

УДК 523.94—645

Влияние радиативных процессов на населенности уровней кислорода в атмосфере Солнца.

II. Поле излучения линий O I с учетом радиативной взаимосвязи и субординатных фотопроцессов

Н. Г. Щукина

Радиативная взаимосвязь линий O I усиливает не-ЛТР эффекты для уровней в тех областях атмосферы, где данные уровни недонаселены. Число возбужденных ${}^5S^0$ -атомов O I при учете субординатных фотопроцессов сильно зависит от радиативных процессов в квинтетных линиях 926.6, 777.2—5 нм в хромосфере и области температурного минимума. Отмечается чувствительность коэффициентов отклонения от ЛТР уровней к инверсии температуры в хромосфере. Рассмотрено действие поля излучения линии L_{β} водорода на населенности уровней кислорода для случая солнечной атмосферы. При L_{β} -накачке уровня ${}^3D^0$ O I отклонение от ЛТР его населенности будет полностью контролироваться полем излучения водородной линии L_{β} . Отклонение от ЛТР нижележащих уровней 3P , ${}^3S^0$ вызвано совместным действием излучения L_{β} и триплетных линий O I.

THE INFLUENCE OF RADIATION ON POPULATION OF OXYGEN LEVELS IN THE SOLAR ATMOSPHERE. II. THE RADIATION FIELD OF O I LINES WITH ACCOUNT OF INTERLOCKING AND SUBORDINATE PHOTOIONIZATION PROCESSES, by Shchukina N. G.—Radiative interlocking of neutral oxygen's lines is shown to increase the non-LTE effects in those solar atmosphere layers where O I levels are underpopulated. The occupation numbers of ${}^5S^0$ atoms of O I are found to be depended considerably on radiation field of quintet lines 926.6, 777 nm in the chromosphere and the temperature minimum region. The departure coefficients of neutral oxygen levels are sensitive to chromospheric temperature inversion. The effects of radiative field of the solar hydrogen L_{β} line is considered for its effect on occupation number of neutral oxygen. Departure from LTE of the ${}^3D^0$ level population is controlled on the whole by L_{β} -radiation. Departure from LTE for lower levels 3P , ${}^3S^0$ is caused by L_{β} and triplet O I lines radiation.

В предыдущей статье автора [1] рассмотрена роль радиативных процессов в заселении уровней кислорода без учета радиативной взаимосвязи. Цель данной работы — выяснить: 1) повлияет ли радиативная взаимосвязь линий на величину отклонения от ЛТР населенностей уровней O I и O II; 2) как изменятся эффекты от радиативных процессов в линиях 135.5—8, 777.2—5, 926.6 нм квинтетной системы и линиях 130.2—6, 844.6, 1128.9 нм триплетной системы (при учете радиативной взаимосвязи) на населенности уровней кислорода, когда во внимание принимаются субординатные фотопроцессы; 3) насколько чувствительны к модели атмосферы коэффициенты отклонения от ЛТР уровней O I; 4) к каким последствиям для населенностей триплетных уровней ${}^3S^0$, 3P , ${}^3D^0$ ведет накачка полем излучения водородной линии L_{β} уровня ${}^3D^0$ O I.

Необходимость рассмотрения последнего вопроса связана с тем, что длина волны перехода ${}^23P — {}^33D^0$ O I (102.577 нм) совпадает с длиной волны водорода L_{β} . Возбуждение полем излучения L_{β} должно приводить к дополнительной заселению уровня ${}^3D^0$, а последующие каскадные переходы ${}^3D^0 \rightarrow {}^3P \rightarrow {}^3S^0 \rightarrow 2p^4 {}^3P$ — к увеличению силы линий, возникающих при этих переходах.

Для ответа на поставленные вопросы мы снова обратились к тринадцатилуровневой модели атома кислорода [1]. Эффекты радиативной взаимосвязи линии учитывались с помощью линеаризации уравнений стационарности, сохранения частиц и переноса излучения в заданных радиативных переходах по методу Ауэра — Михаласа [2, 3]. Список

радиативных переходов в линиях, основном и синглетных континуумах приведен в [1]. Радиативные переходы в субординатных континуумах $O\ I$ включали переходы с высоковозбужденных уровней ${}^5S^0$, 5P , ${}^5D^0$ квинтетной и ${}^3S^0$, 3P , ${}^3D^0$ триплетной систем $O\ I$ на основной уровень ${}^4S_{3/2}\ O\ II$. Из-за ограниченных возможностей ЭВМ ЕС-1022 процедура линеаризации проводилась только для переходов в линиях 135.5—8, 777.2—5, 926.6 квинтетной и 130.2—6, 844.6, 1128.9 триплетной систем (так называемые «основные» переходы). Средние интенсивности

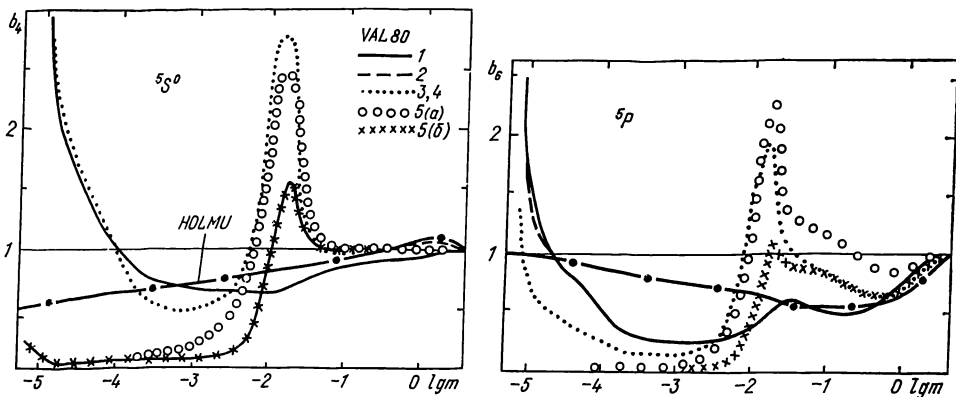


Рис. 1. Распределение по высоте в атмосфере Солнца коэффициента отклонения от ЛТР b_4 уровня ${}^5S^0$ квинтетной системы $O\ I$ при учете радиативной взаимосвязи. Цифрами 1, 2, 3, 4, 5 обозначены результаты решения задач 1—5 для модели атмосферы VAL 80. Задача 5 представлена для случаев пренебрежения радиативной связью (кривая 5 а) и учета ее (5 б). Здесь же приведены результаты решения задачи 4 для модели

Рис. 2. Распределение по высоте коэффициента отклонения от ЛТР b_6 уровня 5P квинтетной системы $O\ I$ при учете радиативной взаимосвязи. Обозначения те же, что и на рис. 1

излучения синглетных линий, основного, синглетных и субординатных континуумов, знание которых необходимо при расчете радиативных скоростей уравнений стационарности, находили из решения уравнений переноса в двухуровневом приближении (схема Фотрье [4]). В дальнейшем эти переходы будем называть «вспомогательными».

Автором рассмотрены следующие модельные задачи:

1. Электронный удар, радиативные процессы в «основных» триплетных линиях 130.2—6, 844.6, 1128.9 нм, во «вспомогательных» синглетных линиях 297.2, 557.7, 636.3 нм, в основном и субординатных континуумах синглетной, триплетной и квинтетной систем (ударная связь между перечисленными системами отсутствует).

2. К механизмам задачи 1 добавляются радиативные процессы в «основной» квинтетной линии 135.5—8 нм.

3. Механизмы те же, что и в задаче 2, плюс радиативные процессы в «основных» квинтетных линиях 777.2—5, 926.6 нм.

4. Используются механизмы задачи 1, но вместо набора триплетных линий привлекается набор «основных» квинтетных линий 135.5—8, 777.2—5, 926.6 нм.

5. Механизмы опустошения и заселения уровней те же, что и в задаче 3. Поле излучения субординатных континуумов отсутствует.

Перечисленные задачи решались для случая L_β -накачки уровня ${}^3D^0$ и ее отсутствия.

Эффекты радиативной взаимосвязи. Оценка эффектов взаимосвязи линий выполнена нами на примере модельной задачи 5, рассчитанной без учета радиативного взаимодействия квинтетных линий и с учетом его. Результаты представлены на рис. 1, 2 соответственно кривыми 5 (а)

и 5(б). Модель атмосферы — VAL 80 [8]. Хорошо видно, что радиативная взаимосвязь линий уменьшает коэффициенты отклонения от ЛТР b_1 квинтетных уровней, не внося качественных изменений в их распределение. В итоге, в областях, где $b_1 < 1$, не-ЛТР эффекты усиливаются. Радиативная взаимосвязь не изменяет значения коэффициентов b_1 первых уровней ионизированного кислорода. По-прежнему, отклонение от

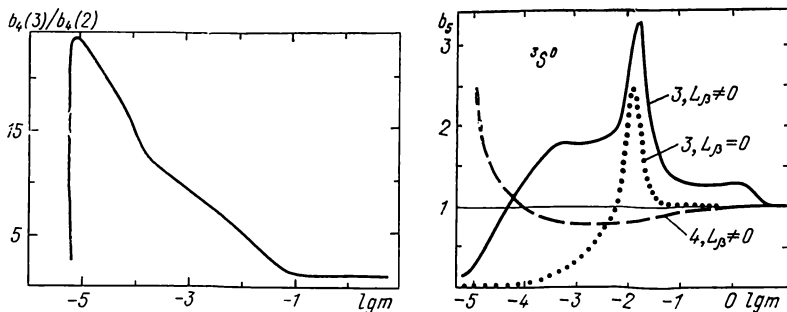


Рис. 3. Отношение коэффициента отклонения от ЛТР b_4 уровня $^5S^0$ при учете радиативных процессов в линиях 926.6, 777.25 нм O I (задача 3) к b_4 , когда этими процессами пренебрегают (задача 2). Учтены радиативная взаимосвязь линий и субординатные фотопроцессы. Модель атмосферы — VAL 80

Рис. 4. Распределение по высоте коэффициента отклонения от ЛТР b_5 уровня $^3S^0$ триплетной системы O I при учете радиативной взаимосвязи. Цифрами 3, 4 обозначены результаты решения модельных задач 3 и 4 [1] для случаев L_β -накачки уровня $^3D^0$ и ее отсутствия. Модель атмосферы — VAL 80

ЛТР ионов O II в хромосфере не зависит от поля излучения квинтетных линий. В фотосфере — влияние поля излучения линий O I является определяющим. Кроме того, поле излучения в линиях триплетной системы не изменяет населенностей уровней квинтетной системы, когда электронная ударная связь между системами отсутствует.

Влияние субординатных фотопроцессов. Уровень $^5S^0$. Из анализа кривых 5(a) и 5(б) на рис. 1, 2 вытекает, что влияние радиативной взаимосвязи линий на населенности уровней O I меньше, чем влияние самих радиативных процессов в линиях. В частности, наши расчеты показывают, что при отсутствии субординатных фотопроцессов, учет радиативной взаимосвязи не изменяет слабой зависимости населенности $^5S^0$ -уровня O I от радиативных процессов в линиях 926.6, 777.2 — .5 нм. Выясним, изменяется ли этот вывод, если учтем субординатные фотопроцессы.

Обратимся с этой целью к результатам расчета коэффициента отклонения от ЛТР b_4 уровня $^5S^0$ для модельных задач 2 и 3 (рис. 1). Несовпадение кривых 2 и 3 указывает, что при учете субординатных фотопроцессов радиативные переходы в линиях 926.6, 777.2 — .5 нм начинают оказывать существенное влияние на распределение по высоте коэффициента b_4 .

Рассмотрим данный вопрос подробнее. Из анализа кривой 1 на рис. 1 ясно, что радиативные процессы в субординатных континуумах O I сами по себе оказывают охлаждающее действие на $^5S^0$ -уровень. Радиативные процессы в мультиплетной линии 135.5 — .8 нм это охлаждающее действие, начиная со слоя $\lg m = -2$ и выше, усиливают (кривая 2), уменьшая еще более населенность уровня $^5S^0$. Радиативные процессы в линиях 926.6 и 777.2 — .5 нм действуют в противоположном направлении (кривая 3). Из рис. 3 следует, что при учете субординатных фотопроцессов радиативные переходы $^5D^0 \leftrightarrow ^5P \leftrightarrow ^5S^0$ увеличивают населенность уровня $^5S^0$ в обширной области атмосферы Солнца ($\lg m = -5 \div -1$). Эффект достигает максимума в верхней хромосфере: $b_4(\text{задача 3})/b_4(\text{задача 2}) \approx 20$ при $\lg m = -5$. Причиной

возникшей зависимости, как показывает совпадение кривых b_4 для задач 2 и 5, является рекомбинационно-каскадный механизм заселения уровня ${}^5S^0$. Основным источником ${}^5S^0$ -атомов служат ионы O II, которые после фоторекомбинаций на вышележащие уровни ${}^5D^0$, 5P и последующих спонтанных переходов ${}^5D^0 \rightarrow {}^5P \rightarrow {}^5S^0$, ${}^5P \rightarrow {}^5S^0$ переходят в состояние ${}^5S^0$ нейтрального атома. Увеличить число ${}^5S^0$ атомов за счет субординатных фотопроцессов и электронного удара не удается

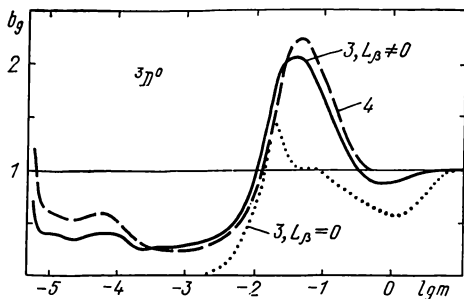


Рис. 5. Распределение по высоте коэффициента отклонения от ЛТР b_g уровня ${}^3D^0$ триплетной системы O I при учете радиативной взаимосвязи. Обозначения те же, что и на рис. 4

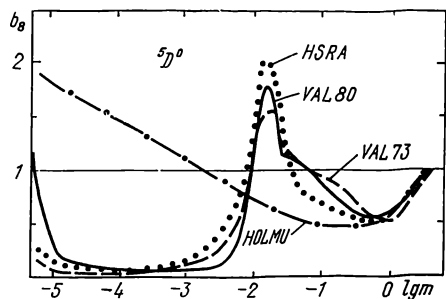


Рис. 6. Распределение по высоте коэффициента отклонения от ЛТР b_g уровня ${}^5D^0$ для четырех моделей атмосферы Солнца. Механизмы возбуждения уровней из задачи 4

(кривая 2). Не удастся увеличить существенно это число и за счет только спонтанных переходов ${}^5D^0$ - и 5P -атомов, поскольку их число мало (кривая 5).

Эффект увеличения населенности уровня ${}^5S^0$ O I путем рекомбинационно-каскадного механизма достигает максимума в верхней хромосфере. Однако именно здесь, как вытекает из совпадения кривых 1 и 3, данный эффект практически компенсируется охлаждающим действием излучения λ 135.5 — .8 нм. В результате в хромосфере, вплоть до $\lg m < -4$, определяющую роль в отклонении от ЛТР населенности ${}^5S^0$ -уровня будет играть его связь с континуумом через фоторекомбинации и фотоионизации непосредственно на него и ударные процессы. Глубже, благодаря преобладающей роли рекомбинационно-каскадного процесса над процессами в λ 135.5 — .8 нм, число ${}^5S^0$ -атомов будет расти. По мере перехода в более глубокие слои атмосферы Солнца роль рекомбинационно-каскадного механизма ослабевает (рис. 3), а радиативного перехода 135.5 — .8 нм усиливается (кривая 2 рис. 1). Начиная со слоя $\lg m > -2$ радиативные переходы в λ 135.5 — .8 нм ведут к дополнительной накачке данного уровня. В итоге, в области $\lg m = -2 \div -1.5$ наблюдается пик перенаселенности: $b_4 \approx 1.5$. В фотосфере b_4 близко к 1.

Уровни 5P , ${}^5D^0$. Радиативные процессы в линиях квинтетной системы 926.6, 777.2 — .5 нм при учете субординатных фотопроцессов вносят существенную коррекцию в отклонение от ЛТР населенностей уровней 5P (рис. 2) и ${}^5D^0$. Характер их влияния аналогичен влиянию радиативных процессов 135.5 — .8 нм на ${}^5S^0$. Однако имеются и отличия. Поле излучения данных переходов создает охлаждающий эффект как в хромосфере ($\lg m < -2.5$), так и в фотосфере ($\lg m > -1$). Именно за счет этого коэффициент отклонения от ЛТР b_6 уровня 5P на глубине $\lg m \approx -0.17$ достигает минимума: $b_6 \sim 0.65$ (модель атмосферы VAL 80).

Действие радиативных процессов в линиях триплетной системы на населенности ее уровней при отсутствии L_β -накачки, как видно из рис. 4, 5, подобно действию радиативных процессов в квинтетной системе на уровни данной системы [1].

Влияние поля излучения линии L_{β} . При L_{β} -накачке триплетная система поля излучения фактически не влияет на отклонение от ЛТР населенности ${}^3D^0$ -уровня (рис. 5). Распределение b_9 будет контролироваться полем излучения водородной линии L_{β} . Близость кривых 3 и 4 ($L_{\beta} \neq 0$) на рис. 5 подтверждает сказанное.

Основной причиной отклонения от ЛТР уровней, лежащих ниже ${}^3D^0 - {}^3P$ и ${}^3S^0$, является совместное действие водородного поля L_{β} и поля триплетных линий 1128.9, 844.6, 130.2 — .6 нм (рис. 4). В верхней хромосфере ($\lg m < -4$) радиативные процессы в триплетных линиях стремятся погасить эффекты L_{β} -накачки, вызванные ударным обменом ${}^3S^0$ - и 3P -уровней с ${}^3D^0$ -уровнем. В остальных областях атмосферы Солнца они, наоборот, способствуют их усилению (кривые 3 и 4 на рис. 4, 5, $L_{\beta} \neq 0$).

Итогом действия L_{β} -накачки уровня ${}^3D^0$ является существенное отличие в отклонении от ЛТР уровней триплетной системы от квинтетной. Характерная особенность — резкое возрастание в хромосфере коэффициентов отклонения от ЛТР уровней триплетной системы. Максимум накачки в области $\tau_{5000} \sim 3 \cdot 10^{-6}$ ($\lg m \approx -4$). Здесь населенность всех триплетных уровней (по сравнению со случаем отсутствия L_{β} -накачки) увеличивается более чем в 20 раз. Однако даже при такой L_{β} -накачке возбужденные уровни ${}^3D^0$ и 3P оказываются недонаселенными (за исключением области температурного минимума $\lg m \approx -2 \div -0.5$). По мере перехода в фотосферу эффективность L_{β} -накачки ослабевает. В области $\tau_{5000} \approx 0.08$ ($\lg m \approx 0.1$) отношение числа атомов на триплетных уровнях при L_{β} -накачке и ее отсутствии уменьшается до 1.12.

Отметим еще одну особенность в распределении атомов кислорода по уровням квинтетной и триплетной систем. Несмотря на большие значения b_1 число возбужденных атомов O I на триплетных уровнях меньше, чем на квинтетных. Это вызвано более высокой вероятностью спонтанных переходов с ${}^3S^0$ -уровня на основной $2p^{43}P$ по сравнению с интеркомбинационным переходом ${}^5S^0 - 2p^{43}P$.

Поле излучения линии L_{β} при наличии ударной взаимосвязи уровней квинтетной и триплетной систем, близких по потенциалам возбуждения, как показывают наши расчеты, может привести к увеличению средней интенсивности в центре мультиплетной линии 135.5 — .8 нм на $\sim 40\%$. Влияние L_{β} -накачки на интенсивность излучения других линий квинтетной системы O I (777.2 — 5,926.6 нм) невелико и не превышает 5%.

Влияние модели. Ввиду того, что L_{β} -эффект может завуалировать чувствительность коэффициентов отклонения от ЛТР к модели атмосферы, мы провели исследование этой чувствительности на примере уровней, от него слабо зависящих. Как следует из вышеизложенного, это квинтетные уровни ${}^5S^0$, 5P , ${}^5D^0$ O I.

В итоге сравнения результатов задачи 4 для моделей VAL 80, VAL 73 [7], HSRA [5] и HOLMU [6] (рис. 1, 2, 6) получены следующие заключения.

В моделях атмосфер Солнца с инверсией температуры (VAL 80, VAL 73, HSRA) поведение b_1 аналогично. В верхней хромосфере (для ${}^5S^0$, начиная со слоя $\lg m < -4$; для 5P — со слоя $\lg m < -5$) и вблизи области температурного минимума число атомов на всех квинтетных уровнях в несколько раз превышает равновесное: $b_1 \approx 2-3$. В других областях хромосферы эти уровни недонаселены: $b_1 = 0.5-0.1$ ($\lg m = -3$). В фотосфере ($\lg m = -1 \div +1$) недонаселенными оказываются высоковозбужденные уровни 5P и ${}^5D^0$. Число ${}^5S^0$ -атомов близко к равновесному ($b_1 \approx 1.06$ в случае модели VAL 80). Отличие в b_1 для рассматриваемых моделей связано с отличиями в распределении температуры в верхних слоях атмосферы, значением и местоположением температурного минимума. В фотосфере после слоя $\lg m \approx 0$ темпера-

турные отличия порядка 100 К практически не сказываются на величине отклонения от ЛТР населенностей квинтетных уровней.

В чисто фотосферной модели HOLMU, с монотонным падением T ко внешней границе, уровни ${}^5S^0$ и 5P недонаселены на протяжении всего рассматриваемого слоя (рис. 1, 2). При этом для ${}^5S^0$ коэффициент b_4 падает до ~ 0.5 ($\lg m = -5$), а для 5P — коэффициент b_6 , достигнув минимума ($b_6 \approx 0.55$ при $\lg m = -1$), начинает расти. Поведение b_8 (уровень ${}^5D^0$, рис. 6) напоминает b_6 . Однако рост b_8 происходит быстрее. В результате в области хромосферы $\lg m < -3$ уровень ${}^5D^0$ перенаселен.

Выводы. Подводя итог сказанному в данной статье, мы приходим к следующим выводам:

1. Учет ударных процессов и фотопроцессов в свободно-связанных континуумах O I не изменяет характерных особенностей влияния радиативных процессов в линиях нейтрального кислорода на отклонение от ЛТР населенностей его уровней. По-прежнему, при заселении какого-либо уровня радиативные процессы в линиях, для которых данный уровень является верхним, играют важную роль.

2. Радиативная взаимосвязь линий усиливает не-ЛТР эффекты для уровней в областях, где данные уровни недонаселены, и уменьшает их там, где $b_i > 1$.

3. Совместное действие фотопроцессов в субординатных континуумах и радиативной взаимосвязи линий вызывает появление сильной зависимости числа возбужденных ${}^5S^0$ -атомов от радиативных процессов в линиях 926.6, 777.2 — .5 нм в области хромосферы $\lg m = -4 \div -1$.

4. При рассмотрении вопроса о заселении в хромосфере уровней триплетной системы необходимо принимать во внимание увеличение их населенности за счет L_β -накачки уровня ${}^3D^0$.

5. Характер и степень влияния радиативных процессов на отклонение от ЛТР уровней O I в значительной степени зависят от того, учитывается хромосфера Солнца или нет. Инверсия температуры в верхних слоях принципиально меняет распределение коэффициентов отклонения от ЛТР квинтетных уровней, начиная с области $\lg m < 0$.

1. *Шукина 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.— Кинематика и физика небес. тел, 1985, 1, № 5, с. 29—33.
2. *Auer L. H.* Application of the complete linearization method to the problem of non-LTE line formation.— *Astrophys. J.*, 1973, 180, N 2, p. 469—472.
3. *Auer L. H., Mihalas D.* Non-LTE model atmospheres. III. A complete linearization method.— *Ibid.*, 1969, 158, N 2, p. 641—655.
4. *Feautrier M. P.* Sur la resolution numerique de l'equation de transfert.— *C. r. Acad. sci.*, 1964, 258, N 12, p. 3189—3191.
5. *Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Cuny J.* The Harvard — Smithsonian reference atmosphere.— *Solar Phys.* 1971, 18, N 3, p. 347—365.
6. *Holweger H., Müller E. A.* The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen.— *Ibid.*, 1974, 39, N 1, p. 19—30.
7. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar atmosphere. I. Basic computations and summary of the results.— *Astrophys. J.*, 1973, 184, N 2, p. 605—631.
8. *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. астрон. обсерватория АН УССР,
Киев

Поступила в редакцию 11.12.84