

УДК 523.94—645

## Влияние радиативных процессов на населенности уровней кислорода в атмосфере Солнца

### I. Поле излучения Лайман-континуума и линий O I без учета радиативной взаимосвязи

Н. Г. Щукина

Анализируется влияние радиативных процессов в линиях нейтрального кислорода, его основных и синглетных континуумах на населенности уровней синглетной, триплетной, квинтетной систем O I и число ионов O II для случая солнечной атмосферы. Показано, что при отсутствии эффектов радиативной взаимосвязи поле излучения в Лайман-континууме практически не оказывает влияния на отклонение от ЛТР населенностей высоковозбужденных уровней O I. Определяющим является поле излучений линий O I. Главная причина отклонения от ЛТР числа ионов O II в хромосфере — фотоионизационные процессы, в фотосфере — радиативные процессы в линиях.

*THE INFLUENCE OF RADIATIVE PROCESSES ON POPULATION OF ATOMIC OXYGEN LEVELS IN THE SOLAR ATMOSPHERE. I. THE RADIATION FIELD OF THE LYMAN CONTINUUM AND O I LINES WITHOUT INTERLOCKING, by Shchukina N. G.*— Radiative transfer in lines of neutral oxygen, its bound-free ground and singlet continua are analyzed for their effect on population O I singlet, triplet, quintet states and the first states of O II. The Lyman continuum radiation field does not affect the LTE departure coefficients of high-excited O I levels, if interlocking effects are neglected. The departure coefficients of these levels are controlled by radiation field of neutral oxygen lines. The departure from LTE for O II is due mainly to photoionization processes (for the chromosphere) and radiative processes in O I lines (for the photosphere).

Спектр нейтрального кислорода может стать ценным источником информации о физических условиях в атмосфере Солнца при условии, что будет решен ряд вопросов его образования, в частности — о роли радиативных процессов в линиях и свободно-связанных континуумах нейтрального кислорода в заселении его уровней.

Под радиативными процессами автор подразумевает: а) эмиссионные переходы вниз — спонтанные и вынужденные (под действием излучения); б) переходы вверх под действием излучения (ведущие к исчезновению фотонов в линии).

Цель статьи — рассмотреть влияние радиативных процессов в отдельных линиях, основном и синглетных континуумах на населенности уровней синглетной, триплетной  $^3S^0$ ,  $^3P$ ,  $^3D^0$ , квинтетной  $^5S^0$ ,  $^5P$ ,  $^5D^0$  систем нейтрального кислорода, а также на населенности основного  $2p^3$   $^4S_{3/2}$  и первых двух возбужденных  $^2D^0$ ,  $^2P^0$  уровней ионизованного кислорода.

В этой статье не будем учитывать эффекты радиативной взаимосвязи линий, при которых поле излучения любой конкретной линии становится зависимым от поля излучения всех других линий атома. Однако эффекты взаимосвязи линий во многих случаях имеют определяющее значение и могут сказываться весьма тонким образом. Их исследованию посвятим следующую статью, сравнив результаты расчета для случаев радиативной взаимосвязи линий и ее отсутствия.

Для определения роли радиативных процессов без учета указанных эффектов достаточно решить систему уравнений стационарности и сохранения частиц. Поле излучения в каком-либо радиативном переходе, учитываемом в уравнении стационарности посредством радиативных скоростей, определяется из уравнения переноса независимо от поля излучения в других переходах. Подобный метод решения, известный под названием эквивалентного двухуровневого атома [1, 2], и применен для реализации поставленных целей. Результатом решения

вышеописанной системы уравнений является распределение по высоте в атмосфере Солнца населенностей уровней  $n_l$  ( $l$  — номер уровня) и средней интенсивности излучения в рассматриваемых радиативных переходах заданной модели атома кислорода. Сравнение полученных значений населенностей уровней с ЛТР-значениями позволяет определить коэффициенты отклонения от ЛТР:

$$b_l = n_l (\text{не-ЛТР}) / n_l (\text{ЛТР}). \quad (1)$$

В данной работе модель атома кислорода включала 13 уровней (рис. 1). Подуровни тонкой структуры заменялись общим уровнем, статистический вес которого равен сумме весов подуровней. Поэтому в дальнейшем под населенностью уровня мы будем иметь ввиду суммарную населенность всех подуровней мультиплетного уровня, а под радиативными переходами — переходы между мультиплетными уровнями. Список исследуемых радиативных переходов приведен в таблице. Переходы в основном и синглетных континуумах O I происходят под действием поля излучения в Лайман-континууме  $L_c$ , так как

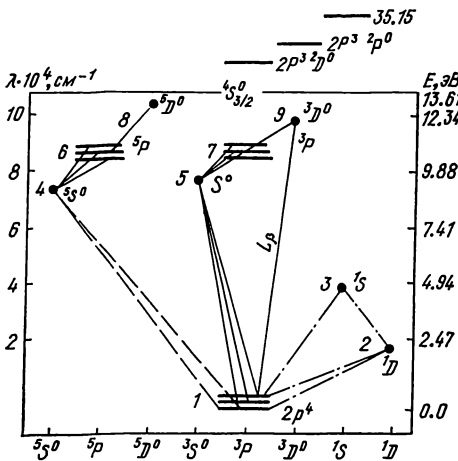


Рис. 1. Диаграмма термов атома кислорода

граница ионизации нейтрального кислорода  $2p^4 \ 3P - 4S^0_{3/2}$  всего лишь на 0.13 нм отстоит от лаймановской границы ионизации водорода. Следовательно, анализируя роль радиативных процессов в основном и синглетных континуумах O I, мы тем самым выясняем роль Лайман-континуума в заселении его уровней.

Исследование роли радиативных процессов проводилось на примере следующих модельных задач: 1. Влияние мультиплетной линии

**Радиативные переходы для тринадцатилуровневой модели атома кислорода**

Линии			
Номер перехода	$l \rightarrow u$	Переход	Длина волны мультиплетной линии, нм
1	1—4	$2p^4 \ 3P - 5S^0$	135.5—8
2	1—5	$2p^4 \ 3P - 3S^0$	130.2—6
3	4—6	$5S^0 - 5P$	777.2—5
4	5—7	$3S^0 - 3P$	844.6
5	6—8	$5P - 5D^0$	926.6
6	7—9	$3P - 3D^0$	1128.9
7	1—2	$2p^4 \ 3P - 1D$	630.0, 636.3
8	1—3	$2p^4 \ 3P - 1S$	297.2
9	2—3	$1D - 1S$	557.7
Свободно-связанные переходы			
Номер перехода	$l \rightarrow u$	Переход	Длина волны на пороге ионизации, нм
10	1—10	$2p^4 \ 3P - 4S^0_{3/2}$	91.0
11	1—11	$2p^4 \ 3P - 2D^0$	69.4
12	1—12	$2p^4 \ 3P - 2P^0$	63.1
13	2—11	$1D - 2D^0$	78.5
14	2—12	$1D - 2P^0$	70.6
15	3—12	$1S - 2P^0$	81.3

135.5—8 нм. Уровни синглетной, триплетной, квинтетной систем  $O I$  заселяются и опустошаются электронным ударом. В квинтетной системе уровней учитываются радиативные процессы в мультиплетной линии 135.5—8 нм. 2. Влияние мультиплетной линии 777.2—5 нм. В квинтетной системе уровней вместо радиативных процессов с  $\lambda$  135.5—8 рассматриваются процессы в мультиплетной линии  $\lambda$  777.2—5.

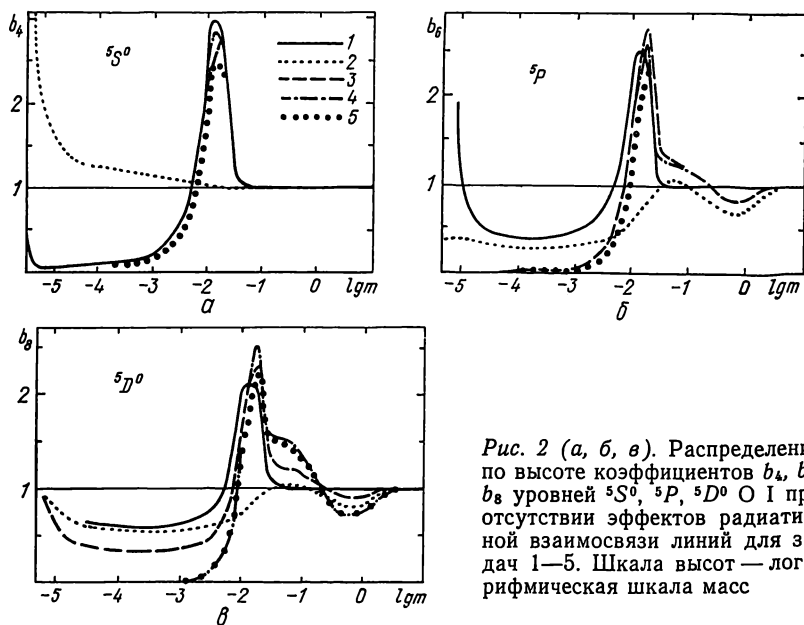


Рис. 2 (а, б, в). Распределение по высоте коэффициентов  $b_k$ ,  $b_p$ ,  $b_D^0$  уровней  $5S^0$ ,  $5P$ ,  $5D^0$   $O I$  при отсутствии эффектов радиативной взаимосвязи линий для задач 1—5. Шкала высот — логарифмическая шкала масс

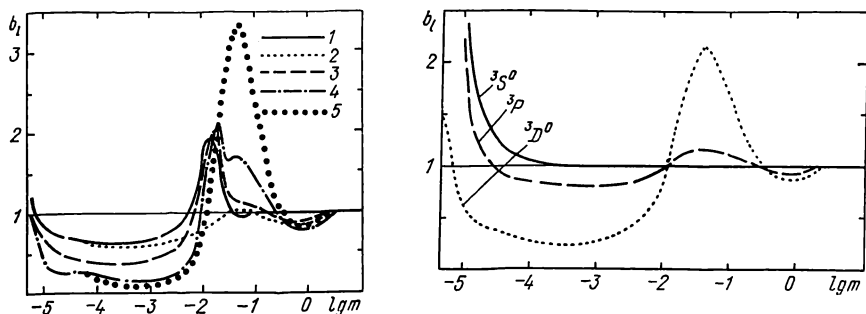


Рис. 3. Распределение по высоте коэффициентов  $b_{10}$ ,  $b_{11}$ ,  $b_{12}$  основного  $2P^3$   $4S^0_{3/2}$  и первых двух возбужденных  $2D^0$ ,  $2P^0$  уровней  $O II$  при отсутствии эффектов взаимосвязи линии для задач 1—5.

Рис. 4. Распределение по высоте коэффициентов  $b_5$ ,  $b_7$ ,  $b_9$  уровней  $3S^0$ ,  $3P$ ,  $3D^0$   $O I$  триплетной системы при отсутствии эффектов взаимосвязи линий и радиативных процессов в данной системе (задача 5)

3. Влияние мультиплетных линий 135.5—8 и 777.2—5 нм. Механизмы возбуждения и опустошения уровней: электронные удары и радиативные процессы в линиях 135.5—8, 777.2—5. 4. Влияние мультиплетных линий квинтетной системы 135.5—8, 777.2—5, 926.6 нм. Механизмы те же, что и в задаче 3, плюс радиативные процессы в переходе 926.6. 5. Влияние линий квинтетной системы 135.5—8, 777.2—5, 926.6, синглетной системы и поля излучения в Лайман-континууме. Наряду с механизмами задачи 4 вводятся фотопроцессы в свободно-связанных переходах с основного и синглетных уровней, а также радиативные процессы в линиях синглетной системы 636.3, 557.7, 297.2 нм.

В перечисленных модельных задачах радиативные процессы в триплетной системе уровней не рассматривались. Для анализа влияния

радиативных процессов в линиях 130.2—6, 844.6, 1128.9 нм триплетной системы решались задачи, аналогичные вышеописанным, с заменой квинтетных линий на соответствующие триплетные и с пренебрежением поля излучения квинтетных линий.

Ударной взаимосвязью синглетной, триплетной и квинтетной систем мы пренебрегали. Сведения об атомных параметрах, коэффициентах непрерывного поглощения и т. п., необходимые для решения данных модельных задач, приведены подробно в [3]. В качестве модели атмосферы использована VAL 80 [4]. Результаты решения модельных задач 1—5 в виде коэффициентов отклонения от ЛТР  $b_l$  представлены на рис. 2—4. Из рис. 2, а следует, что при отсутствии эффектов взаимосвязи линий основной причиной недонаселенности (по сравнению с ЛТР) уровня  $^5S^0$  в хромосферном слое  $\lg m = -5 \div -3$  и перенаселенности в слое  $\lg m = -2.4 \div 1.6$  являются радиативные процессы в мультиплетной линии 135.5—8. Радиативные процессы в переходах 777.2—5, 926.6, в основном свободно-связанном континууме кислорода слабо влияют на населенность данного уровня.

Заселение уровня  $^5P$  (рис. 2, б) в атмосфере Солнца контролируется радиативными процессами в переходах 135.5—8 и 777.2—5 нм. В фотосфере определяющим является излучение в мультиплетной линии 777.2—5 нм. Оно ведет к уменьшению населенности уровня  $^5P$  по сравнению с его ЛТР значением. В результате вблизи области  $\lg m = -0.17$  уровень оказывается сильно недонаселенным. Радиативные переходы в  $\lambda$  135.5—8 стремятся увеличить населенность  $^5P$  уровня в фотосфере и нижней хромосфере ( $\lg m > -2.4$ ) и уменьшить ее в более высоких хромосферных слоях.

Наиболее важную роль в заселении уровня  $^5D^0$  играет излучение в линии 926.6 нм (рис. 2, в). При отсутствии эффектов радиативной взаимосвязи фотопроцессы в основном континууме O I слабо влияют на населенность  $^5D^0$ .

В случае пренебрежения фотопроцессами с основного и синглетных уровней O I и радиативными процессами в линиях триплетной системы основная причина уменьшения числа ионов O II по сравнению с ЛТР значением — радиативные процессы в линиях квинтетной системы (рис. 3). Распределение коэффициентов отклонения от ЛТР для уровней ионизованного кислорода  $^4S^{0}_{3/2}$ ,  $^2P^0$ ,  $^2D^0$  подобно распределению коэффициентов близлежащего к континууму уровня  $^5D^0$  из-за преимущественных (по сравнению с другими нижележащими уровнями) ударных ионизаций и тройных рекомбинаций на этот уровень. Учет фотоионизации с основного уровня и синглетных уровней существенно уменьшает роль квинтетных линий при заселении уровней O II в хромосфере и области температурного минимума. Отклонение от ЛТР населенностей основного  $^4S^{0}_{3/2}$  и возбужденных уровней O II зависит уже не от поля излучения квинтетных линий, а от поля излучения в Лайман-континууме. В фотосфере влияние радиативных процессов в линиях на число ионов кислорода остается определяющим.

Результаты наших расчетов показывают, что в хромосфере вплоть до  $\lg m \approx -3$  отклонения от ЛТР населенностей основного и синглетных уровней контролируются радиативными процессами в основном и синглетных континуумах ( $b_l > 1$ ). Глубже роль радиативных процессов становится пренебрежимо малой:  $b_l \rightarrow 1$ .

Как следует из рис. 4, заселение уровней триплетной системы  $^3S^0$ ,  $^3P$ ,  $^3D^0$  O I при отсутствии поля излучения в ее линиях определяется в фотосфере радиативными процессами в квинтетных линиях и в хромосфере — фотопроцессами в континууме O I. Электронный удар не в состоянии довести населенности уровней данной системы до равновесных значений. Причина — ударная связь возбужденных уровней  $^3S^0$ ,  $^3P$ ,  $^3D^0$  с основным уровнем O I и континуумом O II, испытывающими отклонение от ЛТР. В результате распределение коэффициентов

отклонения от ЛТР первого возбужденного уровня  $O I \ ^3S^0$  ( $b_5$ ) подобно распределению коэффициента основного уровня  $2p^4 \ ^3P$ , а близлежащего к континууму уровня  $\ ^3D^0$  ( $b_9$ ) подобно распределению коэффициентов первых уровней ионизованного кислорода. Значения  $b_7$  уровня  $\ ^3P$  являются промежуточными между  $b_5$  и  $b_9$ , что вызвано, по-видимому, совместным действием ударной связи с  $\ ^3S^0$  и  $\ ^3D^0$ .

Влияние радиативных процессов в линиях триплетной системы  $O I$  на населенности ее уровней, когда механизмом заселения уровней квинтетной системы является только электронный удар, сходно с влиянием радиативных процессов в линиях квинтетной системы, описанным выше.

Подводя итоги анализа роли радиативных процессов при заселении уровней атома кислорода в атмосфере Солнца, можно сформулировать тенденции действия поля излучения для случая отсутствия эффектов взаимосвязи линий и фотопроцессов в субординатных континуумах  $O I$ : 1. Основной причиной отклонения населенности какого-либо возбужденного уровня  $O I$  от равновесного значения являются радиативные процессы в переходах, для которых данный уровень является верхним. 2. Поле излучения в Лайман-континууме слабо влияет на населенности высоковозбужденных уровней  $O I$ . 3. Отклонение от ЛТР основного и синглетных уровней  $O I$  вызвано фотопроцессами в свободно-связанных континуумах. 4. Главная причина отклонения от ЛТР числа ионов кислорода  $O II$  в хромосфере и области температурного минимума ( $\lg m = -5 \div -1$ ) — фотоионизационные процессы. В фотосфере ( $\lg m > -1$ ) — радиативные процессы в линиях, образующихся при переходах между высоковозбужденными уровнями  $O I$ . 5. Электронный удар не нарушает установившегося в результате радиативных процессов отклонения от ЛТР населенностей уровней кислорода, а стремится установить для них подобие в распределении коэффициентов. 6. При отсутствии радиативной взаимосвязи квинтетных линий и в случае пренебрежения фотопроцессами в субординатных континуумах  $O I$  радиативные процессы в линиях 926.6, 777.2—5 нм практически не сказываются на населенности уровня  $\ ^5S^0$ .

1. Михалас Д. Звездные атмосферы. В 2-х т.— М.: Мир, 1982.— Т. 1—2.
2. Щукина Н. Г. Анализ солнечного спектра нейтрального калия с учетом отклонения от ЛТР. I. Начальные оценки населенностей энергетических уровней.— Астрометрия и астрофизика, 1981, вып. 45, с. 13—20.
3. 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).
4. 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 astrophysics, N 1308).

Глав. астрон. обсерватория АН УССР,  
Киев

Поступила в редакцию 11.12.84