

УДК 523.94

## Эффекты отклонения от локального термодинамического равновесия во фраунгоферовом спектре Солнца.

Кислород

Н. Г. Щукина

Рассматривается с учетом отклонения от ЛТР образование линий нейтрального кислорода O I  $\lambda\lambda$  130.2—130.6, 135.6—135.9, 777.2—777.5, 844.6 нм, наблюдаемых в возмущенных областях на диске Солнца. Найдено распределение по высоте в атмосфере коэффициентов отклонения от ЛТР населенностей 12 уровней O I и O II, выполнен расчет профилей и эквивалентных ширин линий для различных положений на диске, проведено их сравнение с ЛТР-значениями и наблюдениями, оценено влияние на найденное решение радиативных и тепловых процессов, водородного излучения линии  $L_{\beta}$  и Лайман-континуума, модели атмосферы и т. д. Отмечается важное значение правильной оценки поля  $L_{\beta}$  при расчете характеристик излучения резонансного триплета. Найдено, что из-за повышенной чувствительности (по сравнению с ЛТР) эквивалентной ширины триплета  $\lambda\lambda$  777.2—777.5 нм к температуре небольшие погрешности при ее определении в фотосфере могут приводить к существенным вариациям потока и эквивалентной ширины триплета в звездных спектрах. Показано, что влияние отклонения от ЛТР на характеристики профилей рассмотренных линий O I выше погрешностей прецизионных солнечных наблюдений и должно учитываться при их интерпретации.

*THE EFFECTS OF DEPARTURE FROM THE LOCAL THERMODYNAMICAL EQUILIBRIUM IN THE SOLAR FRAUNHOFER SPECTRUM. OXYGEN, by Shchukina N. G.*— The non-LTE formation of the O I lines  $\lambda\lambda$  130.2—130.6, 135.6—135.9, 777.2—777.5, 844.6 nm observable in the spectrum of quiet regions on the solar disk is discussed. The departure coefficients for twelve levels of O I and O II are obtained. The non-LTE center-to-limb profiles and equivalent widths of the lines are evaluated and compared with LTE-case and with observations. The influence of radiative and collisional processes, hydrogen radiation of Lyman- $\beta$  and Lyman-continuum is analysed. The non-LTE equivalent widths of  $\lambda\lambda$  777.2—777.5 O I lines are shown to be of higher sensitivity (as compared with the LTE-case) to the distribution of temperature in the region of its formation. As a result insignificant small variations of the temperature in the region of the triplet formation may cause strong variations of its radiative flux and equivalent widths in stellar spectra. The non-LTE effects for lines of O I are higher than the errors of precise solar observations and must be taken into account.

**Введение.** В последнее время с появлением монохроматоров двойной дифракции и Фурье-спектрографов погрешность регистрации излучения солнечных спектральных линий более чем на порядок ниже погрешности расчета с помощью распространённой ЛТР-теории образования линии. Столь существенное расхождение между наблюдениями и теорией чревато серьезными ошибками при определении содержания химических элементов, составлении точных «солнечных» шкал сил осцилляторов, исследовании поля скоростей, создании полуэмпирических моделей атмосфер Солнца, интерпретации магнитографических наблюдений и т. п. В связи с этим особое значение приобретают исследования, цель которых — учесть влияние отклонения от ЛТР на интенсивность излучения линий.

Мы выполнили подобное исследование для линий нейтрального кислорода O I, наблюдаемых в спектре диска Солнца: ультрафиолетового резонансного триплета  $\lambda\lambda$  130.2—130.6 нм, интеркомбинационного дублета  $\lambda\lambda$  135.6—135.9 нм, красных триплетов  $\lambda\lambda$  777.2—777.5, 844.6 нм. Разные области образования этих линий делают их ценным источником информации при зондировании физического состояния солнечной атмосферы. Кроме того, спектр O I может стать индикатором водородного излучения. Благодаря совпадению основных границ ионизации этих элементов, сильное поле излучения Лайман-континуума  $L_{\alpha}$ , по мнению Намбы [32], регулирует в верхней хромосфере интенсивность резонансного триплета.

Возбуждение атомов O I излучением водородной линии  $L_{\beta}$ , длина волны которой ( $\lambda$  102.575 нм) соответствует длине волны разрешенного перехода O I  $2p^1 \ ^3P - 3 \ ^3D^0$

( $\lambda$  102.577 нм), должно приводить к дополнительному заселению уровня  $^3D^0$ , а последующие каскадные переходы вниз — к усилению линий, возникающих при этих переходах. В 1947 г. Боуэн [19] привлек механизм флюоресценции  $L_{\beta}$ -излучения для объяснения необычной силы эмиссии  $\lambda$  844.6 нм в газовых туманностях. Позднее в работе [27] было обращено внимание на важность этого механизма для красных триплетов в звездных спектрах, а в [2, 3] — в солнечном хромосферном спектре. Детальные расчеты [24, 37] с учетом эффектов отклонения от ЛТР подтвердили решающую роль  $L_{\beta}$ -излучения для УФ-триплета  $\lambda\lambda$  130.2—130.6 нм в спектрах позднего гиганта (Арктур) и Солнца.

В настоящее время среди работ по интерпретации спектра нейтрального кислорода следует выделить исследования солнечного хромосферного спектра [1—3, 15, 32]. Другая группа работ посвящена анализу образования фотосферных линий красных триплетов в спектрах Солнца [13, 14, 21, 31, 36] и звезд [26, 28]. Исследования [20, 24, 37], образующие третью, наиболее совершенную, группу работ, представляют значительную эволюцию во взглядах на образование линий O I. Их анализ показывает, что при строгом решении вопроса о величине эффектов отклонения от ЛТР в солнечных линиях O I необходимо рассмотреть одноуровневое образование его красных и УФ-линий с учетом взаимосвязи синглетной, триплетной и квинтетной систем уровней, их водородоподобия и в рамках модели атмосферы с хромосферным подъемом температуры. В таком полном объеме анализ спектра O I выполнен лишь для атмосферы Арктура [24]. Мы попытались выполнить подобное исследование в применении к атмосфере Солнца. Настоящая статья — обобщение результатов, часть из которых обсуждалась ранее [5—12].

**Метод решения.** При выполнении поставленной задачи мы воспользовались результатами решения методом квазилинеаризации [16, 17] системы уравнений переноса, стационарности и сохранения частиц многоуровневой модели атома кислорода в приближении одномерной модели атмосферы и полного перераспределения излучения по частотам. Подробно метод изложен в [5, 7]. Для оценки влияния отклонения от ЛТР на интенсивность излучения  $I_{\lambda}(\mu)$ , профили  $r_{\lambda}(\mu)$  и эквивалентные ширины  $W_{\lambda}(\mu)$  спектральных линий нейтрального кислорода значения этих величин, найденные для различных положений на диске Солнца, сравнивались с соответствующими значениями, рассчитанными в приближении ЛТР. Коэффициенты отклонения от ЛТР  $b_l$  населенностей  $n_l$  уровней оценивались из соотношения  $b_l := n_l(\text{не-ЛТР})/n_l(\text{ЛТР})$ , где  $l$  — номер уровня.

**Данные для вычислений.** Модель атома включала 13 уровней (рис. 1). При линеаризации подуровни тонкой структуры заменялись общим мультиплетным уровнем, статистический вес которого равен сумме весов подуровней. Подробные сведения о модели и атомных параметрах даны в [5]. Оценка скорости возбуждения полем излучения линии  $L_{\beta}$  уровня  $^3D^0$  O I базировалась на предположениях, вытекающих из модели VAL [38]: собственное поле излучения линии  $L_{\beta}$  значительно сильнее (и ее ширина больше) по сравнению с линией O I  $\lambda$  102.577 нм; линия  $L_{\beta}$  в слое, где формируется излучение кислородных линий, является оптически толстой. Формулы для расчета данной скорости приведены в [5]. Распределение по высоте средней интенсивности излучения Лайман-континуума  $L_c$  водорода, значение которой необходимо знать для расчета скоростей фотоионизации и фоторекомбинации этим излучением, находилось из решения уравнения переноса в двухуровневом приближении [22] в частотах за основной границей ионизации кислорода. Это возможно вследствие практического совпадения основных границ ионизации указанных элементов. Содержание кислорода взято из работы [18]:  $\lg A(\text{O}) = 8.84$ . Для оценки влияния погрешности данной величины проводились расчеты при разных ее значениях. Кроме того, учитывалось, что в верхней фотосфере, согласно [4, 23, 29, 38], за счет возникновения молекул CO концентрация свободных атомов кислорода может уменьшиться до 60%. Оценка влияния такого эффекта на величину излучения, выходящего в линиях O I, показала [10], что область вклада в центральную интенсивность дублета  $\lambda\lambda$  135.6—135.9 нм находится выше, а красного триплета  $\lambda\lambda$  777.2—777.5 нм — ниже области максимального уменьшения количества атомов из-за образования CO. Таким образом, интенсивность дублета (а тем более резонансного триплета) оказывается не чувствительной к уменьшению концентрации атомов кислорода. Интенсивность же красных триплетов может увеличиться, а эквивалентная ширина уменьшиться, но не более чем на 1%.

**Отклонение от ЛТР населенностей уровней.** Наши расчеты показывают, что практически во всех слоях атмосферы Солнца число высоковозбужденных нейтральных атомов кислорода и ионов (за исключением фотосферы) не соответствует ЛТР-значениям. В таблице приведено распределение по высоте коэффициентов  $b_l$  для 12 мультиплетных уровней атома кислорода. Характер поведения  $b_l$  триплетной и квинтетной систем уровней O I и первых уровней O II аналогичен: недонаселенность по сравнению с ЛТР в средней хромосфере, пик перенаселенности вблизи области температурного минимума и недонаселенность или слабая перенаселенность в фотосфере. Населенность основного и синглетных уровней превышает ЛТР-значения лишь в верхних

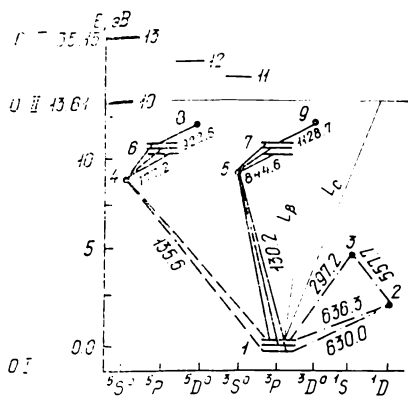


Рис. 1. Диаграмма термов атома кислорода: 1—9 — уровни O I; 10—12 — основной  $^4S_{3/2}^0$  и первые возбужденные уровни  $^2D^0$  и  $^2P$  O II; 13 — основной уровень O III. Линеаризация уравнений переноса выполнялась только для линий триплетной ( $\lambda\lambda$  130.2—130.6, 844.6, 1128.7 нм) и квинтетной ( $\lambda\lambda$  135.6—135.9, 777.2—777.5, 922.6 нм) систем. Поле излучения связанно-свободных переходов и запрещенных линий  $\lambda\lambda$  297.2, 557.7, 630.0—636.3 нм находилось из решения уравнений переноса в двухуровневом приближении [21]

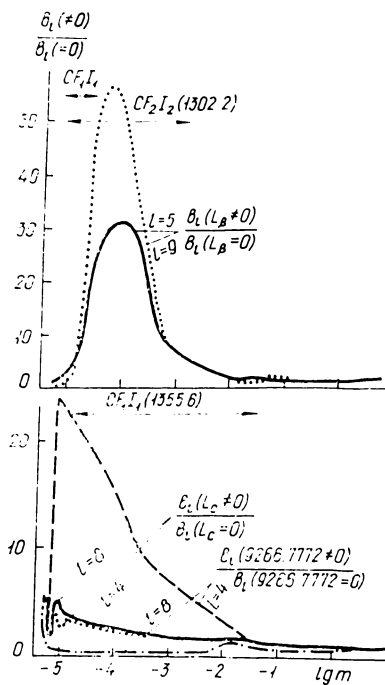


Рис. 2. Влияние Лайман-континуума  $L_\gamma$ , радиативных процессов в линиях  $\lambda\lambda$  926.6, 777.2—777.5 нм и линии  $L_\beta$  на коэффициенты  $b_l$  отклонения от ЛТР уровней  $^3S^0$  ( $l=5$ ),  $^3D^0$  ( $l=9$ ),  $^5S^0$  ( $l=4$ ),  $^5D^0$  ( $l=8$ ) O I. Вертикальная ось — отношение  $b_l$  отдельного уровня для случаев учета ( $\neq 0$ ) и неучета ( $=0$ ) каждого из перечисленных механизмов. Стрелками обозначены области образования центров линии  $CF_1I_1$  дублета  $\lambda\lambda$  135.6—135.9 нм и триплета  $\lambda\lambda$  130.2—130.6 нм, а также пика интенсивности в крыле линии  $\lambda$  130.2 нм —  $CF_2I_2$ , определенные по функции вклада в интенсивность ( $\mu=1$ ). Модель атмосферы — VAL 80, C

слоях атмосферы. Представленные в таблице коэффициенты типичны для моделей атмосферы с инверсией температуры. В чисто фотосферной модели (HOLMU [25]) значения  $b_l$  монотонно уменьшаются при переходе ко внешним, более холодным, слоям [8].

**Роль радиативных процессов.** Анализ причин такого распределения  $b_l$  [7—9, 11, 12] показал, что в хромосфере основными механизмами, контролирующими отклонение от ЛТР населенностей высоковозбужденных уровней нейтрального кислорода ( $^3S^0$ ,  $^5P$ ,  $^5D^0$ ,  $^3S^0$ ,  $^3P$ ,  $^3D^0$ ), являются рекомбинационно-каскадные процессы и накачка водородным излучением  $L_\gamma$ . Для уровней триплетной системы дополнительным важным фактором становится возбуждение уровня  $^3D^0$  O I излучением  $L_\beta$ . Количественные оценки роли каждого из трех механизмов приведены на рис. 2. В обширной области хромосферы каскадные процессы  $^3D^0 \rightarrow ^5P \rightarrow ^3S^0$  в линиях квинтетной системы  $\lambda\lambda$  926.6, 777.2 нм (и аналогичные в линиях триплетной  $\lambda\lambda$  1128.7, 844.6 нм) ведут к оттоку возбужденных  $^5D^0$ -атомов ( $^3D^0$ ), образовавшихся при фоторекомбинациях ионов, на уровень  $^5S^0$  ( $^3S^0$ ). Процесс накопления атомов на последних уровнях ослабевает из-за фотоионизаций (число непосредственных фоторекомбинаций невелико) и радиа-

Коэффициенты отклонения от ЛТР для 12 уровней кислорода

Номер	$m$	$\tau_6$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$b_{10}$	$b_{11}$	$b_{12}$
1	5.300-6	2.080-8	9.85+14	1.04+13	8.70+10	1.09+13	4.44+8	1.94+11	1.60+9	6.23+9	5.66+7	9.28+6	9.28+6	9.28+6
2	5.553-6	9.496-8	1.33+6	3.42+4	7.92+2	3.17+4	1.67+0	1.06+3	7.44+0	6.11+1	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0
3	5.814-6	1.716-7	1.19+6	3.10+4	7.32+2	2.98+4	1.68+0	1.01+3	7.80+0	5.89+1	1.90+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0
4	6.193-5	2.805-7	3.58+3	2.95+2	7.56+1	2.73+2	4.27-1	2.33+1	6.54-1	3.04+0	1.43+0	8.70-1	8.70-1	8.70-1
5	6.416-6	3.243-7	6.71+1	1.06+1	1.78+0	4.67+1	1.19-1	6.32+0	1.92-1	1.22+0	5.79-1	7.99-1	7.99-1	7.99-1
6	7.732-6	5.203-7	8.79+0	3.35+0	1.19+0	1.16+0	1.19-1	2.14+0	1.25-1	5.40-1	4.23-1	5.36-1	5.36-1	5.36-1
7	1.015-5	7.717-7	3.63+0	2.59+0	1.83+0	4.49+0	1.83-1	9.54-1	1.31-1	2.72-1	4.10-1	3.29-1	3.29-1	3.29-1
8	2.467-5	1.560-6	1.52+0	1.46+0	1.40+0	1.91+0	5.18-1	4.63-1	2.05-1	1.50-1	3.66-1	2.27-1	2.27-1	2.27-1
9	1.458-4	3.770-6	1.12+0	1.12+0	1.12+0	7.67-1	1.41+0	1.97-1	4.50-1	7.03-2	3.02-1	1.28-1	1.28-1	1.28-1
10	8.612-4	7.991-6	1.03+0	1.03+0	1.03+0	4.67-1	1.75+0	1.26-1	5.75-1	4.88-2	2.62-1	9.49-2	9.49-2	9.49-2
11	5.089-3	2.374-5	1.00+0	1.00+0	1.00+0	8.06-1	1.88+0	2.96-1	8.43-1	1.53-1	4.63-1	2.51-1	2.51-1	2.51-1
12	1.237-2	4.349-5	1.00+0	1.00+0	1.00+0	2.67+0	2.62+0	1.49+0	1.72+0	1.09+0	1.07+0	1.14+0	1.14+0	1.14+0
13	1.928-2	6.726-5	1.00+0	1.00+0	1.00+0	2.87+0	3.40+0	2.06+0	2.80+0	1.88+0	1.86+0	2.61+0	2.61+0	2.61+0
14	4.687-2	2.829-4	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.01+0	1.45+0	9.50-1	1.59+0	1.09+0	2.06+0	3.58+0	3.58+0	3.58+0
15	2.769-1	7.270-3	1.00+0	1.00+0	1.00+0	9.74-1	1.22+0	7.00-1	1.04+0	6.38-1	1.08+0	1.29+0	1.29+0	1.29+0
16	6.731-1	3.252-2	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.01+1	1.23+0	6.44-1	9.07-1	5.12-1	8.34-1	8.18-1	8.18-1	8.18-1
17	1.636+0	1.438-1	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.06+0	1.28+0	8.30-1	1.02+0	6.79-1	9.14-1	8.75-1	8.75-1	8.75-1
18	6.199+0	5.697+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0

Примечание. Модель атмосферы — VAL 80, C. Содержание кислорода  $\lg A(O) = 8.84$ . Учтены эффекты диссоциации молекулы  $CO$  и  $Lp$ ,  $Lc$ -накачки.

тивных процессов в резонансных линиях, для которых эти уровни являются верхними. При интегрировании по большому интервалу высот суммарное действие на функцию источника дублета  $\lambda\lambda$  135.6—135.9 нм радиативных членов, соответствующих линиям  $\lambda\lambda$  926.6, 777.2, 135.6 нм, оказывается незначительным. В функции источника будут преобладать тепловые члены [9]. Действие рекомбинационно-каскадного механизма на населенности уровней триплетной системы аналогично. Однако в хромосфере ( $-4.7 \leq \lg m \leq -3$ ) он по сравнению с  $L_{\beta}$ -накачкой играет второстепенную роль (рис. 2).

По мере продвижения в высокие слои хромосферы значение  $L_{\beta}$ -накачки уменьшается, а  $L_c$  — увеличивается (рис. 2). Здесь механизм ионизации нейтральных атомов

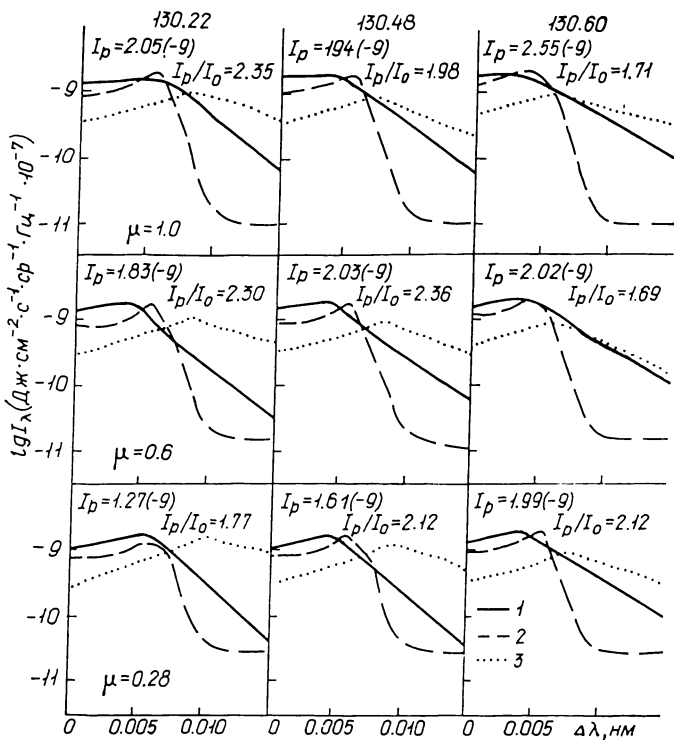


Рис. 3. Сравнение наблюдаемых профилей [35] резонансного триплета  $\lambda\lambda$  130.2—130.6 нм с теоретическими: 1 — наблюдаемые; 2 — наши расчеты (содержание кислорода  $\lg A(O) = 8.84$ , модель атмосферы — VAL 80,C); 3 — расчеты авторов [35, 37]. Наблюдаемые значения  $I_{\lambda}$  при  $\mu = 0.6$  и  $\mu = 0.28$  получены интерполяцией значений этой величины, приведенной в [35] для  $\mu = 0.73$  и  $\mu = 0.23$

кислорода  $L_c$ -излучением и последующих рекомбинаций на высоковозбужденные уровни увеличивает их населенности примерно в пять раз. В фотосфере значение рекомбинационно-каскадных процессов и  $L_{\beta}$ - и  $L_c$ -накачки пренебрежимо мало. На первый план выходят радиативные процессы в линиях [8]. В хромосфере отклонение от ЛТР числа ионов и нейтральных атомов в основном и синглетных состояниях связаны с отличием температуры излучения Лайман-континуума и субординатных континуумов O I от электронной температуры. В фотосфере недонаселенность континуума вызвана недонаселенностью высоковозбужденных уровней O I [12].

**Тепловые процессы.** Из тепловых процессов, влияющих на заселение уровней кислорода в солнечной атмосфере, рассмотрен электронный удар (как наиболее важный из них [11]). Оказалось, что он не нарушает установившегося вследствие радиативных процессов отклонения от ЛТР населенностей уровней, а стремится установить подобие в распределении  $b_i$ . Ударная взаимосвязь триплетной и квинтетной систем, возникающая из-за близости энергий возбуждения уровней  $^5S^0 - ^3S^0$ ,  $^5P - ^3P$ ,  $^5D^0 - ^3D^0$ , важна только при  $L_{\beta}$ -накачке. Эффект достигает максимума в хромосфере ( $-3.5 \leq \lg m \leq -1$ ). Дополнительный отток атомов с триплетных уровней на квинтетные увеличивает населенность последних в 1.5 раза. Тепловой характер функции источника дублета  $\lambda$  135.6 нм предъявляет повышенные требования к ударной скорости возбуждения уровня  $^5S^0$ . В зависимости от используемой аппроксимации скорости можно получить и ЛТР-значения его населенности, и существенную недонаселенность. Особенно нежелательно применение формулы Регемортера. Именно этим, а не охлаждающим действием УФ-излучения, следует, по-видимому, объяснить недонаселенность уровня  $^5S^0$ , полученную в [36],

а также радиативно связанного с ним уровня  ${}^5P$ . В итоге линии триплета  $\lambda$  777.2 нм оказываются слишком глубокими.

**Эффекты отклонения от ЛТР в линиях О I.** При образовании линий *резонансного триплета*  $\lambda\lambda$  130.2—130.6 нм в спектре диска Солнца с учетом отклонения от ЛТР их центральная интенсивность уменьшается более чем на порядок, причем абсолютная интенсивность пика излучения  $I_p$ , ее отношение к излучению в центре линии  $I_p/I_0$ , расстоянние от этого центра до пика  $\Delta\lambda_p$  качественно неплохо согласуются с наблюдениями центр — край, выполненными на КА Skylab [35] (рис. 3). В отличие от расчетов [37] мы не обнаружили поярчания интегральной интенсивности к краю до  $\mu=0.28$ , что также не противоречит действительности. Крылья линий триплета уже наблюдаемых и существенно уже протяженных крыльев, рассчитанных в [37], как и в нашем случае, в приближении полного перераспределения излучения по частотам.

Таким образом, интенсивность крыльев можно изменить, не прибегая к приближению частичного перераспределения излучения по частотам. Несомненно, это перераспределение должно, как утверждается в [35], играть важную роль при образовании резонансных линий триплета. Но не следует забывать еще об одном обстоятельстве, имеющем большое значение,— правильном описании поля излучения линии  $L_\beta$ , к которому чрезвычайно чувствительна населенность верхнего уровня триплета (рис. 2). Различие способов расчета такого поля сыграло, по-видимому, не последнюю роль в расхождении между профилями, полученными нами и в работе [37]. Отметим, что при формировании хромосферного спектра триплета, наблюдаемого за лимбом, необходимо, как показал Намба [32] и как подтверждают данные рис. 2, принимать во внимание влияние не только излучения  $L_\beta$ , но и Лайман-континуума.

Отклонение от ЛТР населенностей уровней *резонансного дублета*  $\lambda\lambda$  135.6—135.9 нм вызывает ослабление центральной интенсивности его линий для модели VAL 80,С примерно в 1.5 раза. Нарушение радиативного баланса в линиях  $\lambda\lambda$  926.6, 777.2, 135.6 нм, что отмечалось выше, должно привести к существенному усилению эффектов отклонения от ЛТР, так как области формирования линий дублета и максимального проявления рекомбинационно-каскадных процессов (рис. 2) совпадают. Исключение из этого процесса радиативных переходов  ${}^5D^0 \rightarrow {}^5P$  ( $\lambda$  926.6 нм),  ${}^5P \rightarrow {}^5S^0$  ( $\lambda$  777.2 нм) снижает абсолютную интенсивность дублета в пять раз [9]. Эффекты  $L_\beta$ -накачки изменяют среднюю интенсивность в его центре максимум на 40 %, а изменение ударной скорости возбуждения уровня  ${}^5S^0$  — в 1.5 раза.

Для профилей линий *триплета*  $\lambda\lambda$  777.2—777.5 нм в спектре диска, рассчитанных с учетом эффектов отклонения от ЛТР, характерны две особенности: во-первых, отличия в значениях  $r_0$ ,  $r_\lambda$ ,  $W_\lambda$  по сравнению с ЛТР-случаем увеличиваются по мере перехода от центра к краю диска Солнца. При этом профили линий становятся глубже (рис. 4), а разность  $\Delta r(\text{не-ЛТР}) = r_0(\text{не-ЛТР}) - r_0(\text{ЛТР})$  к краю практически удваивается (рис. 5). В результате чего кривая  $r_0(\mu)$ , вычисленная с учетом эффектов отклонения от ЛТР, для любой из линий триплета оказывается ниже ЛТР-кривой, а ее наклон относительно оси  $\mu$  уменьшается. Абсолютное значение  $r_0$  зависит от модели атмосферы, что подтверждает выводы других авторов [24, 31, 33]. Однако выбор модели практически не влияет на величину  $\Delta r(\text{не-ЛТР})$ , форму зависимости  $r_0$  от  $\mu$  и ее наклон к этой оси. Эквивалентная ширина линий триплета при их ЛТР-образовании по мере перехода от центра к краю равномерно уменьшается, достигая для  $\mu=0.28$  значения примерно вдвое меньше, чем для  $\mu=1$  (рис. 5). При этом кривые  $W_\lambda(\mu)$  на рис. 5, в для разных моделей атмосферы идут параллельно друг другу. При образовании линий триплета с учетом эффектов отклонения от ЛТР семейство кривых  $W_\lambda(\mu)$  с увеличением  $\mu$  расходится. На краю диска ( $\mu=0.28$ ) величина  $W'_\lambda(\text{не-ЛТР})$  систематически выше  $W'_\lambda(\text{ЛТР})$  во всех линиях и во всех рассмотренных моделях.

Более подробные количественные оценки относительной разности  $\Delta W(\text{не-ЛТР})/W(\text{ЛТР})$  в различных моделях для всех линий триплета при пяти положениях на диске приведены в [5, табл. 1]. Здесь мы лишь отметим, что повышение чувствительности зависимости  $W_\lambda$  от  $\mu$  к выбору модели атмосферы в условиях отклонения от ЛТР и составляет вторую особенность образования линий триплета  $\lambda$  777.2 нм, которую, по-видимому, надо принимать во внимание при интерпретации зависимости «сила линий красных триплетов О I — светимости звезды», обсуждавшейся в работах [27, 33, 34]. Погрешности в распределении температуры в фотосфере звезды порядка несколь-

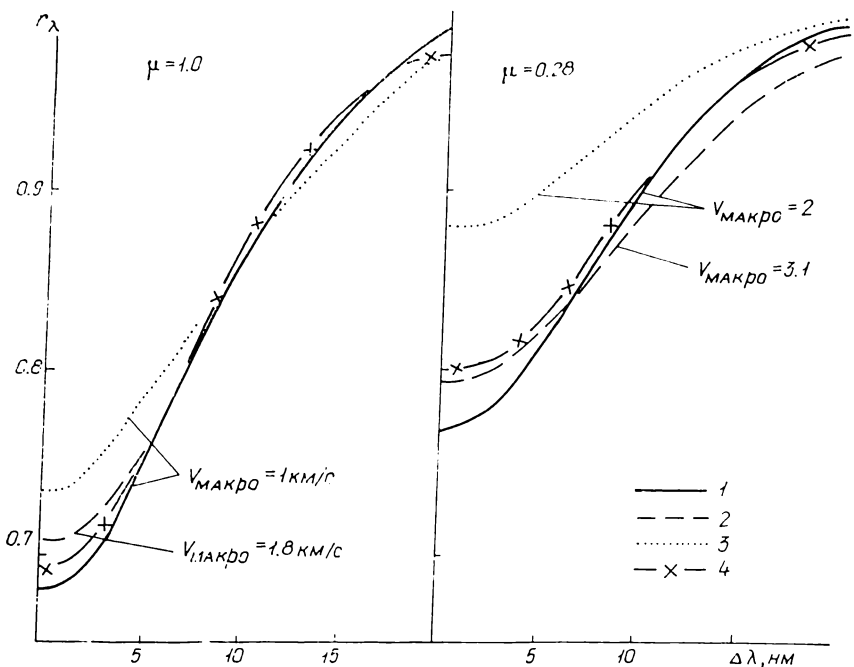


Рис. 4. Сравнение профилей линии O I  $\lambda$  777.4175 нм для двух положений на диске Солнца: 1, 2 — не-ЛТР; 3 — ЛТР ( $\lg A(O) = 8.84$ , модель атмосферы — VAL 80,C); 4 — наблюдения Р. И. Костыка и Т. В. Орловой

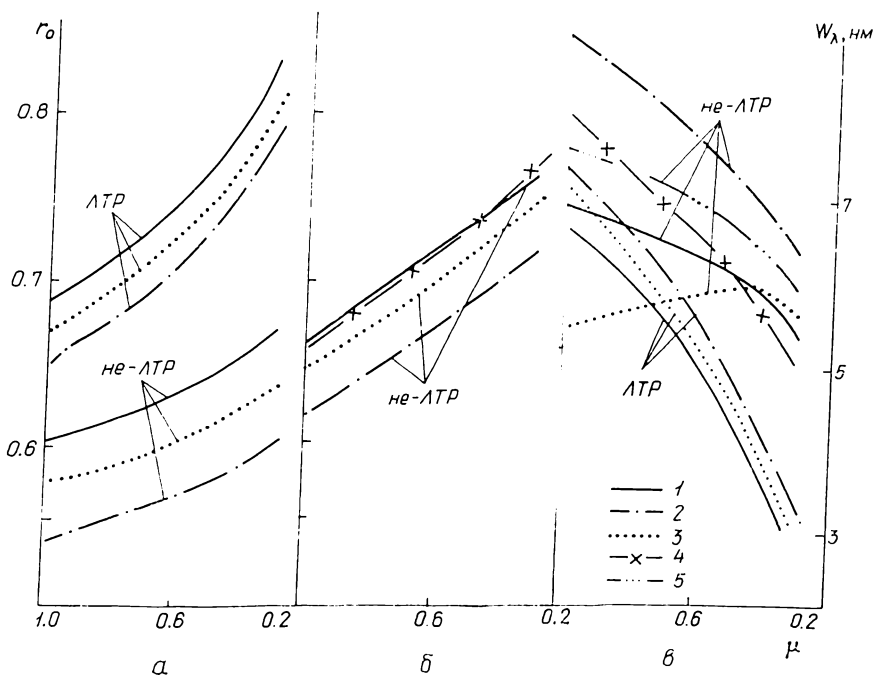


Рис. 5. Изменение центральной остаточной интенсивности  $r_0$  и эквивалентной ширины  $W_\lambda$  в линии O I  $\lambda$  777.1953 нм вдоль диска Солнца для разных моделей атмосферы ( $\lg A(O) = 8.84$ ): 1 — VAL 80, C; 2 — HOLMU; 3 — HSRA; 4 — наблюдения; а — расчеты  $r_0(\mu)$  выполнены с  $V_{\text{макро}} = 1$  км/с для  $\mu = 1.0 - 0.44$  и  $V_{\text{макро}} = 2$  км/с для  $\mu = 0.28$ ; б —  $r_0(\mu)$  с  $V_{\text{макро}} = 1.8$  ( $\mu = 1.0$ ), 2.2 ( $\mu = 0.8$ ), 2.5 ( $\mu = 0.6$ ), 2.8 ( $\mu = 0.44$ ), 3.1 ( $\mu = 0.28$ ) км/с; 5 (на рис. в) — не-ЛТР расчеты  $W_\lambda(\mu)$ ,  $\lg A(O) = 8.93$ , модель VAL 80, C

ких сотен градусов могут изменить эквивалентную ширину  $\lambda\lambda$  777.2—777.5 нм в несколько раз [6].

Теоретические профили линий триплета сравнивались с наблюдениями центр — край, выполненными в 1975 г. Р. И. Костыком и Т. В. Орловой на монохроматоре двойной дифракции ГАО АН УССР (рисунки 4, 5). В центре диска варьированием значений макроскоростей  $V_{\text{макро}}$ , содержания, атомных констант или модели атмосферы можно добиться согласия между наблюдаемыми и ЛТР-профилями. Гораздо труднее объяснить с помощью ЛТР-теории наблюдения центр — край. Расхождения между наблюдаемыми и ЛТР-профилями и кривыми  $r_0(\mu)$ ,  $W_\lambda(\mu)$  для всех линий увеличиваются систематически к краю диска. Для их устранения необходимо изменить наклон

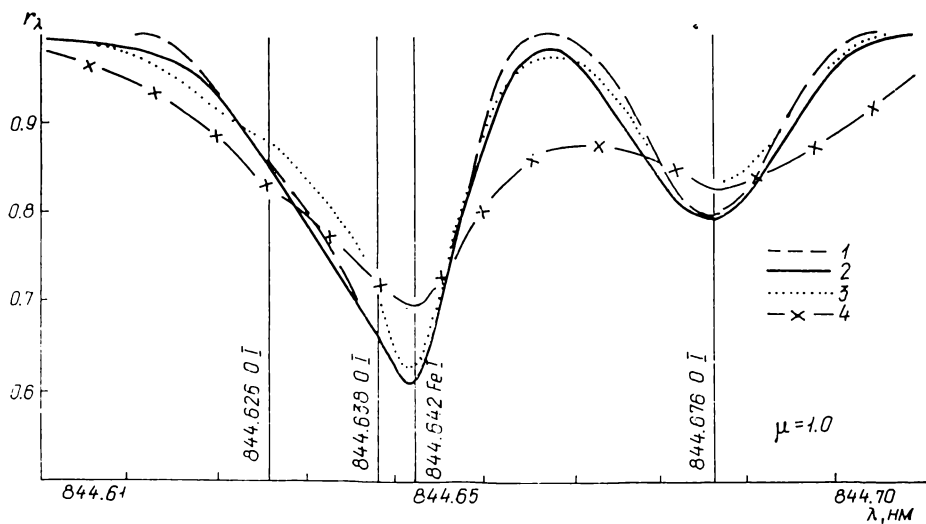


Рис. 6. Профиль компонентов линий триплета O I  $\lambda\lambda$  844.6 нм для центра диска с учетом блендирования линий Fe I  $\lambda$  844.642 нм ( $\lg A(\text{Fe}) = 6.76$ ,  $gf(\text{Fe}) = -0.27$ ,  $\lg A(\text{O}) = 8.84$ ,  $V_{\text{макро}} = 0$ , модель VAL 80, C): 1 — не-ЛТР,  $L_\beta \neq 0$ ; 2 — не-ЛТР,  $L_\beta = 0$ ; 3 — ЛТР; 4 — наблюдения [31]

последних относительно оси  $\mu$ . Наиболее эффективно можно этого добиться, как вытекает из изложенного выше, лишь при учете отклонения от ЛТР. При ЛТР изменение атомных параметров,  $\lg A(\text{O})$  или переход к другой модели атмосферы приводит к параллельному сдвигу  $W_\lambda(\mu)$  и  $r_0(\mu)$ . Наклон  $r_0(\mu)$  можно изменить варьированием  $V_{\text{макро}}$  (рис. 5). Но тогда изменяются сами значения  $r_0$ , и расхождение с наблюдениями может увеличиться.

Учет эффектов отклонения от ЛТР в линиях  $\lambda\lambda$  777.2—777.5 нм намного улучшает согласие с наблюдениями центр — край. Но полного согласия (рис. 5) достигнуть не удастся. Основной причиной этого могут быть температурные неопределенности в области формирования триплета ( $-0.14 \leq \lg m \leq 0.8$ ). К изменению другого параметра — содержания — следует относиться осторожно (рис. 5). Влияние  $L_\beta$ - и  $L_c$ -накачки на  $r_0$ ,  $r_\lambda$ ,  $W_\lambda$  линий  $\lambda\lambda$  777.2—777.5 нм незначительно (не более 1 %).

Нам не удалось добиться совпадения теоретического профиля компонентов триплета  $\lambda$  844.6 нм с наблюдаемым (рис. 6) в центре диска, полученным в работе [31]. Анализ триплета затруднен из-за слияния компонентов  $\lambda\lambda$  844.626 и 844.636 нм, блендирования с линией Fe I  $\lambda$  844.642 нм и, возможно, линией Fe I  $\lambda$  844.656 нм [30], плохо известных значений сил осцилляторов линий железа, а также вследствие неточностей модели атмосферы. Кроме того, не рассматривалось влияние макротурбулентности. Оценки  $\Delta r$  (не-ЛТР) в областях профиля, свободных от блендирования, дают диапазон изменения центр — край этой величины: 4—6 % в крыле  $\lambda$  844.630 нм и 4—7 % в области ядра  $\lambda$  844.676 нм.  $L_\beta$ -эффект на диске мал. В крыльях за счет него  $r_\lambda$  увеличивается примерно на 3 %. При наблюдениях линии O I  $\lambda$  844.6 нм за лимбом зависимость от поля излучения  $L_\beta$  должна быть высокой вследствие сильной чувствительности населенностей триплета в хромосфере к этому излучению (рис. 2).



**Выводы.** Анализ солнечных линий нейтрального кислорода, выполненный нами, показывает, что при наблюдениях на диске их интерпретация должна проводиться в рамках теории, в которой учитывается отклонение от ЛТР в атмосфере Солнца.

Автор выражает благодарность Р. Дж. Руттену (Астрономический институт, г. Утрехт, Нидерланды) за интерес к данной работе, ценные советы, высказанные в процессе ее выполнения, и обсуждение полученных результатов.

1. *Нагирнер Д. И., Шнейвайс А. Б.* Образование линий резонансного мультиплета O I в спектре Солнца // *Астрон. журн.*— 1977.— 54, вып. 2.— С. 367—371.
2. *Никольский Г. М.* Ультрафиолетовое излучение и возбуждение кислородных линий в хромосфере // *Докл. АН СССР.*— 1960.— 130, № 1.— С. 51—52.
3. *Никольский Г. М.* Наблюдения кислородных мультиплетов  $\lambda$  7774 и  $\lambda$  8446 в солнечной хромосфере // *Геомagnetизм и аэрономия.*— 1964.— 4, № 2.— С. 209—212.
4. *Сарычев А. П.* Сумма по состояниям и постоянная равновесия диссоциации для молекулы  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$  // *Астрон. журн.*— 1980.— 57, вып. 5.— С. 1020—1022.
5. *Щукина Н. Г.* Неравновесное образование линий нейтрального кислорода в солнечной атмосфере.— Киев, 1984.— 31 с.— (Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-84-75Р).
6. *Щукина Н. Г.* Температурные эффекты при интерпретации зависимости «сила линий красных триплетов O I — светимость звезды» // *Кинематика и физика небес.* тел.— 1985.— 1, № 4.— С. 26—28.
7. *Щукина Н. Г.* Влияние радиативных процессов на населенности уровней кислорода в атмосфере Солнца. I. Поле излучения Лайман-континуума и линий O I без учета радиативной взаимосвязи // *Там же.*— 1, № 5.— С. 29—33.
8. *Щукина Н. Г.* Влияние радиативных процессов на населенности уровней кислорода в атмосфере Солнца. II. Поле излучения линий O I с учетом радиативной взаимосвязи и субординатных фотопроцессов // *Там же.*— 1, № 6.— С. 56—61.
9. *Щукина Н. Г.* О роли рекомбинационно-каскадных процессов при образовании солнечного резонансного дублета 1355—8 Å O I // *Солнеч. данные.*— 1985.— № 7.— С. 78—82.
10. *Щукина Н. Г.* Влияние образования молекулы CO на солнечные линии кислорода // *Там же.*— № 8.— С. 50—52.
11. *Щукина Н. Г.* О роли ударных процессов при образовании солнечного резонансного дублета 1355—8 Å O I // *Там же.*— № 12.— С. 49—51.
12. *Щукина Н. Г.* Влияние радиативных процессов на населенности уровней кислорода в атмосфере Солнца. III. Поле излучения свободно-связанных континуумов O I // *Кинематика и физика небес.* тел.— 1986.— 2, № 1.— С. 14—19.
13. *Allrock R. C.* A new method for the analysis of equivalent width and its application to solar photospheric oxygen // *Solar Phys.*— 1968.— 5, N 2.— P. 260—280.
14. *Allrock R. C.* Source functions of infrared Fraunhofer lines from equivalent widths // *Ibid.*— 1969.— 7, N 1.— P. 3—10.
15. *Athay R. G., House L.* Departure from thermodynamical equilibrium in chromospheric Mg I, Ca I, O I // *Astrophys. J.*— 1962.— 135, N 2.— P. 500—514.
16. *Auer L. H.* Application of the complete linearization method to the problem of non-LTE line formation // *Ibid.*— 1973.— 180, N 2.— P. 469—472.
17. *Auer L. H., Mihalas D.* Non-LTE model atmospheres. III. A complete linearization method // *Ibid.*— 1969.— 158, N 2.— P. 641—655.
18. *Ayres T. R.* Center-to-limb behavior of first overtone vibration-rotation transitions of solar carbon monoxide // *Ibid.*— 1978.— 225, N 2.— P. 665—673.
19. *Bowen I. S.* Excitation by line coincidence // *Publs Astron. Soc. Pacif.*— 1947.— 59, N 1.— P. 196—201.
20. *Chipman E.* Analysis of solar ultraviolet lines // *Smithsonian Inst. Astrophys. Observ. Spec. Rep.*— 1971.— N 338.— 176 p.
21. *de Jager C., Neven L.* Source functions in the cores of infrared Fraunhofer lines // *Solar Phys.*— 1968.— 3, N 1.— P. 159—163.
22. *Feautrier M. P.* Sur la resolution numerique de l'equation de transfer // *C. r. Acad. sci. B.*— 1964.— 258, N 12.— P. 3189—3191.
23. *Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Cuny Y.* The Harvard-Smithsonian reference atmosphere // *Solar Phys.*— 1971.— 18, N 3.— P. 347—365.
24. *Haisch B. M., Linsky J. L., Weinstein A., Shine R. A.* Analysis of the chromospheric spectrum of O I in Arcturus // *Astrophys. J.*— 1977.— 214, N 3.— P. 785—797.
25. *Holweger H., Müller E. A.* The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen // *Solar Phys.*— 1974.— 39, N 1.— P. 19—30.
26. *Johnson H. R., Milkey R. W., Ramsey L. W.* Formation of the luminosity-sensitive multiplet at 7774 Å // *Astrophys. J.*— 1974.— 187, N 1.— P. 147—150.
27. *Keenan P. C., Hynek J. A.* Neutral oxygen in stellar atmospheres // *Ibid.*— 1950.— 111, N 1.— P. 1—10.
28. *Kodaira K., Tanaka K.* Oxygen abundances of three populations. II. Horizontal branch stars // *Publs Astron. Soc. Jap.*— 1972.— 24, N 3.— P. 355—364.

29. *Lambert D. L.* The abundances of the elements in the solar photosphere. I // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*— 1968.— 138, N 1.— P. 143—179.
30. *Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å.— Washington: Nat. Bur. Stand., 1966.— 349 p.
31. *Müller E. A., Baschek B., Holweger B.* Center-to-limb analysis of the solar oxygen lines // *Solar Phys.*— 1968.— 3, N 1.— P. 125—145.
32. *Namba O.* On the excitation of neutral oxygen in the solar chromosphere // *Publs Astron. Soc. Jap.*— 1954.— 6, N 2.— P. 87—102.
33. *Osmer P. S.* The atmospheres of the F-type supergiants. I. Calibration of the luminosity sensitive O I 7774 line // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*— 1972.— 24, N 206.— P. 247—253.
34. *Parsons S. B.* Near-infrared classification of A and F stars // *Ibid.*— 1964.— 140, N 3.— P. 853—857.
35. *Roussel-Dupre D.* SKYLAB observations of the solar O I resonance triplet // *Astron. and Astrophys.*— 1985.— 153, N 1.— P. 116—124.
36. *Sedlmayr E.* Non-LTE analysis of the infrared O I triplets in the solar spectrum // *Ibid.*— 1974.— 31, N 1.— P. 23—35.
37. *Skelton D. L., Shine R. A.* Formation of the O I resonance triplet and intercombination doublet in the solar chromosphere // *Astrophys. J.*— 1982.— 259, N 3.— P. 869—879.
38. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet Sun.— Cambridge, 1980.— 105 p.— (Prepr. ser. / Harvard-Smithsonian center astrophys.; N 1308).

Глав. астроном. обсерватория АН УССР,  
Киев

Поступила в редакцию 15.10.86,  
после доработки 18.11.86