

УДК 523.942

О возможности уточнения однородной модели фотосферы Солнца

Э. А. Гуртовенко, В. А. Шемнинова

Проведен анализ разностей сил осцилляторов, выведенных по эквивалентным ширинам и центральным интенсивностям различных фраунгоферовых линий при изменении номинальной температуры фотосферной модели и характеристик поля скоростей. Найденные закономерности, зависящие от эквивалентной ширины и потенциала возбуждения линий, могут значительно облегчить задачу уточнения модели фотосферы (или теории образования фраунгоферовых линий) на основе анализа большого массива эмпирических «солнечных» сил осцилляторов спектральных линий. Оценена точность определения содержания химических элементов, соответствующая конкретной точности данных о распределении температуры и о поле скоростей в фотосфере. Сделан вывод о перспективности исследования вариаций температуры и светимости Солнца по прецизионным наблюдениям фраунгоферовых линий. Отмечено, что асимметрия линий легких элементов с высокими потенциалами возбуждения может быть «чувствительным» индикатором физической неоднородности солнечной и звездных атмосфер.

ON THE POSSIBILITY TO IMPROVE THE HOMOGENEOUS PHOTOSPHERIC MODEL OF THE SUN, by Gurtovenko E. A., Sheminova V. A.— The modelling of differences of solar oscillator strengths derived from equivalent widths and central intensities with the variations of nominal temperature of photospheric model and characteristics of photospheric velocity field has been made. The regularities obtained (which depend on the equivalent widths and the excitation potentials) point to the possibility of improvement of photospheric model and (or) the theory of Fraunhofer lines formation using the analysis of a large number of «solar» empirical oscillator strengths derived from different Fraunhofer lines. The accuracy of determining chemical elements abundances is evaluated by applying the specific uncertainties of the distribution of temperature and velocity field amplitude in the solar photosphere. A conclusion is drawn that the investigations of temperature and luminosity variations of the Sun from precise observations of Fraunhofer lines may bring fruitful results. It has been noted that the line symmetry of light elements with high excitation potentials may serve as a «sensitive» indicator of physical inhomogeneity of solar and stellar atmospheres.

Введение. В работах [9, 10] показано, что современные сведения о строении солнечной фотосферы позволяют использовать ее как физическую среду, изученную настолько хорошо, что данные наблюдений фраунгоферовых линий и их современная теория дают возможность создавать довольно точные и вместе с тем массовые шкалы солнечных сил осцилляторов линий, представляющих интерес для астрофизики. В этих работах, а также в [1] отмечалось, что очень важную информацию о природе образования фраунгоферовых линий и о строении солнечной фотосферы дают разности сил осцилляторов $\delta = \lg gf(W) - \lg gf(d)$ или эквивалентные им разности содержания химического элемента, полученные по эквивалентным ширинам (W) и центральным глубинам (d) линий. Поэтому анализ таких разностей можно использовать для уточнения моделей солнечной фотосферы и для проверки теории образования фраунгоферовых линий. Однако такой метод имеет и недостатки: 1) приходится оперировать величиной $\delta \lg gf$, являющейся разностью систематических погрешностей $gf(W)$ и $gf(d)$, а такая разность может быть намного меньше действительных значений этих погрешностей; 2) ввиду малости величины δ для ее анализа требуется большое число линий с разными интенсивностями и атомными параметрами.

Есть и другой метод решения этой задачи: использовать идеально точные значения сил осцилляторов линий. Однако в настоящее время лишь для очень малого числа линий известны силы осцилляторов с надлежащей точностью.

Цель данной работы — выявить влияние неточностей ЛТР-модели на характер разностей сил осцилляторов δ , определяемых с помощью этой модели, и дать заключение о возможности и (или) целесообразности улучшения данной модели. Такая задача представляется нам также важной для исследований по солнечно-звездной физике, где для определения пределов точности диагностики звездных спектров Солнце используется как эталон.

Результаты расчетов, дискуссия. Для выяснения влияния ошибок модели на характер разностей δ мы выполнили численное моделирование изменений содержания некоторых элементов, обусловленных изменением основного параметра модели — температуры. В расчетах, проведенных с помощью модели HOLMU [13], выбирались потенциалы возбуждения, характерные для реальных линий атомов и ионов, наблюдающихся в спектре Солнца. Принимались постоянная затухания $\gamma = 1.5 \gamma_0$ и следующие оптимальные параметры фотосферного поля скоростей: $v_{\text{микро}}^{\text{рад}} = 1.0$, $v_{\text{микро}}^{\text{танг}} = 1.5$; $v_{\text{макро}}^{\text{рад}} = v_{\text{макро}}^{\text{танг}} = 1.5$ км/с. Они достаточно обоснованы в работах [2, 3, 9, 10].

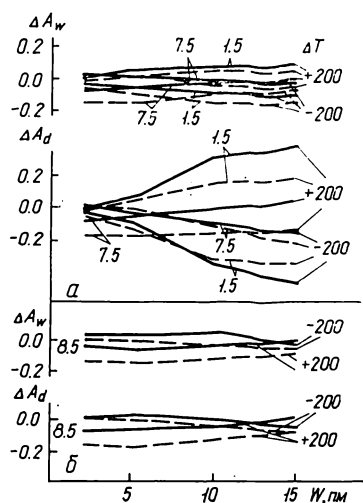
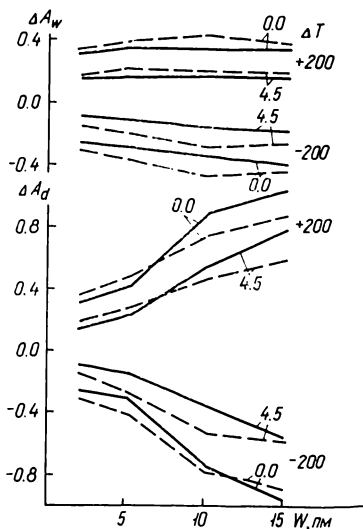


Рис. 1. Разности содержания железа, выведенные по эквивалентным ширинам (ΔA_w) и центральному интенсивностям (ΔA_d) разных линий Fe I при изменении температуры модели фотосферы на ± 200 К. Цифры возле кривых здесь и далее — потенциалы возбуждения линий, эВ. Сплошные линии — центр диска Солнца, штриховые — $\cos\theta = 0.3$

Рис. 2. То же, что и на рис. 1: а — для линий Fe II; б — для линий C I

Определяемое изменение содержания вычислялось как разность ΔA содержаний, полученных с температурой модели и температурой, измененной на ± 200 К. Такое изменение ΔT мы выбрали по той причине, что в имеющихся фотосферных моделях различие температуры достигает значений этого порядка — 100 К и более. При изменении температуры соответственно рассчитывался коэффициент непрерывного поглощения и другие параметры модели. Такие расчеты выполнены для линий Fe I, Fe II, Ti I, C I с потенциалами возбуждения соответственно 0, 1.5, 3.0, 4.5; 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5; 0, 3.0; 7.5, 8.5 эВ и эквивалентными ширинами 2, 5, 10 и 15 пм. Для линий Fe I и номинальной модели HOLMU мы рассчитали также изменение содержания ΔA , обусловленное изменением микро- и макротурбулентных скоростей в пределах ± 0.5 км/с от их номинальных значений.

Результаты численного моделирования представлены на рисунках 1—5.

«Чувствительность» эквивалентных ширин линий к изменению температуры. Максимальное изменение содержания ($\Delta A \leq 0.4$ dex) в 2.5 раза при изменении температуры модели на 200 К отмечается для интенсивных линий Fe I и Ti I с низкими потенциалами возбуждения (рис. 1). Данные для линий Ti I практически не отличаются от приведенных на рисунке данных для линий Fe I. Отметим, что этот эффект по линиям Fe II (рис. 2, а) оказывается почти на порядок меньше (0.07 dex), а для слабых линий Fe II с высокими потенциалами возбуждения он имеет противоположный знак по сравнению с линиями Fe I. При уменьшении температуры эквивалентная ширина слабых линий Fe I увеличивается, а линий Fe II — уменьшается.

Еще более незначительным оказывается эффект для линий углерода (рис. 2, б). Для линий C I результаты для потенциалов возбуждения 7.5 и 8.5 эВ очень близки, поэтому приводятся данные только для потенциала возбуждения 8.5 эВ. Однако в противоположность линиям металлов амплитуда ΔA уменьшается с уменьшением потенциала возбуждения. Кроме того, отмечаются и некоторые другие особенности: более

четко выраженное, чем для линий Fe II, изменение знака разностей при изменении эквивалентной ширины в центре диска Солнца, а также одинаковый знак разности при увеличении и уменьшении температуры модели для линий на краю диска.

«Чувствительность» центральных интенсивностей линий к изменению температуры. Разности ΔA_d заметно больше соответствующих разностей ΔA_w . Для линий Fe I и Ti I эффекты близки, сходны качественно и максимальны (около 1.0 dex) для интенсив-

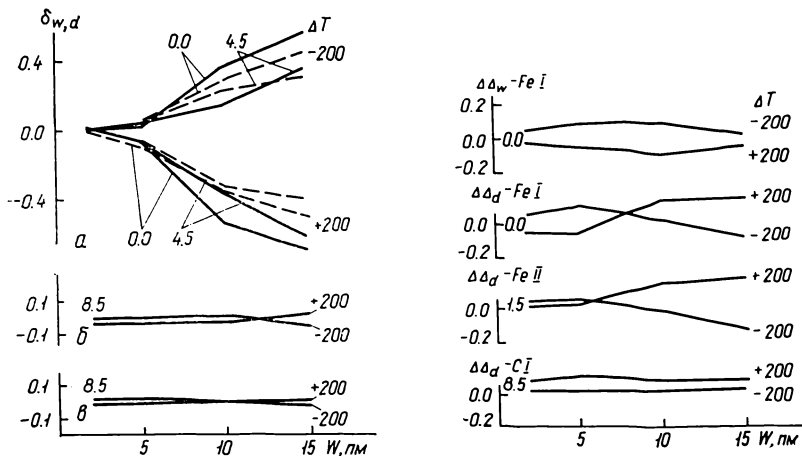


Рис. 3. То же, что и на рис. 1: *a* — разности $\delta W_d = \Delta A_w - \Delta A_d$ для линии Fe I по данным рис. 1; *b*, *c* — соответственно разности δW_d для линий C I в центре и на краю диска

Рис. 4. Примеры максимальных изменений величин ΔA_w и ΔA_d (по данным рисунков 1, 2) при переходе центр — край на диске Солнца. Представлены в виде разностей: $\Delta \Delta_w = \Delta A_w(\cos \theta = 1) - \Delta A_w(\cos \theta = 0.3)$; $\Delta \Delta_d = \Delta A_d(\cos \theta = 1) - \Delta A_d(\cos \theta = 0.3)$

ных линий с низкими потенциалами возбуждения (рис. 1). Для линий Fe II эффект намного меньше (рис. 2, *a*), но, как и для линий нейтральных металлов, существенно больше, чем ΔA_w . Для линий углерода (рис. 2, *b*) разности ΔA_d одного порядка с ΔA_w и в общем очень незначительны.

Разности $\delta W_d = \Delta A_w - \Delta A_d$. Для всех исследуемых линий эти разности (рис. 3) меньше ΔA_d (так как изменения A_w и A_d при изменении температуры имеют одинаковый знак), они слабо зависят от потенциала возбуждения. О характере таких же разностей для линий Fe II можно судить по рис. 2. В общем они имеют сходный характер, только для линий Fe II амплитуда их существенно меньше, особенно на краю диска. Отметим, что для линий углерода (рис. 3, *b*) эти разности вовсе ничтожны.

Изменение ΔA_w и ΔA_d при переходе центр — край (разности типа $\Delta \Delta$). Эти разности также могут быть индикаторами ошибок модели или теории образования линий

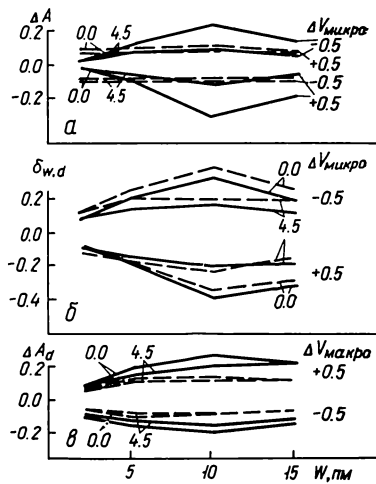
Таблица 1. Изменение эквивалентных ширин (в пм; первая строка) и центральных глубин (вторая строка) фраунгоферовых линий в зависимости от изменения температуры (T) модели HOLMU. Расчеты выполнены для линий с эквивалентной шириной $W \approx 10$ пм

| Элемент | EPL , эВ | $T-200$ К | T , К | $T+200$ К | Элемент | EPL , эВ | $T-200$ К | T , К | $T+200$ К |
|---------|------------|----------------|----------------|---------------|---------|------------|----------------|----------------|----------------|
| Fe I | 0.0 | 11.20 0.880 | 10.01 0.824 | 8.00 0.750 | C I | 7.5 | 10.20 0.543 | 10.15 0.535 | 10.35 0.538 |
| Fe I | 4.5 | 11.20 0.790 | 9.98 0.742 | 8.25 0.685 | C I | 8.5 | 10.00 0.460 | 9.98 0.461 | 10.30 0.472 |
| Ti I | 0.0 | 11.70 0.865 | 9.98 0.804 | 7.90 0.74 | Fe II | 1.5 | 10.59 0.840 | 9.98 0.805 | 9.65 0.770 |
| Ti I | 3.0 | 11.35 0.810 | 10.00 0.753 | 6.60 0.695 | Fe II | 7.5 | 10.15 0.690 | 10.04 67.2 | 10.04 66.2 |

поглощения. Величина их незначительна (рис. 4). Характер изменения при изменениях эквивалентной ширины и потенциала возбуждения различен для разных линий.

Влияние температурных ошибок модели непосредственно на эквивалентные ширины и центральные интенсивности линий. В табл. 1 представлены изменения эквивалентных ширины и центральных интенсивностей линий при изменении температуры модели в пределах ± 200 К. Расчеты выполнены для линий с эквивалентной шириной

Рис. 5. Влияние ошибок поля скоростей: а — разности содержания железа, выведенные по эквивалентным ширинам (сплошные кривые) и центральных интенсивностям (штриховые линии) Fe I в центре диска Солнца при изменении микротурбулентной скорости $v_{\text{микро}}$ от номинальной на величину ± 0.5 км/с (эти же данные для края диска Солнца отличаются мало); б — разности типа δW_d (см. рис. 3) для линий Fe I, обусловленные изменением микротурбулентной скорости на ± 0.5 км/с. Сплошные кривые — центр, штриховые — край диска Солнца; в — разности содержания железа ΔA_d , выведенные по центральных интенсивностям линий Fe I при изменении макротурбулентной скорости $v_{\text{макро}}$ на ± 0.5 км/с. Сплошные кривые — центр, штриховые — край диска Солнца



$W \approx 10$ pm следующим образом: с принятой эквивалентной шириной по модели HOLMU определяется параметр Agf и центральная интенсивность линии. Далее с параметром Agf находилась эквивалентная ширина и центральная интенсивность линии при изменении температуры модели на ± 200 К. Как видно, максимальной чувствительностью к изменению температуры модели обладают линии нейтральных металлов Ti I и Fe I с низкими потенциалами возбуждения, минимальной — линии C I и Fe II с высокими потенциалами возбуждения.

Влияние ошибок поля скоростей. Основные результаты приведены на рис. 5. Их анализ позволяет отметить следующее: 1) к микротурбулентной скорости максимально чувствительны эквивалентные ширины умеренно сильных линий. Подтверждается известный факт ничтожного влияния $v_{\text{микро}}$ на эквивалентные ширины слабых линий; 2) чувствительность эквивалентных ширины к микротурбулентности возрастает с уменьшением потенциала возбуждения линий. Этот факт установлен еще в [8]; 3) неожиданно практически полное отсутствие зависимости ΔA_d от интенсивности и потенциала возбуждения линий. Известно, что влияние микротурбулентности на центральные интенсивности уменьшается по мере увеличения силы линий. Очевидно, этот эффект компенсируется повышением чувствительности определяемого содержания A_d к изменению центральной интенсивности с увеличением силы линий; 4) разности типа δW_d заметно больше соответствующих ΔA_W и ΔA_d , что объясняется противоположными знаками последних и косвенно подтверждает эффективность исследования микротурбулентной скорости путем одновременного использования центральных интенсивностей и эквивалентных ширины линий (перекрестный метод [11]); 5) разности типа ΔA , обусловленные ошибками микротурбулентной скорости, ничтожны (на рисунке не приведены). Существенно больше разности (до 0.1 dex), обусловленные ошибками макротурбулентной скорости. О их значениях можно судить по рис. 5, в.

Сравнение результатов моделирования с данными наблюдений. Абсолютное значение ошибки ΔA , обусловленной ошибками модели фотосферы, нельзя определить путем вычисления содержания A с «идеальными» силами осцилляторов. В лучшем случае при достаточном объеме материала удастся установить зависимость изменения этой ошибки от тех или других параметров линий. Поэтому наиболее эффективными для сравнения результатов моделирования с данными наблюдений оказываются разности типа δ или ΔA . На рис. 6 (в качестве примера) мы сравниваем разности сил осцилляторов $\delta \lg gf$ для линий Fe I [4] с разностями типа δW_d , обусловленными указанными

ми на рис. 3 изменениями температуры фотосферной модели. Как видно, плавными изменениями температуры на глубинах, соответствующих области формирования различных линий Fe I, можно было бы объяснить наблюдающуюся довольно четкую зависимость $\delta \lg gf$ от W . Отметим также, что эта зависимость вряд ли может объясняться ошибками принятой микротурбулентной скорости. Несмотря на то что общий вид ее схож с соответствующей кривой δW_d (рис. 5), весомым аргументом против такого объяснения является отсутствие смещения нуля-пункта, характерного для раз-

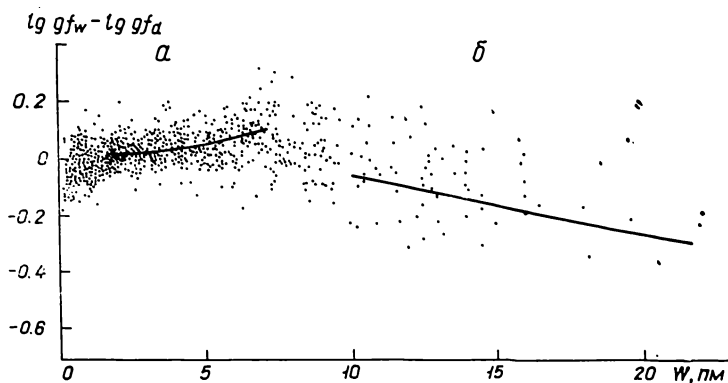


Рис. 6. Разности солнечных сил осцилляторов, выведенные по эквивалентным ширинам и центральным интенсивностям линий Fe I (точки) и моделированные разности, соответствующие изменению температуры модели фотосферы на -140 К и на $+50$ К (соответственно сплошные линии а и б)

ности δW_d , обусловленной ошибками микротурбулентной скорости. Кроме того, для «выпрямления» зависимости $\delta \lg gf$ от W потребовалось бы увеличить $v_{\text{микро}}$ в средних слоях фотосферы и снизить ее в высоких слоях. Это противоречило бы данным об изменении микротурбулентной скорости с глубиной, полученным другими методами в недавних исследованиях (например, [7]).

Заключение. 1. Температурные ошибки фотосферной ЛТР-модели оказывают максимальное влияние на эквивалентные ширины и центральные интенсивности умеренно сильных и сильных линий металлов с низкими потенциалами возбуждения. Если ставится задача исследования содержания элементов или определения солнечных сил осцилляторов, то можно исходить из того, что погрешность определения A и gf , равная $0.05-0.1$ dex, соответствует ошибке распределения температуры $\Delta T \approx 25-50$ К при использовании эквивалентных ширин и $\Delta T = 10-25$ К при использовании центральных интенсивностей сильных линий металлов с низкими потенциалами возбуждения. Следовательно, ошибки температуры в ЛТР-модели порядка $20-40$ К предельно допустимы при современных количественных исследованиях фраунгоферова спектра. Эти условия заметно смягчаются при использовании линий с высокими потенциалами возбуждения.

Таблица 2. Температура трех характерных слоев фотосферы Солнца, охватывающих области образования различных фраунгоферовых линий, по данным различных моделей

| τ_6 | T , К (HSRA) | T , К (HOLMU) | T , К (VAL 81) |
|----------|----------------|-----------------|------------------|
| 0.01 | 4660 | 4782 | 4640 |
| 0.1 | 5160 | 5235 | 5155 |
| 1.0 | 6390 | 6531 | 6420 |

В табл. 2 приведена температура фотосферы по данным трех текущих моделей на глубинах, где могут формироваться различные линии поглощения. Как видно, разности температуры в разных моделях достигают 100 К. Поскольку все три модели используются при ЛТР-расчетах фраунгоферовых линий, то можно утверждать, что точность распределения температуры в текущих фотосферных моделях еще недостаточна для решения задач гелиофизики.

2. Принимая те же критерии необходимой точности определения содержания и (или) солнечных сил осцилляторов, можно сделать вывод о том (рис. 5), что микротурбулентная скорость должна быть известна с погрешностью не более $0.1-0.2$ км/с. Погрешность макротурбулентных скоростей может быть немного выше.

3. Обратная задача — уточнение распределения температуры или других параметров модели фотосферы (например, поля скоростей) путем анализа разностей сил осцилляторов — может решаться с более высокой точностью. Пример анализа солнечных сил осцилляторов и сравнение их с данными моделирования (рис. 6) показывает принципиальную возможность уточнения модели HOLMU, а также то, что первым параметром, подлежащим уточнению, является, по-видимому, температура. Однако имеется и другой не менее важный аспект — учет степени соответствия модели фотосферы и теории образования линий реальной ситуации, существующей в атмосфере Солнца. С этой точки зрения формальное уточнение параметров модели (идеальная подгонка данных наблюдений к расчетным) может не иметь физического смысла. В частности, как показано в [15], для групп линий, образующихся при не-ЛТР в «родственных» условиях, должна быть своя ЛТР-модель с соответствующим распределением температуры. Насколько такие ЛТР-модели, построенные по группам различных линий, будут различаться, пока не ясно.

4. О самой модели HOLMU. Распределение температуры в ней [13] установлено по центральным интенсивностям и эквивалентным ширинам многих линий, в основном линий Fe I и Ti I. Естественно, что эта модель должна в общем хорошо описывать эти и другие линии, для которых эффекты отклонения от ЛТР близки к тем же эффектам для линий Fe I (отнесем эти линии к первой группе). Следует ожидать, что условия образования линий ионов металлов, а также линий атомов легких элементов с высокими потенциалами возбуждения существенно отличаются от условий образования линий Fe I (вторая группа). В этом случае модель HOLMU не должна хорошо описывать линии второй группы. Наши исследования показывают, что вторая группа линий оказывается менее чувствительной к ошибкам распределения температуры модели. Поэтому модель HOLMU хорошо описывает поведение слабых и умеренно сильных фраунгоферовых линий практически всех элементов, и несмотря на кажущуюся «физическую неправомочность» она имеет широкое применение.

5. Представляется перспективным исследование вариаций температуры и светимости Солнца по наблюдениям фраунгоферовых линий, хотя авторы работ [6, 14] в пробных исследованиях не получили убедительных положительных результатов. Отчасти это, возможно, связано с тем, что они использовали линию C I λ 538.0 нм, которая, с нашей точки зрения, не является лучшим выбором для таких исследований.

Следует также обратить внимание на то, что линии Fe II с высокими потенциалами возбуждения и еще в большей степени линии C I выявляют «асимметрию» изменения центральных интенсивностей и эквивалентных ширины (рис. 2, табл. 1) при «симметричном» изменении температуры фотосферы от номинальной. Поэтому можно ожидать, что такого рода линии должны обладать высокой «чувствительностью» их асимметрии к температурным неоднородностям в фотосфере. Отметим, что существенное увеличение асимметрии линий нейтрального железа в спектре Солнца с увеличением потенциала возбуждения установил Р. И. Костык [5]. По-видимому, асимметрия линий легких элементов с высокими потенциалами возбуждения должна быть хорошим «индикатором» исследования физических неоднородностей в фотосферах Солнца и звезд.

1. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И., Орлова Т. В. Построение солнечных внутренних согласованных систем сил осцилляторов и содержания химических элементов. Цирконий // Кинематика и физика небес. тел.— 1986.—2, № 1.— С. 20—23.
2. Кондрашова Н. Н. Определение макротурбулентного поля скоростей в фотосфере Солнца // Солнеч. данные.— 1983.— № 1.— С. 89—92.
3. Костык Р. И. Постоянная затухания и поле скоростей в фотосфере Солнца.— Киев, 1981.— 46 с.— (Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-81-20Р).
4. Костык Р. И. Силы осцилляторов линий титана, хрома, железа и никеля.— Киев, 1982.— 36 с.— (Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-82-33Р).
5. Костык Р. И. Тонкая структура линий и строение фотосферы Солнца.— Киев, 1983.— 26 с.— (Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-83-17Р).
6. Кохан Е. К., Крат В. А. Фраунгоферова линия C I 5380.322 Å как индикатор пространственных флуктуаций температуры солнечной фотосферы // Солнеч. данные.— 1983.— № 11.— С. 81—87.
7. Шемнинова В. А. Распределение микротурбулентной скорости в фотосфере Солнца // Астрометрия и астрофизика.— 1984.— Вып. 53.— С. 15—18.
8. Blackwell D. E., Calamai G., Willis R. B. Effects of uncertainties in damping and microturbulence on theoretical deductions from solar equivalent widths // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.— 1972.— 160, N 1.— P. 121—127.

9. *Gurtovenko E. A., Kostik R. I.* On the establishment of internally consistent solar scales of oscillator strengths and abundances of chemical elements. I // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1981.—46, N 2.— P. 239—248.
10. *Gurtovenko E. A., Kostik R. I.* On the establishment of internally consistent solar scales of oscillator strengths and abundances of chemical elements. II // *Astron. and Astrophys.*—1981.—101, N 1.— P. 132—133.
11. *Gurtovenko E. A., Sheminova V. A.* «Crossing» method for studying the turbulence in solar and stellar atmospheres. I // *Solar. Phys.*—1986.—106, N 1.— P. 237—247.
12. *Holweger H.* Ein empirisches Modell der Sonnenatmosphäre mit lokalem thermodynamischem Gleichgewicht // *Z. Astrophys.*—1967.—65, N 5.— P. 365—417.
13. *Holweger H., Muller E. A.* The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision of Ba II lines by hydrogen // *Solar Phys.*—1974.—39, N 1.— P. 19—30.
14. *Livingston W., Milkey R., Slaughter C.* Solar luminosity variation. I // *Astrophys. J.*—1977.—211, N 1.— P. 281—287.
15. *Rutten R. J., Kostik R. I.* Empirical NLTE analyses of solar spectral lines. III // *Astron. and Astrophys.*—1982.—115, N 1.— P. 104—114.

Глав. астрон. обсерватория АН УССР,
Киев

Поступила в редакцию 21.04.87,
после доработки 04.06.87

РЕФЕРАТ ПРЕПРИНТА

УДК 524.8

СФЕРИЧЕСКИ-СИММЕТРИЧНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В РАДИАЦИОННОЙ ФРИДМАНОВСКОЙ ВСЕЛЕННОЙ / Новосядлый Б. С., Пелых В. А.

(Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-87-153Р)

Получены решения уравнений эволюции сферически-симметричных возмущений метрики пространства-времени, плотности и скорости идеальной жидкости с уравнением состояния $P = \epsilon/3$ на фоне фридмановской Вселенной нулевой пространственной кривизны в системе отсчета, сопутствующей невозмущенному фону космологической жидкости. Из решений следует, что при стремлении к начальной сингулярности по времениподобным или изотропным направлениям расхождения в относительных возмущениях инвариантных величин отсутствуют. Показано, что на ранней стадии эволюции, когда масштаб возмущения больше горизонта, происходит формирование профиля возмущения плотности. Найдено непрерывное преобразование к синхронной системе отсчета, обсуждены различия описаний возмущений в этих системах отсчета.