

УДК 523.942

**Р. И. Костык**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27

### **Особенности конвективных движений в верхней фотосфере Солнца. I**

*На основе спектральных наблюдений линий железа, проведенных вблизи центра солнечного диска на 70-см германском вакуумном ба- шенном телескопе VTT, установленном в обсерватории Дель Тейде Института астрофизики на Канарских островах (о. Тенерифе), ис- следовалось конвективное поле интенсивностей и скоростей от уров- ня образования континуума до температурного минимума. Конвек- тивные элементы в процессе своего движения как вверх, так и вниз изменяют с высотой не только знак контраста, но и направление движения. Высота, на которой происходит такая инверсия, сильно зависит от скорости и контраста конвективных элементов, кото- рые они имели на уровне образования непрерывного спектра. В сред- нем инверсия скорости происходит на высоте  $240 \pm 130$  км, а контраста — на высоте  $200 \pm 65$  км.*

*ОСОБЛИВОСТІ КОНВЕКТИВНИХ РУХІВ У ВЕРХНІЙ АТМОСФЕРІ СОНЦЯ. I, Костик Р. І. — На основі спектральних спостережень ліній заліза, які були проведені поблизу центра сонячного диску на 70-см німецькому башитовому телескопі VTT, встановленому в обсер- ваторії Дель Тейде Інституту астрофізики на Канарських островах (о. Тенерифе), досліджувалось конвективне поле інтенсивностей та швидкостей від рівня утворення континууму до температурного мінімуму. Конвективні елементи під час свого руху як вверх, так і вниз змінюють з висотою не тільки знак контрасту, але і напрямку руху. Висота, на якій відбувається така інверсія, сильно залежить від швидкості та контрасту конвективних елементів, які вони мали на рівні утворення неперервного спектру. В середньому інверсія швид- кості має місце на висоті  $240 \pm 130$  км, а контрасту — на висоті  $200 \pm 65$  км.*

*PROPERTIES OF CONVECTIVE MOTIONS IN THE UPPER SOLAR ATMOSPHERE, by Kostik R. I. — The granulation brightnesses and convective velocities in the solar photosphere between the levels of formation of the continuum radiation and the temperature minimum are examined. The spectral images of the granulation observed in the iron lines were obtained using the 70-cm German Vacuum Tower Telescope (VTT) at the Observatorio del Teide on Tenerife (Spain). It is shown that the convective structures change not only the sign of relative contrast, but also the direction of the motion during their motions up and down throughout the solar photosphere. The heights of intensity contrast reversal and velocity sign reversal strongly depend on the convective velocity and intensity measured in the continuum. On the average, the velocity sign reversal takes place at the height  $240 \pm 130$  km and intensity contrast reversal occurs at the height  $200 \pm 65$  km.*

## ВВЕДЕНИЕ

Энергия, которая в результате ядерных реакций образуется в центральной области Солнца, переносится к поверхности сначала переизлучением, а затем конвекцией. В свою очередь, конвективные движения возбуждают волны, которые в основном и ответственны за нагрев хромосферы и короны. Прямым наблюдениям доступна лишь верхняя граница конвективной зоны в виде грануляционной структуры фотосферы. Этот слой атмосферы Солнца наиболее интересен и одновременно наиболее труден для исследований, поскольку необходимо принимать во внимание все виды переноса энергии.

Конвективные и волновые движения в солнечной атмосфере исследовались неоднократно. Использовались различные инструменты для наблюдений и применялись разнообразные методы обработки и интерпретации этого наблюдательного материала. Итоги исследований, выполненных до 2000 г., можно найти в работе [8]. Согласно этим исследованиям фотосферу можно разделить на две составляющие с разными физическими свойствами и границей раздела около высоты  $H = 170$  км над уровнем образования континуума. Этот вывод сделан на том наблюдательном факте, что амплитуды флуктуаций интенсивности и скорости сначала уменьшаются с высотой, достигая минимума на  $H = 170$  км, а затем снова увеличиваются. Интенсивности и скорости на  $H > 170$  км и на  $H < 170$  км не коррелируют между собой. В нижней фотосфере энергия переносится конвективными образованиями, а в верхних слоях — различного типа волнами. С другой стороны, Эспагне и др. [8] на основе собственных исследований пришли к выводу, что фотосферу можно разделить на две области только по отношению к полю интенсивности, поскольку вертикальные конвективные скорости проникают вплоть до высот  $H = 500$  км. Близкий результат получил и Салуччи и др. [20].

В последующие годы значительные усилия были направлены на определение высоты, на которой происходит инверсия контраста (температуры) конвективных образований. Здесь результаты разных исследователей сильно отличаются. Книир с сотрудниками [14], исследуя спектрограмму в линии Mg b2, пришли к выводу, что изменение знака контраста над гранулами имеет место на высоте  $H = 60$  км, в то время как Бендлин и Фолкнер [7] по данным наблюдений в линии Fe I 630.3 нм получили значение  $H = 270$  км. Близкие к этому значению величины приводятся в работах Костыка и Щукиной [17] —  $H = 250$  км, Янсен и Гауззи [11] — 200 км, а также Пушман и др. [19] — 170 км. М. И. Стодилка и др. [1—4] пришли к выводу, что область температурной инверсии простирается от  $H = 100$  км до температурного минимума. К этому добавим, что в работе [17], помимо инверсии контраста, обнаружено изменение и направления скорости конвективных движений. В среднем это происходит на высоте  $H = 490$  км: вещество над гранулами, контраст которых больше 7 %, начинает преимущественно опускаться, а над межгранулами с контрастом менее 10 % — подниматься.

Цель настоящей работы — на основе данных наблюдений с высоким пространственным и временным разрешением исследовать конвективные поля интенсивностей и скоростей от уровня образования континуума до  $H = 500$  км, и в частности, определить высоты, на которых происходит инверсия контраста, а также изменение направления скорости. Насколько нам известно, последняя задача ранее не исследовалась.

## НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проведены Е. Хоменко 26 августа 2001 г. на 70-см германском вакуумном башенном телескопе VTT, установленном в обсерватории Дель Тейде Института астрофизики на Канарских островах (о. Тенерифе, Испания). Описание телескопа и спектрографа можно найти в работе Шретера и др. [22].

Для наблюдений были выбраны линии нейтрального и ионизованного железа (Fe I 639.361 нм и Fe II 523.418 нм). С помощью узкополосных фильтров в линии водорода H и в линии ионизованного кальция Ca II K была выбрана невозмущенная область вблизи центра солнечного диска. Светоприемником служила ПЗС-камера размером 1024 × 1024 пикс. Протяженность области в направлении дисперсии, регистрируемой матрицей, составляла 0.41 пм. Ширина входной щели спектрографа была равной 100 мкм (0.46 "). Размер одного пиксела соответствует 0.087 " на поверхности Солнца. Таким образом, поле зрения телескопа составляло 0.46 × 0.89 ". Наблюдения велись одновременно на двух камерах. Линии измерялись каждые 8 с на протяжении 158 мин. Продолжительность одной экспозиции равня-

лась 2 с, их общее число составило 943. За время наблюдений дрожание солнечной поверхности на входной щели спектрографа, обусловленное нестабильностью земной атмосферы и погрешностями гидирования, находилось в пределах 0.3—0.5 .

### ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

Все 943 изображения были исправлены за плоское поле по известной методике (см., например, [13]). Калибровочные изображения, которые использовались в качестве плоского поля, экспонировались непосредственно после регистрации спектра в той же длине волны вблизи центра солнечного диска путем усреднения пространственной структуры по поверхности Солнца. Последнее достигалось быстрым покачиванием дополнительного зеркала телескопа. Процедура исправления за плоское поле состояла из нескольких этапов.

1. Исключение темнового тока из всех изображений спектра и всех калибровочных изображений.

2. Коррекция всех изображений за наклон и кривизну входной щели спектрографа.

3. Исключение из усредненного калибровочного изображения солнечных спектральных линий поглощения.

4. Разделение полученного изображения на две составляющие. Здесь требуются дополнительные пояснения. Пыль, которая проникает в здание телескопа, попадает как на регистрирующую матрицу (в виде темных точек), так и на входную щель. Последняя проявляется на матрице в виде темных горизонтальных полос, имитируя межгранульные промежутки. По каким-то причинам эти темные полосы на калибровочных изображениях могут не совпадать с таковыми на изображениях спектра. Поэтому усредненное калибровочное изображение мы разделили на изображение, которое содержит только следы пыли на матрице (матричное плоское поле) и на изображение, которое содержит только темные полосы, обусловленные пылью на входной щели (плоское поле щели).

5. Исключение матричного плоского поля из всех изображений спектра. Это можно сделать в автоматическом режиме. Исключение плоского поля щели требует индивидуального контроля для каждого изображения спектра, поскольку темные полосы на изображениях спектра и на калибровочном изображении могут быть сдвинуты друг относительно друга на разную величину. В этом случае необходимо перестраивать калибровочное изображение (сдвиг изображения по пространству от нескольких десятых до целого пиксела).

Последующая обработка данных наблюдений включала в себя извлечение значений интенсивности и скорости на разных остаточных глубинах контуров линий Fe I 639.361 нм и Fe II 523.418 нм. Для этой цели мы применили методику «лямбда-метра». Подробное опи-

сание этого метода приведено в работе [24]. Профиль каждой линии мы разбили на 11 уровней ( $h = 1 \dots 11$ ) и выбрали 11 ширин (расстояние от коротковолнового до длинноволнового крыла спектральной линии, см. таблицу). На каждом уровне  $h$  для каждого изображения спектра ( $t = 1 \dots 943$ ) и для каждой спектральной дорожки ( $x = 1 \dots 1024$ ) мы находили значения интенсивности  $I(t, x, h)$  и скорости в коротковолновом и длинноволновом ( $V_b(t, x, h)$  и  $V_r(t, x, h)$ ) крыльях линий Fe I  $\lambda 639.361$  нм и Fe II  $\lambda 523.418$  нм. Соответствующие величины  $\bar{I}(h)$ ,  $\bar{V}_b(h)$ ,  $\bar{V}_r(h)$  были найдены и для усредненных по пространству ( $x = 1 \dots 1024$ ) и времени ( $t = 1 \dots 943$ ) контуров линий железа. Затем мы нашли флуктуации интенсивности и скорости в коротковолновом и длинноволновом крыльях исследуемой линии согласно выражениям

$$\begin{aligned} I(t, x, h) &= I(t, x, h) - \bar{I}(h), \\ V_b(t, x, h) &= V_b(t, x, h) - \bar{V}_b(h), \\ V_r(t, x, h) &= V_r(t, x, h) - \bar{V}_r(h). \end{aligned}$$

Колебания скорости  $V_b(t, x, h)$  и  $V_r(t, x, h)$  были исправлены за смещения, обусловленные движением Земли относительно Солнца, учитывая то обстоятельство, что усредненные по пространству величины  $V_b$  и  $V_r$  не должны зависеть от времени.

Флуктуации параметров  $I$  и  $V$  обусловлены в основном конвективными и волновыми движениями. Под конвективными мы понимаем индивидуальные движения гранул и межгранул. Гранулами мы называем такие образования в солнечной фотосфере, контраст которых в континууме выше среднего, а межгранулами — ниже среднего. Заметим, что понятие гранула и межгранула имеет смысл лишь на уровне образования континуума. На всех других высотах такие определения теряют смысл.

Чтобы разделить грануляционную и волновую составляющие полей интенсивности и скорости, мы построили диагностическую  $k$ - $k$ -диаграмму, т. е. зависимость мощности вариаций  $I$  и  $V$  от временной частоты  $\omega$  и пространственной частоты  $k$ . В соответствии с диаграммой мы ограничили волновые движения временными частотами в диапазоне  $\omega = 1.8 \dots 5.7$  мГц, а конвективные  $< 2.2$  мГц. По пространственной частоте волновые движения от конвективных были отделены при  $k = 0.18$  Мм<sup>-1</sup>. Для этой цели были использованы соответствующие высоко- и низкочастотные фильтры. Более подробно процедура разделения полей интенсивности и скорости на волновую и конвективную составляющие приведена в наших предыдущих работах [12, 15—17]. В дальнейшем все исследования мы будем проводить лишь с конвективной составляющей полей интенсивности и скорости. Условно мы приняли движения, направленные к наблюдателю, за положительные.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Чтобы конвективные движения, полученные из контуров спектральных линий на разных остаточных интенсивностях, отнести к определенным высотам в атмосфере Солнца, необходимо вычислить теоретические контуры исследуемых линий. Для этой цели мы воспользовались программой NATAJA [21], любезно предоставленной нам Н. Щукиной. Атомная модель железа, учитывающая и тонкую структуру термов, включает около 250 уровней, которые взаимосвязаны почти 500 переходами в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Детальное описание диаграммы термов железа Fe I + Fe II можно найти в работе Н. Щукиной и Х. Трухильо Буэно [5]. Численный код NATAJA базируется на уравнениях, которые приведены в работе Г. Сокас-Наварро и Х. Трухильо Буэно [23] и основан на эффективных итеративных численных методах решения уравнений многоуровневого переноса в многомерных средах.

В качестве модели атмосферы Солнца мы выбрали тримерную модель Асплунда и др. [6], которая прекрасно себя зарекомендовала и в наших предыдущих исследованиях. К сожалению, мы располагали данными лишь для одного момента времени с пространственными размерами 6000 × 6000 км в горизонтальном направлении и 3800 км по глубине. Пространственное разрешение составляло 120 км. Этот параллелепипед мы превратили в 2500 (6000/120 × 6000/120) одномерных гранульно-межгранульных моделей атмосферы Солнца. Для каждой модели мы рассчитали контуры двух исследуемых нами спектральных линий нейтрального и ионизованного железа.

Таким образом, для каждой спектральной линии мы имели по 2500 теоретических контуров. Предварительно результаты теоретических вычислений контуров исследуемых спектральных линий были подвержены искусственному «дрожанию» с параметром 0.3. Такому качеству наших наблюдений соответствуют лучшие изображения спектра на ПЗС-матрице. Средние высоты образования 11 уровней спектральных линий нейтрального Fe I 639.361 нм и ионизованного Fe II 523.418 нм железа, на которых находились флуктуации интенсивности и скорости приведены в таблице. На рис. 1 мы показываем изменения контраста  $I/I$  и скорости  $V$  вдоль поверхности Солнца на разных высотах в атмосфере Солнца. Хотим обратить внимание на изменение знака контраста и знака скорости (направления движения) с высотой в атмосфере Солнца.

Перейдем к более подробному исследованию характера движений конвективных элементов на всех доступных нам высотах ( $H = 0 \dots 500$  км) в солнечной атмосфере. На рис. 2, а мы приводим долю  $f$  «горячих» конвективных элементов (т. е. тех, температура (контраст) которых выше средней на данной конкретной высоте), движущихся вверх (звездочки) и долю «горячих» элементов, которые опускаются вниз (точки). Даже на уровне образования континуума ( $H = 0$  км) доля



**Полуширины спектральных линий и соответствующие им средние высоты в атмосфере Солнца, на которых измерялись интенсивности и скорости в гранулах и межгранулах на протяжении всего времени наблюдений**

$W(523.462)$ , пм	$H$ , км	$W(639.361)$ , пм	$H$ , км
20	-25	20	5
15	-23	14	20
9.3	-8	9.5	70
7.2	20	7.2	130
6.1	45	6.0	190
5.5	60	5.5	210
4.9	80	4.9	250
4.2	120	4.0	320
3.3	180	3.0	390
1.9	290	1.5	470
1.0	340	0.25	490

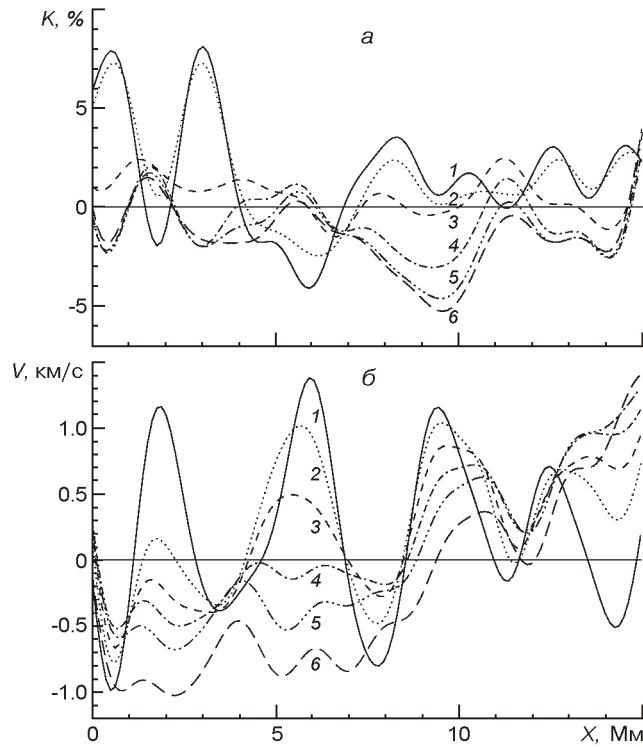


Рис. 1. Изменения контраста  $I/I$  (а) и скорости  $V$  (б) вдоль поверхности на разных высотах в атмосфере Солнца. Цифры 1—6 соответствуют высотам в атмосфере Солнца  $H = 20, 90, 180, 320, 420, 490$  км

поднимающегося горячего вещества не превышает 37 % (при максимально возможной 50 %), и не остается неизменной на разных высотах, как можно было бы ожидать из общих соображений, а с увеличением высоты сначала уменьшается почти до 10 %, достигая минимума при  $H = 300$  км, а затем снова увеличивается до 20 % на

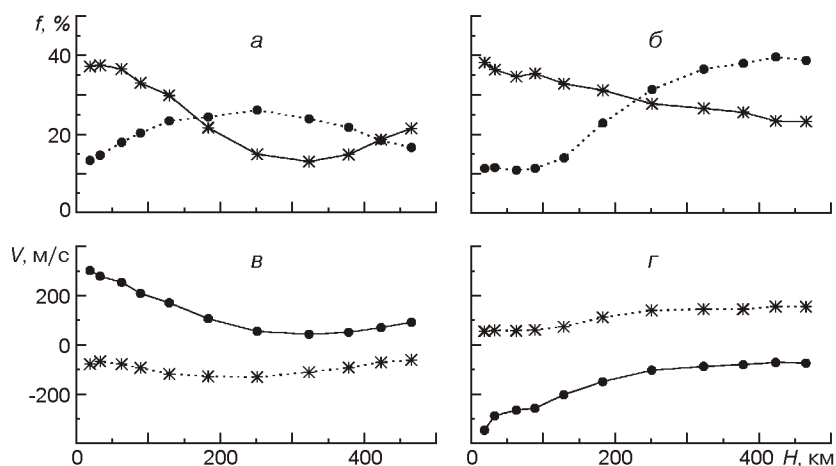


Рис. 2: а, в — доля  $f$  и скорость  $V$  «горячих» конвективных элементов, движущихся вверх (сплошная линия) и вниз (пунктир), на разных высотах  $H$  в атмосфере Солнца; б, г — доля  $f$  и скорость  $V$  «холодных» конвективных элементов, движущихся вниз (сплошная линия) и вверх (пунктир), в зависимости от высоты  $H$  в атмосфере Солнца

высоте  $H = 500$  км. Поведение горячего опускающегося вещества — прямо противоположное: с увеличением высоты доля конвективных элементов постепенно увеличивается с 15 до 25 %, а затем плавно уменьшается до 15 %. Максимальное значение приходится на  $H$

250 км. Отметим любопытную, на наш взгляд, особенность: в довольно большом диапазоне высот ( $H = 150...400$  км), доля опускающегося горячего вещества большая, чем поднимающегося.

На рис. 2, б мы анализируем поведение относительно холодного вещества. Звездочки показывают долю опускающегося холодного вещества, а точки — поднимающегося. Отметим, как и в случае с горячим веществом, на высотах  $H > 250$  км количество холодных поднимающихся конвективных элементов превышает число холодных, движущихся вниз.

На рис. 2, в и г приведены скорости горячего и холодного вещества, движущегося вверх и вниз. Как и следовало ожидать, скорости горячих поднимающихся конвективных элементов и холодных опускающихся (сплошная линия), с высотой в атмосфере Солнца уменьшаются. Скорости горячего опускающегося вещества и холодного поднимающегося (пунктир) существенно меньше и почти не зависят от высоты.

До сих пор мы рассматривали характер движения конвективных элементов в рамках четырехколончатой модели: относительно горячие и холодные конвективные элементы могли двигаться как вверх, так и вниз. По-видимому, реальная картина наблюдаемых движений в солнечной атмосфере может быть намного сложнее. Мы предположили, что на верхней границе рассматриваемой нами области, т. е. на высоте  $H = 500$  км конвективный элемент может или сохранить знак



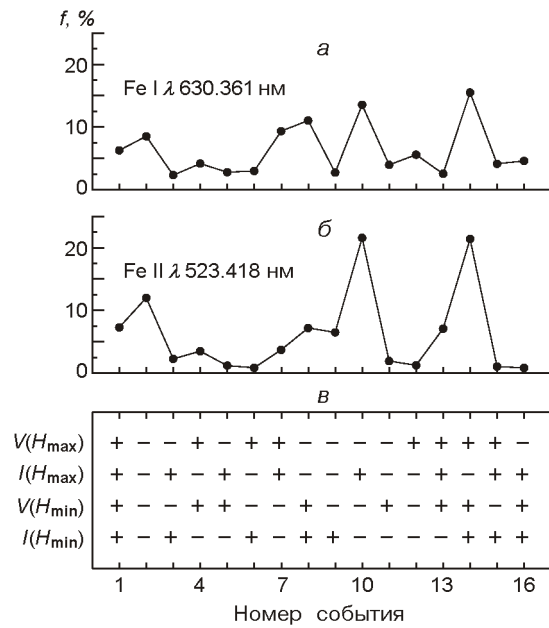


Рис. 3: а, б — доля  $f$  случаев, соответствующих разным типам конвективных движений вещества в атмосфере Солнца между высотами  $H = 0$  и 500 км по данным измерений линий Fe I  $\lambda$  630.361 нм и Fe II  $\lambda$  523.418 нм. Шестнадцать типов конвективных движений показаны на фрагменте в. Знак плюс относится к «горячему» и поднимающемуся веществу, знак минус — к «холодному» и опускающемуся

своего контраста и направление скорости, какими он обладал вблизи континуума (т. е. на высоте  $H = 0$  км), или поменять на противоположные. В этом случае есть 16 комбинаций конвективных движений. Схематически они показаны на рис. 3, в. Знаком плюс мы обозначили вещество, которое движется вверх, а также вещество, контраст (температура) которого на данной высоте выше среднего. Соответственно знак минус относится к опускающимся конвективным образованиям, а также к образованиям с относительным контрастом (температурой) ниже среднего. Оказалось, что все эти 16 типов конвективных движений действительно наблюдаются в солнечной фотосфере. На рис. 3, а для линии Fe I  $\lambda$  630.361 нм показана доля случаев в процентах, соответствующая каждому из 16 типов конвективных движений между высотами  $H = 0$  км и  $H = 500$  км. Число случаев изменяется от минимального значения 2.3 % (движения № 3 согласно нижней панели: опускающееся горячее вещество и вблизи континуума, и на высоте  $H = 500$  км) до максимального 15.5 % (движения № 14: движущееся вверх горячее вещество на  $H = 0$  км и движущееся вверх холодное вещество на максимальной высоте  $H = 500$  км). Чисто конвективному, классическому характеру движения (горячее вещество поднимается, а холодное опускается) следуют лишь  $6.3\% + 8.5\% = 14.8\%$  конвективных элементов (движения № 1 и № 2). Заметим, что эта доля может быть и меньшей, если в диапазоне высот  $H = 0...500$  км конвективные элементы успеют несколько раз изменить знак контраста или направление скорости. В противоположность этим движениям, в 6.5 % случаях относительно холодное вещество движется вверх, а относительно горячее — опускается вниз (движения № 3 и № 4). Остальные 78.7 % конвективных элементов в

диапазоне высот  $H = 0...500$  км успевают изменить знак контраста (34.3 %; №№ 9, 10, 13, 14), направление движения (18.3 %; №№ 11, 12, 15, 16) или одновременно и знак контраста, и направление движения (26.1 %; №№ 5, 6, 7, 8).

На рис. 3, б аналогичные результаты приведены для линии Fe II 523.418 нм. Мы не будем подробно комментировать эти зависимости, поскольку они очень похожи на те, которые показаны на рис. 3, а. Небольшие отличия объясняются разным диапазоном высот, в пределах которых образуются исследуемые линии:  $H = 0...500$  км для линии Fe I 639.361 нм и  $H = 0...340$  км для линии Fe II 523.418 нм. Отметим только, что для линии Fe II 523.418 нм, как и следовало ожидать, доля «правильно» движущихся конвективных элементов увеличилась почти до 20 % против 15 % для линии Fe I 639.361 нм, а количество случаев изменения знака контраста и (или) направления скорости движения уменьшилось с 79 до 75 % соответственно.

Представляет значительный интерес определить высоты, на которых происходит изменение направления движения (знака скорости), а также знака контраста конвективных образований. Отметим, что изменение знака скорости конвективных движений, насколько нам известно, раньше не изучалось, за исключением нашей работы [17].

Предварительные исследования показали, что разброс высот, на которых происходит изменение направления движения чрезвычайно большой, от 50 до 450 км. Оказалось, что причиной такого разброса не могут быть случайные или систематические погрешности, а только индивидуальные особенности конвективных вихрей: контраста и скорости. На рис. 4, а видно, что высота, на которой происходит изменение направления движения очень сильно зависит от скорости кон-

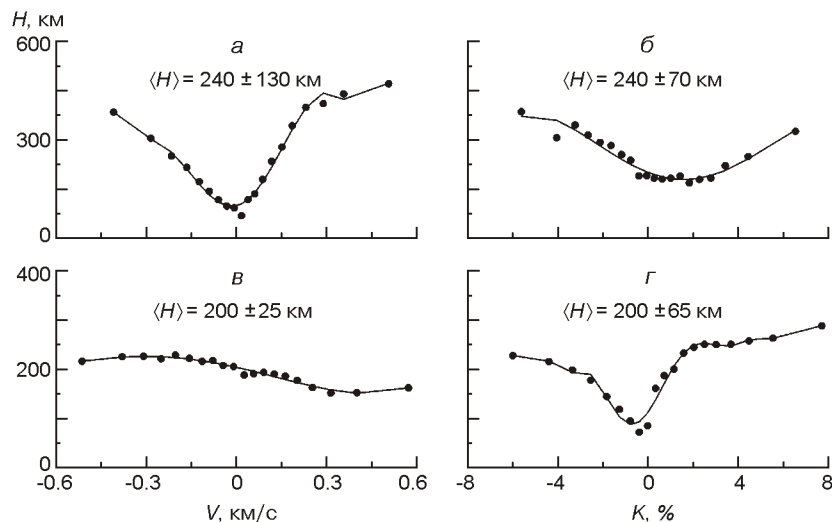


Рис. 4. Высоты, на которых происходит изменение направления скорости движения в зависимости от скорости в континууме (а) и контраста в континууме (б), а также высоты, на которых происходит изменение знака контраста в зависимости от скорости в континууме (в) и контраста в континууме (г). (Линия нейтрального железа Fe I 639.361 нм)

вективных элементов вблизи континуума: чем больше по абсолютной величине эта скорость, тем выше в атмосфере Солнца происходит изменение направления движения. Такая взаимосвязь нам кажется естественной. В среднем перемена направления движения происходит на  $H = 240 \pm 130$  км.

Зависимость высоты перемены направления движения над гранулами и межгранулами показана на рис. 4, б (напомним, что понятия гранулы и межгранулы мы применяем исключительно лишь на уровне образования континуума). Кроме ожидаемого увеличения высоты с увеличением контраста как гранул так и межгранул, отметим слегка асимметричный характер этой зависимости: минимальная высота, на которой происходит изменение знака контраста, приходится не на образования с нулевым контрастом, как следовало ожидать из общих соображений, а слегка сдвинута в сторону гранул.

На рис. 4, в показаны высоты в атмосфере Солнца, на которых происходит изменение знака контраста конвективных образований в зависимости от их скорости на уровне образования континуума. На наш взгляд, зависимость довольно странная: эта высота почти не зависит от скорости конвективных элементов, которые на уровне образования континуума движутся вверх и незначительно уменьшается с увеличением скорости конвективных элементов, которые на уровне образования континуума опускаются. На рис. 4, г высота изменения знака контраста представлена в зависимости от контраста гранул и межгранул. Кроме вполне естественного увеличения высоты с увеличением контраста как гранул, так и межгранул, отметим, что над гранулами перемена знака контраста происходит приблизительно в два раза чаще, чем над межгранулами. В среднем перемена знака контраста происходит на высоте  $H = 200 \pm 65$  км, что несколько ниже, чем смена направления движения ( $H = 240 \pm 130$  км), хотя и в пределах среднего отклонения.

На рис. 5 мы приводим результаты исследования, которые выполнены по линии Fe II 523.418 нм. В общем они подтверждают зависимости, полученные по линии Fe I 639.361 нм. Отметим только, что средние высоты изменения направления движения и знака контраста, найденные по линии Fe II 523.418 нм, на 20—80 км меньше, чем по линии Fe I 639.361 нм. Это вполне объяснимо, поскольку и диапазон высот, в пределах которых образуется линия Fe II 523.418 нм, меньший, чем для линии Fe I 639.361 нм.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наши исследования показали, что в солнечной фотосфере, по крайней мере начиная с  $H = 50$  км, происходит нарушение классической картины конвекции. Конвективные элементы в процессе своего движения как вверх, так и вниз изменяют не только знак контраста, но и направ-

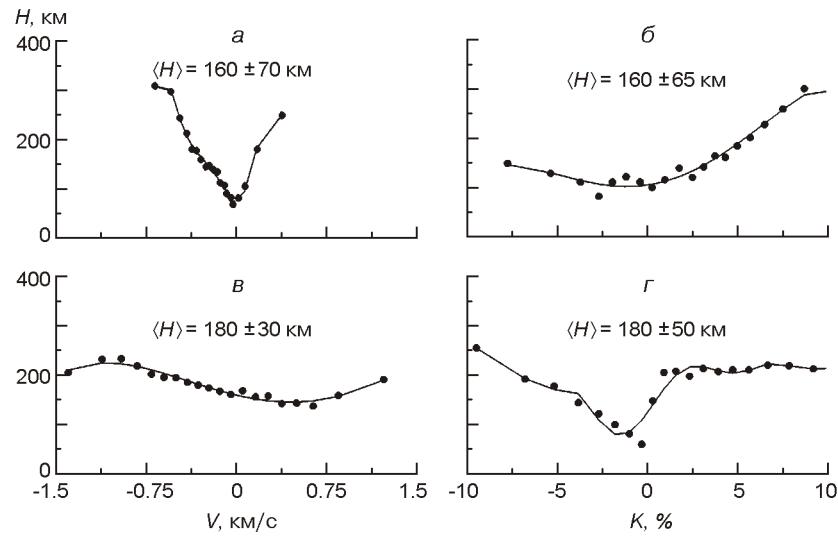


Рис. 5. Высоты, на которых происходит изменение направления скорости движения в зависимости от скорости в континууме (а) и контраста в континууме (б), а также высоты, на которых происходит изменение знака контраста в зависимости от скорости в континууме (в) и контраста в континууме (г). (Линия ионизованного железа Fe II 523.418 нм)

ление движения. Нередко имеют место одновременно оба случая. Этот процесс происходит вплоть до высоты  $H = 500$  км. Высота, на которой происходит изменение знака контраста, сильно зависит от контраста и почти не зависит от скорости, которые имели гранулы и межгранулы вблизи континуума. Следует отметить, что впервые на изменение знака контраста в солнечной атмосфере, по-видимому, указали Эванс и Каталано [9], а также Холвегер и Книир [10].

М. И. Стодилка и др. [1—4] приходят к выводу, что область температурной инверсии простирается от  $H = 150$  км до температурного минимума ( $H = 500$  км). При этом наблюдается тенденция: чем больше гранула, тем в более высоких слоях происходит инверсия температуры. Согласно работе [19] инверсия температуры имеет место для образований больше 1.5 на высотах  $H > 200$  км. Эти выводы подтверждаются и нашими результатами. С другой стороны, согласно работе [3] инверсия температуры чаще происходит над межгранулами, а согласно нашим результатам инверсия контраста происходит почти равновероятно над гранулами и межгранулами (см. рис. 4 и 5).

Большой разброс полученных в разных исследованиях значений средних высот, на которых происходит инверсия температуры (контраста) (60—350 км), обусловлен не столько различиями методик обработки наблюдений и способов вычислений геометрических высот образования используемых линий, как это справедливо отмечено в работе [18], сколько на наш взгляд, различием центральных глубин (высот образования) линий, которые использовались при наблюдениях. В этом нас убедили результаты, которые мы приводим на

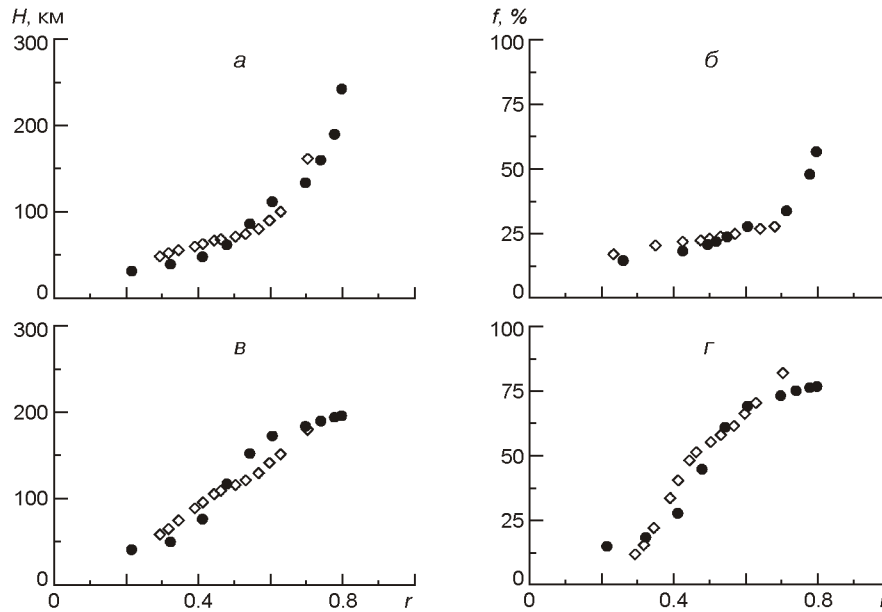


Рис. 6: а, б — средние высоты  $H$ , на которых происходит изменение знака скорости, и доля  $f$  случаев изменения знака скорости в зависимости от глубин  $r$  линий; в, г — средние высоты  $H$ , на которых происходит изменение знака контраста, и доля  $f$  случаев изменения знака контраста в зависимости от глубин  $r$  линий. Точки относятся к линии Fe I 639.361 нм, ромбы — к линии Fe II 523.418 нм

рис. 6, в. Здесь по вертикальной оси отложены средние высоты, на которых происходит изменение знака контраста, а по горизонтальной оси — диапазон глубин линий на которых измерялись интенсивности и скорости линий Fe I 639.361 нм (кружки) и Fe II 523.418 нм (ромбы). Видно, что чем больше глубина линии, тем шире диапазон высот (от 0 км до высоты образования конкретной точки на контуре линии) и тем большую среднюю высоту изменения знака контраста мы получим. А поскольку в разных исследованиях использовались линии с разной центральной глубиной, то и должны получаться разные значения средней высоты смены знака контраста в солнечной атмосфере. Отметим хорошее согласие результатов, полученных по разным спектральным линиям. На рис. 6, г показана доля от общего количества конвективных элементов, которые изменяют свой знак контраста в зависимости от интервала высот, где происходит это изменение. Естественно, чем шире интервал высот, тем больше конвективных элементов успевают изменить знак своего контраста. В интервале высот  $H = 0...500$  км около 75 % конвективных элементов изменяют знак своего контраста.

В солнечной атмосфере происходит не только изменение знака контраста конвективных элементов, но и изменение направления движения. Как и в предыдущем случае, чем шире диапазон исследуемых высот, тем выше происходит инверсия направления скорости (рис. 6, а), и тем больше конвективных элементов изменяют направ-

ление своего движения (рис. 6, б). В диапазоне высот  $H = 0...500$  км уже 60 % конвективных элементов успевают изменить направление своего движения на противоположное. Насколько нам известно, ранее эта особенность движения конвективных элементов не исследовалась.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подробный анализ результатов спектральных наблюдений двух линий железа, образующихся в нижней и средней фотосфере Солнца показал, что в диапазоне исследуемых высот  $H = 0...500$  км более половины конвективных элементов при своем движении как вверх, так и вниз изменяют знак контраста и направление своего движения. Высота, на которой происходит такая инверсия, сильно зависит от скорости и контраста конвективных элементов, которые они имеют на уровне образования непрерывного спектра ( $H = 0$  км).

1. *Стодилка М. И.* Температурная структура реальной солнечной грануляции // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—**19**, № 5.—С. 407—416.
2. *Стодилка М. И.* Структура конвективных движений в фотосфере Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—**22**, № 4.—С. 260—270.
3. *Стодилка М. И., Баран О. А., Малинич С. З.* Особенности конвекции в фотосфере Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—**22**, № 3.—С. 173—182.
4. *Стодилка М. И., Баран О. А.* Структура фотосферной конвекции Солнца на субгрануляционных масштабах // Кинематика и физика небес. тел.—2008.—**24**, № 2.—С. 99—109.
5. *Щукина Н. Г., Трухильо Буэно Х.* Линии Fe I в спектрах холодных звезд: не-ЛТР эффекты в атмосфере солнечного типа // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—**14**, № 4.—С. 315—329.
6. *Asplund M., Nordlund C., Trampedach R., et al.* Line formation in solar granulation. I. Fe line shapes, shifts and asymmetries // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**359**, N 2.—P. 729—742.
7. *Bendlin C., Volkmer R.* Results from two-dimensional spectroscopic observations of solar granulation with a Fabry-Perot interferometer // *Astron. and Astrophys.*—1993.—**278**, N 2.—P. 601—606.
8. *Espagnet O., Muller R., Roudier T., et al.* Penetration of the solar granulation into the photosphere: Height dependence of intensity and velocity fluctuations // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—**109**, N 1.—P. 79—108.
9. *Evans J. W., Catalano C. P.* Observed oddities in the lines H, K, b and H beta // *Solar Phys.*—1972.—**27**, N 2.—P. 299—302.
10. *Holweger H., Kneer F.* Spatially resolved spectra of solar granules // *Solar and Stellar Granulation: Proceedings of the 3rd International Workshop of the Astronomical Observatory of Capodimonte and the NATO Advanced Research Workshop on Solar and Stellar Granulation / Ed. by Robert J. Rutten and Giuseppe Severino.* — Dordrecht: Kluwer, 1989.—**263**.—P. 173.—(NATO Advanced Science Institutes Series C).
11. *Janssen K., Gauzzi G.* Dynamics of the solar photosphere with IBIS. I. Reversed intensity structure in the mid-photosphere // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**450**, N 1.—P. 365—374.



12. *Khomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G.* Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**369**, N 2.—P. 660—671.
13. *Kiselman D.* High-spatial-resolution solar observations of spectral lines used for abundance analysis // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1994.—**104**.—P. 23—77.
14. *Kneer F. J., Mattig W., Nesis A., Werner W.* Coherence analysis of granular intensity // *Solar Phys.*—1980.—**68**, N 1.—P. 31—39.
15. *Kostyk R. I., Shchukina N. G.* Local 5-min oscillations above solar granules and intergranular space // *Astron. Lett.*—1999.—**25**, N 10.—P. 678—687.
16. *Kostyk R. I., Khomenko E. V.* The effect of acoustic waves on spectral-line profiles in the solar atmosphere: Observations and theory // *Astron. Reports.*—2002.—**46**, N 12.—P. 925—931.
17. *Kostyk R. I., Shchukina N. G.* Fine structure of convective motions in the solar photosphere: Observations and theory // *Astron. Reports.*—2004.—**48**, N 9.—P. 769—780.
18. *Puschmann K., Vazquez M., Bonet J. A., et al.* Time series of high resolution photospheric spectra in a quiet region of the Sun. I. Analysis of global and spatial variations of line parameters // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**408**, N 1.—P. 363—378.
19. *Puschmann K. G., Ruiz Cobo B., Vazquez M., et al.* Time series of high resolution photospheric spectra in a quiet region of the Sun. II. Analysis of the variation of physical quantities of granular structures // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**441**, N 3.—P. 1157—1169.
20. *Salucci G., Bertello L., Cavallini F., et al.* The height dependence of intensity and velocity structures in the solar photosphere // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**285**, N 1.—P. 322—332.
21. *Shchukina N., Trujillo Bueno J.* The iron line formation problem in three-dimensional hydrodynamic models of solar-like photospheres // *Astrophys. J.*—2001.—**550**, N 2.—P. 970—990.
22. *Schroeter E. H., Soltan D., Wiehr E.* The German solar telescopes at the Observatorio del Teide // *Vistas in Astron.*—1985.—**28**, N 3.—P. 519—525.
23. *Socas-Navarro H., Trujillo Bueno J.* Linearization versus preconditioning: Which approach is best for solving multilevel transfer problems? // *Astrophys. J.*—1997.—**490**, N 2.—P. 383—392.
24. *Stebbins R., Goode P. R.* Waves in the solar photosphere // *Solar Phys.*—1987.—**110**, N 2.—P. 237—253.

Поступила в редакцию 24.04.09