

УДК 523.94

Корреляционный анализ двумерной солнечной атмосферы

А. С. Гадун¹, А. Ханслмайер²

¹Главная астрономическая обсерватория НАН Украины,
03680, ГСП, Киев-127, Голосиив

²Институт астрономии университета г. Грац,
А-8010 Грац, Университетсплатц 5, Австрия

Изучена структура неоднородной солнечной атмосферы на основе зависимостей, характеризующих корреляционные связи между пространственными вариациями термодинамических величин и поля скоростей в двумерных ГД-моделях. В фотосфере детектируются четыре области: термической и проникающей конвекции, переходной области и полностью осциллирующих верхних слоев. Показано, что сравнение двух наборов высотных стратификаций корреляционных зависимостей, первые из которых проанализированы непосредственно по модельным данным, а последующие вычислены из теоретических спектральных сканов, является подходящим тестом для систем геометрических высот формирования спектральных линий. В частности, протестированы два способа определения ЛТР-высоты формирования ядер спектральных линий и найдено, что тот метод, который привязывает эту высоту к уровню, где оптическая глубина в линии равняется единице, представляется более адекватным для задач диагностики физических процессов в атмосферных слоях, чем подход, основанный на депрессионной функции вклада.

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ДВОВИМІРНОЇ СОНЯЧНОЇ АТМОСФЕРИ, Гадун О. С., Ханслмайер А. — Вивчена структура неоднорідної сонячної атмосфери за допомогою залежностей, що характеризують кореляційні зв'язки між просторовими варіаціями термодинамічних величин та поля швидкостей в двовимірних ГД-моделях. У фотосфері виділено чотири області: термічної і проникаючої конвекції, перехідної області та повністю осцилюючої верхньої фотосфери. Показано, що порівняння двох груп стратифікацій кореляційних залежностей, перші з яких одержано із моделей, а інші розраховано для теоретичних спектральних сканів, є добрим тестом для систем геометричних висот формування спектральних ліній. Зокрема протестовано два методи визначення ЛТР-висоти формування ядра ліній і знайдено, що метод, який пов'язує цю висоту з тим шаром, де оптична глибина в лінії дорівнює одиниці, можна розглядати як більш адекватний для задач діагностики фізичних процесів в атмосфері, ніж підхід, що базується на депресійній функції вкладу.

CORRELATIVE ANALYSIS OF 2-D SOLAR ATMOSPHERE, by Gadun A. S., Hanslmeier A. — Correlations between various parameters of 2-D inhomogeneous time-dependent solar atmospheres are analyzed to be directly related to height-dependent correlations found on the basis of spectral simulations. We detect four photospheric regions with thermal and overshooting

convection, transition zone, and fully oscillating layers. The correlations found for the model data and those computed within simulated spectral scans are a good testing tool for systems of spectral line heights if these correlations are analyzed in comparison. In particular, we examine two methods providing the heights of line core formation in LTE and show that the approach which defines this quantity as a geometrical height at the optical depth of line center $\tau_{\lambda 0} = 1$ is more suitable for diagnostic purpose than the method based on depression contribution function.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечную фотосферу в идеализированном случае отсутствия магнитного поля можно рассматривать как своеобразную переходную область между термической конвекцией, доминирующей в ее нижних слоях и в оболочке, к осцилляциям, определяющим динамику вещества в ее верхних слоях.

В таком контексте она представляла собой предмет исследования большого числа публикаций, например [4, 9, 10, 13—18]. В работах [2, 6, 7] с целью воспроизведения и интерпретации эмпирически определенных корреляционных зависимостей были задействованы теоретические спектральные сканы, рассчитанные на основе двумерных гидродинамических (2D-ГД) моделей. Однако в рамках многомерных моделей солнечной атмосферы есть возможность взглянуть на эту проблему с другой точки зрения. Например, можно:

а) выполнить анализ корреляционных связей между непосредственно модельными данными с целью выявления базовых закономерностей в строении фотосферы;

б) установить, насколько адекватно эти закономерности воспроизводятся методами диагностики, основанными на анализе спектральных наблюдений;

в) протестировать систему высот образования спектральных линий путем простого сравнения высотно зависимых корреляционных связей, которые непосредственно определены из моделей, с теми, которые детектируются из теоретических спектральных сканов.

Перечисленные задачи являются целью настоящей работы.

ДВУМЕРНЫЕ МОДЕЛИ

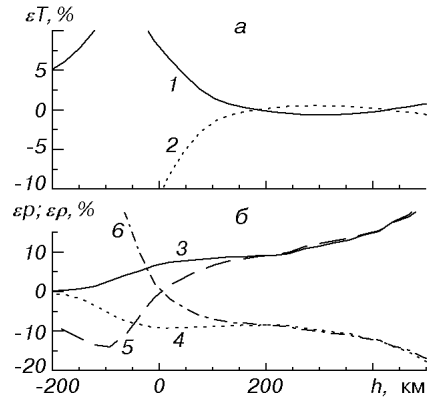
Мы использовали в этой работе последовательность моделей, которая была детально проанализирована в работах [1] и [7]. Модели были рассчитаны с детальной трактовкой радиационных эффектов и с применением специальных граничных условий, которые направлены на уменьшение мощности модельных осцилляций.

Размер области моделирования составлял 3360×1960 км (по горизонтали и вертикали), шаг — 28 км, атмосферные слои — около 700 км. Мы проанализировали последовательность моделей в $2^h 22.5^m$ с шагом 30 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Мы рассмотрим связи между пространственными вариациями модельных величин в двух представлениях. В первом из них термодинамические величины усредняются для восходящих и нисходящих потоков отдельно. Такое представление, называемое двухкомпонентным, удобно для сравнения модельных данных с результатами определения структуры солнечной атмосферы по инверсионным кодам [5]. Во втором представлении мы рассмотрим высотные зависимости корреляционных коэффициентов для

Рис. 1. Относительные флуктуации температуры $\varepsilon T = (T - \langle T \rangle) / \langle T \rangle$ (а, кривые 1, 2), газового давления $\varepsilon p = (p - \langle p \rangle) / \langle p \rangle$ (б, кривые 3, 4) и плотности $\varepsilon \rho = (\rho - \langle \rho \rangle) / \langle \rho \rangle$ (б, кривые 5, 6), усредненные отдельно в восходящих (нечетные номера кривых) и нисходящих потоках (четные номера)



линейной связи, которые имеют место между пространственными вариациями модельных величин или параметров спектральных линий. Последний подход к изучению структуры фотосферы является наиболее простым и использовался во многих наблюдательных программах.

В этой статье уровень поверхности, или $h = 0$ в геометрической шкале высот, соответствует $\lg \bar{\tau}_R = 0$, где $\bar{\tau}_R$ — росселандова оптическая глубина, усредненная по временной последовательности всех моделей.

Двухкомпонентное представление. На рис. 1 представлены температура, газовое давление и плотность, усредненные отдельно в поднимающихся и опускающихся потоках по всей временно-зависимой последовательности моделей. Эти величины показаны относительно их полного среднего для определенного горизонтального уровня в фотосфере.

Поведение температуры (рис. 1, а) хорошо отображает наличие двух областей в фотосфере, где температурные флуктуации изменяют знак. В районе 170 км восходящие потоки становятся холоднее нисходящих из-за активного высвечивания первых и сжатия последних. Однако около традиционного температурного минимума поднимающиеся осциллирующие потоки уравниваются по температуре с нисходящими и даже показывают тенденцию быть более горячими в результате сжатия вещества при распространении фронта возмущения в верхние слои. Такое поведение температурных флуктуаций очень похоже в 2D-моделях и решениях инверсионных кодов [5].

Поведения флуктуаций давления и плотности очерчивают области термической и проникающей конвекции (рис. 1, б). Под видимой поверхностью величина $\Delta \rho / \bar{\rho}$ отрицательна (рис. 1, б), а $\Delta T / T$ — положительна в восходящих потоках, что характерно для области конвективной неустойчивости в стратифицированной среде. Сразу же над излучающим слоем имеет место инверсия сил плавучести: поднимающееся вещество уже не является менее плотным ($\Delta \rho / \bar{\rho}$ положительна), однако оно еще горячее, чем в нисходящих потоках. Это — область проникающей конвекции. Начиная с высоты в 170 км, можно говорить о нивелировании условий для проникающей конвекции: $\Delta T / T$ изменяет знак, а стратификации $\Delta \rho / \bar{\rho}$ и $\Delta P / P$ становятся подобными, что характерно для конвективно стабильной среды.

Таким образом, в двухкомпонентном представлении можно говорить о том, что проникающая конвекция контролирует область фотосферы примерно до 170 км. Однако протяженность этой области зависит от горизонтального размера конвективного потока (ячейки). Например, для ячеек с размером около 180 км область проникающей конвекции достигает уровня не выше чем 70—75 км [8].

Корреляционные зависимости. Мы будем анализировать два их вида: двухточечные корреляции, если пространственные вариации двух изучае-

мых величин берутся на различных высотах (уровнях) в фотосфере, и одноточечные — если они анализируются на одном и том же горизонтальном слое.

Процедура вычисления коэффициентов корреляции по модельным данным и по спектральным сканам была формально одинаковой: первоначально они вычислялись по отдельным сканам или для определенного геометрического слоя по каждой из моделей, а затем эти индивидуальные коэффициенты усреднялись по всей последовательности моделей. Такой порядок вычисления средних корреляционных зависимостей отличает их от двухкомпонентного представления, о котором речь шла выше. Там характеристики потоков для выбранного горизонтального слоя определялись сразу по всей выборке моделей, как по единому массиву данных. Мы также не проводили фильтрацию осцилляций, поскольку интересовались интегральными характеристиками среды.

Двухточечные корреляции. На рис. 2 показаны корреляции между пространственными вариациями выходящей монохроматической интенсивности в λ 500 нм (δI) и флуктуациями температуры (δT_i). Они сильно коррелированы в нижней фотосфере, но эта корреляционная связь затем резко ослабляется: средний коэффициент корреляции становится равным нулю на высоте около 120—130 км. Выше δI и δT_i антикоррелированы. Наибольшая антикорреляция наблюдается на высоте около 330 км, где инверсия температуры наибольшая (рис. 1, а). В более высоких слоях эта антикорреляция постепенно уменьшается. Однако доминирующей тенденцией остается преобладание более холодных облаков вещества над яркими гранулами.

Корреляции между δI и δW_i (пространственными вариациями вертикальной скорости) демонстрируют иное поведение с высотой — они плавно изменяются от почти 1.0 около излучающего слоя до нуля вблизи традиционного температурного минимума. Тем не менее, над яркими образованиями вещество чаще всего поднимается или имеет меньшую скорость опускания (что характерно для осцилляций). Это свидетельствует о том, что в верхней фотосфере не образуются противоячейки, т. е. инверсионное поле скоростей, как в случае с температурой. Заметим, что нарушение высокой корреляционной связи между δI и δW_i имеет место на высотах около 250 км, где средний коэффициент корреляции становится меньше 0.5.

Величины $\langle \delta I, \delta P g_i \rangle$ и $\langle \delta I, \delta \rho_i \rangle$ (корреляции между δI и флуктуациями газового давления и плотности соответственно) характеризуют фотосферу как переходную зону от области с конвективной неустойчивостью. Например, $\langle \delta I, \delta \rho_i \rangle$ в подфотосферных слоях отрицательно — т. е. под яркими поверхностными структурами находятся менее плотные потоки вещества. Однако уже в нижней фотосфере, на высоте около 30—50 км, преобладающей тенденцией становится наличие более плотных фрагментов, висящих над яркими элементами фотосферного поля яркости. Эта тенденция сохраняется практически по всей фотосфере.

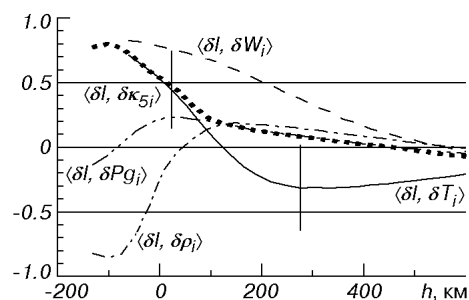


Рис. 2. Корреляции между монохроматической выходящей интенсивностью в λ 500 нм и некоторыми модельными величинами. Вертикальные линии — несмещенная оценка дисперсии. Максимальная средняя квадратичная ошибка корреляционных коэффициентов не превышает 0.03

Пик распределения $\langle \delta I, \delta P_{g_i} \rangle$ находится в районе излучающего слоя — т. е. еще глубже, чем в зависимости $\langle \delta I, \delta \rho_i \rangle$ от высоты. При этом δI и δP_{g_i} остаются положительно коррелированными почти до уровня температурного минимума.

Следует заметить, что вариации давления над вершинами конвективных ячеек в стратифицированной среде отчетливо обозначены [12]: они имеют два пика давления — один, больший по величине, находится над восходящим термическим потоком, а другой, менее значительный, расположен над областями нисходящих течений. Пик давления над центральной частью конвективной ячейки останавливает вертикальные термические потоки вещества, переориентирует их в горизонтальном направлении и нелокальным образом определяет динамику вещества в высоких атмосферных слоях, которые находятся в лучистом равновесии. По этой причине поле скоростей «чувствует» грануляционную картину даже в верхней фотосфере. Избыток давления над нисходящими потоками изменяет ориентацию возвратных течений из горизонтальной в вертикальную, направляя большую их часть назад в оболочку. Однако часть вещества в средней фотосфере может отбрасываться им в верхние атмосферные слои, внося свой вклад тем самым в нарушение колончатой структуры фотосферы.

Интересным представляется поведение $\langle \delta I, \delta \kappa_s \rangle$, т. е. корреляций между δI и флуктуациями монохроматического коэффициента поглощения в λ 500 нм. До высот около 100 км они следуют $\langle \delta I, \delta T_i \rangle$, а выше — определяются флуктуациями давления. Это объясняется чувствительностью главного агента непрозрачности солнечной фотосферы, отрицательного иона водорода, к концентрации свободных электронов. В нижней фотосфере и глубже их основным источником выступает процесс ионизации водорода, который характеризуется высокой чувствительностью к температуре. В средней и верхней фотосфере свободные электроны поставляются металлами, которые там в значительной степени ионизированы, и поэтому электронная концентрация оказывается мало чувствительной к изменению температуры, но в большой степени определяется эффектами сжимаемости среды.

На рис. 3, а представлена серия корреляционных зависимостей, в которых мы использовали профили вертикальной (δW_{-60}) и горизонтальной (δU_{-60}) скоростей на глубине около 60 км под поверхностью вместо δI . Такие корреляции в большей степени являются индикатором колончатой конвективной структуры атмосферы, поскольку δI гораздо сильнее подвержена искажениям неконвективной природы.

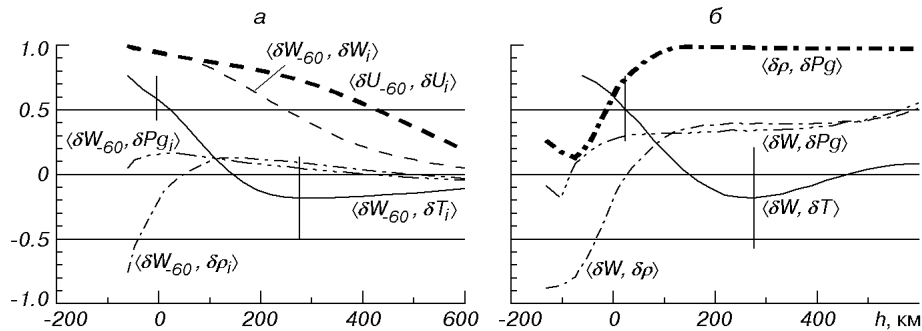


Рис. 3. Корреляции между вертикальной (W_{-60}) и горизонтальной (U_{-60}) скоростями, определенными на глубине в 60 км под видимой поверхностью, и некоторыми модельными величинами (а) и локальные корреляции между пространственными вариациями избранных модельных величин (б). Вертикальные линии — несмещенная оценка дисперсии. Максимальная средняя квадратичная ошибка корреляционных коэффициентов не превышает 0.03

В целом эти корреляционные зависимости близки или совпадают с теми, которые приведены на рис. 2. Отличие состоит в том, что $\langle \delta W_{-60}, \delta T_i \rangle$ показывают тенденцию быть положительно коррелированными на большем интервале высот, до 150 км, чем $\langle \delta I, \delta T_i \rangle$. Также обращает на себя внимание, что горизонтальные скорости сильно коррелированы во всей фотосфере. К этому заметим, что корреляция между вариациями горизонтальных скоростей (δU_i) с δI или δW_{-60} по очевидным причинам практически отсутствует (равна или близка к нулю).

Одноточечные корреляции представлены на рис. 3, б. Величины $\langle \delta W, \delta T \rangle$ демонстрируют описанные выше изменения знака температурных флуктуаций в нисходящих и восходящих потоках. Видно, что восходящие потоки продуцируют неоднородности с большими плотностью и давлением, чем нисходящие. Вариации $\delta \rho$ и δP_g при этом сильно коррелируют.

Обращает на себя внимание, что δW и $\delta \rho$ отрицательно коррелированы до высот около 30 км. Можно говорить о том, что по этим моделям верхняя граница термической конвекции на Солнце расположена выше видимой поверхности. Этот же вывод подтверждают рис. 1, 2 и 3, а. Но пространственная дискретизация модельной области не позволяет установить ее границу более достоверно.

Хотя $\langle \delta W, \delta T \rangle$ становится положительной вблизи температурного минимума, между тем это лишь немного уменьшает отрицательные значения корреляций $\langle \delta I, \delta T_i \rangle$ и $\langle \delta W_{-60}, \delta T_i \rangle$, поскольку на этих высотах уже нарушена колончатая структура атмосферы.

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ

Корреляционные соотношения $\langle \delta I, \delta T_i \rangle$, $\langle \delta I, \delta W_i \rangle$ и $\langle \delta W, \delta T \rangle$, вычисленные по модельным данным, могут быть непосредственно соотнесены с результатами корреляционного анализа спектральных сканов — $\langle \delta I, \delta r \rangle$, $\langle \delta I, \delta V \rangle$ и $\langle \delta V, \delta r \rangle$ (δr — пространственные вариации остаточной интенсивности в ядре линии; δV — доплеровская скорость), если мы полагаем, что а) мы достоверно знаем ту область фотосферы, где образуется спектральная линия; б) эта область не слишком широкая, т. е. участок высот, вносящий наибольший вклад в формирование линии, достаточно узок. Заметим, что ранее такая возможность просто принималась на веру.

Для того чтобы протестировать, насколько хорошо спектральные корреляции воспроизводят реальные соотношения, мы воспользовались теоретическими спектральными сканами 13 линий Fe I и шесть линий Fe II. Они были рассчитаны по той же последовательности 2D-моделей. Методика расчетов описана в работе [7].

Список линий приведен в таблице, где мы предлагаем три оценки для высоты образования линии: H_{ew} — эффективная высота формирования линии, средневзвешенная по всему ее профилю, она в большей мере описывает уровень образования эквивалентной ширины линии и приводится нами из соображений общности; H_d — эффективная высота формирования центральной глубины линии; H_c — геометрическая высота, которая соответствует оптической глубине в центре линии $\tau_{\lambda_0} = \tau_{\lambda_0}^{c+1} = 1.0$. Здесь $\tau_{\lambda_0}^{c+1}$ — оптическая глубина в линии и континууме для центральной части линии. Значения H_{ew} и H_d были рассчитаны по депрессионной функции вклада. Во всех случаях мы проводили расчеты для однородной модели, которая получена путем усреднения нашей последовательности 2D-моделей.

Корреляционные соотношения, найденные по пространственным вариациям параметров линий и интенсивности в континууме (δI), показаны на

Параметры рассчитанных спектральных линий

λ , нм		EPL, эВ	H_d , км	H_{ew} , км	H_r , км
491.1536	Fe I	4.26	148	126	45
649.4499	Fe I	4.73	155	131	71
649.5740	Fe I	4.83	165	132	89
491.1782	Fe I	3.93	181	148	121
567.9032	Fe I	4.65	197	151	158
649.6472	Fe I	4.79	204	155	162
554.3944	Fe I	4.22	215	168	183
602.7059	Fe I	4.07	230	174	185
648.1878	Fe I	2.28	266	217	222
628.0622	Fe I	0.86	303	246	253
525.0216	Fe I	0.12	330	277	308
525.0654	Fe I	2.20	352	292	406
649.4994	Fe I	2.40	414	308	492
513.6800	Fe II	2.84	94	84	23
510.0656	Fe II	2.81	99	85	32
542.5259	Fe II	3.20	128	105	89
643.2683	Fe II	2.89	141	115	89
457.6339	Fe II	2.84	186	148	177
523.4630	Fe II	3.22	238	176	233

Рис. 4. Корреляционные зависимости, найденные из анализа теоретических спектральных сканов, в зависимости от двух шкал высот формирования спектральных линий. Вертикальные линии — несмещенная оценка дисперсии. Точки — линии Fe I, кружки — линии Fe II

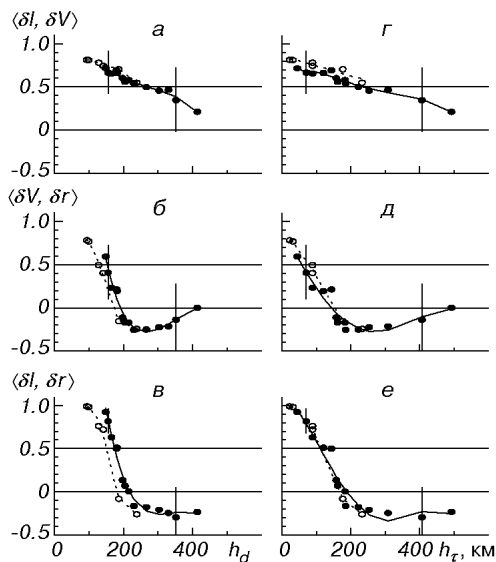


рис. 4 в зависимости от H_d и H_r . Нетрудно заметить, что спектральные корреляции в целом корректно описывают базовые соотношения. Однако, в количественном смысле высотную стратификацию корреляционных соотношений более адекватно представляет шкала высот H_r (рис. 4, $z-e$). Таким образом, 2D-модели дают возможным непосредственным образом протестировать возможные способы определения высот формирования спектральных линий. В частности, для данной последовательности моделей можно сделать вывод, что простой метод оценки области формирования линий по интегральной оптической глубине в ее центре более приемлем для задач диагностики, чем использование подходов, основанных на депрессионной функции вклада.

Следует иметь в виду, что шкалы геометрических высот образования линий безусловно зависят от температурной стратификации моделей, и соотношение высот $H_d - H_r$ по-разному ведет себя в различных моделях. Усредненная структура 2D-моделей продуцирует шкалу высот, которая

оказывается, например, ближе к VAL-C [3], чем к HOLMU [11]. Это дает повод усомниться в целесообразности использования шкал высот образования линий, основанных на известной полуэмпирической модели HOLMU, несмотря на ее известные достоинства в маскировании не-ЛТР-эффектов. В пользу этого предположения свидетельствует и метод ее построения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высотная стратификация модельных корреляций немного изменится, если выбрать иной путь нахождения коэффициентов корреляции — сконцентрировать все модельные данные для выбранного геометрического слоя по всей последовательности моделей и найти затем коэффициент корреляции. Однако эти различия по высоте можно считать небольшими (20—30 км), и они не оказывают драматического влияния на окончательные выводы.

Карпинский [13] на основе спектральных наблюдений пришел к выводу, что в средней фотосфере когерентность вертикальных скоростей резко уменьшается. Наши модели не демонстрируют такого обвала. Возможно, последнее вызвано более ламинарным характером течений в моделях.

Имеются также разногласия с наблюдениями относительно когерентности горизонтальных скоростей. В работе [18] утверждается, что горизонтальные скорости когерентны только в нижних слоях фотосферы. Безусловно, мы должны учитывать, что наши модели описывают ограниченную область на Солнце, из-за чего именно горизонтальная составляющая скоростей в верхней фотосфере подвергается наибольшему упрощению. Двумерность решений и их более ламинарный характер также сказывается на характере поля скоростей. Вместе с тем заметим, что наблюдения и интерпретация горизонтальных скоростей в солнечной атмосфере составляет довольно сложную проблему.

Подытожим основные результаты. Фотометрическое поле яркости выглядит таким образом:

- а) во всей фотосфере над гранулами вещество преимущественно поднимается или имеет меньшую скорость опускания;
- б) начиная с высот в 150—170 км, над гранулами преобладают облака более плотного и холодного вещества;
- в) примерно с высоты 250 км нарушается конвективно-обусловленная колончатая структура атмосферы.

Строение фотосферы может быть представлено следующей схемой:

- а) нижняя фотосфера: верхняя граница термической конвекции, по-видимому, находится на 20—50 км выше видимой поверхности;
- б) до высот в 150—170 км распространяется область проникающей конвекции;
- в) от 170 до 250 км находится переходная область, где колончатая структура еще сохраняется за счет эффектов избытка давления, и где инверсия флуктуаций температуры максимальна;
- г) выше 250—300 км колончатая структура нарушается, и фотосфера характеризуется преобладающим влиянием осцилляций.

В целом эта схема хорошо согласуется с представлениями о строении фотосферы, которые были развиты на основе спектральных наблюдений, например в работах [13] и [18].

Мы также обращаем внимание, что многомерные модели могут быть успешно использованы для тестирования возможных критериев оценки высот формирования спектральных линий.

Авторы благодарят Академию наук Австрии и Национальную академию наук Украины за поддержку двухстороннего сотрудничества.

1. *Гадун А. С.* Пространственные вариации резонансной линии лития λ 671 нм в двумерной искусственной грануляции // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 2.—С. 153—159.
2. *Гадун А. С., Ханслмайер А.* Вариации асимметрии и параметров линий в гранульно-межгранульных областях двумерной искусственной грануляции // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 3.—С. 24—48.
3. *Avrett E. H.* // Heidelberg Conference on Mechanisms of Chromospheric and Coronal Heating. — Berlin: Springer, 1990.
4. *Balthasar H., Grosser H., Schrüter C., Wiehr E.* Intensity correlations in granular spectra // Astron. and Astrophys.—1990.—235, N 1/2.—P. 437—440.
5. *Bellot Rubio L. R., Ruiz Cobo B., Collados M.* Probing downflows in solar magnetic elements: the Fe II test // Astron. and Astrophys.—1999.—341, N 2.—P. L31—L34.
6. *Gadun A. S., Hanslmeier A., Pikalov K. N.* Bisectors and line-parameter variations over granular and intergranular regions in 2-D artificial granulation // Astron. and Astrophys.—1999.—320, N 3.—P. 1001—1012.
7. *Gadun A. S., Solanki S. K., Johannesson A.* Two-dimensional simulation of solar granulation: description of technique and comparison with observations // Astron. and Astrophys.—1999.—350, N 3.—P. 1018—1034.
8. *Gadun A. S., Solanki S. K., Ploner S. R. O., et al.* Scale-dependent properties of 2-D artificial solar granulation. — Kiev: MAO, 1998.—80 p.—(Препринт / НАН Украины. ГАО; MAO-98-4E).
9. *Hanslmeier A., Mattig W., Nesis A.* High spatial resolution observations of some solar photospheric line profiles // Astron. and Astrophys.—1990.—238, N 2.—P. 354—362.
10. *Hanslmeier A., Nesis A., Mattig W.* Dynamics of the solar granulation: bisector analysis // Astron. and Astrophys.—1994.—288, N 3.—P. 960—966.
11. *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.
12. *Hurlburt N. E., Toomre J., Massaguer J. M.* Two-dimensional compressible convection extending over multiple scale heights // Astrophys. J.—1984.—282, N 2.—P. 557—573.
13. *Karpinsky V. N.* Properties of the solar granulation // Solar Photosphere: Structure, Convection, and Magnetic Fields. — Dordrecht: Kluwer, 1990.—P. 67—79.
14. *Komm R., Mattig W., Nesis A.* The height dependence of intensity structures in the solar photosphere // Astron. and Astrophys.—1990.—239, N 1/2.—P. 340—346.
15. *Komm R., Mattig W., Nesis A.* The small-scale velocity field in the solar photosphere // Astron. and Astrophys.—1991.—243, N 1.—P. 251—262.
16. *Komm R., Mattig W., Nesis A.* The height dependence of velocity — intensity fluctuations and several non-dimensional parameters in the solar photosphere // Astron. and Astrophys.—1991.—252, N 2.—P. 812—820.
17. *Kučera A., Rybák J., Wühl H.* Observations of Fe I lines in the quiet solar photosphere // Astron. and Astrophys.—1995.—298, N 3.—P. 917—922.
18. *Nesis A., Durrant C. J., Mattig W.* Overshoot of horizontal and vertical velocities in the deep solar photosphere // Astron. and Astrophys.—1988.—201, N 1.—P. 153—160.

Поступила в редакцию 01.12.99