

УДК 523.942-464

О СТРУКТУРЕ ПОЛЯ КОНВЕКТИВНЫХ СКОРОСТЕЙ В ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА

© 2010 г. А. В. Гетлинг¹, А. А. Бучнев²

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Учреждение Российской академии наук Институт вычислительной математики
и математической геофизики Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 25.09.2009 г.; принята в печать 19.10.2009 г.

Адаптирован для задач физики Солнца и реализован в вычислительной программе метод измерения горизонтальных скоростей в фотосфере, ранее применявшийся для обработки аэрокосмических снимков. От стандартной процедуры локального корреляционного трассирования он отличается специальным выбором пробных площадок (“эталонов”), смещение каждой из которых определяется по максимуму корреляции между ее исходным и всевозможными смещенными положениями. А именно, в некоторой окрестности каждого узла выбранной сетки в качестве эталона выбирается площадка, на которой достигает максимума либо контраст, либо энтропия распределения яркости. Полученные таким образом горизонтальные скорости интерполируются на положения воображаемых “пробных частиц” с помощью триангуляции Делоне и аффинных преобразований, определяемых деформацией полученных треугольников на рассматриваемом временном шаге. Движение пробных частиц представляется их траекториями. Отчетливо выявляется суперпозиция течений различных масштабов в диапазоне от мезогрануляционного до супергрануляционного. Замечены “большие мезогранулы” с размерами порядка 15 Мм. Во многих случаях они имеют звездчатую форму. Обнаружены участки сильной конвергенции горизонтальных течений, которая иногда сопровождается закрученностью. Найдены указания на возможное сосуществование конвективных ячеек с различными направлениями циркуляции вещества — так называемых l - и g -типов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдательные данные о явлениях в хромосфере и короне Солнца, в изобилии поступающие с космических станций, стимулируют активное внимание исследователей к этим явлениям. Работы в этих направлениях оттеснили на задний план изучение течений, непосредственно наблюдаемых (а не реконструируемых по гелиосейсмологическим данным) в фотосфере и подфотосферных слоях, где активные процессы протекают не так бурно, как в слоях вышележащих, и где динамика кажется относительно понятной и не требующей детальной расшифровки.

Между тем, магнитные поля, ответственные за весь комплекс активных явлений, зарождаются в плотных слоях Солнца, где течения играют важную роль в формировании магнитных полей. Структура этих полей в большой мере является отпечатком структуры течений, и ее понимание оказывается, таким образом, необходимым для понимания процессов солнечной активности.

Конвективные движения в упомянутых плотных слоях кажутся очень сложными и малоупорядоченными. Возможно, именно это обстоятельство отодвигает в тень вопрос об их морфологии. Тем не менее — и, в частности, это будет видно из рассматриваемого здесь материала — при использовании подходящих методов исследования структурная организация течений проявляет себя вполне четко и демонстрирует ряд примечательных свойств.

С явлением тепловой конвекции связывают четыре хорошо известных типа наблюдаемых на Солнце ячеек — гранулы, мезогранулы, супергранулы и гигантские ячейки. Их основные характеристики перечислены в таблице. Знак вопроса после значений скоростей, характерных для гранул, отмечает то обстоятельство, что в этих весьма подвижных и изменчивых образованиях трудно разделить скорости внутри гранул и скорости самих гранул. Гранулы переносятся течениями более крупных масштабов и поэтому могут служить трассерами для выявления структуры этих течений [1–4].

Это обстоятельство (и вообще перенос неоднородностей яркости течениями вещества) лежит в основе известного метода *локального корреляционного трассирования* (ЛКТ; в литературе на английском языке *local correlation tracking*, LCT) для определения скоростей перемещения деталей поля яркости [5]. Эти скорости в некотором приближении соответствуют скоростям течения вещества и могут быть использованы вместо последних при анализе фотосферной динамики (так приходится поступать из-за отсутствия метода прямого измерения скоростей, нормальных к лучу зрения, хотя, конечно же, движение яркостных неоднородностей и движение вещества — не одно и то же).

На наш взгляд, наиболее информативной формой представления полей скорости, полученных методом ЛКТ, являются картины движения воображаемых “*пробных частиц*” (*corks*), которые в начальный момент считаются равномерно распределенными по полю изображения и дальнейшее движение которых в каждый момент времени определяется найденными локальными значениями скорости.

Временные серии построенных таким образом карт распределения пробных частиц показывают, что сгущения этих частиц с течением времени очерчивают все более крупные ячейки [6]. Однако процесс укрупнения этих ячеек выглядит непрерывным, и использовать такие серии для изучения форм и характерных размеров реально существующих ячеек поля скоростей довольно трудно. Это в общих чертах понятно из следующих соображений. Частицы, достигая тех участков своих траекторий, где преобладает вертикальная компонента скорости течения (опускание), там накапливаются, поскольку могут двигаться только горизонтально. Чем крупнее масштаб течения, тем дольше оно существует и тем больше частиц накапливается в участках нисходящего движения, очерчивая контуры ячеек такого течения. Но прежде чем частицы достигнут этих участков, их сгущения могут возникать под действием нестационарных течений промежуточных масштабов. При этом также может возникать ячеечная картина, но прорисовывавшиеся в картине пробных частиц ячейки будут растягиваться течениями более крупного масштаба. Поэтому масштаб визуализированных ячеек будет непрерывно увеличиваться, и в нем все более заметными будут становиться течения больших масштабов. Разделение разномасштабных составляющих поля скоростей при таком методе анализа затруднительно.

Как мы увидим, гораздо лучше строить не карты расположения пробных частиц (т.е. мгновенные распределения этих частиц на горизонтальной

Основные характеристики ячеек поля скоростей на Солнце

Тип ячеек	Размер, Мм	Время жизни	Горизонтальные скорости в ячейке
Гранулы	0.25–2	8–15 мин	1–2 км/с (?)
Мезогранулы	5–10	2–10 ч	0.4–1 км/с
Супергранулы	20–30	≥1 сут	~500 м/с
Гигантские ячейки	сотни	≥100 сут	~4 м/с

плоскости¹), а карты их траекторий. При этом короткоживущие течения лишь создадут некоторое “дрожание” частиц и придадут извилистость их траекториям, тогда как по прошествии достаточно долгого времени конечные точки этих траекторий сконцентрируются и очертят образования, наиболее устойчивые на данном временном отрезке.

Метод ЛКТ — как в его традиционном виде, так и в усовершенствованном варианте, используемом нами — будет кратко описан в следующем разделе. Применяемая нами техника была первоначально разработана для нужд космической гидрометеорологии и использовалась для определения скоростей движения облачных масс и дрейфующих льдов [7], а затем была адаптирована для задач физики Солнца. Мы прослеживаем движение пробных частиц в поле скоростей, найденном из анализа серии изображений грануляции.

2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Идея метода ЛКТ состоит в следующем (рис. 1). На изображении солнечной поверхности выделяется площадка А. Затем берется изображение, полученное в следующий, близкий момент времени, и в некоторой окрестности исходного положения площадки просматриваются ее всевозможные сдвинутые положения. Для каждого из них вычисляется корреляция между распределениями яркости в исходной площадке на первом изображении и в сдвинутой площадке на втором изображении. На рисунке картина яркости в пределах исходной площадки условно показана в виде затушеванной детали — фигуры, ограниченной сплошной кривой. Предположим, что при некотором сдвинутом положении Б эта корреляция максимальна среди всех ее значений, найденных для различных сдвигов (на

¹ Строго говоря, здесь следует говорить о картинной плоскости. Однако для изучения горизонтальных течений нужно использовать изображения, полученные вблизи центра солнечного диска, поэтому мы не будем делать различия между картинной плоскостью и горизонтальной плоскостью на Солнце.

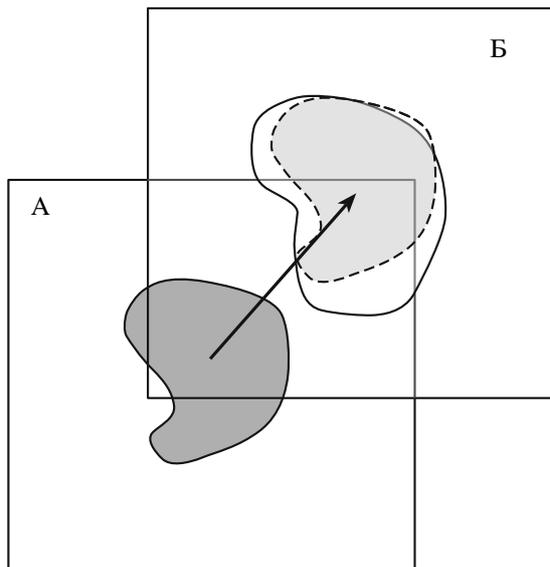


Рис. 1. Иллюстрация к принципу измерения скоростей методом локального корреляционного трассирования. Пояснения в тексте.

рисунке картина яркости на сдвинутой площадке представлена фигурой, ограниченной сплошной кривой, тогда как сдвинутая вместе с площадкой исходная фигура очерчена штриховой кривой; понятно, что чем меньше сдвинутая картина отличается от исходной, тем выше корреляция). В таком случае вектор сдвига площадки Б по отношению к площадке А (показанный жирной стрелкой), деленный на временной интервал между моментами получения двух изображений, принимается в качестве вектора локальной скорости.

Процедура, используемая нами, отличается от стандартной процедуры ЛКТ выбором пробных площадок (“эталонов”), используемых при вычислении корреляций. Если в стандартном методе эталоны привязываются к узлам специально заданной равномерной сетки, то в нашей работе выбор эталонов представляет собой отдельную задачу.

В качестве эталона мы выбираем квадратную площадку на изображении, в пределах которой яркость обладает “максимальной изменчивостью” по сравнению с соседними площадками. Поиск эталонов основан на методике, предложенной EUMETSAT [7]. При поиске эталонов, согласно этой методике, используются следующие параметры: размер ячейки квадратной сетки $Grid_Size$, размер $Targ_Search$ квадратной области с центром в узлах сетки для поиска эталонов, размер $Targ_Size$ эталона, минимальное расстояние $Targ_Dist$ между центрами эталонов (эталон могут частично перекрываться). Оптимальной позицией для эталона внутри области поиска считается та, в которой достигается максимум значения

управляющего параметра Par — контраста либо энтропии. При поиске эталонов внутри области размера $Targ_Search$ используются локальные средние значения яркости I , вычисленные для каждой точки в ее окрестности размером 3×3 пикселей, и локальные стандартные отклонения (в той же окрестности). Контраст определяется как разность

$$C = I_{\max} - I_{\min}, \quad (1)$$

где I_{\max} и I_{\min} — соответственно наибольшее и наименьшее локальные средние значения яркости на площадке. Энтропия равна

$$E = - \sum_i p_i \lg p_i, \quad (2)$$

где p_i — вероятность пикселя со значением² i ; суммирование ведется по всем пикселям площадки с различными значениями. Эта вероятность определяется как $p_i = S_i/S$, где S — площадь изображения (количество пикселей), а S_i — количество пикселей со значением i в изображении.

Кроме перечисленных геометрических параметров, при поиске эталонов используются еще следующие характеристики изменчивости изображения внутри области, покрываемой эталоном: Min_St_Dev — минимальное значение локального стандартного отклонения, Num_Gr_SD — минимальное количество пикселей со стандартным отклонением, превышающим Min_St_Dev . Смещение определяется для каждого из K_Targs найденных эталонов. Поиск новой позиции эталона производится внутри квадратной области размера $Search_Size$. Центр области поиска совпадает с исходной позицией эталона. Новой позицией эталона считается позиция, в которой достигается максимальное значение коэффициента взаимной корреляции $Corr$. В отличие от методики EUMETSAT [7], у нас в процессе сканирования области поиска эталон может подвергаться преобразованиям масштабирования и поворота. Среди всех полученных новых позиций могут быть отобраны позиции, удовлетворяющие пороговым условиям — минимально допустимое значение коэффициента корреляции и минимально допустимое смещение эталона для них задаются.

Благодаря использованию таких критериев выбора эталонов снижается вероятность учета случайно скоррелированных распределений яркости на таких площадках, где она меняется в небольших пределах и плавно. В конечном счете это повышает надежность определения локальных скоростей.

² Здесь и далее вместо значения яркости в пикселе мы для краткости пишем значение пикселя.

Для того, чтобы сравнивать между собой поля скорости, относящиеся к разным моментам, необходимо иметь для этих моментов значения скорости в одних и тех же точках, а чтобы строить траектории, нужно получать скорости в точках, где оканчиваются уже построенные участки траекторий. Наша же процедура дает значения скорости в точках, определяемых выбором эталонов, и точки эти свои для каждого момента. Поэтому, чтобы получить значения скорости в нужных точках, мы интерполируем на эти точки горизонтальные скорости, найденные описанным методом. Для этого мы используем триангуляцию Делоне (см., например, [8]), которая строится на семействе исходных позиций эталонов, и аффинные преобразования, задаваемые деформацией найденных треугольников на рассматриваемом временном шаге.

Ранее Пётци [9] строил траектории пробных частиц, используя для этого стандартную процедуру ЛКТ. Одна из карт траекторий, построенных им по изображениям грануляции из той же серии, которую используем мы, была использована для тестирования нашего алгоритма. Насколько нам известно, Пётци не применял карты траекторий к анализу структуры течений.

Здесь для изучения морфологии солнечной конвекции мы воспользуемся алгоритмом построения траекторий, основанном на описанном выше модифицированном варианте алгоритма ЛКТ.

3. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Мы анализируем серию изображений солнечной грануляции, полученную 5 июня 1993 г. Брандтом (P.N. Brandt), Шармером (G.V. Scharmer) и Саймоном (G.W. Simon) с помощью Шведского вакуумного солнечного телескопа на острове Ла-Пальма Канарского архипелага [10]. Эта серия, примечательная своей длительностью (11 ч) в сочетании с непрерывностью (постоянный интервал между кадрами, составляющий 21.03 с) и качеством (среднеквадратичный контраст, варьирующий от 6% до 10.6%), до сих пор остается одной из лучших. Наблюдения велись с 08 : 07 UT до 19 : 07 UT вблизи центра солнечного диска в спектральной полосе шириной 10 нм с центром на длине волны 468 нм. Разрешение изображений было, как правило, не хуже 0.5".

Предварительная обработка данных включала в себя пространственное совмещение каждого следующего кадра с предыдущим, компенсацию искажений, вносимых атмосферой, и устранение быстрых (5-мин) колебаний яркости путем звуковой фильтрации поля яркости [11]. Кроме того, после вырезки центральной площадки размером 43.5×43.5 Мм (480×480 пикселей размером $0.125''$,

или 90.6 км) все изображения были нормированы на некоторое значение среднеквадратичного контраста, выбранное как стандартное, и на них был исключен остаточный крупномасштабный градиент яркости. Мы используем здесь отрезок серии, охватывающий интервал длиной 8 ч 45 мин (1500 кадров).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы представим здесь результаты построения траекторий пробных частиц, пройденных за интервалы длительностью около двух часов.

На рис. 2 показана серия карт траекторий, построенных для последовательности перекрывающихся 2-ч интервалов. Движение от начала к концу каждой траектории показано нарастанием яркости линии. Видно, что концы траекторий четко обрисовывают границы ячеек.

Так, хорошо различимы две ячейки супергрануляционного масштаба в верхней половине рис. 2а; другая, не такая крупная, ячейка расположена под центром изображения; к ней слева, как можно заметить, примыкает еще одна. Границы супергранулы, находящейся внизу посередине, особенно отчетливо видны на рис. 2б–2г (причем заметно, что супергранула деформируется), а границы верхней правой — на рис. 2г. На других изображениях картина сложнее, и хотя очертания супергранул и могут быть прослежены, сделать это труднее.

На фоне супергранул заметны ячейки меньшего масштаба. Например, нижняя супергранула на рис. 2а пересекается двумя (почти перпендикулярными друг другу) линиями, которые выглядят как границы ячеек меньшего — мезогрануляционного — масштаба. На данном изображении форма этих малых ячеек близка к треугольной, в дальнейшем они деформируются. То, что на рис. 2а они четко “вписаны” в супергранулу, наводит на мысль о присутствии вторичного течения, развившегося из-за неустойчивости супергранулы. В пользу того, что здесь мы видим суперпозицию течений двух масштабов, говорит тот факт, что левая мезогранула (треугольная на рис. 2а и округлая на 2в) характеризуется асимметричной картиной траекторий: в ее левой части, где скорости мезогрануляционного течения складываются со скоростями супергрануляционного, траектории длиннее, чем в правой, где эти две компоненты скорости компенсируют друг друга.

Таким образом, разделение масштабов течений и очертания ячеек выявляются на картах траекторий вполне четко. На самые крупные, супергрануляционные ячейки накладываются меньшие, уверенно отождествляемые с мезогранулами. Интересно, что форма границ тех и других ячеек оказывается гораздо ближе к многоугольной (и,

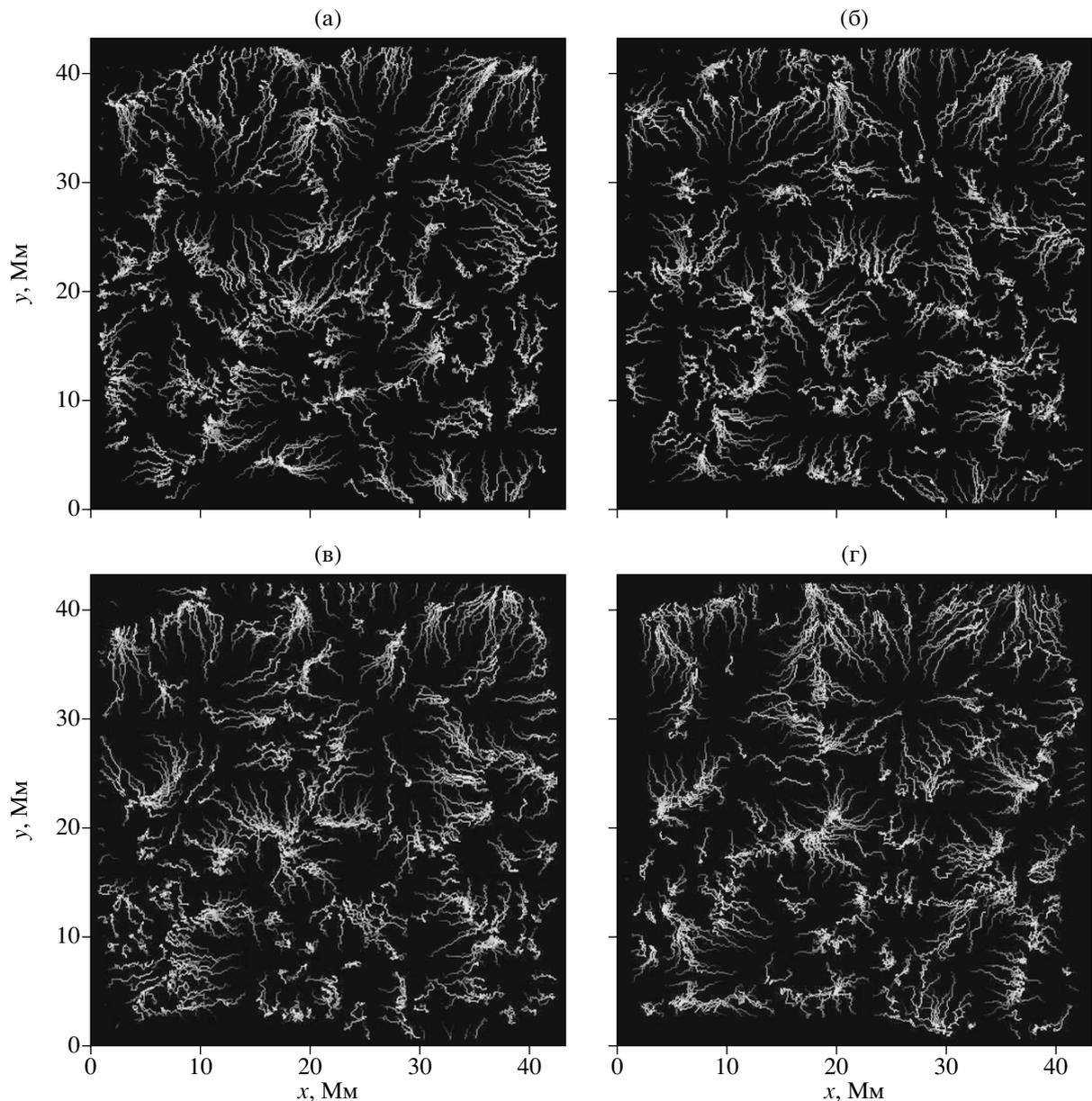


Рис. 2. Траектории, пройденные пробными частицами за интервалы времени 8 : 43–10 : 46 UT (а), 10 : 11–12 : 14 UT (б), 11 : 38–13 : 41 UT (в), 13 : 06–15 : 09 UT (г). Движение пробной частицы от начала к концу траектории показано нарастанием яркости линии.

следовательно, к форме ячеек, наблюдаемых в спокойных лабораторных условиях — в частности, при умеренных надкритичностях), чем если эти границы определять по концентрации пробных частиц на некоторый момент времени.

Карты траекторий очень удобны для определения скоростей пробных частиц (т.е., предположительно горизонтальных скоростей вещества), усредненных за время прохождения некоторого участка траектории. Так, типичные для выявленных мезогранул смещения порядка 6 Мм на участках

траекторий, построенных по данным для двухчасового интервала, дают скорости порядка 0.8 км/с. Это значение лежит в диапазоне мезогрануляционных скоростей. Впрочем, при таких оценках скорости следует помнить о том, что траектория получается при суперпозиции течений разных масштабов, и разделение скоростей, связанных с ячейками разных “сортов”, вообще говоря, представляет особую задачу.

На рис. 2а и 2б нетрудно заметить, что на две верхние супергрануляционные ячейки накладываются

ются ячейки размера заметно меньшего (около 15 Мм), но и заметно превышающего значения, типичные для мезогранул. Та, что наложена на правую супергранулу, еще лучше видна на рис. 2г. Нам неизвестны упоминания о таких ячейках в литературе. Эти ячейки, которым мы дали рабочее название “большие мезогранулы”, обнаруживаются в разные времена и не выглядят явлением исключительным. Если супергранулы, как мы видим, похожи на выпуклые многоугольники (обычно неправильные), то для больших мезогранул бывает характерна и звездчатая форма (она, в частности, заметна у ячейки, наложившейся на правую верхнюю супергранулу на рис. 2б и 2г). Она может свидетельствовать о том, что течение в таких ячейках дальше от режима установления, чем течение в супергранулах, и характеризуется разбегающимися из центра струями.

Обращает на себя внимание, что на каждом изображении заметны несколько участков сильной конвергенции горизонтальных течений. По большей части они находятся в узлах сетки, образуемой границами ячеек (где вещество опускается). Это вообще характерно для конвекции в условиях, когда формируются четко выраженные многоугольные конвективные ячейки с восходящими потоками в центре и опусканием по краям. Однако в ряде случаев связь таких участков с сеткой так ясно не прослеживается. Например, на рис. 2б и 2в вблизи левого края изображения, примерно на середине его высоты, видна конвергенция, которую трудно считать узлом сетки границ ячеек. То же самое можно сказать и о меньшем по размеру участке конвергенции, находящемся несколько выше.

Существование таких изолированных участков ставит вопрос о характере конвективной циркуляции в их окрестности. Очевидно, что если в центре какой-либо конвективной ячейки вещество не поднимается, а опускается, тогда как оно поднимается по краям ячейки и стекается к ее центру, то на карте траекторий края ячейки не будут заметны; наоборот, заметна будет конвергенция в центре. Поскольку отмеченные выше участки конвергенции не вписаны в общую сеть нисходящих течений и на рисунке окружены темным фоном, вполне возможно, что они находятся в центрах ячеек мезогрануляционного масштаба с обратным (по сравнению с большинством ячеек) направлением циркуляции. Заметим, что в лабораторных условиях (которые существенно отличаются от солнечных) именно такая “обращенная” циркуляция характерна для газов, поэтому ячейки с опусканием в центре называются ячейками *g*-типа (от слова *gas* — газ); для конвекции в жидкостях типичны ячейки *l*-типа (от слова *liquid* — жидкость) с восходящим течением в центре — см., например, [12, гл. 4], где дан обзор

исследований воздействия различных факторов на направление циркуляции в ячейках.

Наконец, обратим внимание еще на одно интересное свойство участков конвергенции. На рис. 2в хорошо видно, что поток, сходящийся к гипотетическому центру ячейки *g*-типа, закручен. Такого эффекта и следует ожидать в местах, где имеется концентрированный нисходящий поток (это явление, по-видимому, родственно водовороту, возникающему при стоке воды в ванне). Закрученные течения в фотосфере неоднократно наблюдались и ранее; здесь же примечательна значительная конвергенция закрученного потока на очень малой площадке, что едва ли можно интерпретировать иначе как наличие локализованного стока.

5. ВЫВОДЫ

1. Процедура построения траекторий пробных частиц, основанная на усовершенствованном методе локального корреляционного трассирования, является эффективным средством исследования структуры конвективных течений в околофотосферных слоях. Она отчетливо выявляет суперпозицию течений разных масштабов в диапазоне от мезогрануляционного до супергрануляционного.

2. Супергрануляционные и мезогрануляционные ячейки, выделяемые на картах траекторий пробных частиц, по форме ближе к ячейкам упорядоченной конвекции, наблюдаемой в лабораторных условиях, чем такого рода ячейки, обнаруживаемые другими методами.

3. Кроме ячеек супер- и мезогрануляции с характерными размерами соответственно $\gtrsim 20$ и 5–10 Мм, выявляются “большие мезогранулы”, которые имеют промежуточные размеры порядка 15 Мм.

4. Последние в ряде случаев обнаруживают звездчатую структуру, что может быть эффектом нестационарности конвективных течений.

5. Характерная черта фотосферных течений, выявляемая при построении траекторий пробных частиц, — небольшие участки сильной конвергенции, иногда с закрученностью.

6. Не исключено, что ячейки *l*- и *g*-типа сосуществуют в общем конвективном поле.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 07-02-01094).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. M. Title, T. D. Tarbell, G. W. Simon, and the SOUP Team, *Adv. Space Res.* **8**, 253 (1986).
2. R. Muller, H. Auffret, T. Roudier, *et al.*, *Nature* **356**, 322 (1992).
3. R. A. Shine, G. W. Simon, and N. E. Hurlburt, *Solar Phys.* **193**, 313 (2000).
4. M. Rieutord, T. Roudier, H.-G. Ludwig, Å. Nordlund, and R. Stein, *Astron. and Astrophys.* **377**, L14 (2001).
5. L. J. November, *Appl. Opt.* **25**, 392 (1986).
6. W. Pötzi, “Dynamics of the Solar Granulation and Mesogranulation” Dissertation (University at Graz, 2001).
7. *MSG Meteorological Products Extraction Facility. Algorithm Specification Document*, Doc. No. EUM/MSG/SPE/022, Issue 2.6.1 (EUMETSAT, 2004).
8. Ф. Препарата, М. Шеймос, *Вычислительная геометрия. Введение* (М.: Мир, 1989).
9. W. Pötzi, частн. сообщ. (2007).
10. G. W. Simon, P. N. Brandt, L. J. November, *et al.*, in: *Solar Surface Magnetism*, eds R. J. Rutten, C. J. Schrijver, Science Institute, Advanced Science Institute Series C: Mathematical and Physical Sciences **433** (Dordrecht: Kluwer, 1994), p. 261.
11. A. M. Title, T. D. Tarbell, K. P. Topka, *et al.*, *Astrophys. J.* **336**, 475 (1989).
12. А. В. Гетлинг, *Конвекция Рэлея–Бенара. Структуры и динамика* (М.: УРСС, 1999). [A. V. Getling, *Rayleigh–Bénard Convection: Structures and Dynamics* (Singapore: World Scientific, 1998).]