части конвективной зоны и фотосферы (код MURaM [14]). Недавно получены интересные результаты по моделированию процессов гидромагнитного динамо с целью исследования связи генерации магнитного потока с его переносом

сом и распределения магнитных полей на поверхности холодных звезд в зависимости от их основных параметров и вращения [37]. В общих чертах анализ свойств 3ДГД-моделей показывает высокий уровень реализма в термической структуре фотосферы. К сожалению, конкретно для атмосферы Арктура результаты 3ДГД- и 3ДМГД-моделирования пока не опубликованы.

Классическое полуэмпирическое моделирование, которое часто используется для изучения солнечной атмосферы, можно успешно использовать для ярких звезд, если имеются высококачественные спектральные наблюдения. Для атмосферы Арктура полуэмпирическое моделирование выполнялось неоднократно. На основании атласа спектра Арктура [25] был получен ряд моделей атмосферы, представляющих распределение температуры и давления с высотой [10, 22, 38, 40, 47, 54]. На рис. 2 показан температурный ход этих моделей в зависимости от массы  $m$  вещества в столбе единичного сечения, лежащего над данным уровнем:  $dm = -\rho dh$ , где  $\rho$  — плотность звездного вещества,  $h$  — геометрическая высота. Различия между полученными в разных исследованиях температурными зависимостями большие. На уровне образования континуума разность температур может достигать около 500 К. Это обусловлено, в первую очередь, разбросом значений  $T_{\text{эф}}$ ,  $\lg g$  и  $[A/H]$ . В представленных на рис. 2 моделях максимальное различие между эффективными температурами составляет 170 К, между значениями ускорения свободного падения на поверхности — 0.8 dex, а между значениями металличности — 0.37 dex. Температура в глубоких слоях фотосферы наиболее чувствительна к величине  $\lg g$ , тогда как в верхних слоях — к химическому составу. Плохо определен ход температуры в нижней хромосфере вследствие определенных сложностей в моделировании этих слоев [10]. Отсюда следует, что распределение температуры в атмосфере Арктура недостаточно хорошо исследовано. Необходимы новые подходы для уточнения температурной стратификации атмосферы Арктура.

Цель работы — исследовать распределение температуры с высотой в фотосфере Арктура и построить полуэмпирическую модель на

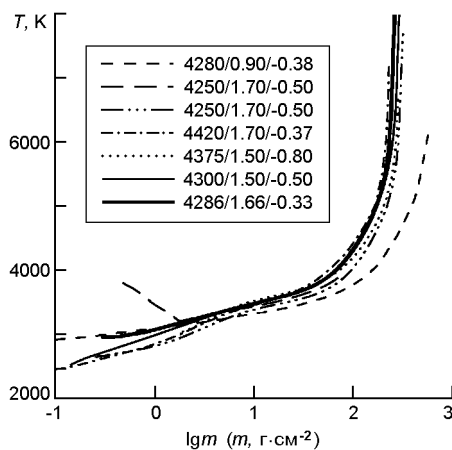


Рис. 2. Изменение температуры с глубиной в атмосфере Арктура согласно разным моделям ( $T_{\text{эф}}, \lg g, [A/H]$ ): 4280/0.90/-0.38 [47], 4250/1.70/-0.50 [10], 4250/1.70/-0.50 [38], 4420/1.70/-0.37 [40], 4375/1.50/-0.80 [22], 4300/1.50/-0.50 [54], 4286/1.66/-0.33 [56]

основании наблюдаемых с высоким разрешением широких крыльев линий  $H$  и  $K$  Ca II.

### ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРЫЛЬЕВ ЛИНИЙ $H$ И $K$ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕР

Идея применения резонансных линий  $H$  (396.8 нм) и  $K$  (393.3 нм) Ca II для построения моделей атмосфер была высказана в 1970 г. Д. Л. Линским и его коллегами [45]. Они разработали метод, который назовем « $H$ - $K$ -моделирование» атмосферы, и впервые применили его для построения спокойной солнечной хромосферы. Затем этот метод был применен для активных областей фотосферы Солнца [64], хромосферы Проциона [11] и Арктура [10]. С появлением более точных атомных данных и новых наблюдений интерес к этому методу возобновился. Недавно было выполнено новое  $H$ - $K$ -моделирование атмосферы в полутени солнечных пятен [58] и в магнитных трубках солнечных факелов [63]. Использование крыльев  $H$  и  $K$  Ca II в инверсионных кодах [13] имеет свои преимущества. Например, нет необходимости вычислять многие линии железа, потому что широкие крылья линий  $H$  и  $K$  формируются в довольно большом диапазоне высот, покрывая практически все слои фотосферы. Вследствие минимума непрозрачности в континууме вблизи длины волны  $\lambda = 400.0$  нм и высокой чувствительности функции Планка к температуре, формирование континуума происходит так же глубоко, как и вблизи длины волны  $\lambda = 1600.0$  нм. Очень важно, что крылья линий  $H$  и  $K$  вне 0.1 нм от их ядер являются нечувствительными к неЛТР-эффектам [51], и поэтому относительно легко рассчитываются при условии ЛТР. Вследствие большой протяженности крыльев такие эффекты, как расширение микро- и макротурбулентностью, вращением и магнитными полями, не оказывают заметного влияния на их профиль. Кроме того, эти крылья содержат свободные от бленд небольшие окна, которые можно использовать для моделирования атмосферы. В работе [63] была высказана идея использовать многочисленные бленды в крыльях линий  $H$  и  $K$  для определения лучевых скоростей на разных глубинах в фотосфере, а также разработан метод и протестирован для Солнца. Достоверность и надежность  $H$ - $K$ -моделирования атмосферы исследована для Солнца в работах [35, 61].

### НАБЛЮДАЕМЫЕ ПРОФИЛИ ЛИНИЙ $H$ И $K$

Первый спектрофотометрический атлас Гриффина [25] долгое время служил источником для многих спектральных исследований атмосферы Арктура благодаря высокому спектральному разрешению (150000), широкому диапазону длин волн ( $\lambda = 360.0$ —882.5 нм), низко-

му уровню шума и незначительному рассеянному свету. По сравнению с первым, второй спектральный атлас Хинкле и его коллег [36] имеет больший диапазон длин волн (от 120 до 5300 нм). Он состоит из трех частей: ультрафиолетовой (120—380 нм), оптической (360—930 нм) и инфракрасной (900—5300 нм). Для оптической части спектра спектральное разрешение составляет около 150000, а отношение сигнал-шум не меньше 1000. Сравнение спектров линий *H* и *K* из двух атласов на рис. 3 демонстрирует хорошее их совпадение, за исключением участков спектра с наибольшим поглощением в ядрах очень сильных линий. В атласе [25] они не настолько глубоки, как в атласе [36]. Различие между атласами может быть вызвано ошибками фотометрической калибровки и учета рассеянного света. Различие между атласом [25] (ромбики) и атласом [36] (крестики) в точках профиля, избранных для 1ДЛТР-моделирования атмосферы, составляет в среднем 1.3 %.

К сожалению, для Арктура до сих пор нет атласа абсолютного потока излучения с высоким спектральным разрешением. Измерения абсолютного потока Арктура с низким разрешением неоднородны и разнообразны по своему представлению. Например, точность абсолютных измерений в большом диапазоне длин волн по данным [1, 3, 4] составляет около 3.5 %. Имеющиеся данные нельзя прямо использовать для сравнения с синтетическим спектром. Как правило, они относятся к определенным полосам спектра с типичной шириной от 2.5 до 5 нм. Для сравнения с результатами расчета синтетического спектра необходимо их перевести к монохроматическим абсолютным потокам, а затем к абсолютным потокам у поверхности Арктура, используя данные об угловом диаметре звезды. В работе [26] проанализированы десять рядов данных измерений абсолютного потока Арктура и получено заключение, что систематические ошибки измерений абсолютного потока могут возникать из-за пренебрежения межзвездным по-

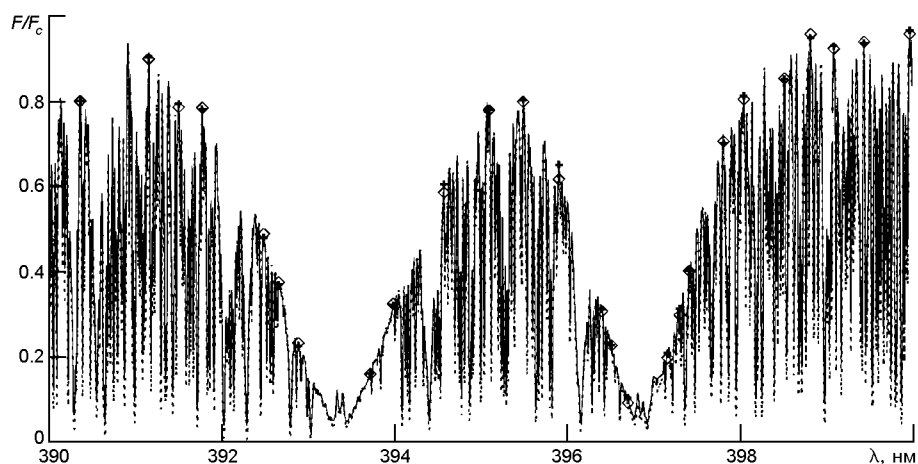


Рис. 3. Линии *H* и *K* в спектре Арктура по данным [25] (сплошная линия, ромбики) и [36] (пунктир, крестики). Символы указывают точки профиля, избранные для 1ДЛТР-моделирования атмосферы



глощением, неопределенностей абсолютной калибровки и наличия вариаций потока излучения в УФ-диапазоне вследствие радиальных пульсаций. В оптическом диапазоне совпадение между разными рядами данных вполне удовлетворительное, хотя некоторые данные заметно отличаются от остальных. В ИК-диапазоне согласие хорошее практически для всех рядов данных.

Если для звезды нет атласа спектра в абсолютных единицах, тогда возникает проблема локального континуума. Для звезд поздних спектральных классов с преобладающим частотным континуумом в наблюдаемых спектрах проводят приблизительно. Вследствие нетривиальной и трудоемкой процедуры абсолютной калибровки в анализе звездных атмосфер отдают предпочтение спектральным линиям, измеренным относительно локального континуума. К сожалению, в спектре линий *H* и *K* уровень локального континуума нельзя провести точно. В этой области спектра наблюдается большое количество перекрывающихся между собой линий атомов и молекул.

Для перевода спектра линий *H* и *K* из атласа [36] в абсолютную шкалу единиц были использованы результаты абсолютной калибровки [9, 10], основанной на фотометрии [20, 77]. На рис. 4 представлены полученные профили потока излучения в линиях *H* и *K* в абсолютных единицах. Величина возможной неопределенности абсолютной калибровки согласно [10] может достигать 20—30 %. Это обусловлено неопределенностью измерения углового диаметра Арктур в то время, а также возможными ошибками фотометрии и определения калибровочных множителей, усредненных по фотометрическим полосам. В фотометрии [20, 77] использованы полосы с шириной 5 и 3 нм соответственно. Как видно из рис. 4, наибольшее различие (5—10 %) между результатами калибровки по данным двух фотометрий проявляется

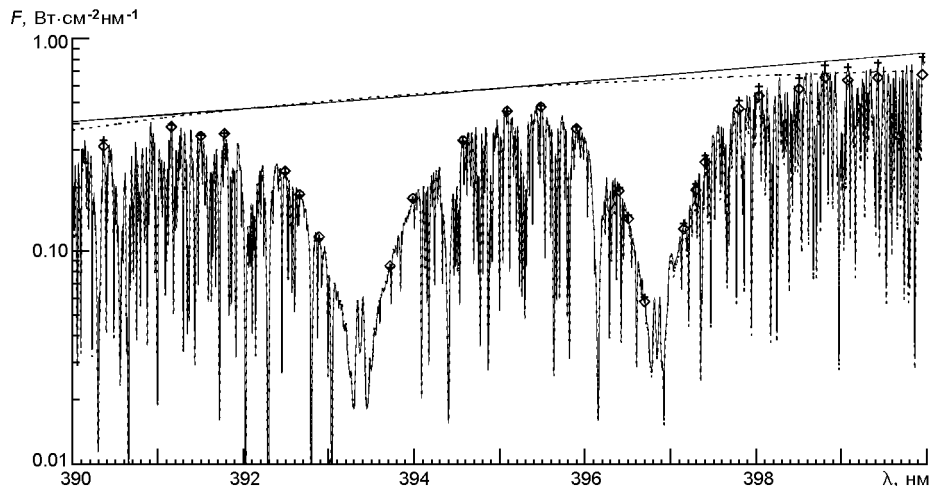


Рис. 4. Абсолютный поток в *H*- и *K*-спектре Арктур согласно абсолютной калибровке [10], основанной на данных фотометрии [77] (темный пунктир и ромбики), и калибровке [9], основанной на фотометрии [20] (светлая линия и крестики). Различие в избранных точках профиля между двумя калибровками составляет в среднем 7.2 %

в далеком крыле  $H$ -линии. Согласно [9, 10] это различие незначительное, так как оно меньше, чем величина неопределенности для данной калибровки.

#### РАСЧЕТ КРЫЛЬЕВ ЛИНИЙ $H$ И $K$ Ca II

Для расчета синтетического спектра была использована программа SPANSAT [2]. Она была модифицирована, чтобы выполнять расчет спектра, содержащего любое количество перекрывающихся спектральных линий. Атомные параметры всех линий (около 6000) в диапазоне длин волн от 390 нм до 400 нм были взяты из базы данных VALD [42]. Молекулярные линии не были включены в список бленд для расчета крыльев. Согласно [38] Арктур достаточно горячая звезда, чтобы молекулы играли существенную роль в структуре ее атмосферы. Исключением могут быть только молекулы CO, которые дают эффект охлаждения вблизи поверхности, а также молекулы TiO, которые слегка нагревают всю атмосферу. Основываясь на этих результатах, можно предположить, что вклад линий молекул в интенсивность крыльев линий  $H$  и  $K$  незначителен. Чтобы убедиться в этом, мы провели тестовые расчеты с использованием полного списка линий молекул [72]. Результаты теста представлены на рис. 5. В самых далеких крыльях вклад линий молекул слегка понижает относительный поток излучения. Особенно это заметно в коротковолновом крыле  $K$ -линии. Избранные для моделирования 26 точек (отмеченные символами на рис. 5) в крыльях линий  $H$  и  $K$  мало подвержены влиянию молекулярных бленд.

Для Арктура поле фотосферных скоростей, параметры которого необходимо задать для расчета крыльев линий  $H$  и  $K$ , лучше описывается анизотропной радиально-тангенциальной моделью микро- и мак-

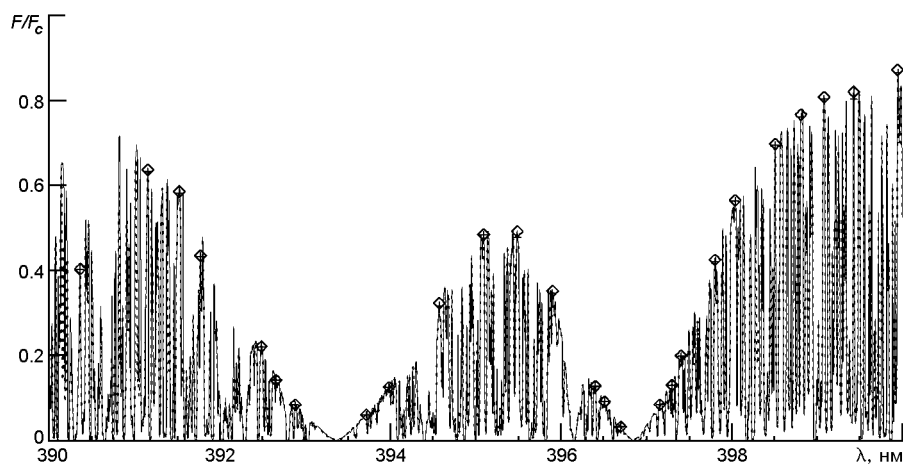


Рис. 5.  $H$ - и  $K$ -спектр Арктура, вычисленный с учетом (сплошная линия и крестики) молекулярных линий и без учета (пунктир и ромбики). Поправка за УФ-дефицит не вводилась в расчеты. Различие в избранных точках профиля составляет 0.5 %

ротурбулентных скоростей [23, 62]. Кроме того, известно, что амплитуда микротурбулентной скорости увеличивается с высотой от 0.5 до 2.2 км/с в области  $\lg \tau$  от 0 до  $-2$  [69]. Заметим, что для Солнца в этой области оптических глубин микротурбулентность уменьшается с высотой, а ее рост с высотой начинается около  $\lg \tau = -3$  [28]. В атмосферах звезд поздних классов поле скоростей тесно связано с конвективными движениями. По-видимому, противоположное поведение турбулентных движений в атмосферах Солнца и Арктура объясняется различием свойств конвективных движений, проникающих в фотосферу. Результаты моделирования конвективной оболочки Арктура [41] в приближении среднего поля показывают, что глубина внешней конвективной зоны Арктура простирается вглубь до расстояния от центра звезды, которое равняется 3 % от радиуса. По всей глубине в звезде происходят конвективные движения, похожие на солнечную грануляцию и супергрануляцию. Так как влияние поля скоростей на широкие крылья  $H$  и  $K$  незначительно, в данной работе для простоты расчетов использована амплитуда общего поля скоростей  $V_t$ . Впервые она была введена в работе [9] как  $V_t^2 = V_{mic}^2 + V_{mac}^2$ . В этой работе принято значение  $V_t = 3.7$  км/с, если предположить, что изотропные  $V_{mic} = 1.6$  и  $V_{mac} = 3.3$  км/с согласно [62].

Согласно работам [15, 24] новое более точное значение скорости вращения атмосферы Арктура  $V \sin i = 1.5 \pm 0.3$  км/с стало меньшим по сравнению с предыдущим значением  $V \sin i = 2.4$  км/с [23]. Скорость вращения Арктура на экваторе составляет  $1.8 \pm 0.3$  км/с, наклон оси вращения к лучу зрения равен  $58 \pm 25^\circ$ , период вращения — около двух лет. Для расчета профиля крыльев мы приняли значение  $V \sin i = 1.5$  км/с.

Для Солнца как звезды принято значение амплитуды общего поля турбулентных скоростей  $V_t = 2.6$  км/с согласно данным  $V_{mic} = 1.2$  км/с и  $V_{mac} = 2.3$  км/с [5] и стандартное значение скорости вращения  $V \sin i = 1.8$  км/с.

Еще есть очень важные для расчета синтетического спектра параметры — параметры затухания. Форма широких крыльев линий  $H$  и  $K$  определяется в основном затуханием излучения и эффектами давления, которые проявляются вследствие столкновения между поглощающими ионами кальция и атомами нейтрального водорода и гелия (уширение Ван-дер-Ваальса). Поэтому постоянная  $C_6$  уширения Ван-дер-Ваальса является важным параметром в расчетах крыльев линий  $H$  и  $K$ . Как показано в работе [8], для линий  $H$  и  $K$  необходимо вводить поправочный множитель к значению  $C_6$ , рассчитанному по классической формуле Унзольда. Для линий  $H$  и  $K$  в центре солнечного диска такой множитель равен  $1.6 \pm 0.5$  [8].

Рис. 6 демонстрирует профили линий  $H$  и  $K$ , вычисленные для Арктура и Солнца (как звезды) с разными значениями поправочного множителя к  $C_6$ . В настоящее время уже не требуется определять поправочный множитель для каждой спектральной линии. С помощью

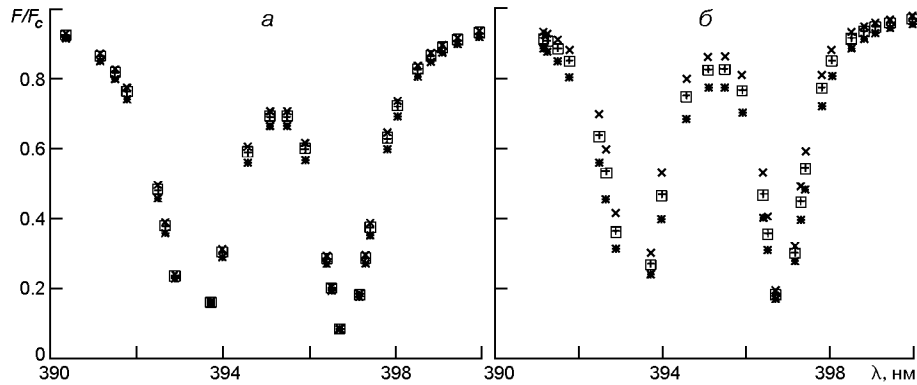


Рис. 6. Рассчитанные линии  $H$  и  $K$  (без бленд) для Арктура ( $a$ ) и Солнца как звезды ( $b$ ) с разными значениями постоянной затухания  $C_6$ : косые крестики —  $1.0C_6$ , квадратики —  $1.3C_6$  (Арктур),  $1.4C_6$  (Солнце), звездочки —  $2.0C_6$ , плюсики — уширение Ван-дер-Ваальса согласно методу [12]

метода, основанного на квантовомеханических оценках [12],  $C_6$  определяется достаточно надежно. Для ее расчета мы используем код, свободно представленный авторами этого метода.

В расчетах спектральных линий содержание химических элементов соответствует значениям, которые были приняты в стартовых моделях.

### ПРОБЛЕМА ДЕФИЦИТА УФ-ПОГЛОЩЕНИЯ

В УФ-диапазоне вычисленный поток излучения Арктура существенно превышает наблюдаемый. Этот эффект назвали дефицитом УФ-поглощения («УФ-дефицит») [29] из-за естественного предположения о наличии неизвестных поглотителей, которые подобно непрерывному поглощению могут значительно понизить уровень излучения в ультрафиолете. Это поглощение может быть вызвано большим количеством неизвестных слабых линий (line haze) или неизвестными источниками непрерывного поглощения. Кроме того, возможно влияние нелТР-эффектов, неоднородностей атмосферы, наличия невидимых спутников звезды, ошибок абсолютных измерений УФ-спектра, обусловленных атмосферным поглощением.

Для построения модели атмосферы эффект дефицита УФ-поглощения является важным, поскольку без его учета моделирование звездной атмосферы приведет к более холодной модели. Согласно нашим оценкам [63] для солнечного  $H$ - и  $K$ -спектра в центре диска расхождение между результатами вычислений и наблюдений в ультрафиолете относительно небольшое и зависит от модели фотосферы. Оно оценивалось с помощью поправочного множителя  $f(\lambda)$  к непрозрачности в континууме, который вводился в расчет профилей как  $\tau_{\text{new}} = f(\lambda) \tau$ . В рамках известных солнечных моделей HOLMUL,

VALC, HSRA-SP в среднем для диапазона 390...400 нм поправочный множитель составляет  $f = 1.14, 1.05, 1.01$  соответственно. Чем горячее модель фотосферы Солнца, тем больше этот множитель.

В результате детального исследования проблемы дефицита УФ-поглощения в работах [65—68] сделан вывод, что наиболее вероятной причиной большого различия между вычисленным и наблюдаемым потоком в УФ-диапазоне является неучтенное непрерывное поглощение двухатомных молекул гидридов металлов MgH, SiH, FeH. В общем обнаруженный дефицит УФ-поглощения для Арктура был не удивительным, поскольку он ранее был известен для Солнца. При рассмотрении всех результатов абсолютных измерений солнечного потока излучения оказалось, что новые более точные измерения уменьшают дефицит УФ-поглощения, который по данным [49, 50] для Солнца составлял 10 %. По данным измерений на пике Терскол [16] и со спутника EURECA [70] солнечный УФ-поток оказался соответственно на 8 и 4 % выше, чем по данным [49, 50].

По оценкам [66] поправочный множитель для УФ-поглощения в спектре Солнца как звезды составляет  $f = 1.15$ , а в спектре Арктура —  $f = 2$ . При этом принимался во внимание большой список линий поглощения, сферичность атмосферы, неЛТР-эффекты, более точный химический состав, неоднородность атмосферы. Несмотря на все уточнения, значение множителя  $f$  для Арктура не изменилось. Авторы считают, что значительное количество недостающей непрозрачности, вероятнее всего, связано с непрерывным поглощением неизвестных источников. Кроме того, было обнаружено, что среди исследованных звезд классов G—K с металличностью от 0 до 0.5 только Арктур обладает аномально большим дефицитом УФ-поглощения.

Итак, анализ результатов исследования дефицита УФ-поглощения показал, что природа этого явления пока неизвестна. В следующих работах мы планируем проверить предположение о том, что спутник Арктура может быть причиной превышения потока излучения в УФ-спектре Арктура, здесь же недостающие источники непрерывного поглощения в УФ-диапазоне будем учитывать с помощью поправочного множителя  $f(\lambda)$  к непрозрачности в континууме.

## МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗВЕЗДНЫХ АТМОСФЕР

Процесс полуэмпирического моделирования начинается с выбора стартовой модели, которая задает начальное приближение для распределения температуры и давления с высотой. Такую модель можно выбрать из сетки стандартных звездных моделей, рассчитанной для заданных  $T_{\text{эф}}$ ,  $\lg g$  и металличности. Остальные недостающие параметры модели, необходимые для расчета синтетического спектра, вычисляются при условии гидростатического равновесия в вертикальном направлении для случая плоскопараллельной геометрии. Согласно [66]

сферическая модель атмосферы Арктур в наружных слоях атмосферы только немного (на 50 К) «теплее», чем плоскопараллельная. Этим можно пренебречь в моделировании фотосферы Арктур. Поэтому в данной работе сферичность атмосферы не учитывается для простоты вычислений.

С подготовленной стартовой моделью рассчитываются крылья линий  $H$  и  $K$  с учетом всех бленд. Для сравнения с наблюдениями и ускорения вычислительного процесса поток излучения рассчитывается в избранных 26 точках вдоль всего участка  $H$ - и  $K$ -спектра, которые являются почти свободными от бленд. Эти точки профиля отмечены символами на рис. 3—8. Синтетический профиль в 26 точках сравнивается с данными наблюдений. Для количественной оценки наилучшего согласия между профилями в этих же точках вычисляются средние квадратичные отклонения синтетического спектра от наблюдаемого согласно следующей формуле:

$$\frac{F_{syn} - F_{obs}}{F_{obs}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[F_{syn}(i) - F_{obs}(i)]^2}{F_{obs}(i)^2}}, \quad (1)$$

где  $F_{syn}(i)$  и  $F_{obs}(i)$  — вычисленный и наблюдаемый абсолютный поток излучения в линии для длины волны  $\lambda_i$ , где  $i = 1, \dots, 26$ . Если подгонка профилей производится в относительной шкале, тогда равна

$$(r_{syn} - r_{obs}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_{syn}(i) - r_{obs}(i))^2}, \quad (2)$$

где  $r(i)$  — отношение потока излучения в линии к потоку излучения в локальном континууме для конкретной точки профиля  $\lambda_i$ .

Если согласие между наблюдаемым и вычисленным спектром неудовлетворительное, распределение температуры изменяется до тех пор, пока согласие между ними будет наилучшим. Каждое последующее изменение температурного распределения выполняется вручную в специально выбранных 13 точках по высоте, начиная с верхних слоев. Если необходимо сохранить неизменной эффективную температуру стартовой модели, тогда коррекция температуры заканчивается в слоях формирования континуума ( $\log g \approx 1$ ). Таким способом можно уточнять только ход температуры, не изменяя  $T_{эф}$ . Точки, где интерактивно изменяется температура, выбираются неравномерно по высоте. Их выбор зависит от величины температурного градиента. Затем выполняется интерполяция по всем заданным в начальной модели точкам по высоте, и уже с новой температурной стратификацией производится пересчет газового давления и остальных модельных параметров.

Каждая последующая итерация в процессе согласования вычисленного и наблюдаемого спектров минимизирует сумму средних

квадратичных отклонений. В принципе подобная процедура отягощена проблемой единственности решения. Наш предыдущий опыт построения моделей для фотосферы Солнца [61, 63] свидетельствует о том, что такая процедура подгонки дает удовлетворительные результаты. Обычно полагается, что полученная в результате подгонки модель атмосферы Солнца, которая дает наилучшее согласие между теорией и наблюдениями, представляет истинную солнечную атмосферу в рамках заложенных в методе приближений и присущих наблюдениям усреднений. Для звезд ситуация несколько сложнее. Звездные профили из-за низкого пространственного разрешения не могут адекватно представлять спокойную атмосферу из-за крупномасштабных горизонтальных неоднородностей поверхности звезды. Спектральная линия содержит вклады от всей поверхности, что требует в принципе применения многокомпонентной модели. Однако можно ожидать, что для Арктура, как и для звезд солнечного типа, однокомпонентная модель является приемлемой. Ранее в работе [60] было показано, что солнечные интегральные профили Ca II, в частности их крылья, мало изменяются в зависимости от солнечной циклической активности. Кроме того, для звездных спектров есть ошибки абсолютной калибровки наблюдений из-за проблем фотометрии слабых объектов. Поэтому даже наилучшее совпадение не позволяет получить модель реальной атмосферы звезды.

Для пересчета модели в каждой итерации используется программа SPANSAT. Коэффициент непрерывного поглощения пересчитывается при изменении температурной стратификации по алгоритму ATLAS [43] с учетом следующих источников поглощения и рассеивания: 1) H I; 2) H<sub>2</sub>; 3) H — связанно-свободные и свободно-свободные переходы; 4) H I — рэлеевское рассеяние; 5) He I; 6) He II — связанно-свободные и свободно-свободные переходы; 7) He — свободно-свободные переходы; 8) He I — рэлеевское рассеяние; 9) C I, Mg I, Si I, Al I (низкотемпературные поглотители) и Si II, Mg II, Ca II, N I, O I (среднетемпературные) — связанно-свободные и свободно-свободные переходы; 10) C II—IV, N II—V, O II—VI, Ne I—II (высокотемпературные) — связанно-свободные переходы; 11) рэлеевское рассеяние на электронах и на H<sub>2</sub>. Отметим, что все модельные расчеты и расчеты спектра выполняется с одним и тем же химическим составом, который задается в стартовой модели.

Чтобы убедиться в надежности используемого метода *H-K*-моделирования для звездных атмосфер, мы сначала применили его для Солнца как звезды, а затем для Арктура.

## СТАРТОВЫЕ УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для Солнца стартовой моделью послужила модель HSRA-SP-M [63]. Химический состав солнечной атмосферы соответствует новым данным [21]. Наблюдаемый спектр для Солнца как звезды в абсолютных

единицах был любезно представлен Р. Руттенем на электронных носителях. Он соответствует данным атласа Неккеля и Лабса [50] с абсолютной калибровкой, выполненной Неккелем [49].

Для Арктурэ эффективная температура  $T_{\text{эф}} = 4286$  К, ускорение свободного падения на поверхности  $lgg = 1.66$  и конкретные значения содержания металлов С, О, Na, Mg, Al, Si, S, К, Са, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni относительно водорода были взяты из работы [56]. На основании этих данных была рассчитана стратификация температуры и давления в зависимости от массы  $m$  с помощью модифицированного кода ATLAS12 [52]. Следует отметить, что в среднем содержание металлов [56] относительно солнечного [21]  $[A/H] = \lg(N_A / N_H)_{\text{star}} - \lg(N_A / N_H)_{\odot} = -0.33$ , тогда как по базе данных PASTEL  $[A/H] = -0.56$ . Содержание альфа-элементов О, Mg, Si, S, Са и Ti [56]  $[A/Fe] = \lg(N_A / N_{Fe})_{\text{star}} - \lg(N_A / N_{Fe})_{\odot} = 0.31$ , тогда как содержание железа  $[Fe/H] = -0.52$ . Стартовую модель атмосферы Арктурэ обозначим как 4286/1.66/-0.33 в соответствии с принятыми фундаментальными параметрами  $T_{\text{эф}}/lgg/[A/H]$ .

Чтобы проверить влияние неопределенностей значений фундаментальных параметров Арктурэ на конечный результат, дополнительно использовались еще три стартовые модели из сетки моделей Куруца. Содержание металлов в этих моделях было просто получено вычитанием 0.5 dex из солнечного содержания [7], т. е.  $[A/H] = -0.5$ . Эффективная температура составляла  $T_{\text{эф}} = 4250$  и 4300 К, а ускорение свободного падения —  $lgg = 1.5$  и 2.0 (эти модели обозначены как 4250/1.5/-0.5, 4250/2.0/-0.5 и 4300/1.5/-0.5).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Моделирование солнечной атмосферы (Солнце как звезда).** Несмотря на то, что для Солнца как звезды имеется высокоточный спектральный атлас в абсолютных единицах [49, 50], мы выполнили  $H$ - $K$ -моделирование атмосферы Солнца также с использованием спектра в относительных единицах, чтобы сопоставить полученные результаты моделирования.

Из рис. 7, а видно, что вычисленные со стартовой моделью HSRA-SP-M и без учета поправки к континууму профили линий  $H$  и  $K$  (ромбики) только слегка отклоняются от наблюдаемых. Наилучшее согласие между результатами вычислений (крестики) и наблюдений было получено путем введения поправочного множителя к коэффициенту непрерывного поглощения и небольшим (около 150 К) понижением температуры в глубоких слоях фотосферы (рис. 7, в). Поправочный множитель потребовался только для кратковолнового крыла  $K$ -линии. В результате согласования крыльев профилей получено среднее по профилю минимальное среднее квадратичное отклонение  $\sigma = 0.016$  и поправочный множитель  $f(\lambda) = 1.15, 1.1, 1.0, 1.0, 1.0$  соответственно для  $\lambda = 390.0, 392.5, 395.0, 398.0, 400.0$  нм.



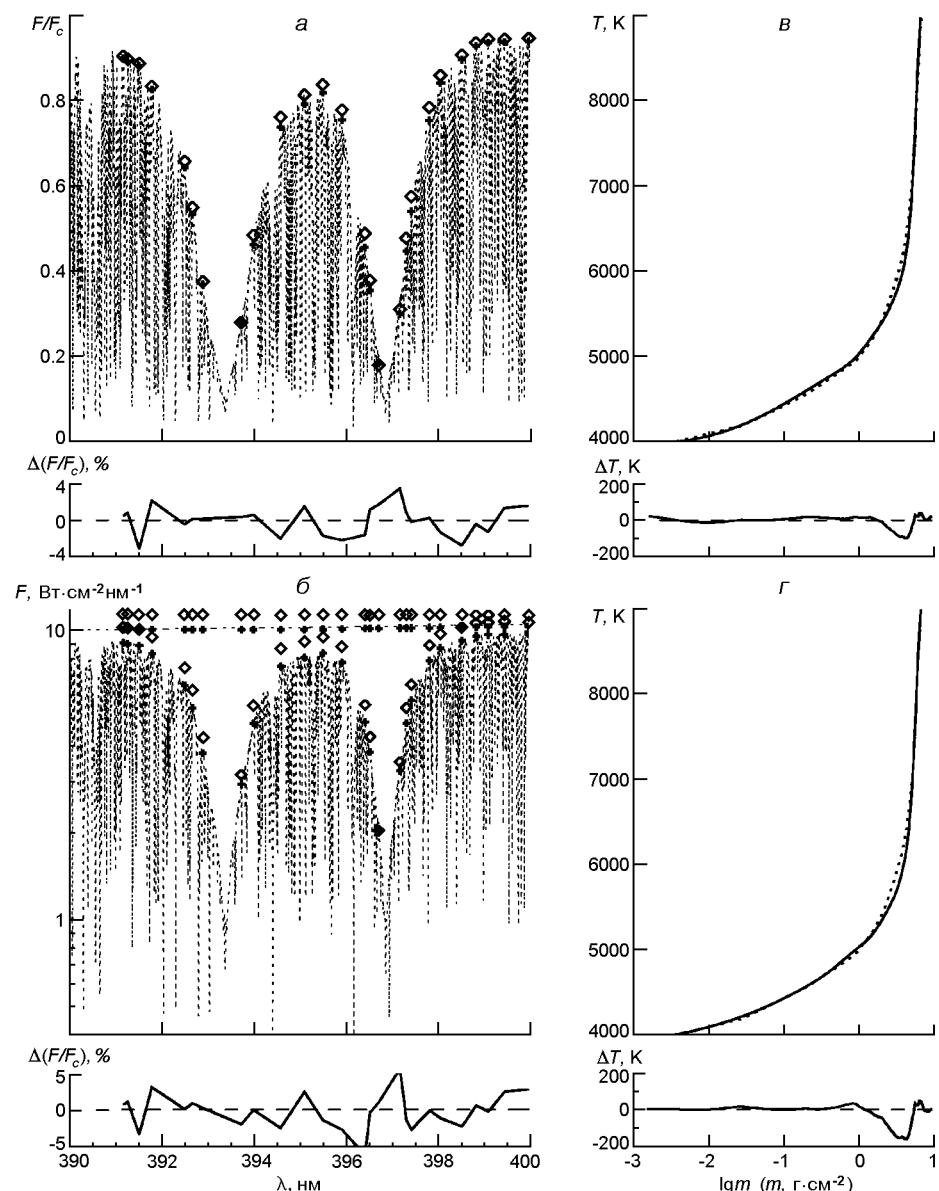


Рис. 7. Результаты 1DЛТР-моделирования для Солнца как звезды. Наблюдаемый поток излучения (светлый штрих) представлен в относительных (а) и в абсолютных (б) единицах. Ромбики — профиль, вычисленный со стартовой моделью и без поправки за УФ-дефицит. Лучшее согласие между вычисленным (крестики) и наблюдаемым профилями показано в избранных 26 точках, а различия между ними показано на нижних панелях. Полученная в результате моделирования температурная стратификация (в, г) показана сплошной линией в сравнении с стартовой моделью HSRA-SP-M (пунктир). Различия между ними показано на нижних панелях

Рис. 7, б, г представляют результаты моделирования атмосферы с использованием *H*- и *K*-спектра в абсолютных единицах. Вычисленный со стартовой моделью поток излучения в линиях *H* и *K* и в континууме (без учета поправочного множителя к континууму) явно пре-

вышает данные наблюдений (рис. 7, б). Дефицит УФ-поглощения для вычисленного континуума в диапазоне длин волн 390—400 нм составляет в среднем 9.3 %. Наилучшее согласие между синтетическим спектром и наблюдениями достигнуто при минимальном значении  $\tau = 0.015$  с поправочным множителем  $f(\lambda) = 1.20, 1.2, 1.2, 1.17, 1.15$  для  $\lambda = 390.0, 392.5, 395.0, 398.0, 400.0$  нм, и с понижением температуры на 150—250 К в слоях эффективного формирования континуума. Полученная модель фотосферы Солнца как звезды оказалась холоднее, чем модель HSRA-SP-M, выведенная таким же методом для центра диска Солнца (рис. 7, з). Следует отметить, что уровень локального континуума в наблюдаемом спектре линий  $H$  и  $K$  удовлетворительно согласуется с вычисленным (рис. 7, б). По этой причине синтетические профили крыльев линий  $H$  и  $K$  в относительных единицах ( $F/F_C$ ) и без учета поправки к континууму оказались близкими к наблюдаемым профилям. Если бы локальный континуум идеально совпал с вычисленным, тогда в относительной шкале не потребовалось бы вводить поправочный множитель к континууму, так как УФ-дефицит просто был бы скомпенсирован.

**Моделирование атмосферы Арктика.** Рис. 8, а демонстрирует результаты согласования профилей в относительных единицах с использованием стартовой модели 4286/1.66/–0.33. По сравнению с наблюдениями синтетические профили без учета поправки к континууму ( $f = 1$ ) более глубокие не только в крыльях, но и в центральных частях линий. Введение поправочного фактора  $f(\lambda)$  в расчеты непрозрачности и изменение температурного хода с глубиной позволило значительно улучшить совпадение синтетических и наблюдаемых профилей. Тем не менее, получить удовлетворительные результаты не удалось. Поправка к непрозрачности оказалась довольно большая по сравнению с солнечными данными. Для Арктика получено  $f(\lambda) = 3.16, 2.62, 2.26, 1.99, 1.81$  соответственно для  $\lambda = 390.0, 392.5, 395.0, 398.0, 400.0$  нм. Минимальное значение среднего квадратичного отклонения ( $\sigma = 0.035$ ) в два раза больше, чем в случае солнечного спектра. Из рис. 8, в видно, что полученная в данном случае модель оказалась горячее на 200 К в глубоких фотосферных слоях, чем стартовая модель 4286/1.66/–0.33.

Для других стартовых моделей (4250/1.5/–0.5, 4250/2.0/–0.5, 4300/1.5/–0.5, а также 4260/0.9/–0.38 [47], 4250/1.7/–0.50 [38], 4420/1.7/–0.37 [40], 4375/1.5/–0.8 [22] и 4300/1.5/–0.5 [54]) совпадение между вычисленными и наблюдаемыми профилями в относительных единицах существенно не улучшилось. Лучшего значения, чем  $\sigma = 0.035$ , получить не удалось. Эти результаты показали, что различие в стартовых условиях моделирования практически не влияют на результаты согласования вычисленного профиля и наблюдений. Основными причинами неудовлетворительного согласия профилей, по всей вероятности, является совместное влияние неопределенностей локального континуума в атласе [36] и эффекта «УФ-дефицита».

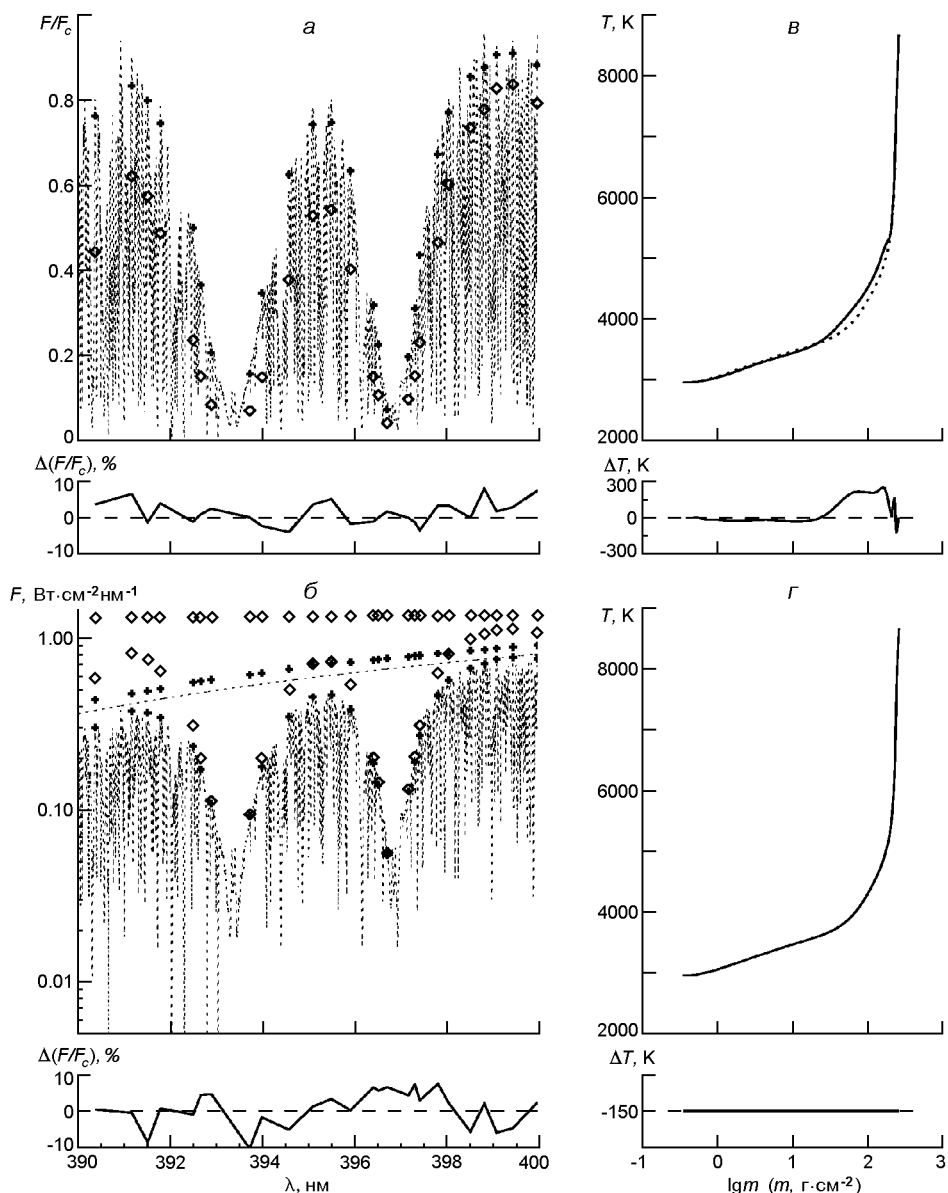


Рис. 8. Результаты 1D LTE-моделирования для Арктура со стартовой моделью 4286/1.66/-0.33 (пунктир). Все обозначения см. на рис. 7

Вычисленный поток излучения в абсолютных единицах (без поправки к континууму) со стартовой моделью 4286/1.66/-0.33 значительно превышает наблюдаемый поток в линиях *H* и *K* (рис. 8, б). Это значит, что дефицит УФ-поглощения для Арктура очень большой, и достигает по нашим оценкам 42.6 %. Это намного больше, чем для Солнца. Учет неизвестного поглощения в континууме с помощью множителя  $f(\lambda)$  позволил найти удовлетворительное согласие между синтетическим спектром и наблюдениями со значением  $f(\lambda) = 0.028$ . При этом были получены значения  $f(\lambda) = 2.45, 1.95, 1.65, 1.45, 1.35$  (фото-

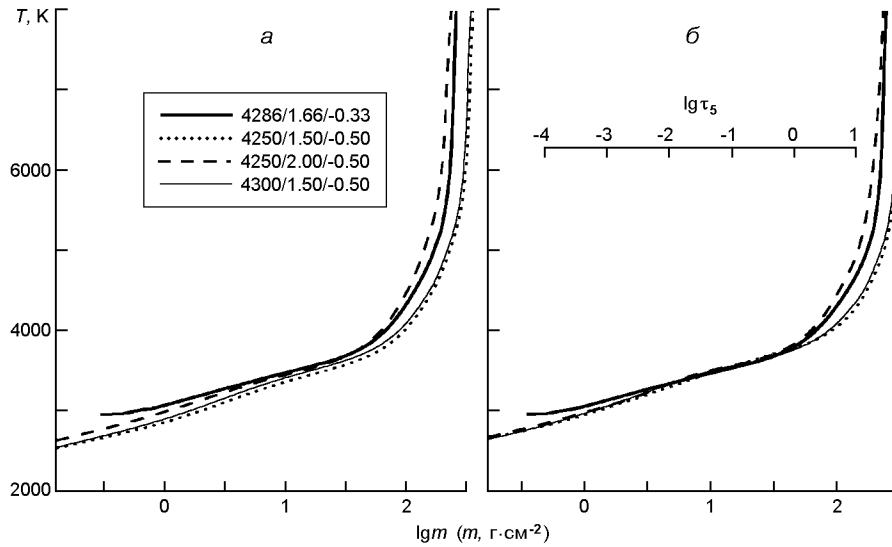


Рис. 9. Распределение температуры в атмосфере Арктур в зависимости от логарифма массы  $\lg m$  для стартовых моделей (а) и моделей, полученных в результате подгонки абсолютных потоков излучения в крыльях линий  $H$  и  $K$  (б). Справа сверху — шкала оптических глубин  $\lg \tau_5$

метра [20]) и  $f(\lambda) = 2.2, 1.9, 1.7, 1.55, 1.45$  (фотометрия [77]) для длин волн 390.0, 392.5, 395.0, 398.0, 400.0 нм. Попытки улучшить согласие профилей (т. е. получить такое значение  $\tau$ , как для солнечного спектра) с помощью изменения температурного хода не привели к успеху. По-видимому, причиной этого является недостаточно надежная абсолютная калибровка, более низкое разрешение наблюдаемого спектра Арктур по сравнению с солнечным, и, возможно, наличие спутника у Арктур.

Полученные результаты согласования спектров в абсолютных единицах свидетельствуют о том, что модель 4286/1.66/-0.33 без коррекции температурного хода, но с учетом поправки за недостающее поглощение в континууме, достаточно надежно описывает наблюдаемые крылья линий  $H$  и  $K$  и указывает на занижение локального континуума в среднем на 12 %.

На рис. 9, а, б показаны температурные стратификации нескольких стартовых моделей и соответственно им полученные в результате  $H$ - $K$ -моделирования новые стратификации. Отчетливо видно, что в области оптических глубин от  $\lg \tau_5 = 2.5$  до 0.3 (рис. 7, б), где эффективно формируются крылья линий  $H$  и  $K$ , новые температурные стратификации приблизились к температурной стратификации модели 4286/1.66/-0.33. Поправочные множители к континууму в каждом случае разные. Для 4250/1.5/-0.5 модели  $f(\lambda) = 1.96, 1.60, 1.42, 1.33, 1.30$ ; для 4250/2.0/-0.5 модели  $f(\lambda) = 2.05, 1.76, 1.59, 1.47, 1.38$  и для 4300/1.5/-0.5 модели  $f(\lambda) = 2.1, 1.8, 1.6, 1.5, 1.5$ . Чем выше  $T_{\text{эф}}$ , тем больше эффект «УФ-дефицита».

## ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные на рис. 7, *а*, *б* результаты согласования синтетического и наблюдаемого солнечного потока излучения в крыльях линий *H* и *K* для двух случаев (в относительных и абсолютных единицах) демонстрируют почти одинаково хорошее совпадение ( $\delta = 0.016$  и  $0.015$ ), потому что локальный континуум проведен достаточно удачно. Об этом свидетельствует удовлетворительное ( $\delta = 0.014$ ) согласие наблюдаемого континуума и вычисленного с учетом поправки за эффект УФ-дефицита (рис. 7, *б*) в пределах ошибок данного анализа. Именно по этой причине выведенное новое распределение температуры с высотой для Солнца как звезды получилось в обоих случаях почти одинаковым (рис. 7, *в*, *г*).

По сравнению с моделью для центра диска Солнца HSRA-SP-M [63] полученная в данной работе модель для Солнца как звезды оказалась холоднее на 100—200 К в слоях эффективного образования континуума. Это различие, вероятнее всего, обусловлено горизонтальными и вертикальными температурными неоднородностями, которые образуются вследствие проникающей конвекции в поверхностных слоях атмосферы и не учитываются при 1D-моделировании. В связи с этим интересно отметить, что выполненный в работах [61, 74] анализ влияния температурных неоднородностей на результаты 1D-моделирования показал, что 1D-модели фотосферы Солнца в центре диска могут быть завышены на 200 К в этих же слоях. В случае 1D-моделирования атмосферы Солнца как звезды действие температурных неоднородностей на выходящую интенсивность, обусловленных грануляцией, различное в центральной зоне и краевых зонах диска Солнца. Поток из центральной зоны поверхности дает завышенную температуру, а поток из краевых зон — заниженную. В результате усреднения интенсивности по всему диску происходит компенсация этих эффектов и получается, что 1D-модель атмосферы Солнца как звезды ближе к реальной, чем 1D-модель атмосферы в центральной части диска.

Для Арктура сравнение результатов согласования синтетического и наблюдаемого потока излучения в крыльях линий *H* и *K* в относительных (рис. 8, *а*) и абсолютных (рис. 8, *б*) единицах демонстрирует большие проблемы как в расчетах континуума, так и при проведении локального континуума в наблюдаемом *H-K*-спектре. Согласно нашим результатам локальный континуум занижен в среднем на 12 %. Как раз по этой причине в относительной шкале единиц не удалось получить удовлетворительное согласие с наблюдениями ( $\delta = 0.035$ ). При использовании относительных потоков излучения для моделирования атмосферы понижение континуума на 12 % ведет к повышению температуры примерно на 200 К в слоях формирования континуума (рис. 8, *в*). В абсолютной шкале результаты согласования синтетического и наблюдаемого *H*- и *K*-спектра не зависят от локального кон-

тинуума, поэтому они лучше ( $\epsilon = 0.028$ ), чем в относительной шкале, но хуже, чем для солнечного спектра ( $\epsilon = 0.015$ ). В связи с этим необходимо подчеркнуть, как важно использовать потоки излучения в абсолютных единицах при моделировании звездных атмосфер. В противном случае нельзя избежать ошибок из-за неточного локального континуума.

Заметим, что для описания наблюдаемого  $H$ - и  $K$ -спектра в абсолютных единицах наилучшие результаты (без дополнительных изменений температурной стратификации) были получены со стартовой моделью 4286/1.66/−0.33 (рис. 8, *з*). Этот факт свидетельствует о надежности значений фундаментальных параметров Арктура, полученных в работе [56]. Если предположить, что модель 4286/1.66/−0.33 наиболее близка к реальной, тогда остальные результаты согласования спектров, полученные с разными стартовыми моделями (рис. 9, *а*), демонстрируют влияние возможных ошибок фундаментальных параметров звезды на атмосферный ход температуры. Новые полученные зависимости температуры с высотой (рис. 9, *б*) совпадают между собой в слоях эффективного формирования  $H$ - и  $K$ -крыльев ( $\lg \tau_5 = 2.5$  до  $\lg \tau_5 = 0.3$ ). Это говорит о том, что данный метод надежно определяет стратификацию температуры в слоях фотосферы, независимо от неопределенности значений фундаментальных параметров звезды. В более глубоких подфотосферных слоях, где данный метод нечувствителен к изменению температуры, температурный ход соответствует стартовым моделям. Здесь расхождение между стартовыми моделями обусловлено в основном различием величины ускорения свободного падения на поверхности. В глубоких слоях влияние химического состава мало, так как основную роль поставщика электронов здесь играет водород. В самых верхних слоях фотосферы и нижней хромосферы, где  $\lg \tau_5 < 2.5$ , на температурный ход одинаковым образом влияют ускорение свободного падения и химический состав атмосферы. Основными источниками свободных электронов в этих слоях являются металлы. Для стартовой модели 4286/1.66/−0.33 содержание металлов  $[A/H]$  в среднем на 0.17 dex больше, чем для других стартовых моделей. Увеличение содержания металлов приводит к повышению электронного давления, а значит к увеличению непрозрачности, уменьшению газового давления и увеличению температуры в этих слоях. Поэтому в высоких слоях температура стартовой модели 4286/1.66/−0.33 выше, чем остальных стартовых моделей (рис. 9, *а*). В результате  $H$ - $K$ -моделирования различие между полученными моделями в верхних слоях явно уменьшилось (рис. 9, *б*), но не исчезло. Чтобы уточнить модель в этих хромосферных слоях, необходимо рассчитывать профили ядер линий  $H$  и  $K$ , но это выходит за рамки данного анализа.

Рис. 10 демонстрирует  $H$ - и  $K$ -спектр со всеми блендами, вычисленный в рамках модели 4286/1.66/−0.33 с учетом поправки к непро-

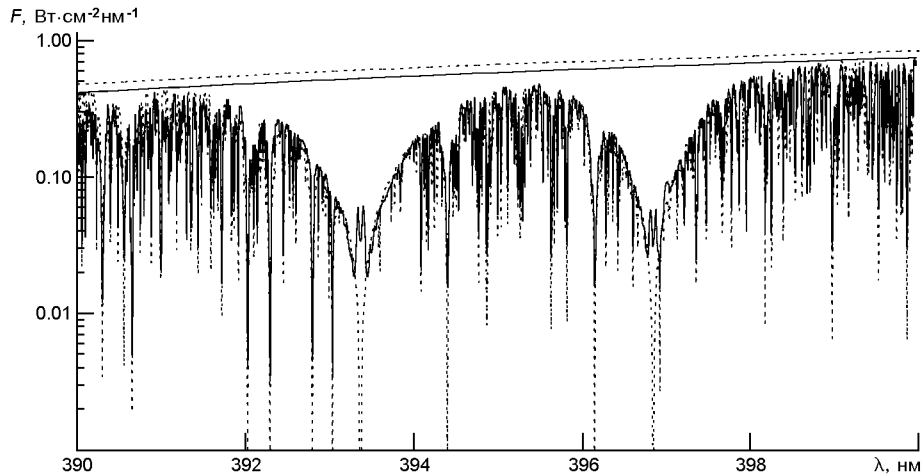


Рис. 10. Синтетический  $H$ - и  $K$ -спектр Арктура (пунктир) с учетом бленд (около 6000) и наблюдаемый [36] в шкале абсолютных единиц (сплошная линия). Модель 4286/1.66/–0.33,  $V_{mic} = 1.6$  км/с,  $V_{mac} = 3.3$  км/с,  $V_{\sin i} = 1.5$  км/с

зрачности в континууме. Ядра всех сильных линий получились значительно глубже, чем наблюдаемые, вследствие принятого в расчетах ЛТР-приближения. Бальмеровская линия  $H$  (397 нм) в крыле линии  $H$  не проявляет наблюдаемой эмиссии. Согласно [10] причиной эмиссии является высокая чувствительность условий образования этой линии к температурному росту в хромосфере. В принципе расчеты этой линии и ядер линий  $H$  и  $K$  позволят уточнить температурную стратификацию хромосферы, но для этого необходимо решать неЛТР-задачу и учитывать сферичность атмосферы Арктура.

## ВЫВОДЫ

Получено распределение температуры с высотой в атмосфере Арктура на основании расчетов профилей протяженных крыльев линий  $H$  и  $K$  Ca II и минимизации отклонения между вычислениями и наблюдениями. Важным моментом в используемом 1DЛТР-моделировании звездной атмосферы является условие использования потока излучения от звезды в абсолютных единицах. В таком варианте никаких существенных ограничений для применения данного метода к звездным спектрам не обнаружено. Если использовать для моделирования поток излучения относительно континуума, то необходимо иметь надежный локальный континуум. Ошибки при визуальном проведении локального континуума, как правило, занижают его, что приводит к превышению температуры в слоях эффективного формирования континуума. Наши результаты показали, что в случае использования спектра звезды в относительных единицах полученное различие в 200 К в слоях формирования континуума превышает разброс разных оценок  $T_{эф}$  для Арктура. Это обусловлено, с одной стороны, занижени-

ем уровня локального континуума в атласах на 12 %, а с другой — наличием неучтенных источников непрозрачности или процессов, приводящих к перераспределению излучения по спектру.

Что касается проблемы УФ-дефицита, она остается актуальной для построения синтетического спектра Арктура в области линий *H* и *K* Ca II. Компенсация недостающей непрозрачности с помощью поправочного множителя показала, что величина поправки к непрерывному спектру зависит от длины волны и от эффективной температуры модели. С увеличением длины волны она существенно уменьшается, а с увеличением  $T_{\text{эф}}$  — увеличивается. Для Арктура синтетический (без поправки) континуум в среднем на 42.6 % выше наблюдаемого, тогда как для Солнца эта величина составляет 9.3 %. Надежное определение поправки к континууму возможно при применении абсолютных потоков путем согласования только далеких крыльев линий *H* и *K*. Мы рекомендуем для Арктура использовать поправочный множитель к коэффициенту непрерывного поглощения  $f(\lambda) = 2.2, 1.9, 1.7, 1.55, 1.45$  для длин волн 390.0, 392.5, 395.0, 398.0, 400.0 нм соответственно. Полученный в этой работе поправочный множитель в среднем равен 1.8. Это удовлетворительно совпадает с оценками, полученными ранее в работе [66].

Полуэмпирическая модель, выведенная путем 1D-моделирования с использованием крыльев линий *H* и *K*, совпадает с теоретической моделью, рассчитанной с помощью кода ATLAS12 [52], для фундаментальных параметров Арктура, которые были получены в работе [56]. Эта модель с учетом поправки к континууму дает наилучшее согласие между результатами вычислений *H*- и *K*-спектра и наблюдений. На основании этого можно заключить, что значения фундаментальных параметров Арктура [56] ( $T_{\text{эф}} = 4286$  К,  $\lg g = 1.66$ ,  $[C/H] = -0.09$ ,  $[O/H] = -0.02$ ,  $[Na/H] = -0.41$ ,  $[Mg/H] = -0.15$ ,  $[Al/H] = -0.18$ ,  $[Si/H] = -0.19$ ,  $[K/H] = -0.32$ ,  $[Ca/H] = -0.41$ ,  $[Sc/H] = -0.29$ ,  $[Ti/H] = -0.28$ ,  $[V/H] = -0.32$ ,  $[Cr/H] = -0.57$ ,  $[Mn/H] = -0.73$ ,  $[Fe/H] = -0.52$ ,  $[Co/H] = -0.43$ ,  $[Ni/H] = -0.46$ ,  $[Zn/H] = 0.30$ ) являются надежными. Поэтому мы рекомендуем их использовать в дальнейших исследованиях. Для удобного использования модели 4286/1.66/-0.33 в расчетах спектральных линий мы приводим таблицу с необходимыми модельными параметрами для Арктура.

Полученные в этой работе результаты 1DЛТР-моделирования атмосферы Арктура с использованием широких крыльев линий *H* и *K* свидетельствуют о том, что получить более точную температурную стратификацию, чем выведенную теоретическим методом, с помощью которого созданы сетки звездных моделей, в настоящее время не представляется возможным. В будущем стоит повторить подобное исследование атмосферы Арктура на основе спектральных прокалброванных наблюдений, выполненных с разрешением 500000. В принципе уже сейчас такие спектры можно получить на 2-м телескопе на пике Терскол.



## Модель атмосферы для Арктура (4286/1.66/-0.33)

$\lg H$ (H, см)	$m$ , г/см <sup>2</sup>	$T$ , К	$P_g$ , Па	$P_e$ , Па	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
2.95345E+10	3.48036E-01	2952.6	1.57168E+00	1.53279E-05	8.19207E-11
2.79759E+10	5.02573E-01	2961.0	2.27783E+00	2.01092E-05	1.18388E-10
2.59219E+10	8.12300E-01	3020.5	3.69195E+00	3.45085E-05	1.88105E-10
2.46580E+10	1.08678E+00	3067.6	4.94521E+00	4.96510E-05	2.48091E-10
2.25721E+10	1.73921E+00	3155.9	7.92471E+00	9.22029E-05	3.86441E-10
2.11051E+10	2.40289E+00	3215.3	1.09564E+01	1.38996E-04	5.24410E-10
1.96139E+10	3.31782E+00	3276.5	1.51363E+01	2.08954E-04	7.10940E-10
1.81157E+10	4.56336E+00	3329.9	2.08276E+01	3.03616E-04	9.62566E-10
1.66278E+10	6.23055E+00	3385.5	2.84460E+01	4.39340E-04	1.29306E-09
1.58901E+10	7.25724E+00	3412.5	3.31378E+01	5.25038E-04	1.49442E-09
1.51564E+10	8.43632E+00	3438.4	3.85262E+01	6.23910E-04	1.72433E-09
1.44265E+10	9.78865E+00	3463.4	4.47065E+01	7.37831E-04	1.98650E-09
1.37005E+10	1.13370E+01	3487.5	5.17830E+01	8.68522E-04	2.28504E-09
1.29778E+10	1.31086E+01	3511.3	5.98795E+01	1.01949E-03	2.62440E-09
1.22586E+10	1.51317E+01	3535.0	6.91259E+01	1.19402E-03	3.00934E-09
1.15430E+10	1.74379E+01	3559.2	7.96663E+01	1.39741E-03	3.44462E-09
1.08311E+10	2.00604E+01	3584.8	9.16523E+01	1.63771E-03	3.93457E-09
1.01212E+10	2.30491E+01	3607.2	1.05312E+02	1.90119E-03	4.49289E-09
9.41463E+09	2.64387E+01	3635.6	1.20804E+02	2.23451E-03	5.11355E-09
8.71230E+09	3.02689E+01	3666.4	1.38310E+02	2.63407E-03	5.80536E-09
8.01484E+09	3.45803E+01	3701.1	1.58015E+02	3.12284E-03	6.57037E-09
7.32191E+09	3.94196E+01	3741.0	1.80133E+02	3.73034E-03	7.41015E-09
6.63237E+09	4.48419E+01	3786.4	2.04915E+02	4.48659E-03	8.32850E-09
5.94497E+09	5.09061E+01	3838.8	2.32631E+02	5.43984E-03	9.32586E-09
5.25775E+09	5.76817E+01	3898.9	2.63598E+02	6.64218E-03	1.04043E-08
4.91296E+09	6.13668E+01	3933.1	2.80440E+02	7.36897E-03	1.09730E-08
4.56746E+09	6.52602E+01	3968.8	2.98234E+02	8.17448E-03	1.15642E-08
4.21934E+09	6.93923E+01	4008.1	3.17119E+02	9.09569E-03	1.21759E-08
3.86874E+09	7.37726E+01	4049.8	3.37138E+02	1.01267E-02	1.28112E-08
3.51550E+09	7.84148E+01	4094.0	3.58354E+02	1.12785E-02	1.34703E-08
3.15586E+09	8.33826E+01	4142.2	3.81058E+02	1.25900E-02	1.41570E-08
2.79303E+09	8.86492E+01	4192.3	4.05127E+02	1.40360E-02	1.48715E-08
2.42144E+09	9.43146E+01	4246.6	4.31019E+02	1.56753E-02	1.56195E-08
2.04269E+09	1.00379E+02	4303.5	4.58735E+02	1.74932E-02	1.64041E-08
1.65711E+09	1.06863E+02	4363.0	4.88368E+02	1.95037E-02	1.72255E-08
1.25706E+09	1.13929E+02	4427.6	5.20658E+02	2.17941E-02	1.80964E-08
8.51372E+08	1.21456E+02	4494.1	5.55056E+02	2.43160E-02	1.90064E-08
4.29373E+08	1.29681E+02	4566.1	5.92648E+02	2.72339E-02	1.99735E-08
0.00000E+00	1.38473E+02	4642.5	6.32825E+02	3.06174E-02	2.09769E-08
-4.38065E+08	1.47894E+02	4724.1	6.75879E+02	3.47136E-02	2.20167E-08
-8.77946E+08	1.57802E+02	4817.0	7.21158E+02	4.01559E-02	2.30386E-08
-1.31291E+09	1.68050E+02	4917.4	7.67988E+02	4.77011E-02	2.40337E-08
-1.72702E+09	1.78182E+02	5036.4	8.14287E+02	5.97737E-02	2.48802E-08
-2.11111E+09	1.87890E+02	5144.9	8.58645E+02	7.57385E-02	2.56819E-08
-2.46709E+09	1.97201E+02	5257.9	9.01190E+02	9.88801E-02	2.63746E-08
-3.01119E+09	2.11645E+02	5573.6	9.67161E+02	2.14671E-01	2.66995E-08
-3.40244E+09	2.22087E+02	5892.0	1.01483E+03	4.69394E-01	2.64952E-08
-3.66785E+09	2.29050E+02	6275.5	1.04657E+03	1.12515E+00	2.56382E-08
-3.84486E+09	2.33523E+02	6663.9	1.06691E+03	2.50490E+00	2.45822E-08
-3.97953E+09	2.36793E+02	6995.2	1.08175E+03	4.65522E+00	2.36968E-08
-4.11573E+09	2.39995E+02	7305.6	1.09627E+03	7.93749E+00	2.29266E-08
-4.17852E+09	2.41436E+02	7428.8	1.10281E+03	9.69853E+00	2.26454E-08

Окончание таблицы

$\lg H$ (H, см)	$m$ , г/см <sup>2</sup>	$T$ , К	$P_g$ , Па	$P_e$ , Па	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
-4.25064E+09	2.43072E+02	7564.7	1.11023E+03	1.20268E+01	2.24034E-08
-4.35261E+09	2.45354E+02	7743.4	1.12058E+03	1.57571E+01	2.20183E-08
-4.45569E+09	2.47625E+02	7904.7	1.13088E+03	1.99071E+01	2.16891E-08
-4.72696E+09	2.53447E+02	8279.6	1.15729E+03	3.30933E+01	2.09536E-08
-4.90552E+09	2.57180E+02	8487.0	1.17423E+03	4.29900E+01	2.05695E-08
-5.07393E+09	2.60640E+02	8673.4	1.18993E+03	5.37551E+01	2.02151E-08

Автор благодарит А. Шаврину за расчеты синтетического спектра с учетом молекулярных линий и Я. Павленко за расчеты теоретической модели атмосферы Арктур 4286/1.66/-0.33, а также рецензента за полезные замечания и комментарии, которые улучшили представление результатов исследования.

1. *Бурнашев В. И.* Каталог данных о распределении энергии в спектрах звезд в однородной спектрофотометрической системе // Бюл. Абастум. астрофиз. обсерватории.—1985.—**59**.—С. 83—90.
2. *Гадун А. С., Шеминова В. А.* SPANSAT: Программа расчета профилей спектральных линий поглощения в звездных атмосферах в ЛТР-приближении. — Киев, 1988.—37с.—(Препринт / АН УССР. Ин-т теор. физики; ИТФ-88-87 Р).
3. *Глушнев И. Н., Волошина И. В., Дорошенко В. Т. и др.* Распределение энергии в спектрах 72 звезд в диапазоне длин волн 3200—7600 Å // Тр. Гос. астрон. ин-та им. П. К. Штернберга.—1984.—**54**.—С.3—39.
4. *Харитонов А. Б., Терещенко В. М., Князева Л. Н.* Спектрометрический каталог звезд (Справочник). — Алма-Ата: Наука, 1988.—478 с.
5. *Шеминова В. А.* Турбулентность в фотосфере Солнца как звезды. III. Микро-макротурбулентность // Солнеч. данные.—1984.—№ 4.—С.70—78.
6. *Alves-Brito A., Melendez J., Asplund M., et al.* Chemical similarities between Galactic bulge and local thick disk red giants: O, Na, Mg, Al, Si, Ca, and Ti // *Astron. and Astrophys.*—2010.—**513**.—P. A35.
7. *Anders E., Grevesse N.* Abundances of the elements — Meteoritic and solar // *Geochim. Cosmochim. Acta.*—1989.—**53**.—P. 197—214.
8. *Ayres T. R.* A reexamination of solar upper photosphere models, the calcium abundance, and empirical damping parameters // *Astrophys. J.*—1977.—**213**.—P. 296—308.
9. *Ayres T. R., Johnson H. R.* The surface gravity and mass of Arcturus // *Astrophys. J.*—1977.—**214**.—P. 410—417.
10. *Ayres T. R., Linsky J. L.* Stellar model chromospheres. III. Arcturus K2 III // *Astrophys. J.*—1975.—**200**.—P. 660—674.
11. *Ayres T. R., Linsky J. L., Shine R. A.* Stellar model chromospheres. H. Procyon (F5 Iv/v) // *Astrophys. J.*—1974.—**192**.—P. 93—110.
12. *Barklem P. S., O'Mara B. J.* The broadening of strong lines of Ca<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup> and Ba<sup>+</sup> by collisions with neutral hydrogen atoms // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—**300**.—P. 836—871.

13. *Beck C., Schmidt W., Rezaei R., Rammacher W.* The signature of chromospheric heating in Ca II H spectra // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**479**.—P. 213—227.
14. *Beeck B., Schussler M., Reiners A.* MHD simulations reveal crucial differences between solar and very cool star magnetic structures // *ASP Conf. Ser.*— 2012.— **448**.—P. 1071—1076.—(Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun / Eds C. M. Johns-Krull, M. K. Browning).
15. *Brown K. I. T., Gray D. F., Baliunas S. L.* Long-term spectroscopic monitoring of Arcturus // *Astrophys. J.*—2008.—**679**.—P. 1531—1540.
16. *Burlov-Vasiljev K. A., Gurtovenko E. A., Matvejev Yu. B.* New absolute measurements of the solar spectrum // *Solar Phys.*—1995.—**157**, N 1-2.—P. 51—73.
17. *Chemin L., Soubiran C., Crifo F., et al.* The catalog of radial velocity standard stars for the Gaia RVS: status and progress of the observations SF2A-2010 // *Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics / Eds S. Boissier, M. Heydari-Malayeri, R. Samadi, D. Valls-Gabaud.* — 2010.— P. 29—30.
18. *Dyck H. M., Benson J. A., van Belle G. T., Ridgway S. T.* Radii and effective temperatures for K and M giants and supergiants // *Astron. J.*—1996.—**111**.—P. 1705—1712.
19. *Eggen O. J.* The Arcturus Group // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1971.—**83**, N 493.— P. 271—285.
20. *Fay T. D., Stein W. L., Warren W. H.* Scanner observations of selected cool stars // *Publs Astron. Soc. Pacif.* —1974.—**86**.—P. 772—790.
21. *Fontenla J. M., Balasubramaniam K. S., Harder J.* Semiempirical models of the solar atmosphere. II. The quiet-Sun low chromosphere at moderate resolution // *Astrophys. J.*—2007.—**667**.—P. 1243—1257.
22. *Frisk U., Nordh H. L., Olofsson S. G., et al.* The temperature of Arcturus // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1982.—**199**.—P. 471—481.
23. *Gray D. F.* The temperature dependence of rotation and turbulence in giant stars // *Astrophys. J.*—1982.—**262**.—P 682—699.
24. *Gray D. F., Brown K. I. T.* The rotation of Arcturus and Active longitudes on giant stars // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—2006.—**118**, N 846.—P. 1112—1118.
25. *Griffin R.* A photometric atlas of the spectrum of Arcturus, 3600—8825 Å. — Cambridge: Cambridge Philosophical Society, 1968.
26. *Griffin R. E. M., Lynas-Gray A. E.* The effective temperature of Arcturus // *Astron. J.*—1999.—**117**, N 6.—P. 2998—3006.
27. *Grupp F., Kurucz R. L., Tan K.* New extended atomic data in cool star model atmospheres. Using Kurucz's new iron data in MAFAGS-OS models // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**503**, N 1.—P.177—181.
28. *Gurtovenko E. A., Sheminova V. A.* 'Crossing' method for studying the turbulence in solar and stellar atmospheres. I. Application to the Sun // *Solar Phys.*—1986.— **106**.—P. 237—247.
29. *Gustafsson B., Bell R. A.* The colours of G and K type giant stars. I // *Astron. and Astrophys.*—1979.—**74**, N 3.—P. 313—352.
30. *Gustafsson B., Edvardsson B., Eriksson K., et al.* A grid of MARCS model atmospheres for late-type stars. I. Methods and general properties // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**486**, N 3.—P. 951—970.
31. *Hatzes A. P., Cochran W. D.* Short-period radial velocity variations of alpha Bootis: Evidence for radial pulsations // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**422**, N 1.— P. 366—373.

32. *Hauschildt P. H., Baron E.* Numerical solution of the expanding stellar atmosphere problem // *J. Comput. Appl. Math.*—1999.—**109**, N 1-2.—P. 41—63.
33. *Hauschildt P. H., Schweitzer A., Allard F., et al.* Cool stellar atmospheres // *Astrophys. and Space Sci.*—2002.—**274**.—P. 15—26.—(New quests in stellar astrophysics: the link between stars and cosmology / Eds M. Chevez, A. Bressan, A. Buzzoni, D. Mayya).
34. *Hayek W., Asplund M., Carlsson M., et al.* Radiative transfer with scattering for domain-decomposed 3D MHD simulations of cool stellar atmospheres. Numerical methods and application to the quiet, non-magnetic, surface of a solar-type star // *Astron. and Astrophys.*—2010.—**517**.—A49.
35. *Henriques V. M. J., Kiselman D.* Temperature stratification in the Sun's photosphere in high horizontal resolution using Ca II H filtergrams // *Mem. della Soc. Astron. Italiana.*—2009.—**80**.—P. 639—642.
36. *Hinkle K., Wallace L., Livingston W., et al.* High resolution infrared, visible and ultraviolet spectral atlases of the Sun and Arcturus // *Proceedings of 12th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun / Eds A. Brown, G. M. Harper, T. R. Ayres.* — Colorado: University of Colorado, 2003.—P. 851—856.
37. *Isik E., Schmitt D., Schussler M.* Magnetic flux generation and transport in cool stars // *Astron. and Astrophys.*—2011.—**528**.—P. A135.
38. *Johnson H. R., Collins J. G., Krupp B., Bell R. A.* The line blanketing and structure of the atmosphere of Arcturus // *Astrophys. J.*—1977.—**212**.—P. 760—767.
39. *Jorgensen B. R., Lindegren L.* Determination of stellar ages from isochrones: Bayesian estimation versus isochrone fitting // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**436**.—P. 127—143.
40. *Kipper T., Kipper M., Sitska J.* Analysis of the spectrum of Arcturus // *W. Struve Astrophys. Obs. of Tartu*, 1981.—P. 3—14.—(Estonian SSR Priprint 64).
41. *Kuker M., Rudiger G.* Differential rotation and meridional flow on the lower zero-age main sequence: Reynolds stress versus baroclinic flow // *Astron. Nachr.*—2011.—**332**, N 9/10.—P. 933—941.
42. *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.
43. *Kurucz R. L.* Atlas: A computer program for calculating model stellar atmospheres // *SAO Special Report.* 1970. N 309.
44. *Kurucz R. L.* ATLAS12, SYNTHE, ATLAS9, WIDTH9, et cetera // *Mem. della Soc. Astron. Italiana Suppl.*—2005.—**8**.—P. 14—24.
45. *Linsky J. L., Avrett E. H.* The Solar H and K Lines // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1970.—**82**, N 485.—P. 169—248.
46. *Ludwig H.-G., Samadi R., Steffen M., et al.* Hydrodynamical simulations of convection-related stellar micro-variability. II. The enigmatic granulation background of the CoRoT target HD 49933 // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**506**, N 1.—P. 167—173.
47. *Macke R., Holweger H.* A model-atmosphere analysis of the spectrum of Arcturus // *Astron. and Astrophys.*—1975.—**38**.—P. 239—257.
48. *Navarro J. F., Helmi A., Freeman K. C.* The Extragalactic Origin of the Arcturus Group // *Astrophys. J.*—2004.—**601**, N 1.—P. L43—L46.
49. *Neckel H.* Announcement spectral atlas of solar absolute disk-averaged and disk-center intensity from 3290 to 12510 Å (Brault and Neckel, 1987) // *Solar Phys.*—1999.—**184**.—P. 421—421.
50. *Neckel H., Labs D.* The solar radiation between 3300 and 12500 Å // *Solar Phys.*—

- 1984.—**90**.—P. 205—258.
51. *Owocki S. P., Auer L. H.* Two-dimensional radiative transfer. II. The wings of Ca K and Mg K // *Astrophys. J.*—1980.—**241**.—P. 448—458.
52. *Pavlenko Ya. V.* Model atmospheres of red giants // *Astron. Rep.*—2003.—**47**, N 1.—P. 59—67.
53. *Perryman M. A. C., Lindegren L., Kovalevsky J., et al.* The HIPPARCOS Catalogue // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**323**.—P. L49—L52.
54. *Peterson R. C., Dalle Ore C. M., Kurucz R. L.* The nonsolar abundance ratios of Arcturus deduced from spectrum synthesis // *Astrophys. J.*—1993.—**404**.—P. 333—347.
55. *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.
56. *Ramirez I., Allende Prieto C.* Fundamental parameters and chemical composition of Arcturus // *Astrophys. J.*—2011.—**743**, N 2.—P. 135—149.
57. *Ramirez I., Allende Prieto C., Koesterke L., et al.* Granulation in K-type dwarf stars. II. Hydrodynamic simulations and 3D spectrum synthesis // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**501**, N 3.—P. 1087—1101.
58. *Roupe van der Voort L. H. M.* Penumbra structure and kinematics from high-spatial-resolution observations of Ca II K // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**389**.—P. 1020—1038.
59. *Sbordone L., Bonifacio P., Castelli F., Kurucz R. L.* ATLAS and SYNTHE under Linux // *Mem. della Soc. Astron. Italiana Suppl.*—2004.—**5**.—P. 93—96.
60. *Sheeley N. R.* The average profile of the solar K-Line during the sunspot cycle // *Astrophys. J.*—1967.—**147**.—P. 1106—1108.
61. *Sheminova V. A.* The wings of Ca II H and K as photospheric diagnostics and the reliability of one-dimensional photosphere modeling // *Solar Phys.*—2012.—**280**, N 1.—P. 83—102.—(eprint arXiv:1207.2020).
62. *Sheminova V. A., Gadun A. S.* Fourier analysis of Fe I lines in spectra of the Sun, alpha Centauri A, Procyon, Arcturus and Canopus // *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.*—1998.—**14**, N 3.—P. 169—179.—(eprint arXiv:1004.3286).
63. *Sheminova V. A., Rutten R. J., Roupe van der Voort L. H. M.* The wings of Ca II H and K as solar fluxtube diagnostics // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**437**, N 3.—P. 1069—1080.
64. *Shine R. A., Linsky J.* A facular model based on the wings of the Ca II lines // *Solar Phys.*—1975.—**37**, N 1.—P. 145—150.
65. *Short C. I., Campbell E. A., Pickup H., Hauschildt P. H.* Modeling the near-UV band of GK stars. II. Non-LTE Models // *Astrophys. J.*—2012.—**747**, N 2.—P. 143—152.
66. *Short C. I., Hauschildt P. H.* Non-LTE modeling of the near-ultraviolet band of late-type stars // *Astrophys. J.*—2009.—**691**, N 2.—P. 1634—1647.
67. *Short C. I., Hauschildt P. H.* Modeling the near-ultraviolet band of GK stars. I. Local thermodynamic equilibrium models // *Astrophys. J.*—2010.—**718**.—P. 1416—1427.
68. *Short C. I., Lester J. B.* Missing opacity in the atmospheric models of red giants // *Astrophys. J.*—1994.—**436**, N 2.—P. L165—L168.
69. *Takeda Y.* Spectroscopic study of microturbulence in the atmosphere of Arcturus // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**253**, N 2.—P. 487—497.
70. *Thuillier G., Herse M., Labs D., et al.* The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the atlas and Eureca missions // *Solar Phys.*—2003.—**214**, N 1.—P. 1—22.

71. *Trimble V., Bell R. A.* Spectroscopic determination of stellar masses — Mene Tekel Arcturus // *Quart. J. Roy. Astron. Soc.*—1981.—**22**.—P. 361—379.
72. *Tsymbal V. V.* STARSP: A Software system for the analysis of the spectra of normal stars // *ASP Conf. Ser.*—1996.—**108**.—P. 198—199.—(Model atmospheres and spectral synthesis / Eds S. J. Adelman, F. Kupka, W. W. Weiss).
73. *Turner N. H., Brummelaar T. S., Mason B. D.* Adaptive optics observations of Arcturus using the Mount Wilson 100 inch telescope // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1999.—**111**, N 759.—P. 556—558.
74. *Uitenbroek H., Criscuoli S.* Why one-dimensional models fail in the diagnosis of average spectra from inhomogeneous stellar atmospheres // *Astrophys. J.*—2011.—**736**.—P.69—78.
75. *van Leeuwen F.* Validation of the new Hipparcos reduction // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**474**, N 2.—P. 653—664.
76. *Verhoelst T., Bord P. J., Perrin G., et al.* Is Arcturus a well-understood K giant? Test of model atmospheres and potential companion detection by near-infrared interferometry // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**435**, N 2.—P. 563—574.
77. *Willstrop R. V.* Absolute measures of stellar radiation. II // *Mem. Roy. Astron. Soc.*—1965.—**69**.—P. 83—143.

Статья поступила в редакцию 30.07.12