Масштабы конвективных структур на различных глубинах подфотосферной зоны Солнца и их вариации в цикле активности

А.В. Гетлинг¹, А.Г. Косовичев²

¹НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова ²Технологический институт штата Нью-Джерси, Ньюарк, США

(a) Ibardkgreiuntelsy am

) backgroundawy

1 Operations (01 United Stylesons)

(H) baddigrouthickly and

Изображение солнечной грануляции с рекордным на 2020 г. разрешением (около 30 км), полученное на крупнейшем *наземном* солнечном телескопе им. Дэниэла К. Ино́уэ (остров Мауи, Гавайи). Поле изображения охватывает область размером 40 × 40 Мм.



Траектории гранул (за 1 ч 45 мин), выявляющие супергранулы и мезогранулы



Гигантские ячейки по данным SDO (HMI)

Течения: кр<mark>асны</mark>й цвет – с запада, синий – с востока



Исходные данные – компоненты скорости v_x и v_y, полученные методом пространственно-временной гелиосейсмологии из наблюдений на инструменте Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Обсерватории солнечной динамики (SDO) и охватывающие период с мая 2010 по август 2024 г.

Представлены картами компонент скорости на 1026 × 1026 точках с шагом 0.12° по гелиографической широте и долготе (123° × 123°) и временной каденцией 8 ч для 8 подфотосферных уровней:

> 0. *d* = 0.50 (0–1) MM 1. *d* = 2.00 (1–3) MM 2. *d* = 4.00 (3–5) MM 3. *d* = 6.00 (5–7) MM 4. *d* = 8.50 (7–10) MM 5. *d* = 11.50 (10–13) MM 6. *d* = 15.0 (13–17) MM 7. *d* = 19.0 (17–21) MM

(a) batcher (eruntetay and

A DECKERCENTER SYMM

(a) and a state of the state of

Пример полновекторной карты скоростей по гелиосейсмологическим данным (*d* = 2 Мм)



Calibrackgrownelsy.....

Пример поля дивергенции (*d* = 0.5 Мм)



(T) BEERROUTERER

badkgroundsv.in

u) baddeg foru nd stike

An Ibardkerraturation

n) Deletestertintelsyteen

(a) laadkaarou nidsy/.....

(3) provide state (3)

(i) beidegreungenging

Спектр мощности поля дивергенции

 $f(\theta, \varphi) = \operatorname{div} \mathbf{v}$

$$f(\theta,\varphi) = \sum_{\ell=0}^{\ell_{\max}} \sum_{m=-\ell}^{\ell} A_{\ell m} Y_{\ell}^{m}(\theta,\varphi)$$

 $p_{\ell m} = |A_{\ell m}|^2$

$$p_{\text{tot}} = \int_{\Omega} f^2 d\Omega = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |A_{\ell m}|^2 \qquad p_{\ell}^{\Sigma} = \sum_{m=-\ell}^{\ell} |A_{\ell m}|^2$$

(a) badkgreitindsy am

) is stelling the state of the

(a) Identified to Intelex/memory

(H) Gizidikati Othinteksyam

Типичный спектр, усредненный за 45 суток, d = 0.5 Mm



Типичный спектр, усредненный за 45 суток, d = 2 Mm



Типичный спектр, усредненный за 45 суток, d = 4 Мм



(a) bridkgroundsvam

Типичный спектр, усредненный за 45 суток, d = 6 Мм



Типичный спектр, усредненный за 45 суток, d = 8.5 Mm



(b) bardkgroundsy.de

Типичный спектр, усредненный за 45 суток, d = 11.5 Mm



Типичный спектр, усредненный за 45 суток, d = 15.0 Mm



Типичный спектр, усредненный за 45 суток, d = 19 Mm



Вычисление среднего волнового числа ℓ_c и средней длины волны λ_c

$$\ell_{c} = \sum_{\ell=1}^{\ell} \sum_{m=1}^{\ell} \ell p_{\ell m} \left(\sum_{\ell=1}^{\ell} \sum_{m=1}^{\ell} p_{\ell m} \right)^{-1}$$

Формула Джинса: $\lambda_c = \frac{2\pi r}{\sqrt{\ell_c(\ell_c+1)}}$

Характерный размер структур с волновым числом λ лежит в пределах от $\sim \lambda/2$ до $\sim 2\lambda$

Вариации средней длины волны λ_с в 11-летнем цикле, *d* = 0.5 Мм



(=) bereksereruntelog ann

T / [2]2(C] ((2) (C) / [1]2(C) / (com

To load strong to the Sylamo

(tr) Sondares Orumos Vian

Вариации средней длины волны λ_с в 11-летнем цикле, *d* = 2 Мм



a) backgroundsymm

(tr) StartingsforumfelsVaan

Вариации средней длины волны λ_с в 11-летнем цикле, *d* = 4 Мм



(a) bratekerreruntetay anar

E TERETERS CONTRACTOR

The second se

(tr) StartingsforumfelsVaan

Вариации средней длины волны λ_с в 11-летнем цикле, *d* = 6 Мм



and latete key return to tay man

(a) [b]a(G)(S)(C)([n]a(b))/(come)

- Callera Charles Columnes

(ta) Grandingerorum (distrium

Вариации средней длины волны λ_с в 11-летнем цикле, *d* = 8.5 Мм



(a) lattekgretuintelay and

E) [9] a [d] [2] [[2] [[2] [] [2] [] [2] [[2] [] [2] [] [2] [] [2] [] [2] [2] [[2] [2] [[2] [[2] [[2] [[2] [[2] [[2] [[2] [[2] [[2] [[2] [[2] [[2] [[2] [[2] [[2] [2]

and a state state of the state

(a) SaddegroundsWan

Вариации средней длины волны λ_с в 11-летнем цикле, *d* = 11.5 Мм



(a) bratekerreruntetay anar

Example 16 [16] [16] [27 (control)

TAL PERSONAL CONTRACTOR

(ta) Gardegarow metersylam

Вариации средней длины волны λ_с в 11-летнем цикле, *d* = 15 Мм



(a) batekereruntetay am

District (States) (Contraction of the states)

(12) Dirthestorumestylam

Вариации средней длины волны λ_с в 11-летнем цикле, *d* = 19 Мм

(a) bratcheg rotuintatoy man

(a) Signikession metsion

Корреляция средневзвешенной длины волны λ_c с числом солнечных пятен

an later series and the series of the series

are restrict and a structure in

(a) badkerorundsya

(1) (a) backgroundigva

Изменение λ_с с глубиной

Сплошные линии – высокая активность (2014, 2024), штриховые – низкая (2019, 2010)

Слева усреднение за 180 суток, справа — за 360 суток

(a) loatekerennetsy am

Корреляция интегральной мощности с числом солнечных пятен

b) backgroutnetsy

(a) loardigaroutinicisy/ar

(a) badkeroundsy

Распределение p_ℓ^Σ по глубине d и степеням ℓ

(a) bratchegreruntersy and

Оценка масштаба по формуле Джинса

Степени ионизации водорода и гелия в конвективной зоне Солнца

Зоны частичной ионизации $d \lesssim 8$ Мм и $10 \lesssim d \lesssim$ 40 Мм конвективно наименее устойчивы

Выводы

- Масштаб супергрануляции стабилен, масштаб гигантских ячеек варьирует с числом пятен
- Масштаб супергрануляции четко прослеживается в верхних 4 Мм зоны, масштаб гигантских ячеек – ниже уровня 8 Мм. Между этими двумя глубинами средний масштаб определяется суперпозицией тех и других структур.
- Два пика корреляции длины волны конвекции и уровня солнечной активности приходятся на зоны частичной ионизации водорода и гелия, которые наиболее неустойчивы конвективно и где можно ожидать наибольшей интенсивности конвекции.
- Оба этих пика лежат в том интервале глубин, где спектральная мощность конвекции показывает существенную положительную корреляцию с уровнем активности.
- Таким образом, характерный масштаб конвекции увеличивается с ростом интенсивности конвекции, которая растет с усилением солнечной активности, и этот эффект наиболее заметен в зонах частичной ионизации.

Спасибо за внимание

Diadkgroundby am

) blatekejkett nie Sylwood

Dadiggroundsylven

a) baddigrowholsymm

(II) best stream and the state