УДК 524.3–86

ПЫЛЕВЫЕ ОБОЛОЧКИ ВОКРУГ Ae/Be ЗВЕЗД ХЕРБИГА С АЛГОЛЕПОДОБНЫМИ МИНИМУМАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

©1997 г. Н.А. Кривова[1], В.Б. Ильин[2,3]

[1] *Институт астрономии, университет им. Н.Коперника, Торунь, Польша*
[2] *Рабочая группа об-ва Макса Планка при Йенском университете, Йена, Германия*
[3] *Астрономический институт Санкт-Петербургского университета, Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 03.03.97 г.

Модель сферически-симметричной пылевой оболочки со степенным распределением вещества вдоль радиуса и облаками, экранирующими звезду от наблюдателя, используется для совместной интерпретации распределения энергии в диапазоне примерно от 0.3 до 100 мкм и поведения показателей цвета $(U-B)$, $(B-V)$, $(V-R)$ и $(V-I)$ во время глубоких минимумов блеска 5 Ae/Be звезд Хербига: UX Ori, WW Vul, BF Ori, VX Cas и NX Pup. Оценены параметры оболочек звезд и среднее альбедо пылевых частиц во внутренних частях оболочек. Полученные значения альбедо составляют 0.3–0.4 в полосах U, B, V и существенно отличаются от значений, характерных для межзвездных пылинок (0.6–0.7).

DUST SHELLS AROUND HERBIG Ae/Be STARS WITH ALGOL-LIKE MINIMA: MODELLING OF PHOTOMETRIC DATA

N.A. Krivova and V.B. Il'in

A spherically symmetric circumstellar shell model with a power-law density distribution and clouds that screen the star from an observer is applied to interpret both the spectral energy distributions in the range 0.3–100 μm and the colour-magnitude diagrams observed for 5 Herbig Ae/Be stars: UX Ori, WW Vul, BF Ori, VX Cas, and NX Pup. Parameters of the shells and albedo of circumstellar grains located in their inner layers are estimated. The albedo in the bands U, B, V appears to be equal to about 0.3–0.4 and essentially differs from that typical of grains in interstellar clouds (0.6–0.7).

1. ВВЕДЕНИЕ

Ae/Be звезды Хербига представляют собой молодые звезды, окруженные газопылевыми оболочками. Они являются предшественниками звезд типа β Pic, вокруг которых были обнаружены околозвездные пылевые диски и, как считается, происходит или уже произошло формирование планет.

Пылевые частицы в окрестности Ae/Be звезд Хербига поглощают, переизлучают и рассеивают излучение звезды (и оболочки). Это проявляется в виде ряда наблюдаемых эффектов, анализ которых позволяет получать информацию об околозвездной пыли. Как правило, моделируется лишь распределение энергии в спектре объекта, наблюдаемое в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах (см., например, Беррилли и др., 1992; Хилленбранд и др. 1992; Мэннингс 1994). Иногда привлекают также данные об околозвездном поглощении в ультрафиолете (УФ) и о профиле пылевой полосы на $\lambda 10$ мкм, что позволяет несколько углубить анализ (см., например, Соррель, 1990; Хартман и др., 1993).

Ae/Be звезды Хербига с алголеподобными минимумами (UX Ori, CQ Tau, WW Vul и др.), называемые также звездами типа UX Ori, предоставляют еще одну возможность для изучения их пылевых оболочек. Важной особенностью этих звезд является так называемый "эффект поголубения", проявляющийся во время глубоких (обычно больше 1^m–$1^m.5$) минимумов блеска. Он заключается в том, что показатели цвета звезд сначала возрастают, а затем убывают, причем цвет звезды может стать даже более голубым, чем в состоянии максимального блеска (Гётц, Венцель, 1968; Зайцева, 1973). В настоящее время общепринятым является следующее объяснение указанного эффекта (Тэ, 1994; Хербст и др., 1994): минимумы блеска звезд вызваны плотными околозвездными облаками, экранирующими звезду от наблюдателя, а "поголубение" звезды происходит из-за возрастания при этом доли излучения, рассеянного околозвездными пылинками, распределенными по оболочке. Данная гипотеза (Венцель, 1969; Гринин, 1988), была подтверждена наблюдениями значительного роста линейной поляризации излучения звезд во время минимумов (см. Гринин, 1994 и ссылки в этой работе). Очевидно, что в рамках подобного предположения поведение показателей цвета во время минимумов связано со свойствами околозвездной пыли во внутренних частях оболочек. Эти же слои ответственны и за излучение объектов в ближнем и среднем ИК диапазонах.

Тем не менее изучение оболочек Ae/Be звезд Хербига до сих пор проводилось путем моделирования *либо* распределения энергии в спектре (Беррилли и др., 1992; Хилленбранд и др. 1992; Хартман и др., 1993), включая также кривые околозвездного поглощения в УФ (см., например, Вощинников и др., 1996), *либо* диаграмм показатель цвета–звездная величина (и изменений линейной поляризации) для звезд типа UX Ori (Вощинников и др., 1988; Вощинников, 1989; Вощинников, Гринин, 1991). Целью данной работы является *совместная* интерпретация распределения энергии в спектре и диаграмм показатель цвета–звездная величина, наблюдаемых для нескольких звезд типа UX Ori. В разделе 2 описываются наблюдательные данные. Модель оболочки и метод расчетов рассмотрены в разделе 3. В разделе 4 обсуждаются результаты расчетов, а основные выводы перечислены в разделе 5.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Мы выбрали несколько звезд типа UX Ori, для которых наблюдался эффект поголубения и известно распределение энергии в спектре в диапазоне от 0.3 до 25–100 мкм: UX Ori, WW Vul, BF Ori, VX Cas и NX Pup. В табл. 1 приведены некоторые характеристики этих звезд: видимая звездная величина в полосе V в ярком состоянии, наибольшее наблюдавшееся ослабление блеска $(\Delta V)_{max}$, спектральный класс, светимость в единицах солнечной $L_*/L_\odot$, эффективная температура звезды T_*, расстояние до звезды D и избыток цвета E_{B-V}. Там же даны ссылки на работы, из которых были взяты фотометрические и другие данные, использованные для построения распределения энергии в спектрах звезд и диаграмм, показывающих изменение показателей цвета звезд в зависимости от их блеска в ходе глубоких минимумов. Температура звезд оценивалась по спектральному классу в соответствии с работой Коэн, Кухи (1979). Как известно, небольшие ее изменения не сказываются существенно на результатах моделирования ИК спектров (Рован-Робинсон, 1980; Йорк, Шустов, 1981).

Следует заметить, что для нескольких Ae/Be звезд Хербига были получены УФ спектры со спутника IUE (см. список Талавера и Вердюго, 1994). Эти данные обработаны и опубликованы лишь для трех звезд с алголеподобными минимумами: NX Pup (Тьин А Дье и др., 1984), HR5999 (Перес и др., 1993) и UX Ori (Грэди и др., 1995). Для NX Pup и UX Ori они относятся к ослабленным состояниям блеска звезд. Для принятой модели "переменной околозвездной экстинкции" это означает, что кривые околозвездного ослабления должны определяться преимущественно свойствами пыли в экранирующих облаках, рассмотрение которых выходит за рамки данной работы.

Мы также не моделировали результаты наблюдений поляризации в минимумах и максимумах блеска звезд. Эти данные будут интерпретироваться нами в последующей работе на основании расчета переноса поляризованного излучения в несферических оболочках методом Монте-Карло. Постановка задачи и некоторые предварительные результаты этого исследования опубликованы Кривовой и др. (1996).

3. МОДЕЛЬ ОБОЛОЧКИ

3.1. Модель и способ расчета

В качестве модели пылевых частиц была выбрана смесь силикатных и графитовых шаров разного размера, которую обычно используют при моделировании пыли в диффузных межзвездных облаках (Матис и др., 1977). Основные ее характеристики — минимальный a_{min} и максимальный a_{max} размеры частиц, показатель степени q в распределении частиц по размерам $n(a) \propto a^{-q}$ и отношение числа силикатных и графитовых частиц n_{Si}/n_C. Оптические свойства пылевых частиц рассчитывались по теории Ми; показатели преломления для графита и астрономического силиката брались из работы Дрэйна (1985).

Считается возможным, что в оболочках наряду с микронными частицами присутствуют и субмикронные. Последние должны бы быстро выметаться давлением излучения. Наличие субмикронных пылинок в оболочках Ae/Be звезд Хербига пока не доказано, однако, с другой стороны, оно не противоречит имеющимся наблюдательным данным (см., например, Грэди и др., 1995). Вощинников и Гринин (1991) высказали предположение, что источником субмикронных пылинок во внутренних слоях оболочек могут быть облака, вызывающие минимумы блеска и, вероятно, разрушающиеся вблизи звезд. Сходный сценарий предполагается для звезд типа β Pic (см., например, недавние работы Лекавелье дез Этань и др. (1996) и Гринберг, Ли (1996)).

Мы использовали сферически-симметричную модель пылевой оболочки, вещество в которой распределено вдоль радиуса r по степенному закону

$$\rho(r) = \rho_0 \; r^{-\alpha}. \qquad (1)$$

Положение внутренней границы оболочки R_i заметно влияет на поток в ближней ИК области и может быть найдено из сравнения рассчитанных и наблюдаемых потоков. Отметим, что для всех рассмотренных звезд R_i оказывается близким к границе, за которой должно происходить испарение пылинок (температура $T_i \approx 1200$–1500 K). Внешний радиус оболочки R_o можно лишь весьма приближенно оценить по потокам излучения в далеком ИК диапазоне. Однако его точное значение не сказывается существенно на результатах моделирования распределения энергии в спектре в более коротковолновых областях и, следовательно, диаграмм показатель цвета–звездная величина.

Интенсивность излучения объекта (звезда+оболочка) находилась нами по формуле

$$I_\lambda = I_\lambda^{Kurucz}\left[e^{-\tau_\lambda} + \frac{I_\lambda^{sca} + I_\lambda^{therm}}{B_\lambda(T_*)}\right], \qquad (2)$$

где τ_λ — оптическая толщина оболочки, I_λ^{Kurucz} — интенсивность излучения звезды в соответствии с моделями звездных атмосфер Куруча (1979), $B_\lambda(T_*)$ — интенсивность излучения абсолютно черного тела с температурой, равной эффективной температуре звезды, I_λ^{sca} и I_λ^{therm} — интенсивности рассеянного и теплового излучения оболочки, соответственно. Изменения блеска объекта при затмении звезды поглощающим облаком определялись по очевидным формулам (см., например, Кривова, 1997).

Интенсивности рассеянного и теплового излучения оболочки вычислялись по программе Э.Крюгеля (Хини и др., 1986), позволяющей решать уравнение переноса излучения в сферически-симметричной оболочке вокруг чернотельного источника излучения совместно с уравнением теплового баланса для пылинок.

Мы не принимали во внимание возможное присутствие в оболочках очень маленьких частиц ($a < 0.005$ мкм) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) (см., например, Натта и др., 1993; Прусти и др., 1994), поскольку наблюдения пока однозначно не подтвердили предположение о том, что эти частицы действительно играют заметную роль в оболочках (Брук и др., 1993; Ли и др., 1994). Добавим, что нами не учитывалось также свободно-свободное излучение околозвездного газа, которое может быть существенно, в частности, в ИК области спектра (см. Беррилли и др., 1992 и ссылки в этой работе).

3.2. Параметры и основные характеристики модели

Хорошо известно, что распределение энергии, наблюдаемое в спектре источника, окруженного пылевой оболочкой, можно воспроизвести, используя различные модели оболочки, аналогичные описанной выше (см., например, Стенхольм и др., 1991; Тамм и др., 1994; Батнер, 1996; Меньщиков, Хеннинг, 1996). Моделирование диаграмм показатель цвета–звездная величина и сопоставление их с наблюдаемыми может ограничить круг таких моделей. Однако поскольку эти диаграммы (и распределение энергии в спектре) имеют всего несколько независимых характерных особенностей, то соответственно лишь несколько основных параметров моделей может быть найдено из такого сравнения с наблюдениями.

Наша модель имеет по крайней мере 8 входных параметров: a_{min}, a_{max}, $q, n_{Si}/n_C, \alpha, R_i, R_o, \rho_0$ (или масса пыли в оболочке M_{env} при заданных α, R_i, R_o). Рассмотрим характерные особенности моделируемых наблюдательных данных и попытаемся выделить те комбинации/функции входных параметров[1], от которых они в основном зависят.

Наблюдаемые **диаграммы показатель цвета–звездная величина** (см., например, рис. 1) имеют следующие основные характеристики: 1) наклон треков на начальном этапе падения блеска (при $\Delta V < 1^m$), 2) положение точки поворота, когда начинается поголубение, и 3) положение минимума ($(\Delta V)_{max}$, $\Delta(X-Y)_{max}$).

Наклон треков связан со свойствами пыли в облаках, вызывающих затмения (см., например, Фридеманн и др., 1993, 1995), и ниже обсуждаться не будет.

Максимальное ослабление блеска (наблюдается лишь рассеянный пылью в оболочке свет звезды) должно составлять

$$(\Delta m)_{max} \approx -2.5 \log \frac{F_{sh}/F_*}{\exp(-\tau_{sh}) + F_{sh}/F_*}, \tag{3}$$

где F_{sh}/F_* – отношение потоков рассеянного излучения и излучения звезды, τ_{sh} – оптическая толщина (поглощение и рассеяние) оболочки без облака на луче зрения. Для оптически тонких оболочек, а многие из рассматриваемых оболочек сравнительно близки к ним (см. раздел 4), выражение (3) еще более упрощается, поскольку $\exp(-\tau_{sh}) \approx 1$ и $(F_{sh}/F_*) \approx \tau^{sca} << 1$, где τ^{sca} – оптическая толщина оболочки по рассеянию, а именно:

$$(\Delta m)_{max} \approx -2.5 \log \tau^{sca}. \tag{4}$$

Максимальное поголубение – разность значений показателя цвета $(X-Y)$ в максимуме и минимуме ($\Delta(X-Y)_{max}$), как очевидно из ф-лы (4), связана с разностью оптических толщин для длин волн, соответствующих полосам, $\tau^{sca}(\lambda_X) - \tau^{sca}(\lambda_Y)$.

Таким образом, в нашей модели вид диаграмм показатель цвета–звездная величина определяется, прежде всего, оптической толщиной оболочек по рассеянию τ^{sca}. Этот вывод иллюстрирует рис. 1, на котором показаны диаграммы для трех моделей с существенно различными значениями параметров ансамбля пылинок, но одинаковыми значениями τ_V^{sca} и близкими значениями τ_R^{sca} и τ_I^{sca}.

Основные характеристики **распределения энергии в спектрах** звезд с оболочками и возможность оценки по ним параметров моделей неоднократно обсуждались различными авторами (см., например, Рован-Робинсон, 1980; Йорк, Шустов, 1981; Эмерсон, 1988; Кривова, 1997) и не будут рассматриваться здесь. Заметим лишь, что зависимость ИК излучения оболочки от длины волны позволяет более или менее надежно оценивать параметры α и R_i. Болометрическая ИК светимость оболочки зависит в основном от интеграла по частоте ν от произведения оптической толщины $\tau^{abs}(\nu)$ и светимости звезды $L_*(\nu)$ (для оптически тонких оболочек светимость просто равна этому интегралу). Поэтому для рассматриваемых звезд она наиболее чувствительна к τ^{abs} в области максимума $L_*(\lambda)$, т.е. в полосах U, B, V.

Таким образом, две комбинации входных параметров τ^{sca} и τ^{abs} (наряду с параметрами α и R_i) в основном определяют вид распределения энергии в спектре и диаграмм показатель цвета–звездная величина, рассчитываемых в рамках сделанных предположений. Соответственно, с другой стороны, совместная интерпретация таких данных, по-видимому, должна быть, в первую очередь, направлена на оценку оптических толщин

[1] Имеются в виду, такие характеристики моделей как оптическая толщина оболочки $\tau = \tau(a_{min}, a_{max}, q, n_{Si}/n_C, \alpha, R_i, R_o, \rho_0)$, среднее альбедо пылинок $\langle\Lambda\rangle = \langle\Lambda\rangle(a_{min}, a_{max}, q, n_{Si}/n_C)$ и т.п.

оболочек τ^{sca} и τ^{abs} причем первой в тех полосах, где наблюдается эффект поголубения, а последней в области 0.3–0.5 мкм.

Отметим, что для выбранной модели, предполагающей одинаковые свойства пыли вдоль радиуса сферически-симметричной оболочки, среднее альбедо пылинок $\langle\Lambda\rangle$, представляющее собой отношение сечений рассеяния и ослабления, усредненных с соответствующей функцией распределения частиц по размерам, равно $\tau^{sca}/(\tau^{abs}+\tau^{sca})$. Правда, получаемые таким образом значения альбедо, следует рассматривать скорее как некоторые оценки сверху, поскольку расчеты выполнялись нами для случая изотропного рассеяния (фактор асимметрии индикатрисы рассеяния $\langle\cos\theta\rangle = 0$).

Для всех рассмотренных нами ансамблей пылинок $\langle\cos\theta\rangle > 0$, т.е. больше излучения рассеивается вперед чем назад. При неизотропном рассеянии число вторых и последующих рассеяний должно быть меньше, чем в нашем случае, т.к. при первом рассеянии больше излучения будет рассеиваться в направлении внешних, более разреженных слоев оболочки. Соответственно меньше должна быть и часть рассеянного излучения, поглощаемая при втором и последующих рассеяниях. Поэтому при тех же значениях параметров звезды и оболочки (и следовательно τ^{sca}) полный поток рассеянного оболочкой излучения F_{sh} при учете неизотропности рассеяния будет превосходить получаемый в наших расчетах (очевидно, что расхождение невелико для почти оптически тонких оболочек). И соответственно, чтобы подогнать, например, ту же величину глубины минимума, нужно будет выбирать ансамбли пылинок с более низким средним альбедо в видимой области спектра. Выполненные нами тестовые расчеты методом Монте-Карло показали, что при анизотропном рассеянии среднее альбедо должно быть уменьшено не более чем примерно на 20%.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Варьируя значения модельных параметров, мы нашли для каждой из звезд несколько моделей, удовлетворительно объясняющих наблюдательные данные. Некоторые параметры этих моделей оболочек: показатель степени (α) для радиального распределения пыли, внутренний (R_i) и внешний (R_o) радиусы оболочки, ее масса ($M_{env}/M_{\odot}$), а также оптические толщины по поглощению (τ^{abs}) и рассеянию (τ^{sca}) в полосах U и V — имеют примерно сходные значения, и поэтому в табл.2 они даны лишь для одной из моделей. Рис. 2–4 показывают согласие этих моделей с наблюдательными данными для UX Ori, BF Ori и VX Cas. Модели, согласующиеся с данными для WW Vul, были рассмотрены ранее Кривовой (1997), а с данными для NX Pup — Кривовой и Ильиным (1996), и для этих звезд рисунки не приводятся.

В отличие от параметров, описывающих распределение пыли в оболочках, мы были не в состоянии определить сколько-нибудь однозначно параметры ансамблей пылинок. Было найдено несколько способов получить хорошее согласие с наблюдательными данными. Удовлетворительными в этом смысле оказались модели с размером пылинок 0.005–1 мкм и показателем степени $q \approx 4$–5 или с близким к стандартному для межзвездной среды значению $q = 3.5$, но с максимальным размером частиц около 0.1 мкм (см. также Кривова, 1997). Согласие с наблюдательными данными было получено и для моделей, в которых отсутствовали частицы с размерами от 0.05–0.1 мкм до 0.3 мкм (более мелкие и более крупные пылинки присутствовали). Очевидно, что при таком диапазоне неопределенности размеров пылинок отношение n_C/n_{Si} не существенно, однако в целом, смеси с $n_C/n_{Si} > 1$ почти всегда были более предпочтительными.

Общим свойством указанных ансамблей пылинок, очевидно, является относительно низкое значение среднего альбедо: либо за счет большего содержания мелких пылинок, либо отсутствия частиц субмикронных размеров, либо, наконец, за счет меньшей доли рассеивающих частиц.

Усредненные по ансамблю частиц значения альбедо пылинок $\langle\Lambda\rangle$, полученные нами для полос U и V, даны в табл. 2. Очевидно, что они существенно меньше, чем найденные для пылинок в межзвездных облаках. Последние оценивались несколькими способами: путем анализа наблюдений диффузного галактического света, отражательных туманностей и темных облаков (см., например, Витт, 1989 и ссылки в этом обзоре). Хотя каждый из способов имеет свои трудности и дает значения альбедо с ошибкой ~0.1, все они указывают на то, что альбедо межзвездных пылинок составляет 0.6–0.7 в полосах U, B, V (фактор асимметрии $\langle\cos\theta\rangle \sim 0.7$).

Если допустить, что пыль поставляется во внутренние слои оболочек облаками, то причиной различия альбедо межзвездных и рассматриваемых околозвездных частиц могли бы быть процессы, сопровождающие разрушение этих облаков и испарение пылинок. Подобный сценарий для звезд типа β Pic был рассмотрен Гринбергом и Ли (1996). Они предположили, что кометообразные объекты непрерывно поставляют во внутренние слои диска пыль, состоящую, подобно кометной пыли, из пористых частиц, имеющих низкое альбедо (~0.2). Частицы эти вблизи звезд подвергаются воздействию излучения и частично разрушаются, кристаллизируются и т.п. Данное предположение базируется на относительно хорошо изученных процессах, протекающих в межпланетной среде, и в состоянии объяснить профили силикатной полосы и некоторые другие данные наблюдений звезд типа β Pic.

Заметим, что для звезд UX Ori и WW Vul диаграммы показатель цвета-звездная величина моделировались Вощинниковым и др. (1988) и Вощинниковым и Грининым (1991). Было найдено, что хорошее согласие с наблюдательными данными достигается для этих звезд соответственно при $(a_{min}, a_{max}, q, n_{Si}/n_C, A/B, \tau_U^{ext})$ = (0.04мкм, 0.15мкм, 3.5, 1.07, 4, 0.5) и (0.055мкм, 0.25мкм, 5.0, 0.25, 3, 0.55), где A/B – отношение полуосей рассмотренных сплюснутых сфероидальных оболочек. Учитывая то, что альбедо этих смесей пылинок равно 0.74 и 0.54, и поправку за форму оболочки $(A/B)^{2/3}$ (см. Кривова, 1997), легко получить, что оптическая толщина по рассеянию сферических оболочек, имеющих такой же объем, как сфероидальные, должна составлять в полосе U $\tau_U^{sca} \approx 0.15$ для UX Ori и 0.16 для WW Vul. Это согласуется со значениями в табл. 2.

Наконец, рассмотрим некоторые не включенные в модель оболочки факторы, которые могли бы повлиять на оценки параметров моделей (см. табл. 2) и, в частности, альбедо пылинок.

1. Увеличения блеска звезд после входа в минимум и уменьшения при выходе из него (см., например, Гринин и др., 1991) могут быть объяснены неоднородностью затмевающих облаков. В этом случае глубина минимума $(\Delta m)_{max}$ может определяться не только рассеянным светом, а например, для простой модели неоднородного экрана с некоторым фактором заполнения f, также неполным исключением прямого света звезды. Тогда в формуле (2) числитель следует заменить на $[(1-f)\cdot\exp(-\tau_{sh}) + f \cdot L_{sh}/L_*]$, и видно, что

оптическая толщина оболочки по рассеянию и, соответственно, альбедо должны быть еще меньше. В целом, подобная скважность экрана должна просто "отрезать" нижнюю часть диаграммы показатель цвета–звездная величина. Отметим однако, что падение блеска звезд более чем на 2^m свидетельствует о том, что фактор f весьма близок к 1 ($f > 0.9$).

2. Линейная поляризация Ae/Be звезд Хербига, достигающая в минимумах блеска 7–10%, свидетельствует о том, что в оболочках имеет место существенно несферическое распределение пыли. До настоящего времени не было сделано окончательного вывода о том, как распределено околозвездное пылевое вещество: в виде диска или некоторой сплюснутой оболочки[2] (см., например, Хилленбранд и др., 1992; Беррилли и др., 1992; Хартман и др., 1993; Батнер, 1996).

В принципе, сплюснутые оболочки не сильно отличаются от рассмотренной нами сферически-симметричной модели. В оптически тонких оболочках пыль "излучает объемно", а зависимость температуры пылинок от расстояния до звезды слабо зависит от геометрии, например, степени сплюснутости в случае, когда изоденсы являются сфероидами. Поэтому наши результаты, касающиеся моделирования ИК спектров, должны быть в целом применимы и для несферических оболочек. При этом, однако, следует учитывать очевидные поправки. В частности, значения оптических толщин в табл. 2 будут представлять собой усредненные по всем направлениям величины. Связь их с оптической толщиной по лучу зрения, например для сфероидального распределения вещества, будет зависеть от сплюснутости оболочки и ее ориентации. Очевидно, что доля рассеянного излучения (или точнее величина $\exp(-\tau_{sh}) + F_{sh}/F_*$) также будет зависеть от этих параметров, особенно при учете неизотропности рассеяния (см., например, рис. 4 в работе Вощинников и др., 1995). Тем не менее, значения среднего альбедо околозвездных пылинок из табл. 2, вероятно, должны измениться несильно.

Одно из основных отличий пылевых дисков от оболочек — то, что их поверхность может освещаться излучением звезды, а оптическая толщина вдоль радиуса диска может быть достаточно большой. Поэтому зависимость температуры пылинок от расстояния до звезды может существенно отличаться от типичной для сферических моделей. Тогда, очевидно, не применимы наши выводы о радиальном распределении вещества (параметры α, R_o) и оценки оптических толщин (τ^{abs}, τ^{sca}).

3. Наблюдаемые избытки в ближней ИК области могут быть объяснены несколькими способами: излучение околозвездных субмикронных пылинок; свободно-свободное излучение (см. Беррилли и др., 1992 и ссылки в этой работе); излучение очень маленьких пылинок и ПАУ (см., например, Натта и др., 1993). Очевидно, что приписывая ~50% светимости в ближней ИК области не учитываемому нами излучению газа или/и пылинок очень малых размеров, можно построить модель, описывающую наблюдения и включающую пылевые частицы с альбедо, характерным для межзвездной пыли.

Тестом такой модели могло бы стать изучение пространственного распределения излучения и интерпретация поляризационных наблюдений в видимой области. Карты распределения интенсивности и поляризации с высоким разрешением пока получены лишь для очень небольшого числа Ae/Be звезд Хербига. Они могли бы быть полезны не только для того, чтобы решить вопрос об источнике избыточного ИК излучения, но и для того, чтобы еще более ограничить модели оболочек (см., например, Батнер, 1996; Ильин и др., 1996).

[2] С точки зрения наблюдательных проявлений оболочек эти распределения представляют собой некоторые предельные случаи.

Поляризационные данные для состояний максимального блеска и минимумов доступны для многих звезд типа UX Ori. Предварительные результаты нашего моделирования методом Монте-Карло поляризационных данных вместе с распределением энергии в спектре и диаграммами показатель цвета–звездная величина для звезды CQ Tau (с учетом анизотропного рассеяния при сфероидальном распределении вещества) показали, что привлечение пылинок с низким альбедо действительно позволяет объяснить эти и фотометрические данные (Кривова и др., 1996). Заметим, что Вощинников (1989), рассматривая однократное рассеяние в однородной сфероидальной оболочке и моделируя поведение цветов и поляризации в минимумах, также указал на то, что частицы в окрестности звезд типа UX Ori должны иметь пониженное значение альбедо.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для 5 Ae/Be звезд Хербига с алголеподобными минимумами (UX Ori, WW Vul, BF Ori, VX Cas и NX Pup) интерпретированы распределение энергии в диапазоне примерно 0.3–100 мкм и поведение показателей цвета $(U-B), (B-V), (V-R)$ и $(V-I)$ во время глубоких минимумов блеска звезд. Использовалась модель сферически-симметричной оболочки со степенным распределением вещества вдоль радиуса и степенным распределением графитовых и силикатных частиц по размерам.

Оценены параметры оболочек (оптические толщины, размеры и т.д.) и среднее по ансамблю альбедо околозвездных пылевых частиц, находящихся во внутренних слоях оболочек. Отмечено, что полученные значения альбедо (0.3–0.4 в полосах U, B, V) существенно отличаются от характерных для межзвездных пылинок (∼0.6–0.7) и близки к значениям, полученным Гринбергом и Ли (1996) для внутренних частей дисков звезд типа β Pic и типичным для кометной пыли.

Авторы благодарны Э.Крюгелю за любезно предоставленную программу расчета переноса излучения и Н.В.Вощинникову за сделанные замечания и полезное обсуждение. Н.К. признательна проф. Я. Креловскому за прекрасные условия для работы, предоставленные ей в Институте Астрономии в Торуне, а также Польскому Национальному Комитету по Научным Исследованиям за поддержку (грант N 2 P304 010 07). В.И. благодарит Фонд Гумбольдта (Бонн, Германия) за финансовую поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Артюхина Н.М. // Астрон. журн. 1960. Т. 37. С. 95.

Батнер (Butner H.M.) //The Role of Dust in the Formation of Stars. Proc. ESO Workshop / Eds Käufl H.U., Siebenmorgen R. Springer, 1996. P. 149.

Бердюгин А.В. // Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. 1992. Т. 87. С. 107.

Бердюгин А.В., Гринин В.П., Миникулов Н.Х. // Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. 1992. Т. 86. С. 69.

Беррилли и др. (Berrilli F., Corciulo G., Ingrosso G. et al.) //Astrophys. J. 1992. V. 398. P. 254.

Бибо, Тэ (Bibo E., Thé P.S.) //Astron. and Astrophys. 1990. V. 236. P. 155.

Брэнд и др. (Brand P.W.J.L., Hawarden T.G., Longmore A.J. et al.) //Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 1983. V. 203. P. 215.

Брук и др. (Brooke T.Y., Tokunaga A.T., Strom S.E.) //Astron. J. 1993. V. 106. P. 656.

Венцель (Wenzel W.) //Non-Periodic Phenomena in Variable Stars. IAU Coll. N 4 / Ed Detre L. Budapest, 1969. P. 61.

Вивер, Джонс (Weaver W.B., Jones G.) //Astrophys. J. Suppl. Ser. 1992. V. 78. P. 239.

Витт (Witt A.N.) //Interstellar Dust. IAU Symp. N 139 / Eds Allamandola L.J., Tielens A.G.G.M. Reidel, 1989. P. 87.

Вощинников Н.В. // Астрофизика. 1989. Т. 30. С. 509.

Вощинников Н.В., Гринин В.П. // Астрофизика. 1991. Т. 34. С. 181

Вощинников Н.В., Гринин В.П., Киселев Н.Н., Миникулов Н.Х. // Астрофизика. 1988. Т. 28. С. 311.

Вощинников и др. (Voshchinnikov N.V., Grinin V.P., Karjukin V.V.) //Astron. and Astrophys. 1995. V. 294. P. 547.

Вощинников и др. (Voshchinnikov N.V., Molster F.J., Thé P.S.) //Astron. and Astrophys. 1996. V. 312. P. 243.

Гётц, Венцель (Götz V.W., Wenzel W.) //Mitt. veränd. Sterne. 1968. V. 5. P. 2.

Гласс, Пенстон (Glass I.S., Penston M.V.) //Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 1974. V. 167. P. 237.

Гринберг, Ли (Greenberg J.M., Li A.) //The Role of Dust in the Formation of Stars. Proc. ESO Workshop / Eds Käufl H.U., Siebenmorgen R. Springer, 1996. P. 161.

Гринин В.П. // Письма в Астрон. журн. 1988. Т. 14. С. 65.

Гринин (Grinin V.P.) // ASP Conf. Ser. 1994. V. 62. P. 63.

Гринин В.П., Киселев Н.Н., Миникулов Н.Х. // Письма в Астрон. журн. 1989. Т. 15. С. 1028.

Гринин и др. (Grinin V.P., Kisilev N.N., Minikulov N.Kh., Chernova G.P., Voshchinnikov N.V.) //Astrophys. and Space Sci. 1991. V. 186. P. 283.

Грэди и др. (Grady C.A., Pérez M.R., Thé P.S., Grinin V.P., de Winter D., Johnson S.B., Talavera A.) //Astron. and Astrophys. 1995. V. 302. P. 472.

Дрэйн (Draine B.T.) //Astrophys. J. Suppl. Ser. 1985. V. 57. P. 587.

Зайцева Г.В. // Перем. звезды. 1973. Т. 19. С. 63.

Зайцева Г.В. // Перем. звезды. 1983. Т. 22. С. 1.

Зайцева Г.В. // Астрофизика. 1986. Т. 25. С. 471.

Ильин и др. (Il'in V., Krivova N., Men'shchikov A.) //The Role of Dust in the Formation of Stars. Proc. ESO Workshop / Eds Käufl H.U., Siebenmorgen R. Springer, 1996. P. 183.

Йорк, Шустов (Yorke H.W., Shustov B.M.) //Astron. and Astrophys. 1981. V. 98. P. 125

Кардополов В.И., Филипьев Г.К. // Перем. звезды. 1985 а. Т. 22. С. 103.

Кардополов В.И., Филипьев Г.К. // Перем. звезды. 1985 б. Т. 22. С. 122.

Килкенни и др. (Kilkenny D., Whittet D.C.B., Davies J.K. et al.) //South. Afr. Astron. Obs. Circ. 1985. V. 9. P. 55.

Колотилов Е.А. // Астрофизика. 1977. Т. 13. С. 33.

Колотилов Е.А., Зайцева Г.В., Шенаврин В.И. // Астрофизика. 1977. Т. 13. С. 449.

Коэн (Cohen M.) //Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 1973 а. V. 161. P. 97.

Коэн (Cohen M.) //Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 1973 б. V. 161. P. 105.

Коэн, Кухи (Cohen M., Kuhi) //Astrophys. J. Suppl. Ser. . 1979. V. 41. P. 743.

Кривова Н.А. // Письма в Астрон. журн. 1997. (в печати)

Кривова, Ильин (Krivova N., Il'in V.) //The Role of Dust in the Formation of Stars. Proc. ESO Workshop / Eds Käufl H.U., Siebenmorgen R. Springer, 1996. P. 187.

Кривова и др. (Krivova N.A., Il'in V.B., Fischer O.) //From Stardust to Planetesimals: Contributed Papers. Proc. 108th Ann. Meet. of ASP (Santa Clara) / Eds Kress M.E., Tielens A.G.G.M., Pendleton Y.J. NASA-CP 1996. #3343. P. 37.

Куруч (Kurucz R.L.) //Astrophys. J. Suppl. Ser. 1979. V. 40. P. 1.

Лекавелье дез Этань и др. (Lecavelier des Etangs A., Vidal-Madjar A., Ferlet R.) //Astron. and Astrophys. 1996. V. 307. P. 542.

Ли и др. (Li W., Evans II N.J., Harvey P.M., Colomé C.) //Astrophys. J. 1994. V. 433. P. 199.

Матис и др. (Mathis J.S., Rumpl W., Nordsieck K.H.) //Astrophys. J. 1977. V. 217. P. 425.

Мэннингс (Mannings V.) //Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 1994. V. 271. P. 587.

Меньщиков, Хеннинг (Men'shchikov A., Henning Th.) //The Role of Dust in the Formation of Stars. ESO Workshop / Eds. Käufl H.U., Siebenmorgen R. Springer, 1996. P. 351.

Натта и др. (Natta A., Prusti J., Krügel E.) //Astron. and Astrophys. 1993. V. 275. P. 527.

Прусти и др. (Prusti T., Natta A., Palla F.) //Astron. and Astrophys. 1994. V. 292. P. 593.

Перес и др. (Pérez M.R., Grady C.A., Thé P.S.) //Astron. and Astrophys. 1993. V. 274. P. 381.

Пугач А.Ф. // Астром. Астрофиз. 1979. Т. 39. С. 8.

Пугач А.Ф. // Астрофизика. 1983. Т. 19. С. 739.

Рейпурт (Reipurth B.) //Astron. and Astrophys. 1983. V. 117. P. 183.

Рован-Робинсон (Rowan-Robinson M.) //Astrophys. J. Suppl. Ser. 1980. V. 44. P. 403.

Ситко и др. (Sitko M.L., Savage B.D., Meade M.R.) //Astrophys. J. 1981. V. 246. P. 161.

Соррель (Sorrell W.H.) //Astrophys. J. 1990. V. 361. P. 150.

Стенхольм и др. (Stenholm L.G., Störzer H., Wehrse R.) //J. Quant. Spectroscop. and Radiat. Transf. 1991. V. 45. P. 47.

Талавера, Вердюго (Talavera A., Verdugo E.) //ASP Conf. Ser. 1994. V. 62. P. 136.

Тамм и др. (Thamm E., Steinacker J., Henning Th.) //Astron. and Astrophys. 1994. V. 287. P. 493.

Тимошенко Л.В., Филипьев Г.К. // Астрофизика. 1983. Т. 19. С. 513.

Тьин А Дье и др. (Tjin A Djie H.R.E., Remijn L., Thé P.S.) //Astron. and Astrophys. 1984. V. 134. P. 273.

Тэ (Thé P.S.) //ASP Conf. Ser. 1994. V. 62, P. 23.

Тэ и др. (Thé P.S., de Winter D., Pérez M.R.) //Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1994 a. V. 104. P. 315.

Тэ и др. (Thé P.S., Pérez M.R., van den Heuvel E.P.J., Eds) The Nature and Evolutionary Status of Herbig Ae/Be Stars. ASP Conf. Ser. 1994 б. V. 62.

Фридеманн и др. (Friedemann C., Reimann H.-G., Gürtler J., Tóth V.) //Astron. and Astrophys. 1993. V. 277. P. 184.

Фридеманн и др. (Friedemann C., Gürtler J., Reimann H.-G.) //Astron. and Astrophys. 1995. V. 300. P. 269.

Хартман и др. (Hartman L., Kenyon S.J., Calvet N.) //Astrophys. J. 1993. V. 407. P. 219.

Хатчинсон и др. (Hutchinson M.G., Albinson J.S., Barrett P. et al.) //Astron. and Astrophys. 1994. V. 285. P. 883.

Хербст и др. (Herbst W., Booth J.F., Koret D.L. et al.) //Astron. J. 1987. V. 94. P. 137.

Хербст и др. (Herbst W., Herbst D.K., Grossman E.J.) //Astron. J. 1994. V. 108. P. 1906.

Хилленбранд и др. (Hillenbrand L.A., Strom S.E., Vrba F.J., Keene J.) //Astrophys. J. 1992. V. 397. P. 613.

Холопов П.Н. // Астрон. журн. 1959. Т. 36. С. 295.

Хини и др. (Chini R., Krügel E., Kreysa E.) //Astron. and Astrophys. 1986. V. 167. P. 315.

Шаймиева А.Ф., Шутемова Н.А. // Перем. звезды. 1985. Т. 22. С. 167.

Шевченко В.С., Якубов С.Д. // Астрон. журн. 1992. Т. 69. С. 705.

Эмерсон (Emerson J.P.) //Formation and Evolution of Low Mass Stars / Eds Dupree A.K., Lago M.T.V.T. Kluwer, 1988. P. 21.