

УДК 524.316-355

Я. В. Павленко<sup>1</sup>, С. В. Жуковская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27

<sup>2</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

### Связанно-свободное поглощение атомами C I, N I и O I в атмосферах звезд поздних спектральных классов

*Обсуждаются результаты расчетов коэффициентов связанно-свободного поглощения нейтральными атомами C, N, O, рассчитанных на основе данных OPACITY PROJECT. Приводятся результаты сравнения наших вычислений с таблицами Хоффса и расчетами Куруца. Рассматривается влияние связанно-свободного поглощения атома C I на распределение энергии в спектрах Солнца и объекта Сакураи (V4334 Sgr).*

*ZV'YAZANO-VIL'NE POGLINANNIA ATOMAMI C I, N I TA O I V ATMOSFERAH ZIP PIZNIX SPEKTRAL'NYKH KLASIV, Павленко Я. В., Жуковська С. В. — Обговорюються результати розрахунків коефіцієнтів зв'язано-вільного поглинання нейтральними атомами C, N, O, які отримані на основі даних OPACITY PROJECT. Наводяться результати порівняння наших обчислень з таблицями Хоффса та розрахунками Куруца. Розглядається вплив зв'язано-вільного поглинання атома C I на розподіл енергії в спектрах Сонця та об'єкта Сакураї (V4334 Sgr).*

*THE BOUND-FREE ABSORPTION BY THE C I, N I, AND O I IN THE LATE TYPE STARS' ATMOSPHERES, by Pavlenko Ya. V., Zhukovskaya S. V. — The results of computations of coefficients of the bound-free absorption by C I, N I, and O I atoms using Opacity Project data are discussed. We compared our results with the Hoffsaes tables and Kurucz calculations. We consider the impact of bound-free absorption by C I atom on spectral energy distributions in spectra of the Sun and Sakurai's Object (V4334 Sgr).*

#### ВВЕДЕНИЕ

В атмосферах звезд на стадии асимптотической ветви гигантов (АВГ) связанно-свободное поглощение нейтральных атомов C, N, O играет важную роль. Число этих звезд в Галактике невелико, поскольку стадию эволюции АВГ они проходят за небольшие промежутки времени. Химиче-

ский состав их атмосфер свидетельствует о выносе в поверхностные слои звезды значительных количеств продуктов нуклеосинтеза в недрах.

Гелий и углерод — наиболее распространенные элементы в атмосферах части АВГ звезд, содержание азота также повышено. Вследствие низкого содержания водорода роль отрицательного иона водорода при переносе излучения здесь не столь существенна, как в случае «нормальных» звезд [18]. Поэтому при моделировании спектров звезд АВГ учет связанно-свободного (*bf*) поглощения атомами C I, N I, O I приобретает критическое значение. Действительно, непрозрачность вещества в их атмосферах в значительной степени определяется фотоионизацией C I [18]. При понижении эффективной температуры ниже 7000 К покровный эффект обусловлен также поглощением двухатомных углеродосодержащих молекул — C<sub>2</sub> и CN [19].

Проблема расчета сечений фотоионизации нейтральных атомов C, N, O состоит в очевидной сложности структуры атома нейтрального углерода. Множество уровней атома C I (как и атомов O I и N I) различной мультиплетности расположены близко друг от друга, они расщеплены вследствие спин-орбитального взаимодействия. Далее, потенциалы ионизации C, N, O достаточно высоки ( $E_{\text{ion}} = 11.260, 14.534$  и  $13.618$  эВ соответственно [4]). При высоких температурах населенность их высоковозбужденных уровней оказывается большой, а вклад связанно-свободного поглощения, обусловленного переходами с них, может быть значительным как в видимой, так и ИК-областях спектра. Проблема расчета *bf*-поглощения атомами C I, N I, O I рассматривалась рядом исследователей [1, 21]. Сечения фотоионизации Пича [21] с трех нижних уровней C I использовались Куруцем в ранних версиях программы ATLAS [14]. В более поздней версии программы ATLAS12 [16] учтено связанно-свободное поглощение излучения 30 уровнями C I. В работах Хоффсаса, основанных на методе Томаса — Ферми [11], были выполнены вычисления коэффициента *bf*-поглощения многими атомами и ионами, в том числе и C I, N I и O I. Результаты представлены в виде таблиц для сетки температур в интервале 4000—18000 К и интервала длин волн  $\lambda\lambda$  30—1800 нм.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

При расчетах коэффициентов связанно-свободного поглощения атомов углерода, азота и кислорода мы использовали сечения фотоионизации с их уровней, которые были рассчитаны Ситоном и др. [22] в рамках проекта OPACITY PROJECT. Эти данные были взяты из базы данных TOPBASE (IP address: 130.79.128.5), которая расположена в Страсбургской базе астрономических данных (<http://cdsweb.u-strasbg.fr/>). База данных TOPBASE содержит атомные данные, необходимые для расчета непрозрачности вещества недр звезд, их атмосфер и/или околозвездных оболочек. База данных TOPBASE содержит данные (энергии ионизации и возбуждения, сечения связанно-свободных переходов, силы осцилляторов и др.) для 17 элементов: нейтральных атомов и их ионов (с зарядом ядра  $NZ = 1...14, 16, 18, 26$  и количеством электронов  $N_e = 1...24$ ). Соответственно информация в базе делится на три массива: данные по энергетическим уровням, связанно-связанным переходам и сечениям фотоионизации. С помощью набора команд в режиме реального времени осуществляется взаимодействие пользователя и базы данных. Атомные уровни можно задать, указав номер энергетического состояния в пределах серии и полное квантовое число спектроскопической серии, задающее терм. Зависимости сечений фотоионизации атома от энергии фотона в Ru определены на конечном интервале

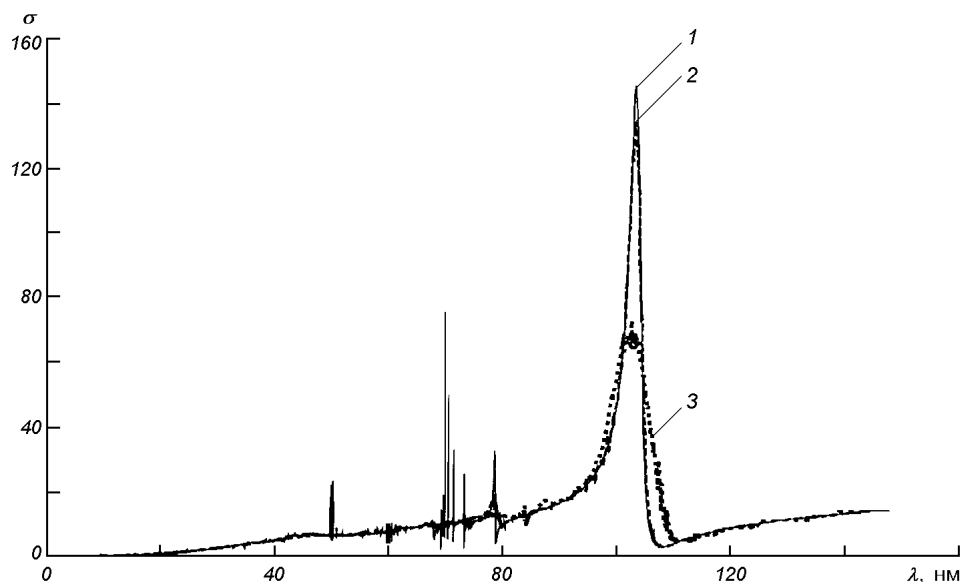


Рис. 1. Коэффициенты поглощения TOPBASE (1) со второго уровня атома С I и результаты их усреднения функцией с треугольным профилем с  $D = 0.01$  (2) и  $0.05$  (3)

энергий для каждого уровня атома. Отметим, что в базе данных имеются сечения фотоионизации для 220 уровней С I, а также 149 и 65 уровней N I и O I соответственно, что намного больше количества уровней, учтенных Хоффасом и Куруцем. Естественно, это повышает достоверность расчетов  $\alpha(\nu, T)$ , особенно в ИК-области спектра. Используя данные TOPBASE о сечениях фотоионизации с отдельных уровней нейтральных атомов С, N, O, мы нашли суммарные коэффициенты связанно-свободного поглощения этих атомов в интервале длин волн  $\lambda\lambda$  0.03—8.88 мкм. Расчеты проводились в рамках приближения ЛТР, т. е. мы предположили, что населенности уровней соответствуют распределению Больцмана. При этом вклад каждого уровня в суммарный коэффициент поглощения учитывался согласно формуле

$$\alpha(\nu, T) = \sum_{i=1}^{N_{\max}} g_i \sigma_i(\nu) e^{-E_i/kT}, \quad E_i > h\nu,$$

где  $g_i$  и  $E_i$ ,  $\sigma_i(\nu)$  — статистический вес, энергия возбуждения и сечение фотоионизации  $i$ -го уровня, все значения взяты из TOPBASE.

Особенностью связанно-свободного поглощения нейтральных атомов углерода, кислорода и азота является наличие резонансов — на некоторых длинах волн имеются участки с  $\delta$ -образными пиками поглощения [22]. Эти нерегулярности мы сглаживали. Заметим, что эта процедура не является строго корректной с точки зрения физической природы самих резонансов, однако позволяет учесть их наличие в терминах интегральных характеристик связанно-свободного поглощения. Функция сглаживания определялась в наших расчетах имела профиль гауссианы или треугольника — на конечном результате это сказывалось мало. Более существенной оказалась зависимость результатов от ширины профиля функции сглаживания.

На рис. 1 показаны результаты применения функции сглаживания с трехугольным профилем с основанием  $2D = 0.1\lambda_i$  и  $0.02\lambda_i$ , где  $\lambda_i$  — это граничная длина волны для фотоионизации с данного уровня.

Наша процедура расчетов состояла из нескольких этапов.

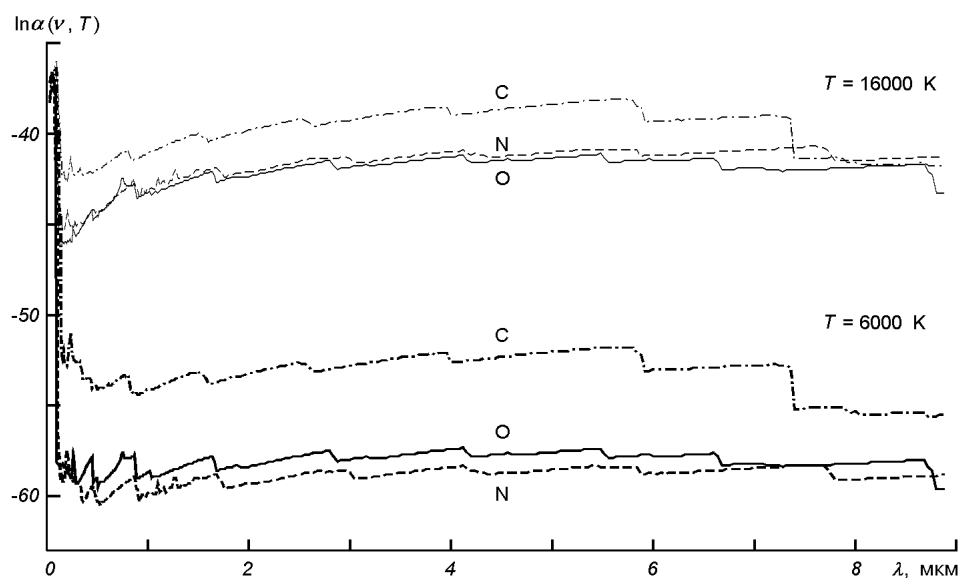


Рис. 2. Коэффициенты поглощения, рассчитанные по данным ОР для  $T = 6000$  К и  $T = 16000$  К

- На первом этапе сечения TOPBASE сглаживались в узлах сетки длин волн с постоянным шагом. Число узлов в этой сетке варьировалось ( $N = 1000$ — $10000$ ). Наши расчеты показали, что имеется слабая зависимость формы кривой коэффициента поглощения от числа точек разбиения интервала  $N$ . При изменении  $N$  на порядок величина  $\ln\alpha(v, T)$  изменяется в длинноволновом диапазоне ( $\lambda > 0.38$  мкм) на 1—2 %, в коротковолновой части спектра ( $\lambda < 0.38$  мкм) изменения составляют 2 %.
- Сглаженные коэффициенты поглощения для данного уровня интерполировались на сетку длин волн, пригодную для дальнейших численных расчетов синтетических спектров или моделей атмосфер.
- Коэффициенты  $bf$ -поглощения со всех связанных уровней суммировались в узлах второй (менее детальной) сетки длин волн.

Зависимости коэффициента поглощения атомов С, N, O от длины волны при разных температурах представлены на рис. 2.

#### ТАБЛИЦЫ НЕПРОЗРАЧНОСТЕЙ

Полученные коэффициенты  $bf$ -поглощения для С I, N I, O I представлены в виде трех таблиц  $\alpha(\lambda, T)$ , как и таблицы [11]. Приведены значения натуральных логарифмов коэффициентов  $bf$ -поглощения в расчете на один атом в зависимости от температуры и длины волны фотона. Таблицы доступны в интернете:

[http://mao.kiev.ua/staff/yp/TOP-res/bf\\_CNO.tar.gz](http://mao.kiev.ua/staff/yp/TOP-res/bf_CNO.tar.gz)

Заметим также, что приведенные в наших таблицах величины  $\alpha(\lambda, T)$  соотносятся с данными Хоффса [11] следующим образом:

$$\alpha(\lambda, T) = \alpha_{\text{Хоф}}(\lambda, T) \cdot U(T),$$

где  $U(T)$  — сумма по состояниям элемента.

**Сравнение с результатами Хоффса и Куруца.** Таблицы [11] представляют рассчитанные коэффициенты связанно-свободного поглощения  $\alpha(v, T)$  атомами С, N, O и другими нейтральными атомами на интервале длин волн  $\lambda \lambda$  0.03—1.8 мкм. Мы провели расчеты  $\alpha(v, T)$  на

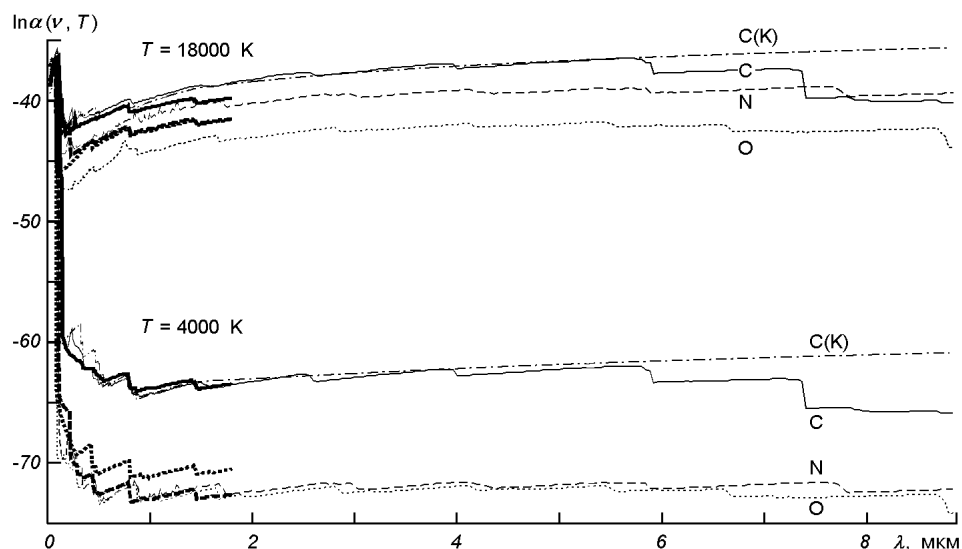


Рис. 3. Коэффициенты поглощения, рассчитанные нами, а также Хоффсасом и Куруцем

большем интервале длин волн  $\lambda$  0.03—8.8 мкм. Результаты сравнения этих непрозрачностей представлены на рис. 3. Там же представлены коэффициенты поглощения, рассчитанные по подпрограмме C1OP из ATLAS12 Куруца.

В целом эти результаты согласуются достаточно хорошо. Представляется целесообразным отметить ряд моментов.

- Рассчитанные нами коэффициенты связанно-свободного поглощения лучше согласуются с данными [11] при низких температурах. Очевидно, это обусловлено более полным набором уровней с высокими энергиями возбуждения в TOPBASE.
- Для углерода на интервале до 6 мкм отмечается отличное совпадение с данными Куруца, в более длинноволновом диапазоне данные сильно различаются. Видимо, для  $\lambda > 6$  мкм Куруц экстаполирует коэффициенты поглощения атомами C I. Расчеты  $\alpha(\nu, T)$  с использованием данных TOPBASE представляются здесь более корректными.

#### ПРИМЕНЕНИЕ К РАСЧЕТАМ ЗВЕЗДНЫХ СПЕКТРОВ

С использованием полученных сечений нами был рассчитан ряд синтетических спектров звезд на значительных интервалах длин волн. По сути мы рассчитывали распределения энергии в звездных спектрах. Моделирование спектров производилось по программе WITA6 [3] в рамках классических предположений: ЛТР, отсутствие стоков и источников энергии в плоскопараллельной среде. При решении уравнения переноса излучения учитывались как поглощение фотонов, так и их рассеяние. В расчетах микротурбулентная скорость задавалась постоянной по глубине  $v_t = 2$  км/с.

Расчеты производились с учетом поглощения излучения в континууме и в линиях атомов и ионов. Списки этих линий были взяты из базы данных VALD [13]. В процессе расчетов профили отдельных линий описывались функцией Фойгта, при расчете постоянной затухания учитывалось естественное затухание, уширение Ван-дер-Ваальса и Штарка [2]. Синтетические спектры сворачивались с инструментальным профилем, форма которого определялась гауссианой  $\exp(-(\Delta/\lambda/\Delta\lambda_g)^2)/\sqrt{\pi}$ .

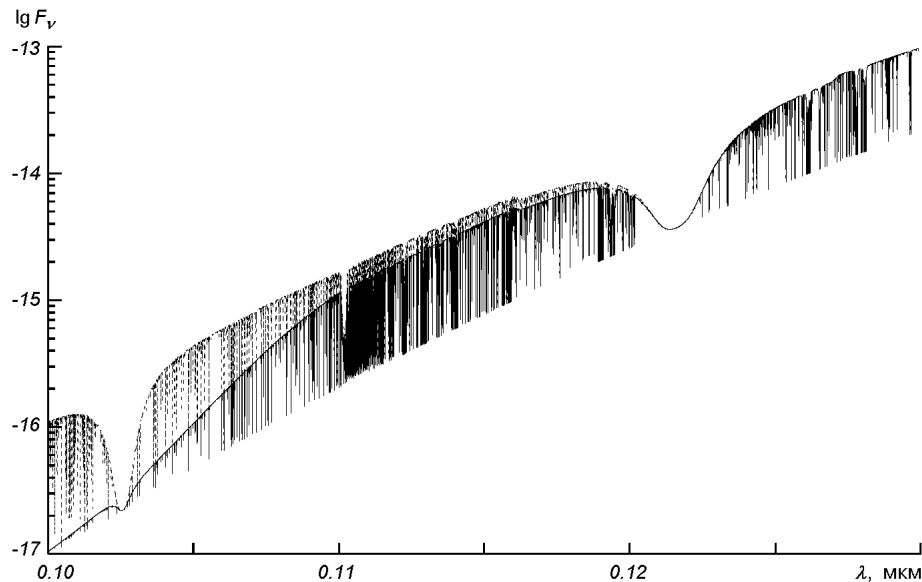


Рис. 4. Распределение энергии в спектре Солнца: с учетом  $bf$ -поглощения углерода (сплошная линия) и без него (штриховая линия). Модель атмосферы 5770/4.44 из сетки Куруца [15]

**Солнце.** Рассчитанный участок спектра в ультрафиолетовой части спектра Солнца представлен на рис. 4. Расчеты проводились для модели атмосферы [15] и химического состава [9]. Здесь показаны распределения энергии, рассчитанные как с учетом поглощения углерода, так и без его учета (для простоты мы ограничились здесь и дальше влиянием на спектры звезд только свободно-связанного поглощения углерода).

Поглощение углеродом становится критичным при  $\lambda < 144$  нм, при этом и распределение энергии в спектре Солнца в этом участке спектра, и интенсивности линий поглощения атомов и ионов изменяются при включении свободно-связанного поглощения С I.

**Объект Сакураи.** Естественно, учет  $bf$ -поглощения атомами С, N, O представляет особый интерес при исследовании звезд на поздних стадиях эволюции. Химический состав таких звезд изменяется с течением времени. Обычно эти изменения происходят сравнительно медленно. В то же время некоторые объекты показывают удивительные случаи ультрабыстрых изменений. Пожалуй, самый экстремальный случай эволюции наблюдался для объекта Сакураи (V4334 Sgr), открытого в 1996 г. [17]. В атмосфере объекта Сакураи  $C/O > 1$  [5, 12]. Этот уникальный объект с 1994 г. увеличил свою светимость на  $6^m$ , его спектр эволюционировал за два года от спектрального класса F до поздних C. Это сопровождалось не только значительными изменениями светимости, но и химического состава за небольшие промежутки времени [6]. В 1999 г. объект Сакураи исчез под мощной пылевой оболочкой [10].

Зависимость спектров объекта Сакураи от связанно-свободного поглощения С I исследовалась в рамках этой работы на примере расчетов для модели атмосферы объекта Сакураи из работы [19] с химическим составом [6]. Известно [19], что роль поглощения  $H^-$  в атмосфере этого гиганта резко уменьшается, при этом характеристики фотосферного поглощения на больших частотных интервалах определяются поглощением С I.

Сравнение рассчитанных распределений энергии в спектре объекта Сакураи с учетом  $bf$ -поглощения С I и без его учета показаны на рис. 5.

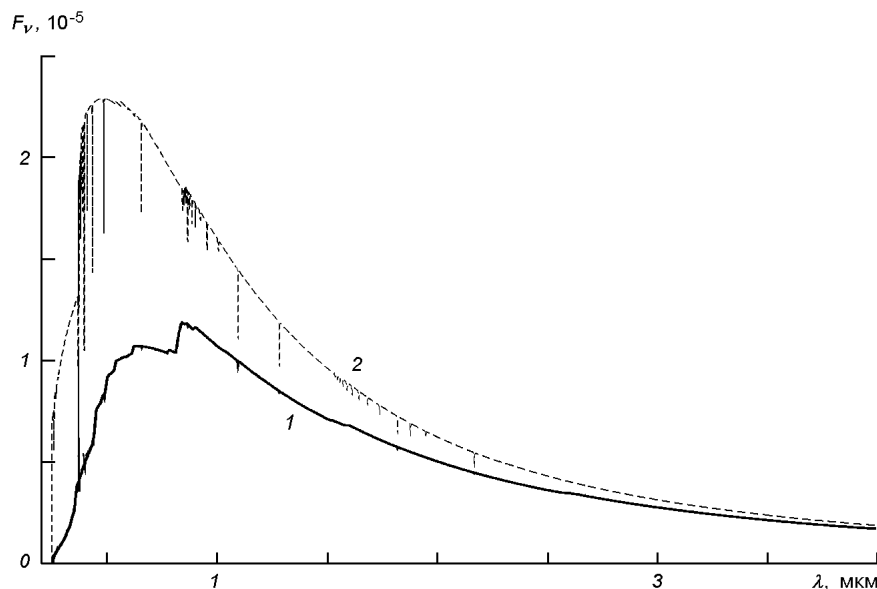


Рис. 5. Распределение энергии в непрерывном спектре объекта Сакураи: 1 — с учетом *bf*-поглощения С I, 2 — без него. Модель атмосферы из работы [19]

Заметим, что при этом расчеты производились для неизменной структуры модели атмосферы. Естественно, картина влияния поглощения С I на спектр объекта Сакураи является в общем случае более сложной: учет поглощения углерода сдвигает обращаящий слой (фотосферу) в область меньших давлений, что сложным образом влияет на распределение энергии в спектре. Рассмотрение полной картины эффектов выходит за рамки этой статьи, некоторые аспекты проблемы обсуждаются в работах [7, 18].

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты имеют практическое значение в первую очередь при расчете моделей атмосфер и синтетических спектров звезд с аномалиями химического состава. Непрозрачность в их атмосферах в большой мере определяется связанно-свободным поглощением атомов углерода. Впрочем, при определенных обстоятельствах в атмосферах звезд, богатых азотом или кислородом, учет *bf*-поглощения этих атомов может также изменить непрозрачность вещества на значительных частотных интервалах. Естественно, это в первую очередь относится к случаю атмосфер относительно горячих звезд ( $T_{\text{эф}} \approx 7000$  К). При появлении молекулярных полос в спектре звезды относительный вклад *bf*-поглощения С, N, O уменьшается — впрочем, на уровне фотосферы его роль может быть существенной, как это имеет место, например, в атмосфере объекта Сакураи на поздних стадиях его эволюции.

Расчитанные таблицы покрывают больший спектральный диапазон по сравнению с работой [11], которые были получены в рамках похожих теоретических моделей. Наш опыт показывает, что особый интерес последнее обстоятельство имеет при моделировании инфракрасных спектров химически пекулярных звезд [20].

С другой стороны, сравнение наших результатов с сечениями Куруца показывает, что на длинах волн  $\lambda > 5.6$  мкм правильнее использовать сечения TOPBASE. Конечно, прямой расчет *bf*-поглощения атомами С, N,

О здесь возможен, однако это потребовало бы учета переходов с сотен уровней, что едва ли представляется целесообразным с точки зрения оптимизации вычислительного процесса.

Работа выполнена при частичной поддержке SRG Американского астрономического общества.

1. Ленг К. Астрофизические формулы. — М.: Мир, 1978.—Т. 1.—448 с.
2. Павленко Я., Шаврина А. В. О постоянной затухания в атмосферах К-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—1986.—2, № 6.—С. 54—56.
3. Павленко Я. В. Линия лития в спектрах поздних М-карликов: случай UX Tau C // Астрон. журн.—2000.—77, № 4.—С. 254—263.
4. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Параметры атомов и атомных ионов. — М.: Энергоатомиздат, 1986.—71 с.
5. Asplund M., Gustafsson B., Lambert D. L., et al. A stellar endgame — the born-again Sakurai's object // Astron. and Astrophys.—1997.—321.—P. L17—L20
6. Asplund M., Gustafsson B., Rao K., et al. Abundance similarities between the RCrB star V854 Cen and the born-again Sakurai's object // Astron. and Astrophys.—1998.—332.—P. 651—660.
7. Asplund M., Gustafsson B., Lambert D. L., et al. The R Coronae Borealis stars — atmospheres and abundances // Astron. and Astrophys.—2000.—353, N 1.—P. 287—310.
8. Duerbeck H. W., Liller W., Sterken C., et al. The rise and fall of V4334 Sagittarii (Sakurai's Object) // Astron. J.—2000.—119, N 5.—P. 2360—2375.
9. Grevesse N., Sauval A. J. Standard solar composition // Space Sci. Rev.—1998.—85, N 1/2.—P. 161—174.
10. Geballe T., Evans A., Smalley B., et al. The infrared evolution of Sakurai' Object // Astrophys. and Space Sci.—2002.—279, N 1–2.—P. 39—49.
11. Hoffsaess D. Photoionization cross sections calculated by the scaled Thomas—Fermi method ( $h\nu < 50$  eV) // Atomic data and nuclear data tables.—1985.—24.—P. 285—321.
12. Kipper T., Klochkova V. The chemical composition of Sakurai's Object // Astron. and Astrophys.—1997.—324.—P. L65—L68.
13. 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, N 1.—P. 119—133.
14. Kurucz R. L. ATLAS: a computer program for calculating model stellar atmospheres // SAO Special Report., 1975.
15. Kurucz R. L. ATLAS: a computer program for calculating model stellar atmospheres. — 1993.—CD-ROM 9.
16. Kurucz R. L. <http://cfa5.harvard.edu>.—2000.
17. Nakano S., Sakurai Y., Hazen M., et al. Novalike variable in Sagittarius // IAU Circ.—1996.—N 6322.
18. Pavlenko Ya. V. Model Atmosphere of R CrB stars // Astron. J.—1999.—76, N 2.—P. 115—125.
19. Pavlenko Ya. V., Yakovina L. A., Duerbeck H. W. Modeling the spectrum of V4334 Sgr // Astron. and Astrophys.—2000.—354, N 1.—P. 229—235.
20. Pavlenko Ya. V., Geballe T. Models of infrared spectra of Sacurai's Object (V4334 Sgr) in 1997 // Astron. and Astrophys.—2002.—390, N 2.—P. 621—626.
21. Peach G. Continuous absorption coefficients for non-hydrogenic atoms // Mem. Roy. Aston. Soc.—1970.—73, N 1.—P. 1—123.
22. Seaton M. J., Zeppen C. J. Tully J. A., et al. The Opacity Project — computation of atomic data // Rev. Mexicana Astron. Astrofis.—1992.—23.—P. 19—44.

Поступила в редакцию 07.10.02