

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. II

В рамках тримерной гидродинамической модели солнечной атмосферы мы рассчитали профили линий Fe I 639.361 нм и Fe II 523.462 нм, принимая во внимание отклонения от локального термодинамического равновесия. Мы определили высоты, на которых происходит изменение знака контраста, а также изменение направления движения конвективных элементов. Эти высоты сильно зависят от контраста и скорости конвективных элементов на уровне образования континуума. Чем больше эти величины, тем выше в атмосфере Солнца происходит изменение знака контраста и направления движения. Полученные результаты мы сравнили с данными наблюдений, которые были получены на германском вакуумном башенном телескопе (о. Тенерифе, Испания). Используемая нами 3D-гидродинамическая модель вполне удовлетворительно описывает основные наблюдательные данные о скорости и интенсивности конвективных элементов.

ОСОБЛИВОСТІ КОНВЕКТИВНИХ РУХІВ В ВЕРХНІЙ ФОТОСФЕРІ СОНЦЯ. II, Костик Р. І. — В рамках тривимірної гідродинамічної моделі сонячної атмосфери ми розраховували контури ліній Fe I 639.361 нм і Fe II 523.462 нм, приймаючи до уваги відхилення від локальної термодинамічної рівноваги. Ми знайшли висоти, на яких відбувається зміна знаку контраста, а також зміна напрямку руху конвективних елементів. Ці висоти сильно залежать від контрасту та швидкості конвективних елементів на рівні утворення континууму. Що більші ці величини, то вище в атмосфері Сонця відбувається зміна знаку контрасту та напрямку руху. Отримані результати ми порівняли зі спостережними, які були отримані на німецькому вакуумному баштовому телескопі (о. Тенерифе, Іспанія). На наш погляд, 3D-гідродинамічна модель, яку ми використовували, задовільно

описує основні спостережені дані про швидкість та інтенсивність конвективних утворень.

SOME PROPERTIES OF CONVECTIVE MOTIONS IN THE UPPER SOLAR ATMOSPHERE. II, by Kostik R. I. — Using the three-dimensional hydrodynamical model of the solar atmosphere, we calculated profiles of the Fe I 639.361 nm and Fe II 523.462 nm lines with consideration for deviations from the local thermodynamic equilibrium. We determined heights for intensity contrast reversal and for velocity sign reversal of convective elements. Both of these parameters depend strongly on the convective velocity and intensity measured in the continuum. The larger are the parameters, the greater is the atmosphere altitude where the reversal takes place. We compared all the calculated relations with the observations obtained at the German Vacuum Tower Telescope in Izana (Tenerife, Spain). In our opinion, 3D hydrodynamical model of the solar atmosphere describes satisfactorily all the main features of observed convective velocities and intensities.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее в работе [1] по данным наблюдений линий нейтрального и ионизованного железа (Fe I 639.361 нм, Fe II 523.418 нм) в фотосфере Солнца мы исследовали конвективные поля интенсивностей и скоростей от уровня образования континуума до температурного минимума. Было показано, что конвективные элементы в процессе своего движения вверх или 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, которые они имели на уровне образования непрерывного спектра. Полученные ранее результаты мы сравниваем с результатами математического моделирования контуров спектральных линий, вычисленных с использованием трехмерной модели атмосферы Солнца.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЖЕЛЕЗА

В качестве модели атмосферы Солнца мы выбрали трехмерную модель Асплунда и др. [3], которая прекрасно себя зарекомендовала и в наших предыдущих исследованиях. К сожалению, мы располагали лишь данными для одного момента времени для квадратной области размерами 6000 6000 км по горизонтали и 3800 км по глубине. Пространственное разрешение составляло 120 км, вследствие чего мы смогли рассмотреть 2500 (6000/120 6000/120) одномерных гранульно-межгранульных моделей атмосферы Солнца. Для каждой модели

мы рассчитали контуры спектральных линий Fe I и Fe II. Для этой цели мы воспользовались программой NATAJA [4], 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 [2]. Численный код NATAJA базируется на уравнениях, которые приведены в работе [5] и основан на эффективных итеративных численных методах решения уравнений многоуровневого переноса в многомерных средах.

Таким образом, для спектральных линий Fe I 639.361 нм и Fe II 639.361 нм мы имели по $x = 2500$ теоретических контуров. Аналогично наблюдениям, с помощью метода «лямбда-метр» [6], на $h = 11$ уровнях каждой спектральной линии мы определили флуктуации интенсивности $I(x, h)$ и скорости в коротковолновом ($V_b(x, h)$) и длинноволновом ($V_r(x, h)$) крыльях. Эти же величины $\bar{I}(h)$, $\bar{U}_b(h)$, $\bar{U}_r(h)$ были найдены и для усредненного по пространству $x = 1...1024$ контуров линий железа. Затем мы нашли флуктуации интенсивности и скорости в коротковолновом и длинноволновом крыльях исследуемой линии согласно выражениям

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

Здесь движения, направленные к наблюдателю, условно считаются положительными.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ С МОДЕЛЬНЫМИ ВЫЧИСЛЕНИЯМИ

Перед анализом результатов вычислений, полезно сравнить модельные конвективные скорости и восстановленные из теоретических контуров линий: это проверка всех наших вычислений, а также тестирование метода «лямбда-метр».

На рис. 1 для линии нейтрального железа Fe I 639.361 нм показаны пространственные распределения исходных, модельных скоростей V , температур T и высот H образования линий (сплошные кривые) и величин V и I , восстановленных из теоретических контуров линий (пунктир), для двух значений ширин: $\Delta\lambda = 0.5$ пм ($a-e$) и $\Delta\lambda = 40$ пм ($z-e$). Для наглядности сравнения мы ограничились по пространству лишь 200 модельными точками. Видно, что при $\Delta\lambda = 0.5$ пм восстановленные скорости V даже в мелких деталях отслеживают исходные, заданные. Коэффициент корреляции между этими двумя последовательностями очень высок и равен 0.97. Диапазон изменения высоты

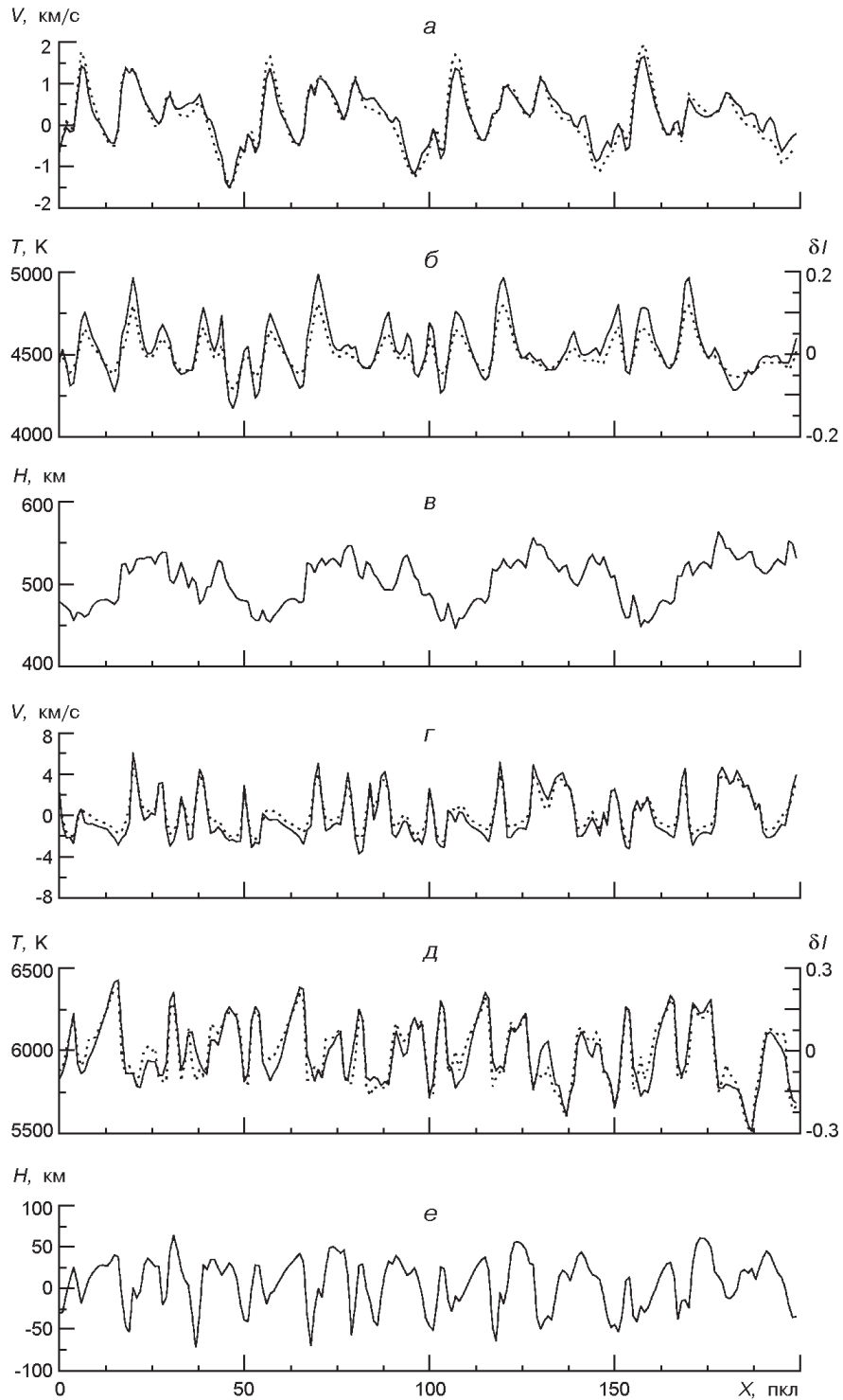


Рис. 1. Пространственные распределения исходных, модельных скоростей V , температур T и высот H образования линий (сплошные кривые) и величин V и I , восстановленных из теоретических контуров линии Fe I 639.361 нм (пунктиры): *a*, *б*, *в* — для центра линии ($\Delta\lambda = 0.5$ пм), *г*, *д*, *е* — для крыла линии ($\Delta\lambda = 40$ пм)

образования каждого из 200 контуров спектральной линии на ширине $\Delta\lambda = 0.5$ пм довольно большой: $H \approx 100$ км при среднем значении $H = 490$ км. Об этой особенности нужно помнить при построении зависимостей разных физических параметров солнечной атмосферы, извлекаемых их контуров спектральных линий, от геометрической высоты.

Для нас оказалось неожиданным, что колебания интенсивности I (пунктир), восстановленные из теоретических контуров спектральной линии Fe I $\lambda = 639.361$ нм на ширине $\Delta\lambda = 0.5$ пм, так же хорошо коррелируют с модельными значениями температуры T (сплошная линия) на высотах H , которые приведены на фрагменте в (коэффициент корреляции равен 0.98).

На фрагментах a — e приведены те же зависимости, что и на фрагментах a — e , но для $\Delta\lambda = 40$ пм, т. е. для крыла линии. Средняя высота образования этой точки контура линии равна $H = 5$ км, а диапазон изменения $H \approx 100$ км, как и для случая при $\Delta\lambda = 0.5$ пм. Соответствующие коэффициенты корреляции равны 0.98 и 0.93. На основании анализа данных, которые приведены на рис. 1, мы можем сделать заключение, что используемый нами метод «лямбда-метр» вполне пригоден для извлечения из контуров спектральных линий таких физических параметров атмосферы Солнца, как скорость и интенсивность. С другой стороны, нужно с осторожностью пользоваться понятием «средняя высота». Как видно из рис. 1, одному и тому же значению соответствует разброс значений высот в пределах 100 км, как вблизи центральной интенсивности, так и в крыле линии.

Высоты, на которых образуются остаточные интенсивности в «фиолетовом» и «красном» крыльях контура этой спектральной линии, могут различаться. На рис. 2 приведены разности H высот образования в «фиолетовом» и «красном» крыльях для разных значений ширины $\Delta\lambda$ от 0.5 до 40 пм. Вблизи центральной остаточной интенсивности при $\Delta\lambda = 0.5$ пм (фрагмент a) высоты образования «фиолетового» и «красного» крыльев линий практически совпадают. С увеличением $\Delta\lambda$ разности увеличиваются и для этой линии достигают наибольшего значения (почти 200 км) при $\Delta\lambda = 10$ пм (фрагмент b), т. е. на участке контура, где изменение интенсивности с длиной волны становится максимальным. В дальнейшем с увеличением ширины $\Delta\lambda$ эти разности уменьшаются. Характер изменения средней разности высот H в зависимости от ширины $\Delta\lambda$ видно из рис. 2, e . Таким образом, при интерпретации физических параметров, извлеченных из контуров спектральных линий методом «лямбда-метр», следует вычислять высоты отдельно для коротковолнового и отдельно для длинноволнового участков контура спектральной линии.

Сравним характер наблюдаемых в солнечной атмосфере движений конвективных элементов с модельными. Из рис. 3, a видно, что количество относительно горячих поднимающихся конвективных эле-

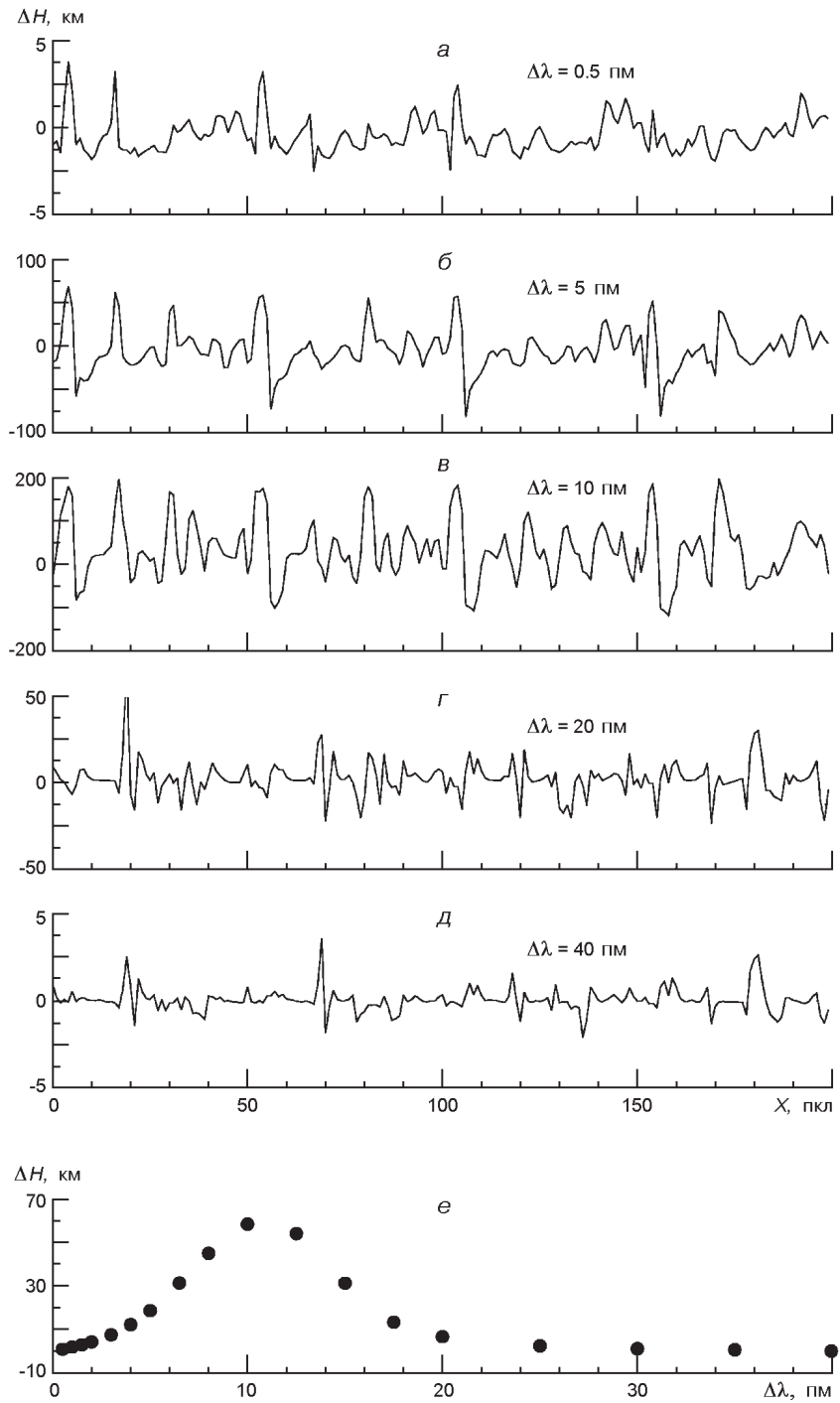


Рис. 2. Разности H высот образования в «фиолетовом» и «красном» крыльях линии нейтрального железа Fe I 639.361 нм для разных значений ширины от 0.5 до 40 пм (фрагменты а—д), е — зависимость средних значений этой разности от

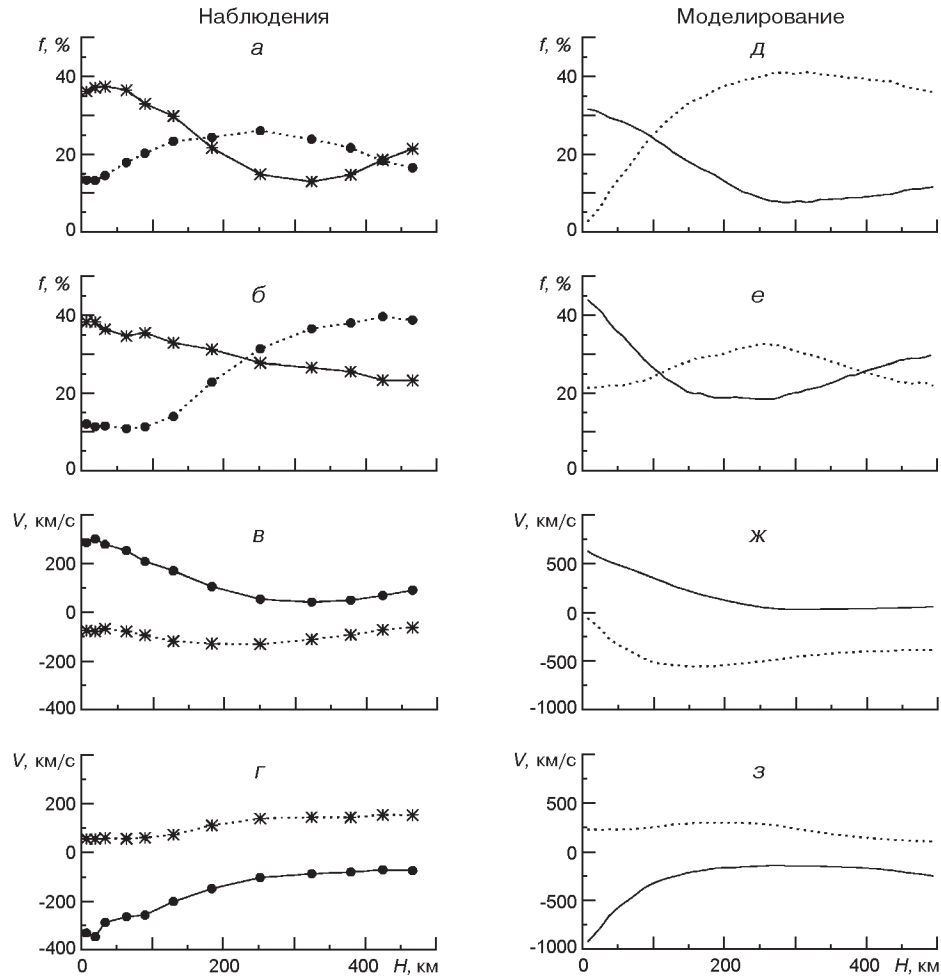
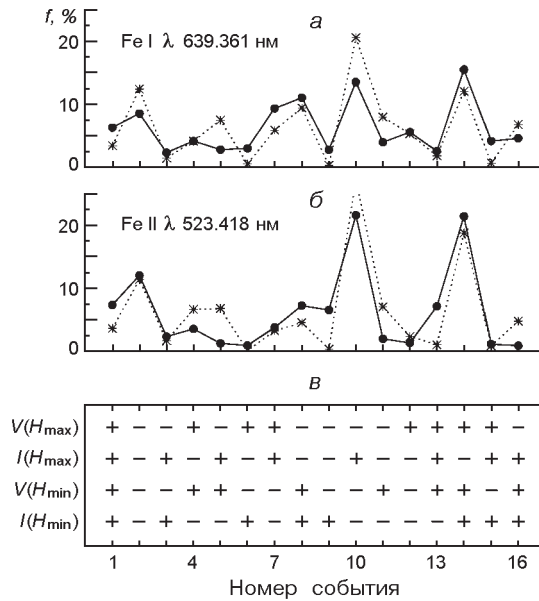


Рис. 3: *а* — наблюдаемая доля f «горячих» конвективных элементов, движущихся вверх (сплошная линия), и вниз (пунктир); *б* — доля опускающихся (сплошная линия) и поднимающихся (пунктир) «холодных» конвективных элементов; *в* — скорости «горячих» конвективных элементов, движущихся вверх (сплошная линия), и вниз (пунктир); *г* — скорости опускающихся (сплошная линия) и поднимающихся (пунктир) «холодных» конвективных элементов в зависимости от высоты в атмосфере Солнца; *д* — *з* — соответствующие теоретически вычисленные значения

ментов уменьшается с высотой в атмосфере Солнца, а опускающихся, наоборот, — увеличивается как в реальной солнечной атмосфере, так и в трехмерной модели. Хуже согласие на рис. 3, *б*: число наблюдаемых холодных конвективных элементов, которые движутся вниз и вверх, почти монотонно изменяется с высотой H , а соответствующие модельные образования обнаруживают экстремум на $H = 250$ км.

Как видно из рис. 3, *в*, *г*, скорости горячих поднимающихся конвективных элементов и «холодных» опускающихся (сплошные линии) с высотой в атмосфере Солнца уменьшаются. Скорости горячего опускающегося вещества и холодного поднимающегося (пунктиры) существенно меньше и почти не зависят от высоты. Такие закономер-

Рис. 4: *a*, *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 639.361 нм и Fe II 523.418 нм (пунктир — модельные значения). Шестнадцать типов конвективных движений показаны на фрагменте *в*. Знак плюс относится к «горячему» и поднимающемуся веществу, знак минус — к «холодному» и опускающемуся



ности обнаруживают и моделируемые, и наблюдаемые конвективные элементы.

Как было показано в нашей работе [1], конвективные элементы в процессе своего движения как вверх, так и вниз могут или сохранить знак своего контраста и направление движения, какими они обладали вблизи континуума, или поменять на противоположные. Если брать во внимание только самую нижнюю высоту ($H = 0$ км) и самую высокую ($H = 500$ км), то возможны 16 вариантов конвективных движений (см. рис. 4, *в*). Знаком плюс мы обозначили вещество, которое движется вверх, а также вещество, контраст которого на данной высоте выше среднего. Соответственно знак минус относится к опускающимся конвективным образованиям, а также к образованиям с относительным контрастом ниже среднего. На рис. 4, *a* приведены результаты, полученные для линии Fe I 639.361 нм, а на средней — ионизованного железа Fe II 523.418 нм: сплошная линия — наблюдаемые величины, пунктир — модельные данные. Видно, что почти все особенности полей интенсивности и скорости, обнаруженные при наблюдениях, проявились и в трехмерной гидродинамической модели Асплунда и др. [3]. На наш взгляд, можно констатировать хорошее и качественное, и количественное согласие данных наблюдений с теоретическими вычислениями. Коэффициент корреляции между этими двумя кривыми равен 0.79 для линии Fe I 639.361 нм и 0.86 для линии Fe II 523.418 нм.

На рис. 5 (для линии Fe I 639.361 нм) и рис. 6 (для линии Fe II 523.418 нм) показаны высоты, на которых происходит изменение направления движения (знака скорости), а также знака контраста конвективных образований: на левых панелях результаты наблюдений, а

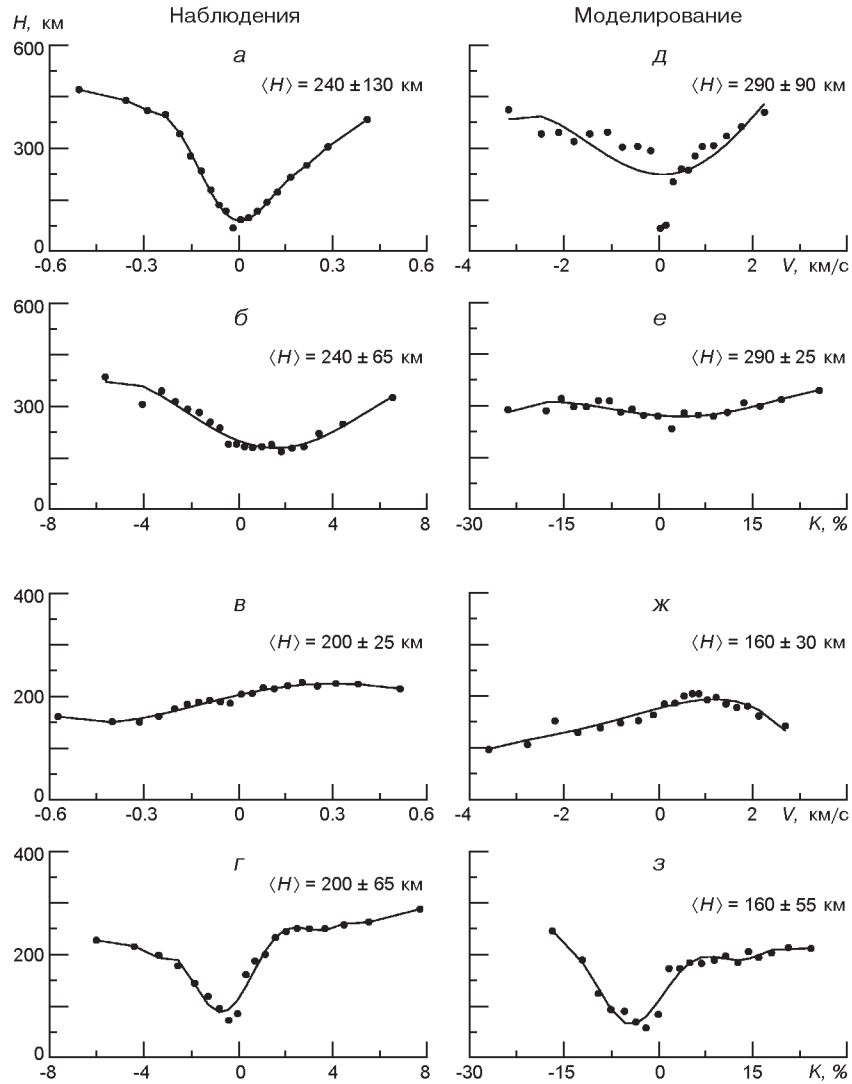


Рис. 5. Высоты, на которых происходит изменение направления скорости движения в зависимости от скорости в континууме (а) и контраста в континууме (б). Высоты, на которых происходит изменение знака контраста в зависимости от скорости в континууме (в) и контраста в континууме (г). Левая колонка — результаты наблюдений, правая — теоретические вычисления. (Линия нейтрального железа Fe I 639.361 нм)

на правых — результаты моделирования. Отметим наиболее важные особенности приведенных зависимостей. Средние высоты, на которых происходит изменение знака скорости, сильно зависят от скорости на высоте образования непрерывного спектра и в меньшей степени — от контраста на уровне образования континуума. С другой стороны, изменение знака контраста происходит тем выше в солнечной атмосфере, чем больше контраст гранулы или межгранулы на высоте $H = 0$ км и почти не зависит от скорости на $H = 0$ км. На наш взгляд,

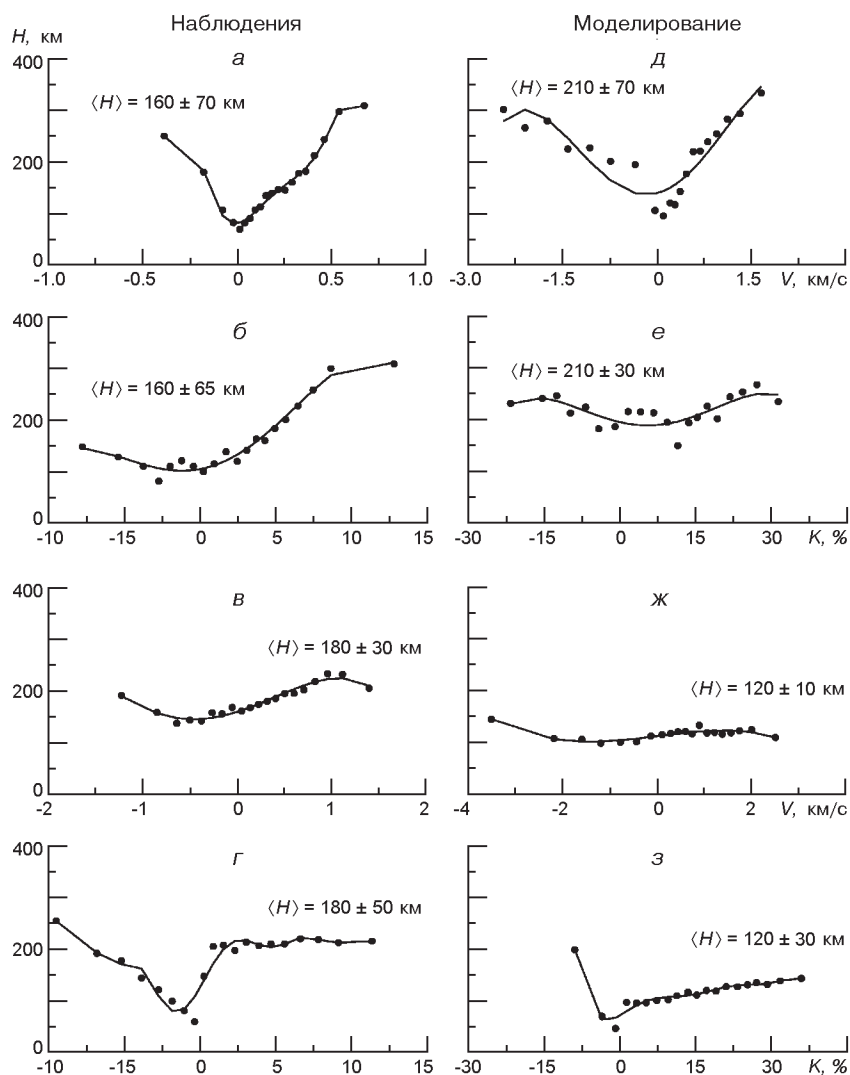


Рис. 6. То же, что и на рис.5, но для линии ионизованного железа Fe II 523.418 нм

совпадение наблюдаемых и модельных зависимостей — удовлетворительное. Наилучше совпадают зависимости, которые приведены на фрагментах *a* рис. 5 и *б* (зависимость высоты перемены направления движения от скорости в континууме) и на фрагментах *з* (зависимость высоты перемены знака контраста от контраста в континууме). Отметим также асимметричный характер этих кривых относительно нулевой точки как в наблюдениях, так и в теоретических вычислениях. В пределах среднего отклонения, как видно из рисунков, согласуются и средние высоты. На фрагментах *б* и *в* совпадения хуже, хотя и в теории, и в наблюдениях высоты, на которых происходит изменение знака контраста и направления движения, не очень сильно зависят от скорости и контраста в континууме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты математического моделирования с использованием 3D-модели атмосферы Солнца и в рамках НЛТР-приближения подтвердили наблюдательные данные об изменении знака контраста и направления движения конвективных элементов при их распространении в атмосфере Солнца. Удовлетворительно совпадают с наблюдениями также и средние высоты, на которых происходит эта инверсия контраста и скоростей. Почти все особенности конвективных полей интенсивности и скорости, обнаруженные при наблюдениях, проявляются и в трехмерной гидродинамической модели.

Автор благодарит Н. Г. Щукину за предоставленную программу NATAJA, с помощью которой были вычислены контуры линий.

1. Костык Р. И. Особенности конвективных движений в верхней фотосфере Солнца. I // Кинематика и физика небес. тел.—2010.—**26**, № 5.—С. 26—40.
2. 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.
3. Asplund M., Nordlund A, 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.
4. 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.
5. 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.
6. Stebbins R., Goode P. R. Waves in the solar photosphere // *Solar Phys.*—1987.—**110**, N 2.—P. 237—253.

Поступила в редакцию 12.01.10