

ТЕЧЕНИЯ В КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЕ СОЛНЦА: МАСШТАБЫ И ВАРИАЦИИ МОЩНОСТИ В ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Гетлинг А.В.¹, Косовичев А.Г.²

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

²*Технологический институт штата Нью-Джерси, Ньюарк, США*

FLOWS IN THE SOLAR CONVECTION ZONE: SCALES AND POWER VARIATION OVER THE SOLAR ACTIVITY CYCLE

Getling A.V.¹, Kosovichev A.G.²

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia*

²*New Jersey Institute of Technology, NJ 07102, USA*

A spectral analysis of the spatial structure of solar subphotospheric convection is carried out based on the maps of subsurface velocities at depths from 0 to 10 Mm measured using techniques of time–distance helioseismology. The source data are obtained with the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO) from May 2010 to September 2020. The scales of convective flows are analysed expanding the field of the divergence of the horizontal velocity component in spherical harmonics. The horizontal flow scales grow from supergranular values to giant-cell sizes, and a tendency toward the emergence of meridionally elongated (banana-shaped) convective structures in deep layers can be noted. The variation of the integrated convective-flow power in the course of the solar activity cycle is studied. This quantity is anticorrelated with the sunspot number in the near-surface layers and positively correlated at greater depths. This can be interpreted in terms of the depth redistribution of the convective flow energy due to the action of magnetic fields.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-53-56

Введение

Благодаря успехам гелиосейсмологии появилась возможность прослеживать структуру и эволюцию этих полей в большом диапазоне глубин в течение нескольких лет. Здесь мы исследуем масштабы конвективных течений и временные вариации их мощности на разных глубинах в конвективной зоне на основе спектральных представлений поля горизонтальных скоростей, найденного методами пространственно-временной гелиосейсмологии по наблюдениям на инструменте Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) орбитальной обсерватории солнечной динамики (Solar Dynamics Observatory – SDO).

Данные и их обработка

Поля скоростей представлены значениями в 1026×1026 точках с шагом 0.12° по гелиографической широте и долготе ($123^\circ \times 123^\circ$) и временной

каденцией 8 ч для 8 подфотосферных слоев, лежащих в интервале глубин $d = 0\text{--}19$ Мм. Толщина этих слоев меняется от 1 Мм для верхнего слоя до 4 Мм для нижнего. В дальнейшем мы будем указывать средние значения d для этих слоев. Для удобства спектрального анализа перейдем от полей компонент вектора горизонтальной скорости $\mathbf{V}$ к скалярному полю – дивергенции скорости, которая в сферических координатах имеет вид

$$\text{div } \mathbf{V}(\theta, \varphi) = \frac{1}{r_{\odot} \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (V_{\theta} \sin \theta) + \frac{1}{r_{\odot} \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} V_{\varphi}$$

(θ – коширота, φ – долгота, $r_{\odot}$ – радиус Солнца). Дополним найденное поле дивергенции до полного долготного интервала, взяв это поле на интервале длиной 120° и дважды повторив его – со сдвигом по долготе на 120° и 240° . Представим поле дивергенции разложением по сферическим функциям $Y_l^m(\theta, \varphi)$, обозначим амплитуды гармоник как A_{lm} и ограничимся степенями разложения, не превышающими подходящим образом выбранной величины $l = l_{\max} = 200$.

К спектрам мощности $p_{lm} = |A_{lm}|^2$ мы применяем процедуру вычисления скользящего среднего по времени с окном 45 суток. Согласно теореме Парсеваля, интегральная мощность течения равна

$$p_{\text{tot}} = \sum_{l=0}^{l_{\max}} \sum_{m=-l}^l |A_{lm}|^2$$

Оценить пространственные масштабы компонент, представленных гармониками данной степени l , можно, положив $r = r_{\odot}$ в формуле Джинса [1] $\lambda = 2\pi r / \sqrt{l(l+1)}$.

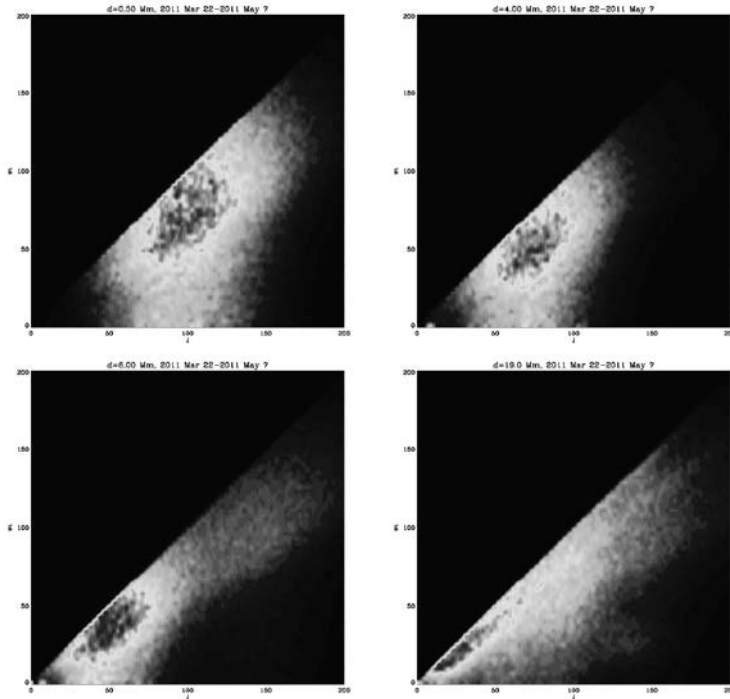


Рис. 1. Пример спектров мощности течения на глубинах $d = 0.5, 4, 6, 19$ Мм (указаны на каждом рисунке сверху). Максимальным значениям соответствуют темные участки, окруженные светлыми полями. Черное поле справа внизу – малые значения, черное поле слева сверху – область $m > l$, где значения не определены.

Результаты

Типичная серия спектров мощности для одного и того же 45-суточного интервала усреднения и разных глубин показана на рис. 1. Видно, что полоса спектра соответствует широкому интервалу значений степени l (и масштабов λ). Главный спектральный максимум сильно смещается с глубиной в длинноволновую область. Если в верхних слоях коротковолновая часть области наиболее энергичных гармоник имеет $l \approx 120$ (что соответствует размерам супергранул $\lambda \approx 30$ Мм), то длинноволновая

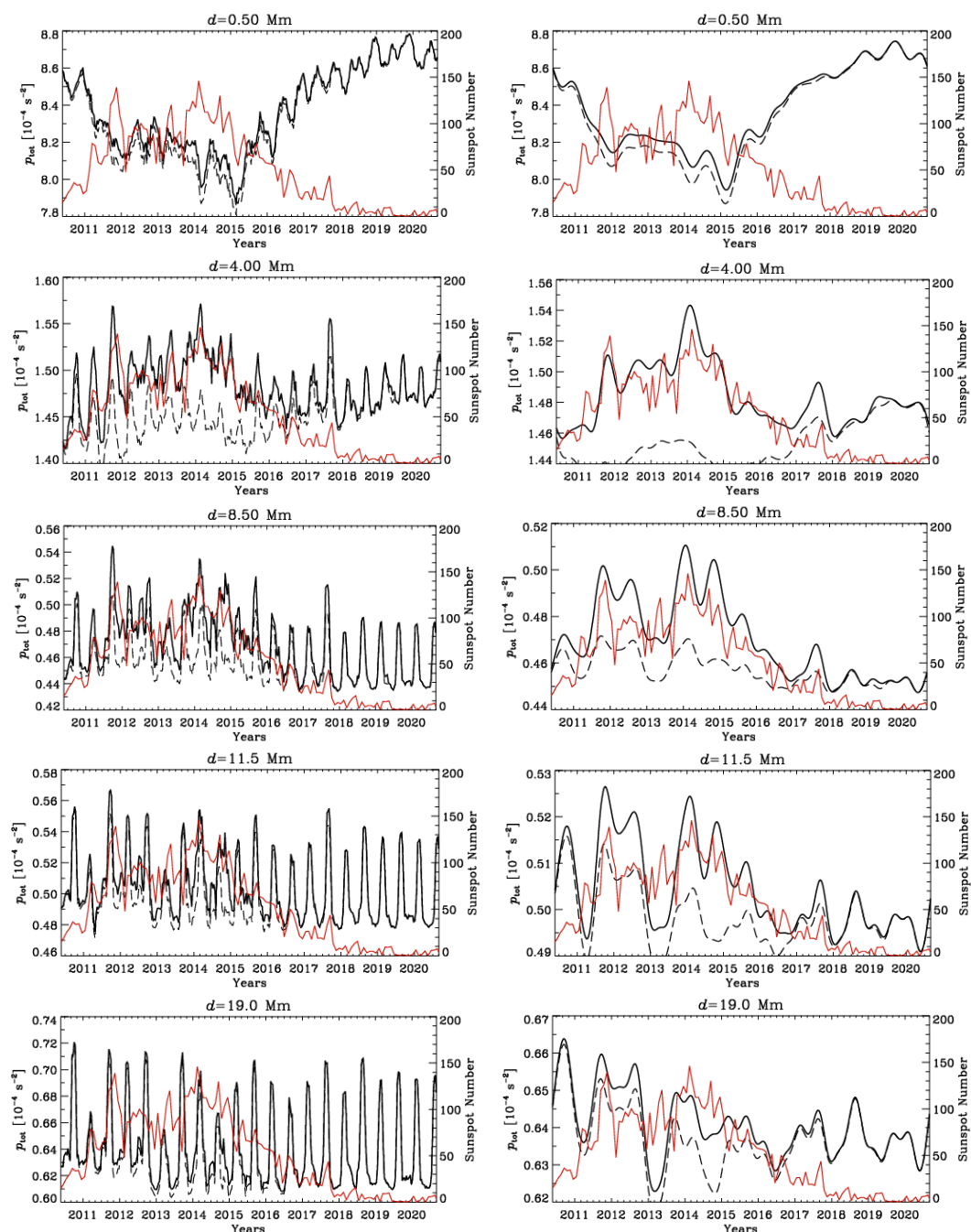


Рис. 2. Временные вариации интегральной мощности течений на различных глубинах d : слева нефильтрованные, справа фильтрованные; штриховые линии – для «маскированных» полей. Красной линией показаны изменения среднемесячного числа солнечных пятен.

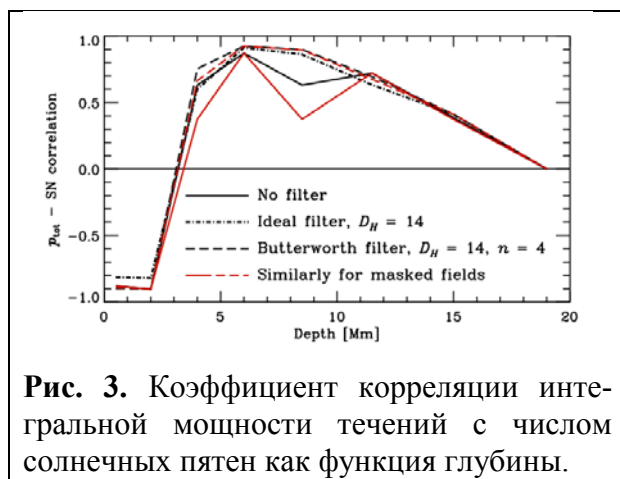


Рис. 3. Коэффициент корреляции интегральной мощности течений с числом солнечных пятен как функция глубины.

часть на больших глубинах начинается на $l \approx 15$, и λ лежит в области значений 150–300 Мм, что является масштабом гигантских ячеек. Интересная особенность спектра течений состоит в том, что с ростом d спектральный пик приближается в плоскости (l, m) к линии $l = m$, которая соответствует секториальным (не зависящим от θ) гармоникам. Это значит, что

крупномасштабные ячейки имеют тенденцию к бананообразной форме (такая возможность временами обсуждается в литературе). Интегральная мощность течений p_{tot} испытывает вариацию в цикле активности, которая с глубиной все более зашумлена полугодовой гармоникой, обусловленной изменениями наклона оси вращения Солнца к лучу зрения (рис. 2, левый столбец). Чтобы выделить физически значимую составляющую вариации, мы применяем к ней низкочастотную спектральную фильтрацию, либо обрезаем ее временной спектр на частоте $\nu_H = 0.05$ мкГц, либо умножая его на фильтр Баттерворта $H(\nu) = 1/[1 + (\nu/\nu_H)^{2n}]$, $n = 4$, и выполняя обратное фурье-преобразование. Отфильтрованная вариация (рис. 2, правый столбец) показывает антикорреляцию мощности течений с числом солнечных пятен в верхних слоях и положительную корреляцию в более глубоких слоях. Изменение коэффициента корреляции с глубиной показано на рис. 3.

Для оценки возможного влияния магнитных полей на рассчитанные вариации p_{tot} эти вариации были также выполнены для «маскированных» полей, в которых значения дивергенции скорости на участках сильных магнитных полей заменялись ее средним значением. Результаты показаны штриховыми линиями на рис. 2 и красными линиями на рис. 3.

Выводы

Характерный масштаб конвекции растет с глубиной, показывая признаки присутствия гигантских конвективных ячеек. Наблюдаемое по мере перехода к большим глубинам приближение спектрального пика к линии $l = m$, соответствующей секториальным гармоникам, может отражать тенденцию к меридиональной вытянутости конвективных структур – образованию бананообразных ячеек.

В поверхностных слоях интегральная мощность антикоррелирует, в более глубоких показывает положительную корреляцию с уровнем солнечной активности. Максимальная корреляция приходится на глубину ~ 6 Мм.

Литература

1. Jeans J.H. // Proc. Roy. Soc. London, 1923, v. A102, p. 554.