

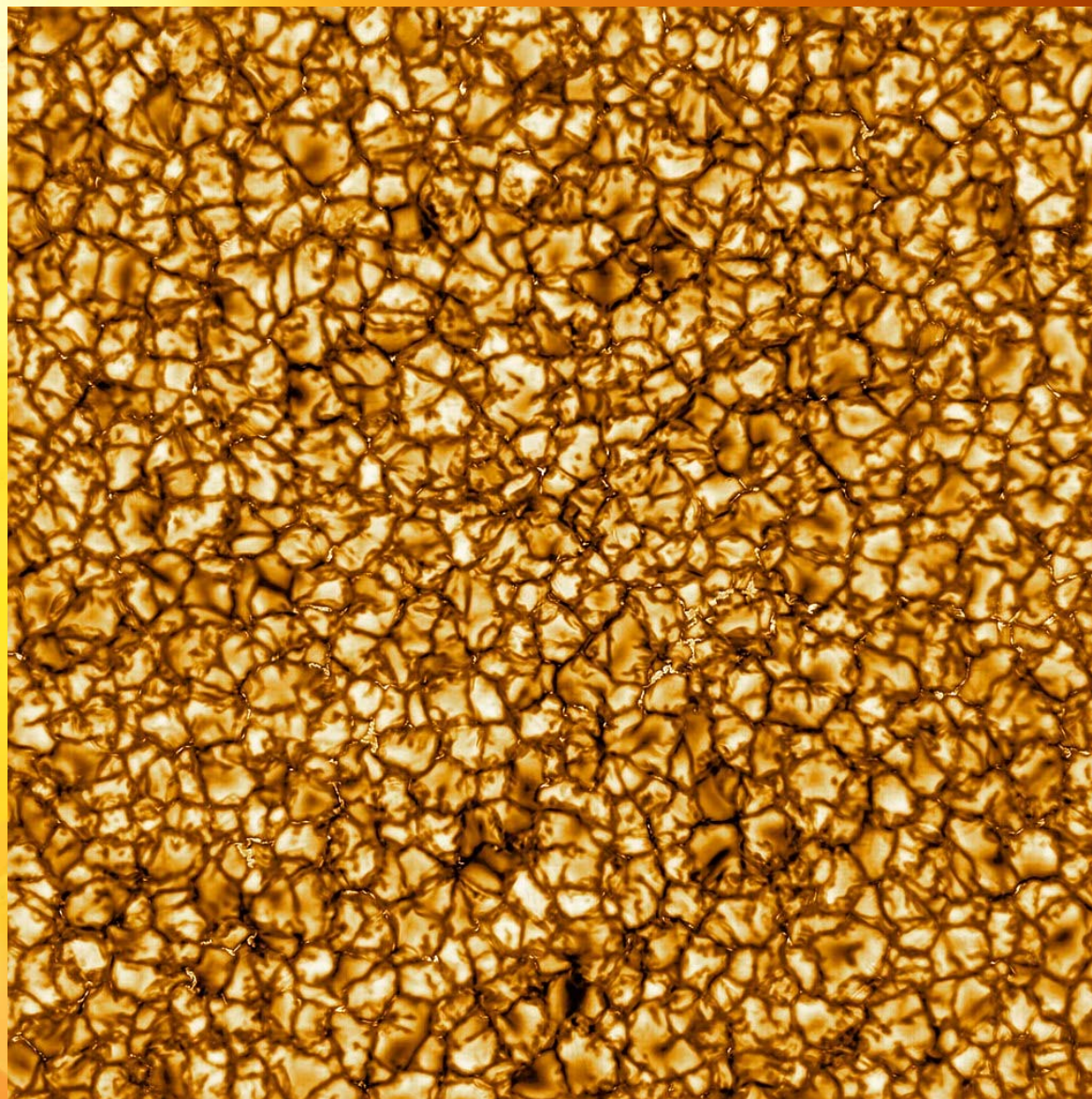
Масштабы конвективных структур на различных глубинах подфотосферной зоны Солнца и их вариации в цикле активности

А.В. Гетлинг¹, А.Г. Косовичев²

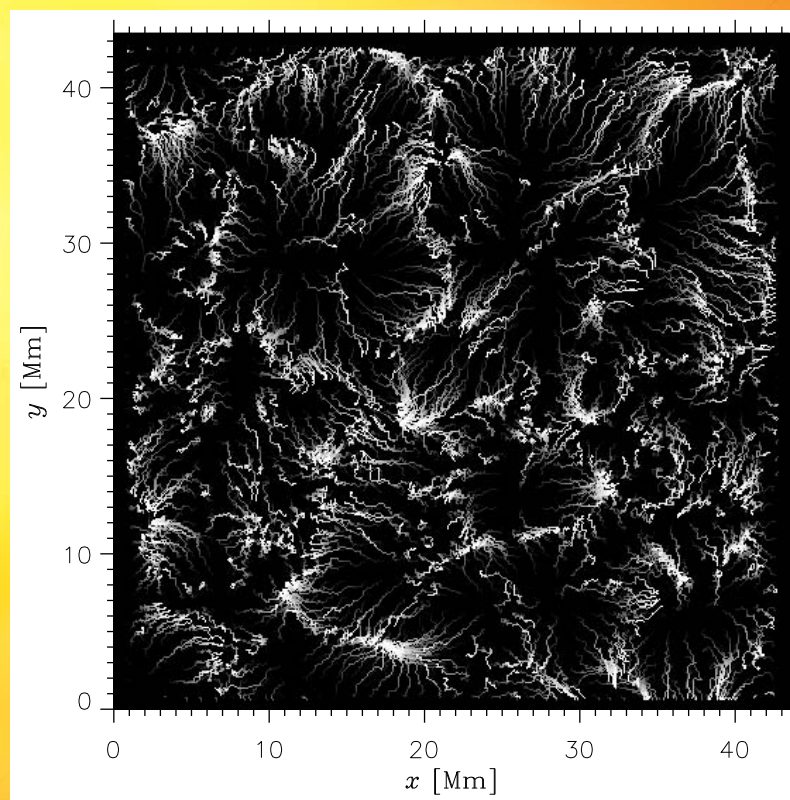
¹НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова

²Технологический институт штата Нью-Джерси, Ньюарк, США

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

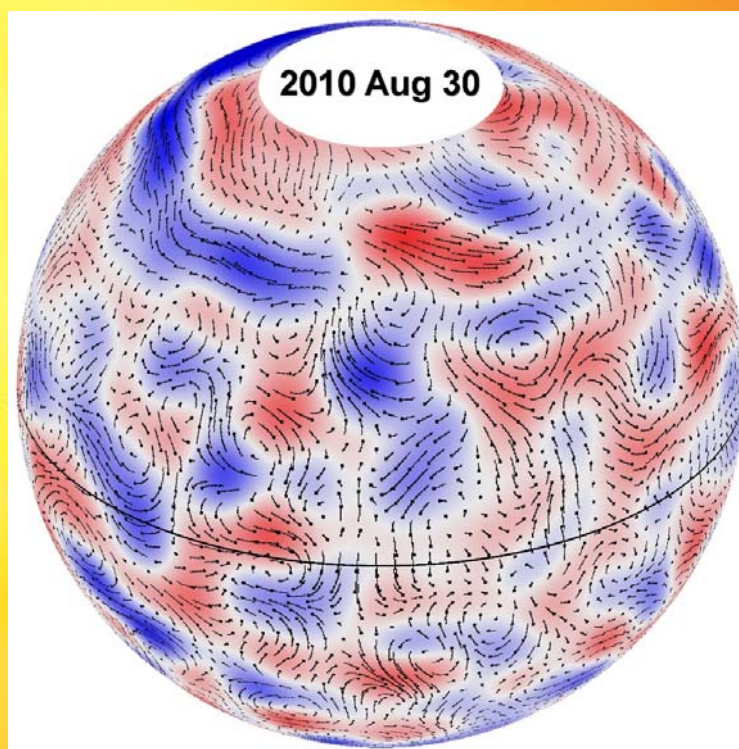


Траектории гранул (за 1 ч 45 мин), выявляющие супергранулы и мезогранулы



Гигантские ячейки по данным SDO (HMI)

Течения: красный цвет – с запада, синий – с востока

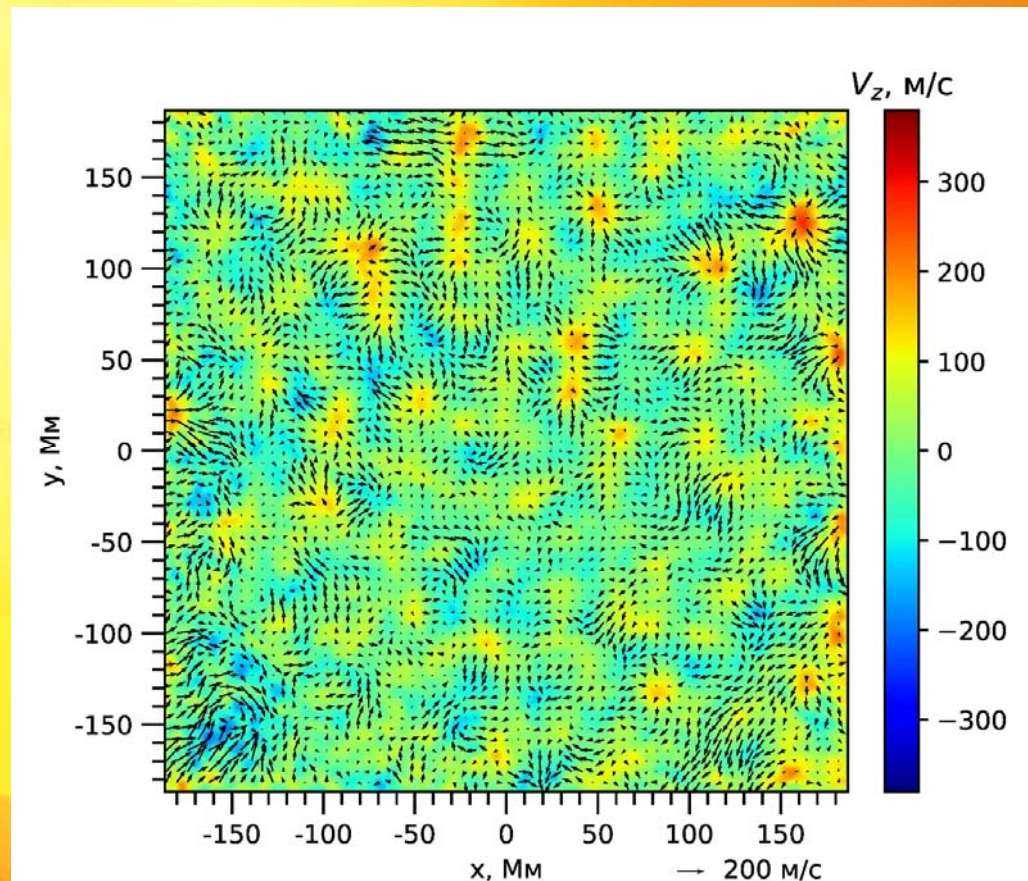


Исходные данные – компоненты скорости v_x и v_y , полученные методом пространственно-временной гелиосейсмологии из наблюдений на инструменте Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Обсерватории солнечной динамики (SDO) и охватывающие период с мая 2010 по август 2024 г.

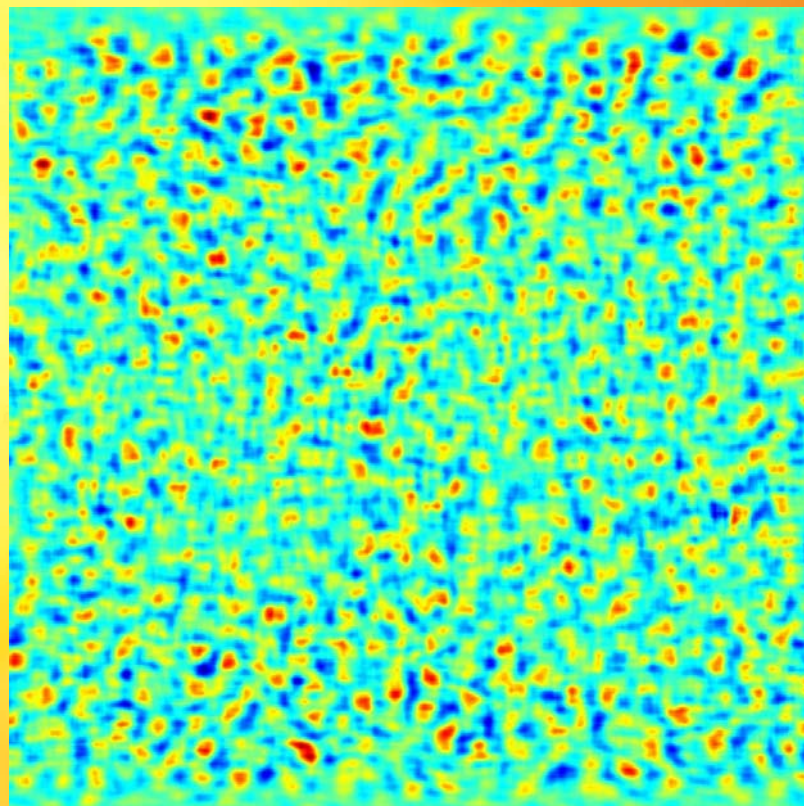
Представлены картами компонент скорости на 1026×1026 точках с шагом 0.12° по гелиографической широте и долготе ($123^\circ \times 123^\circ$) и временной каденцией 8 ч для 8 подфотосферных уровней:

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

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



Пример поля дивергенции ($d = 0.5$ Мм)



Спектр мощности поля дивергенции

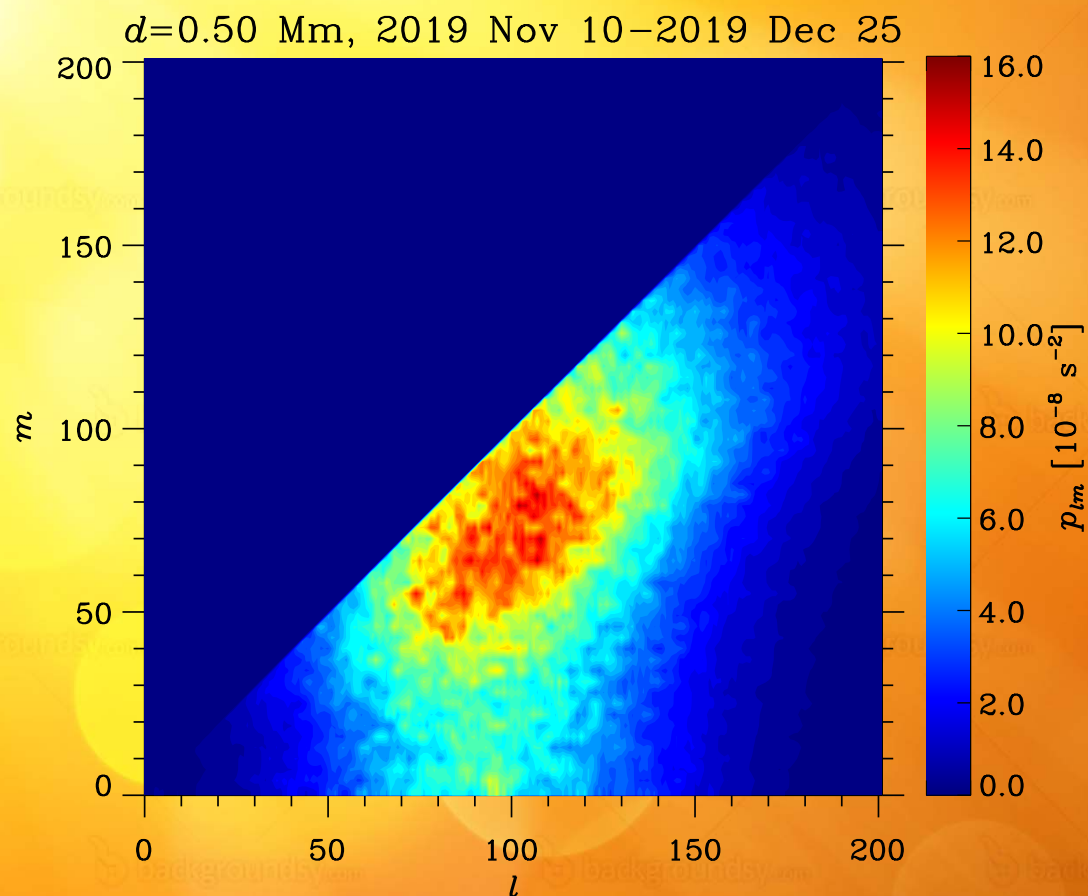
$$f(\theta, \varphi) = \operatorname{div} \mathbf{v}$$

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

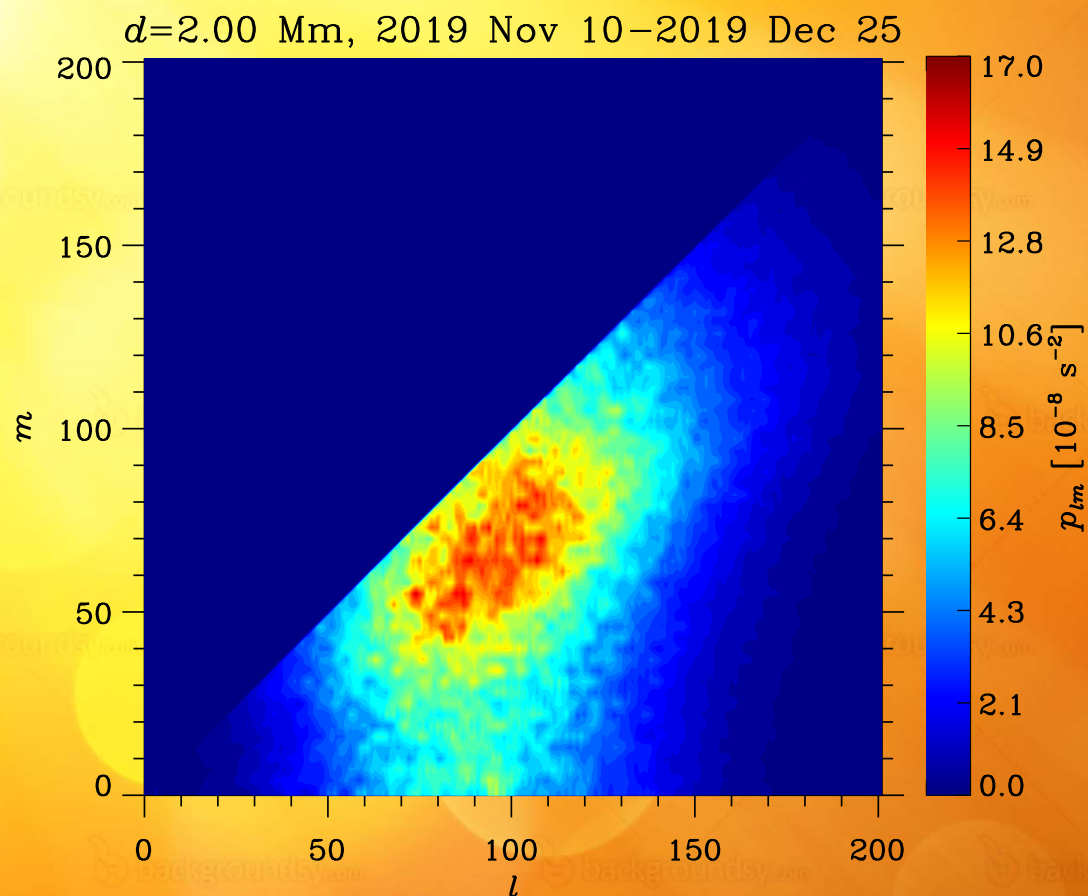
$$p_{\ell m} = |A_{\ell m}|^2$$

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

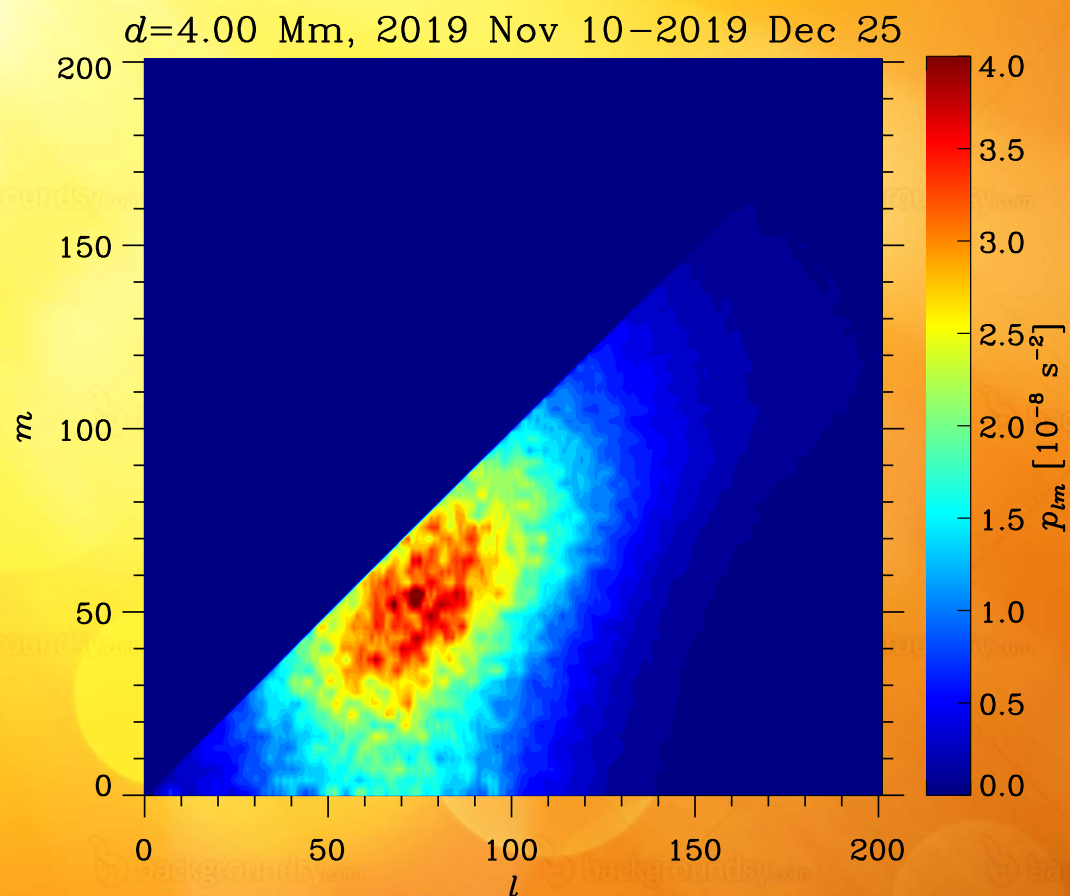
Типичный спектр, усредненный за 45 суток, $d = 0.5$ Мм



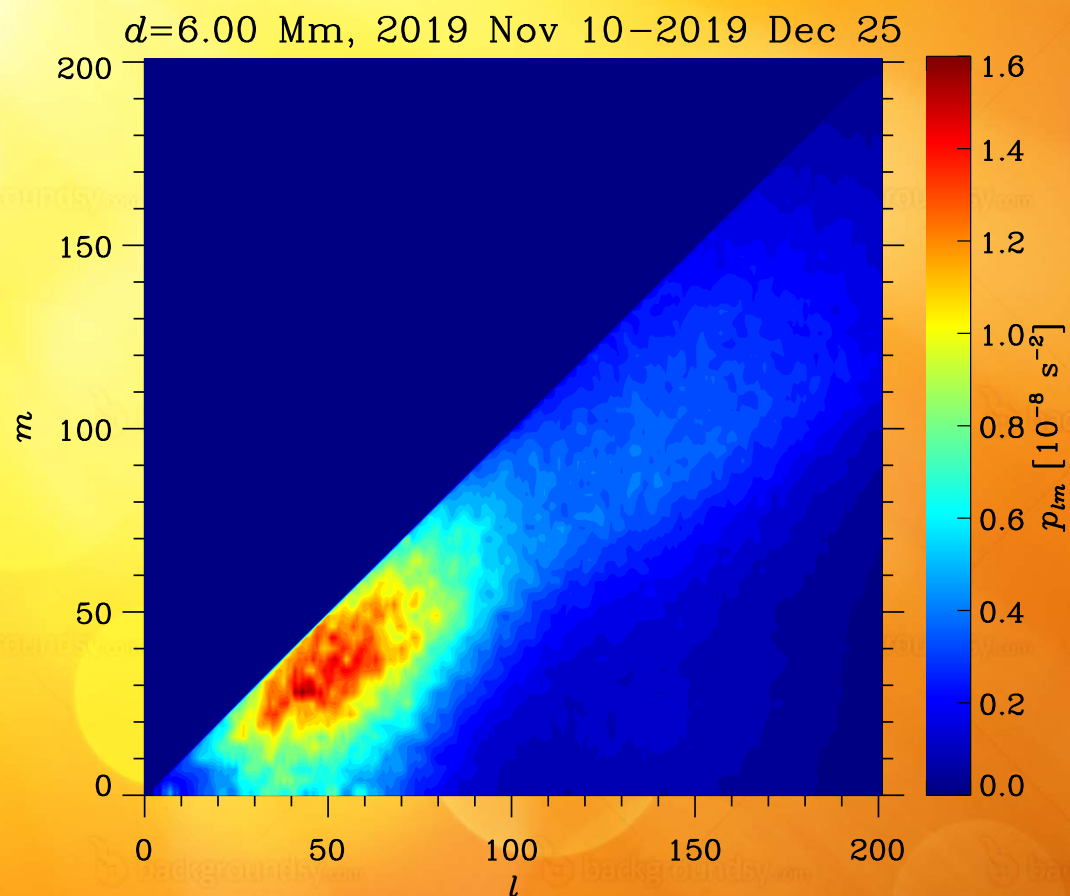
Типичный спектр, усредненный за 45 суток, $d = 2$ Мм



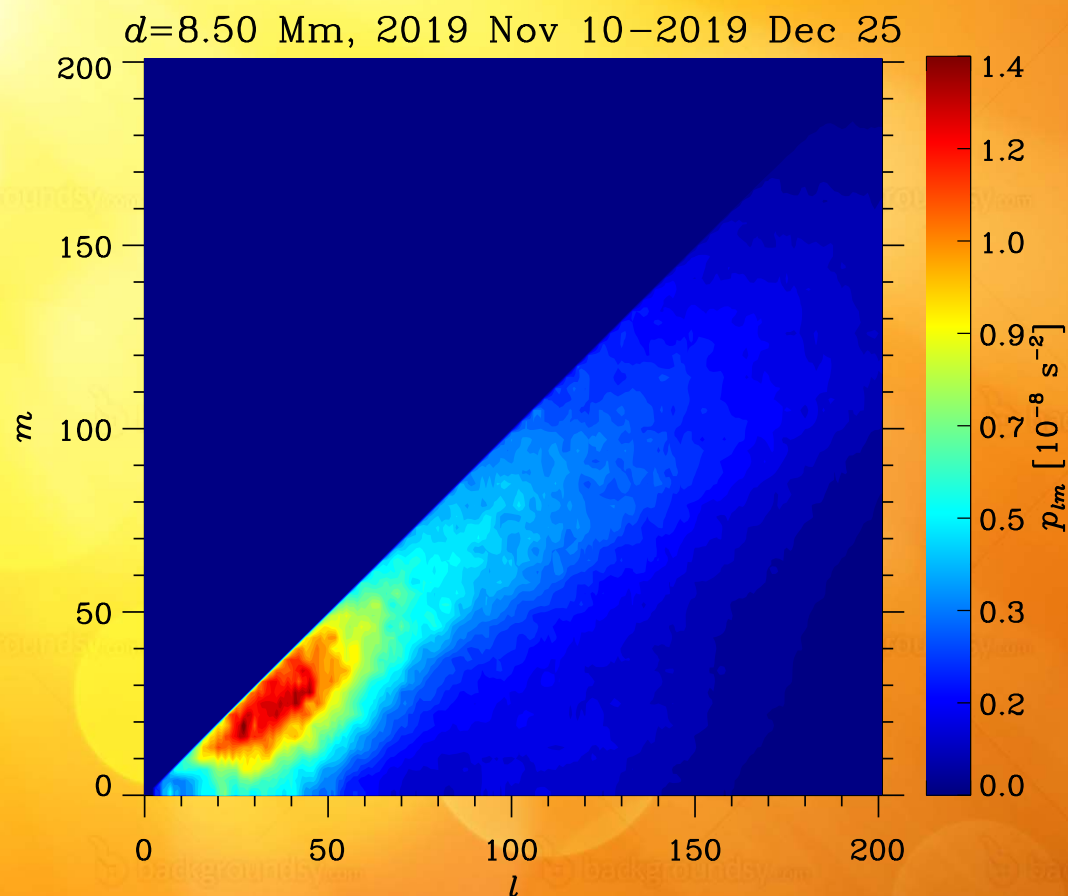
Типичный спектр, усредненный за 45 суток, $d = 4$ Мм



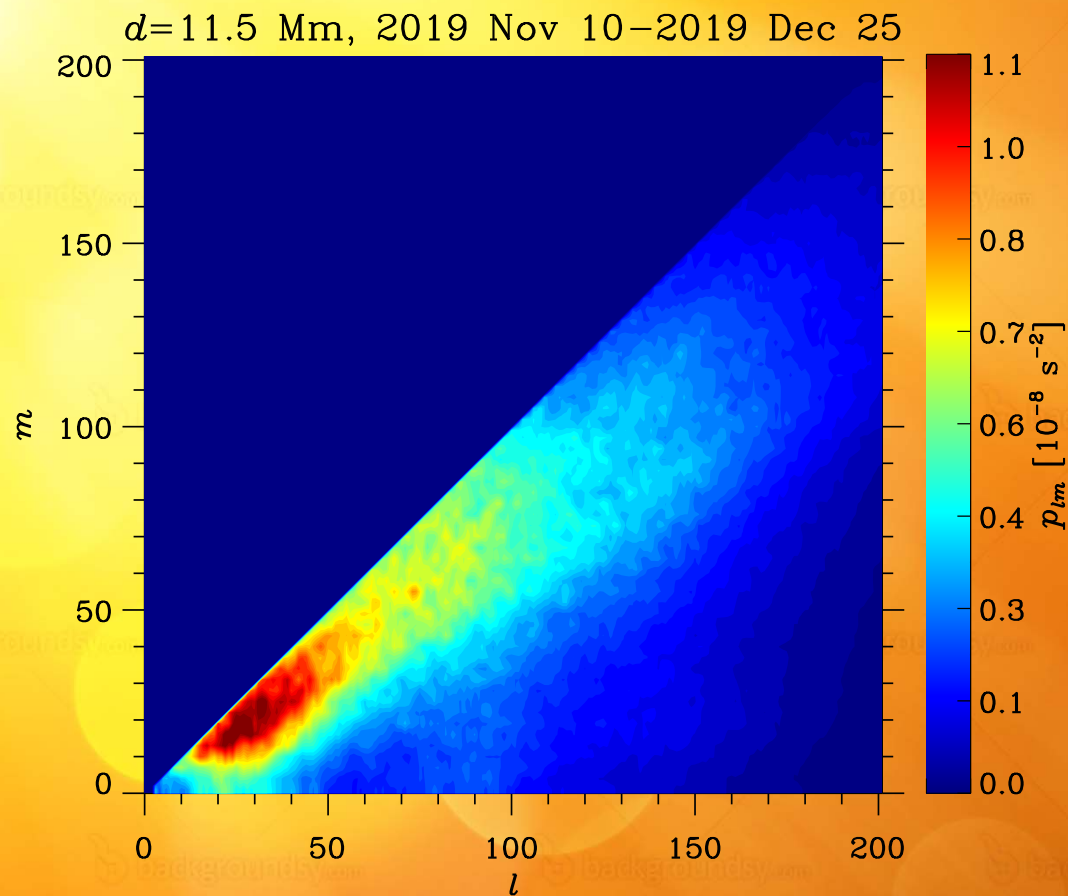
Типичный спектр, усредненный за 45 суток, $d = 6$ Мм



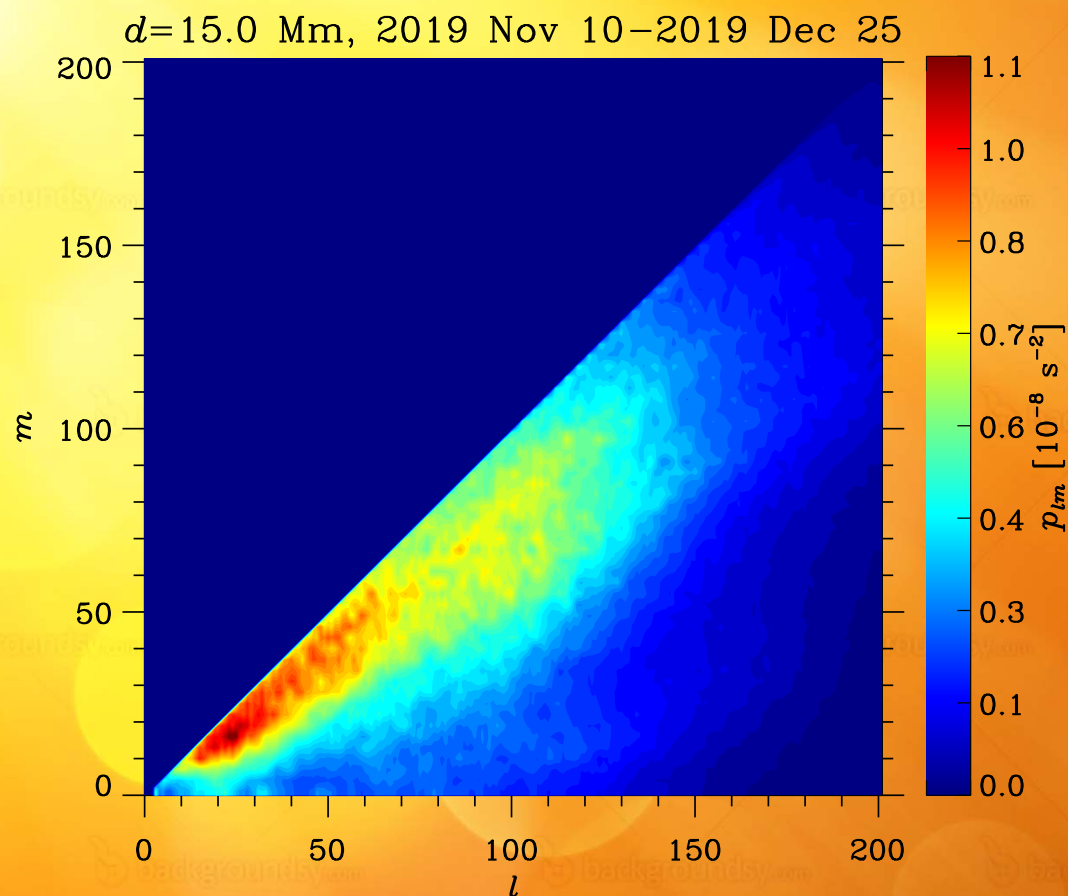
Типичный спектр, усредненный за 45 суток, $d = 8.5$ Мм



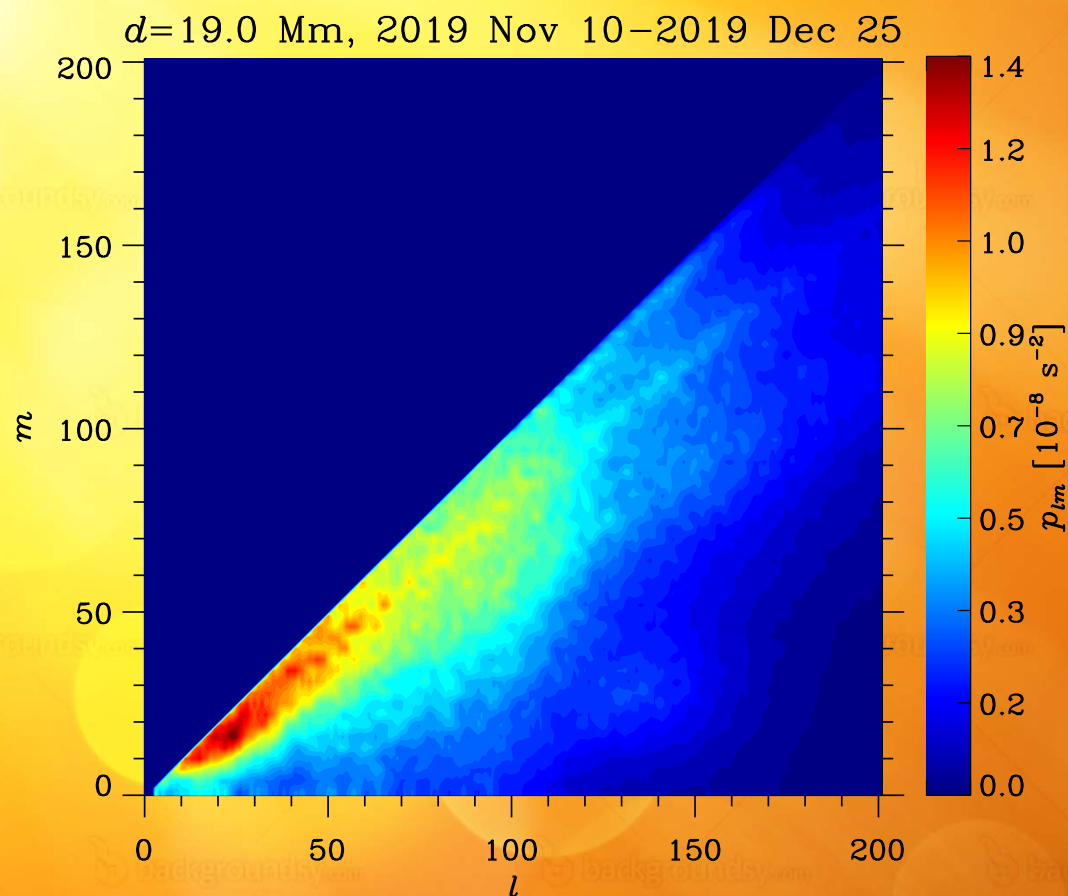
Типичный спектр, усредненный за 45 суток, $d = 11.5$ Мм



Типичный спектр, усредненный за 45 суток, $d = 15.0$ Мм



Типичный спектр, усредненный за 45 суток, $d = 19$ Мм



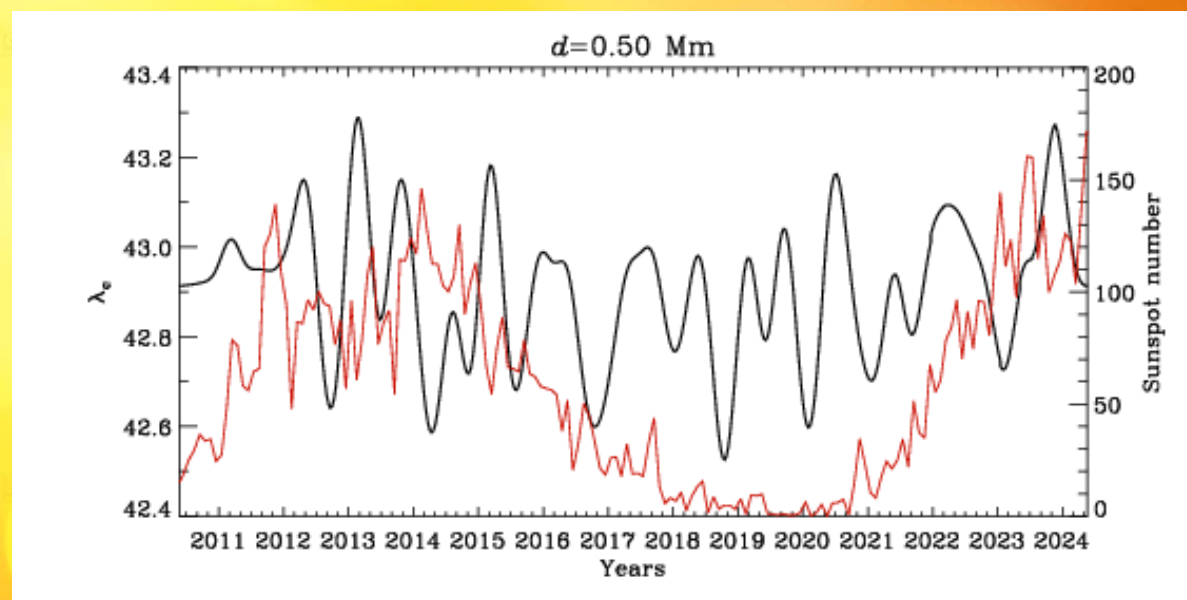
Вычисление среднего волнового числа ℓ_c и средней длины волны λ_c

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

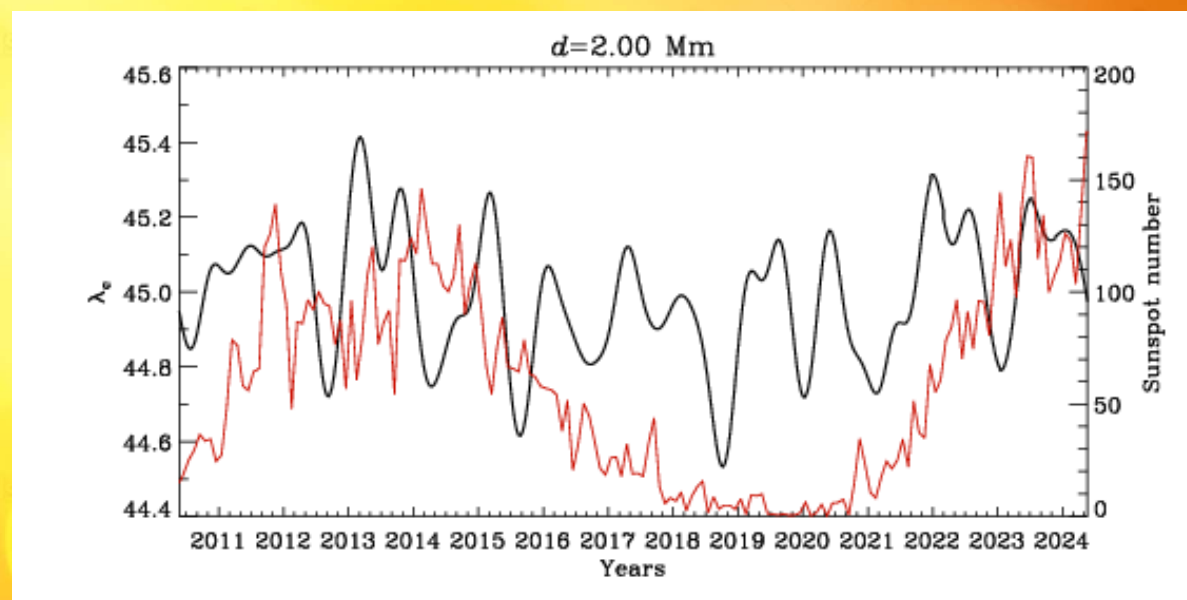
Формула Джинса: $\lambda_c = \frac{2\pi r}{\sqrt{\ell_c(\ell_c+1)}}$

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

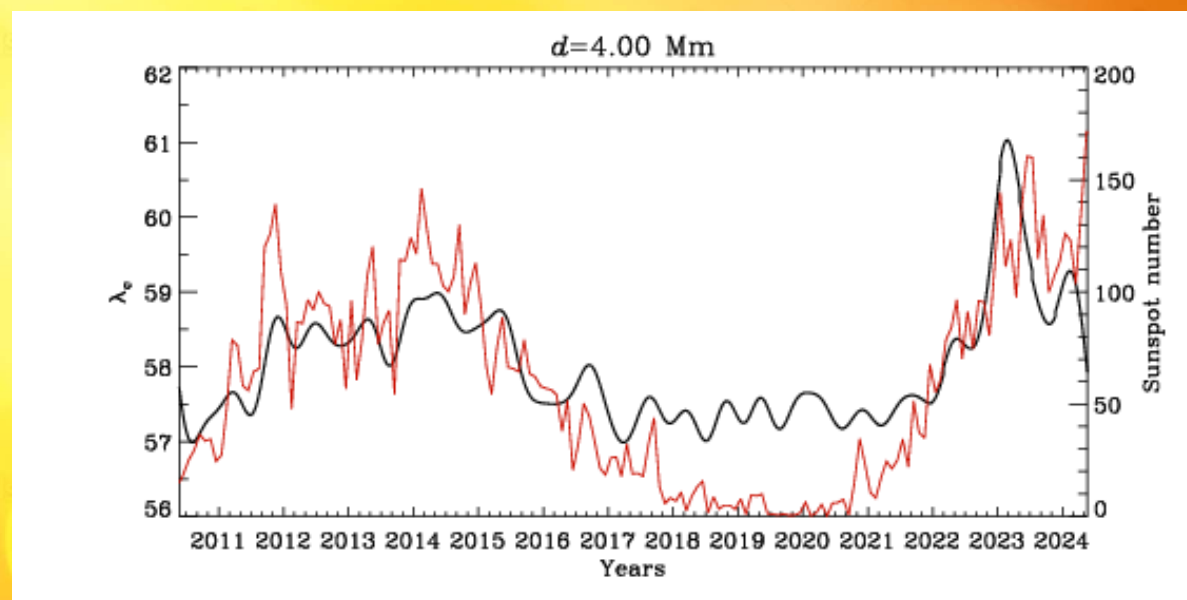
Вариации средней длины волны λ_c в 11-летнем цикле, $d = 0.5$ Мм



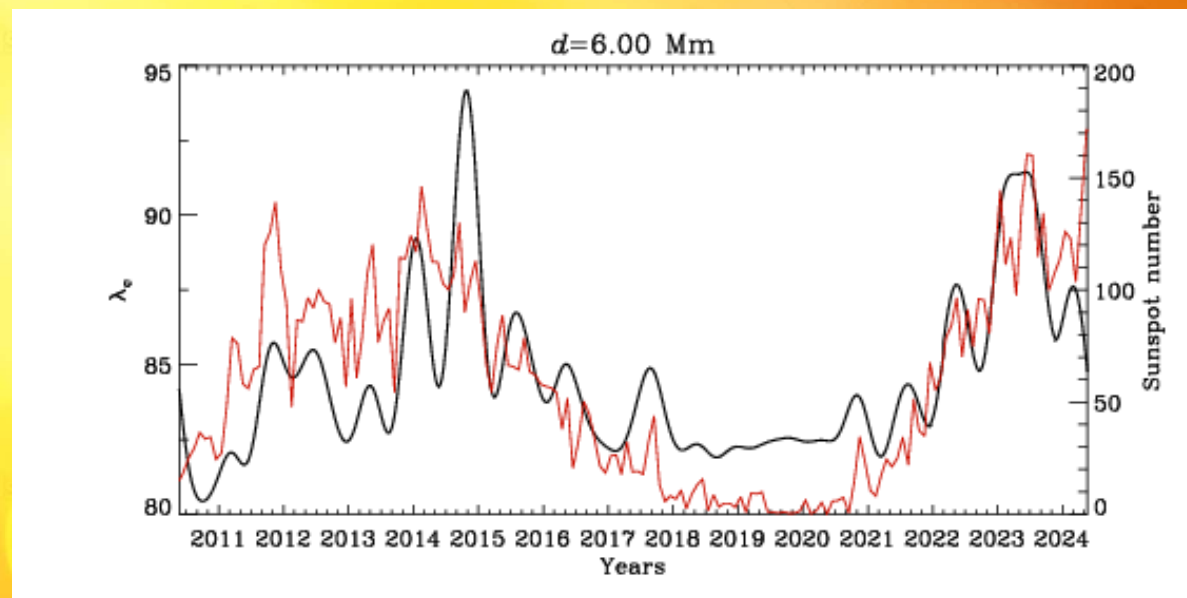
Вариации средней длины волны λ_c в 11-летнем цикле, $d = 2$ Мм



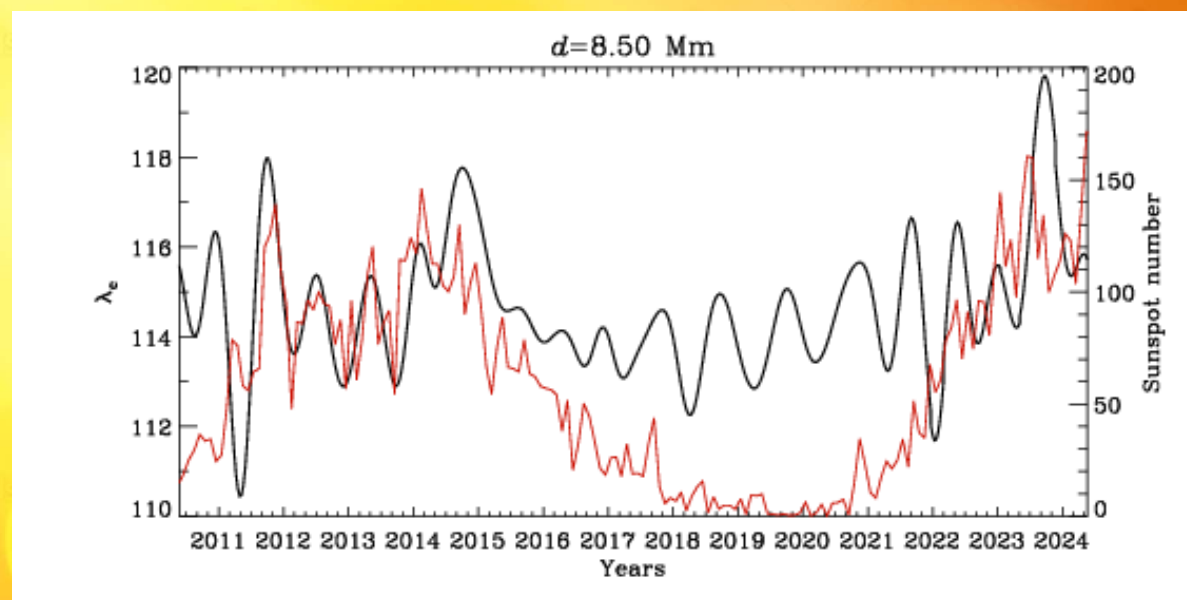
Вариации средней длины волны λ_c в 11-летнем цикле, $d = 4$ Мм



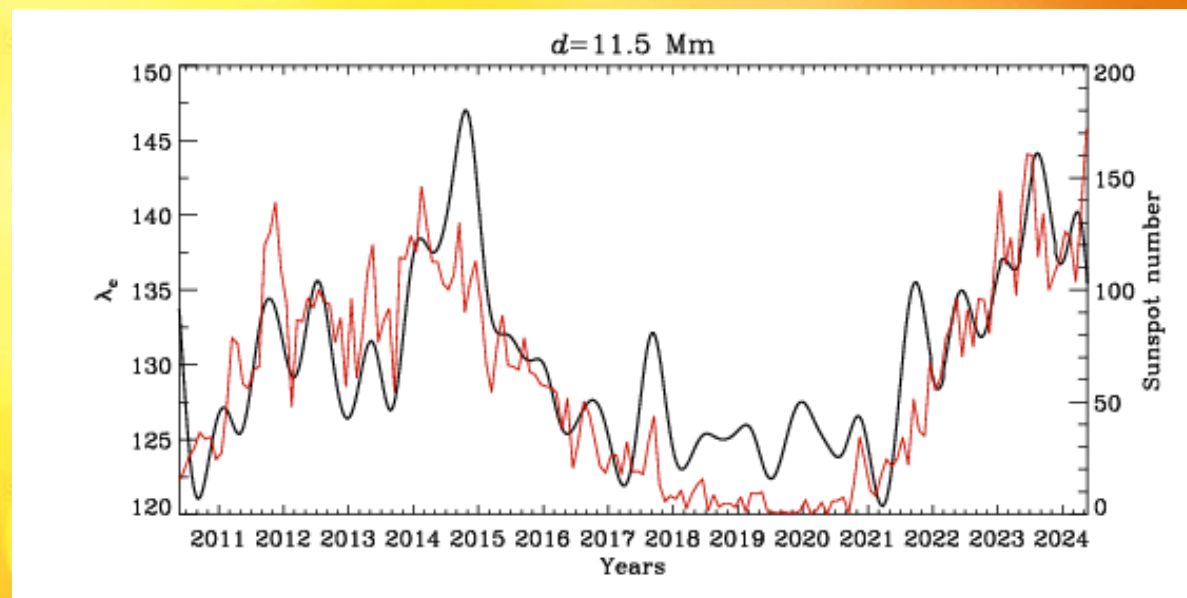
Вариации средней длины волны λ_c в 11-летнем цикле, $d = 6$ Мм



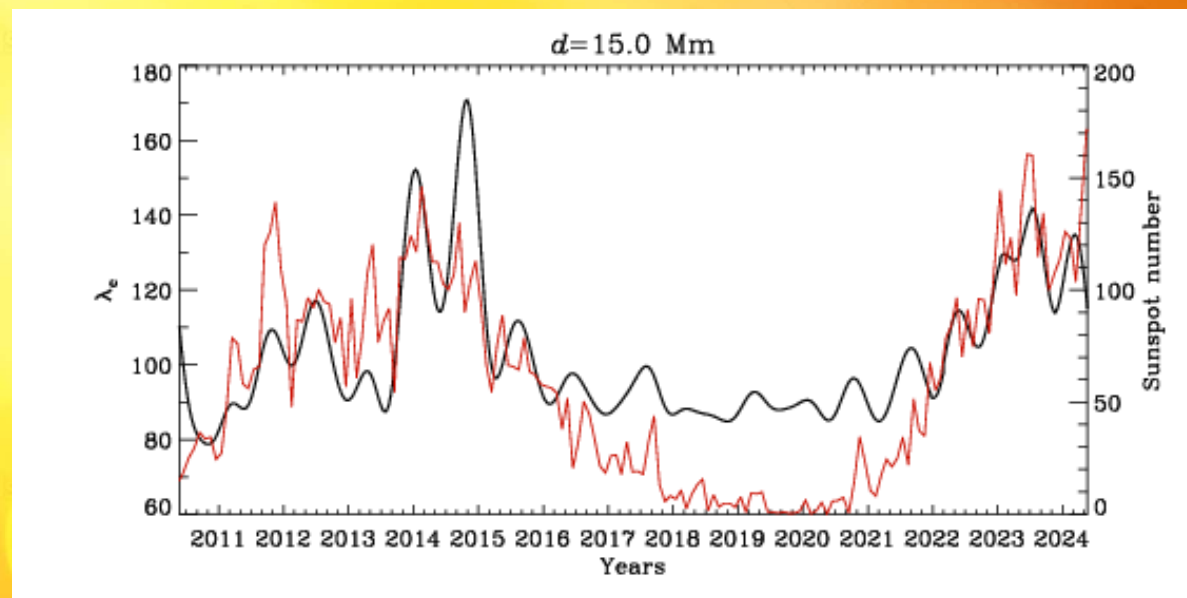
Вариации средней длины волны λ_c в 11-летнем цикле, $d = 8.5$ Мм



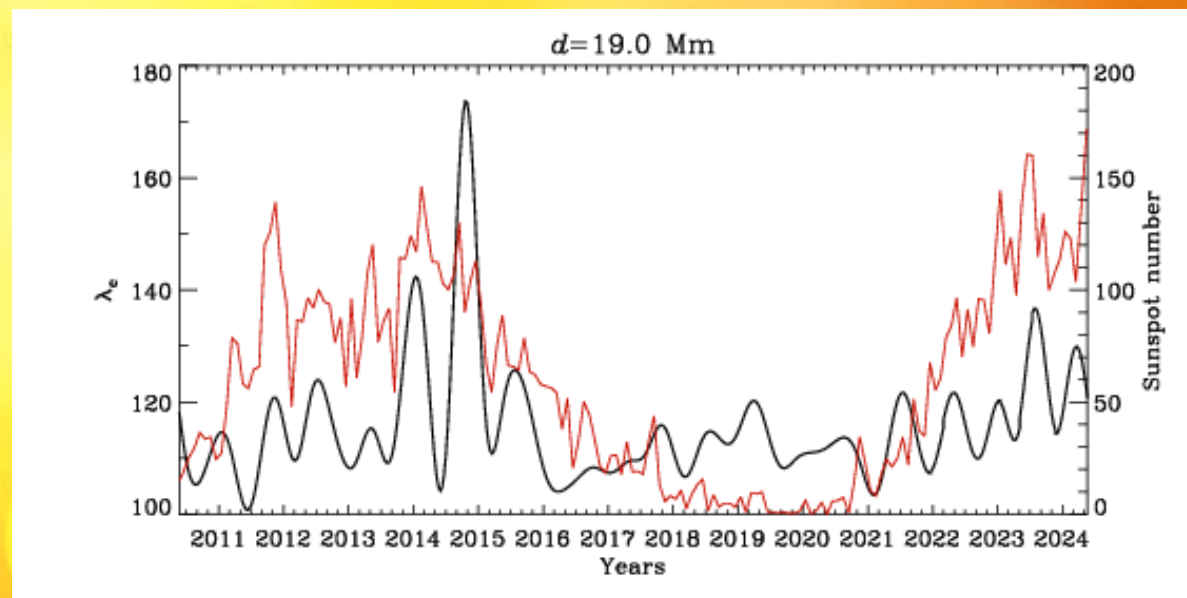
Вариации средней длины волны λ_c в 11-летнем цикле, $d = 11.5$ Мм



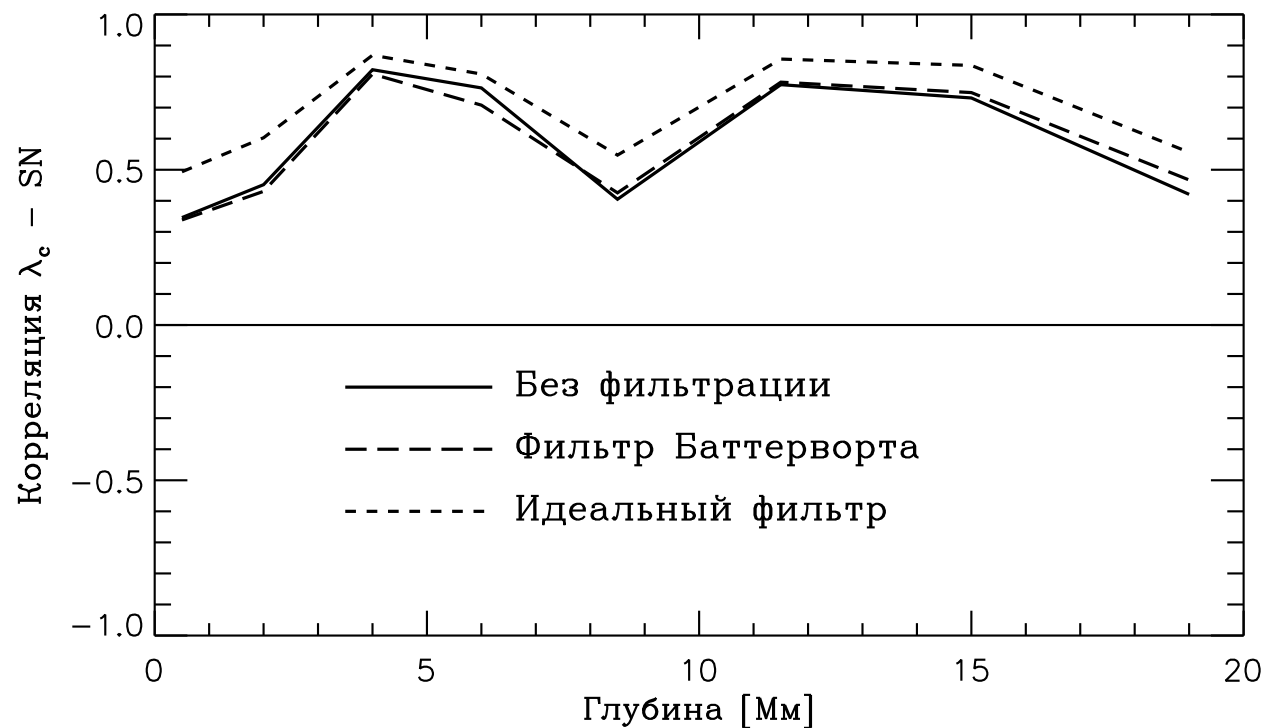
Вариации средней длины волны λ_c в 11-летнем цикле, $d = 15$ Мм



Вариации средней длины волны λ_c в 11-летнем цикле, $d = 19$ Мм

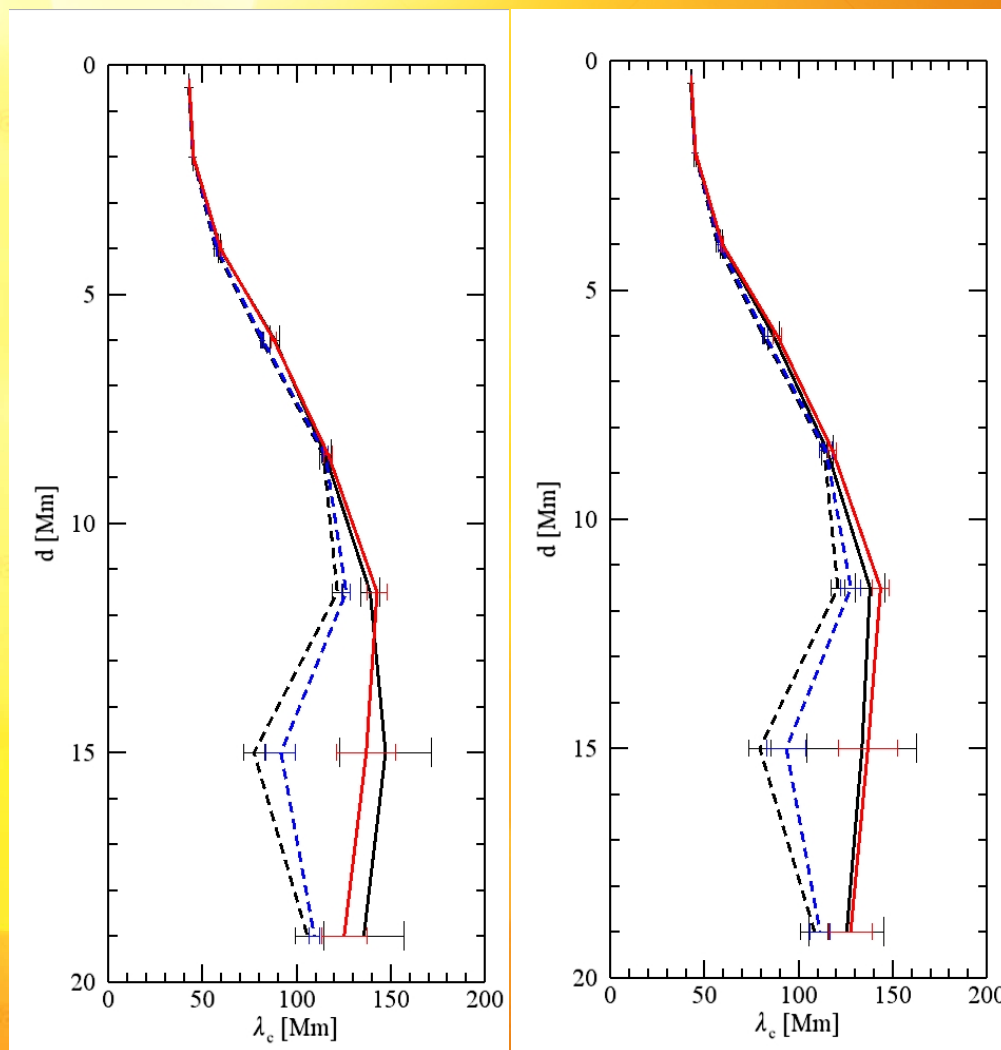


Корреляция средневзвешенной длины волны λ_c с числом солнечных пятен



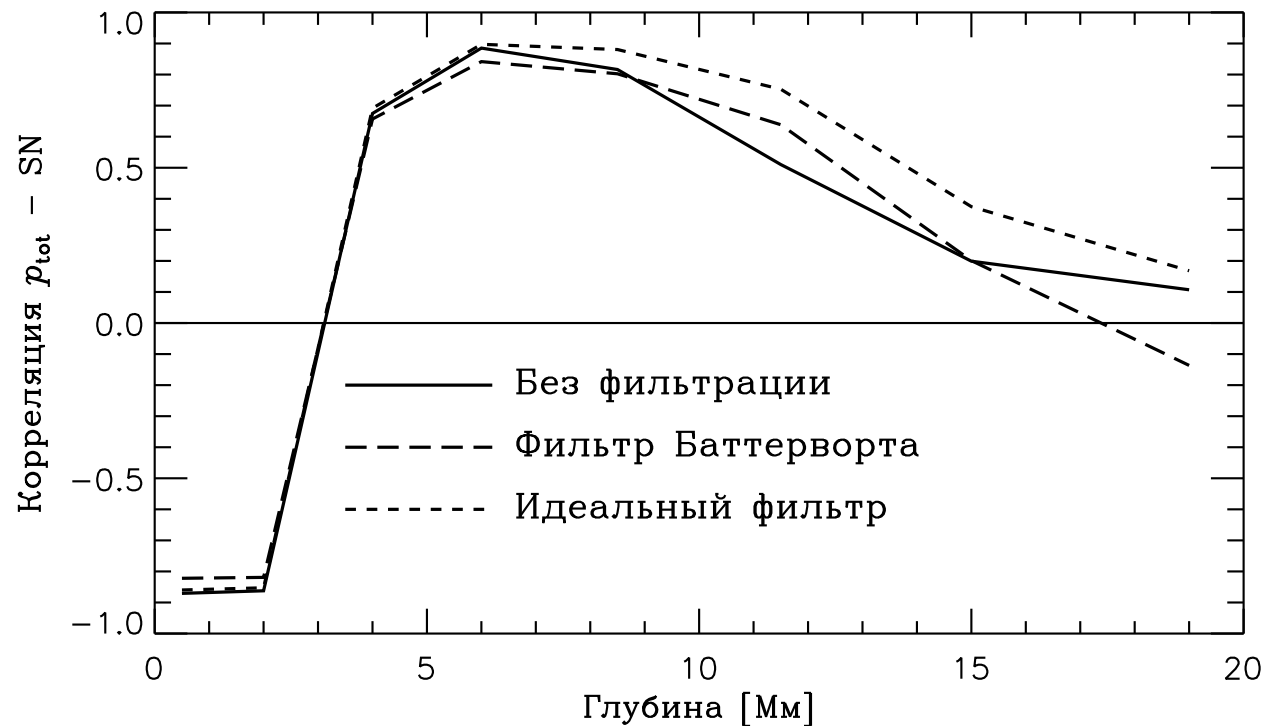
Изменение λ_c с глубиной

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

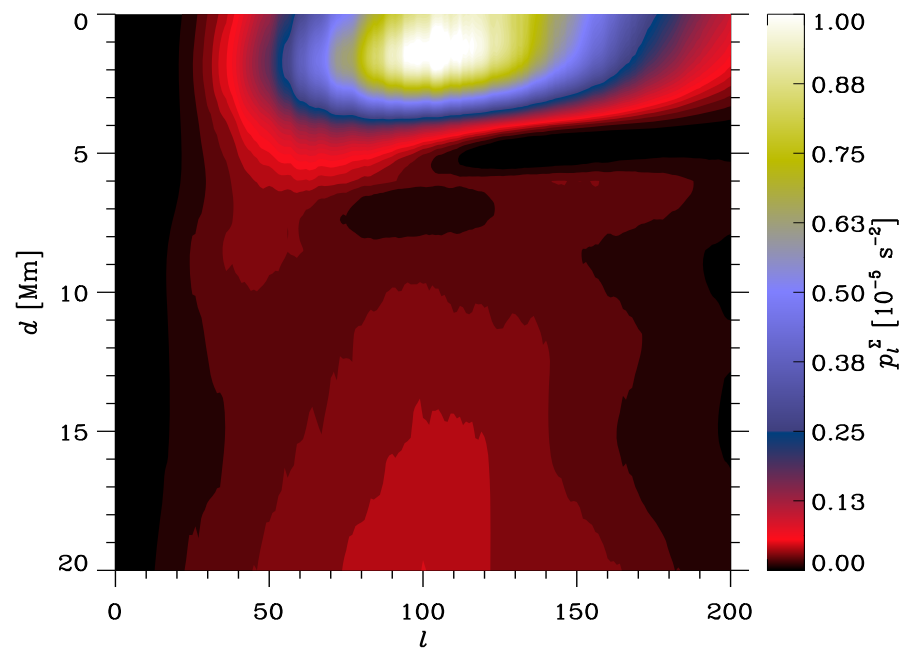


Слева –
усреднение за
180 суток,
справа – за 360
суток

Корреляция интегральной мощности с числом солнечных пятен

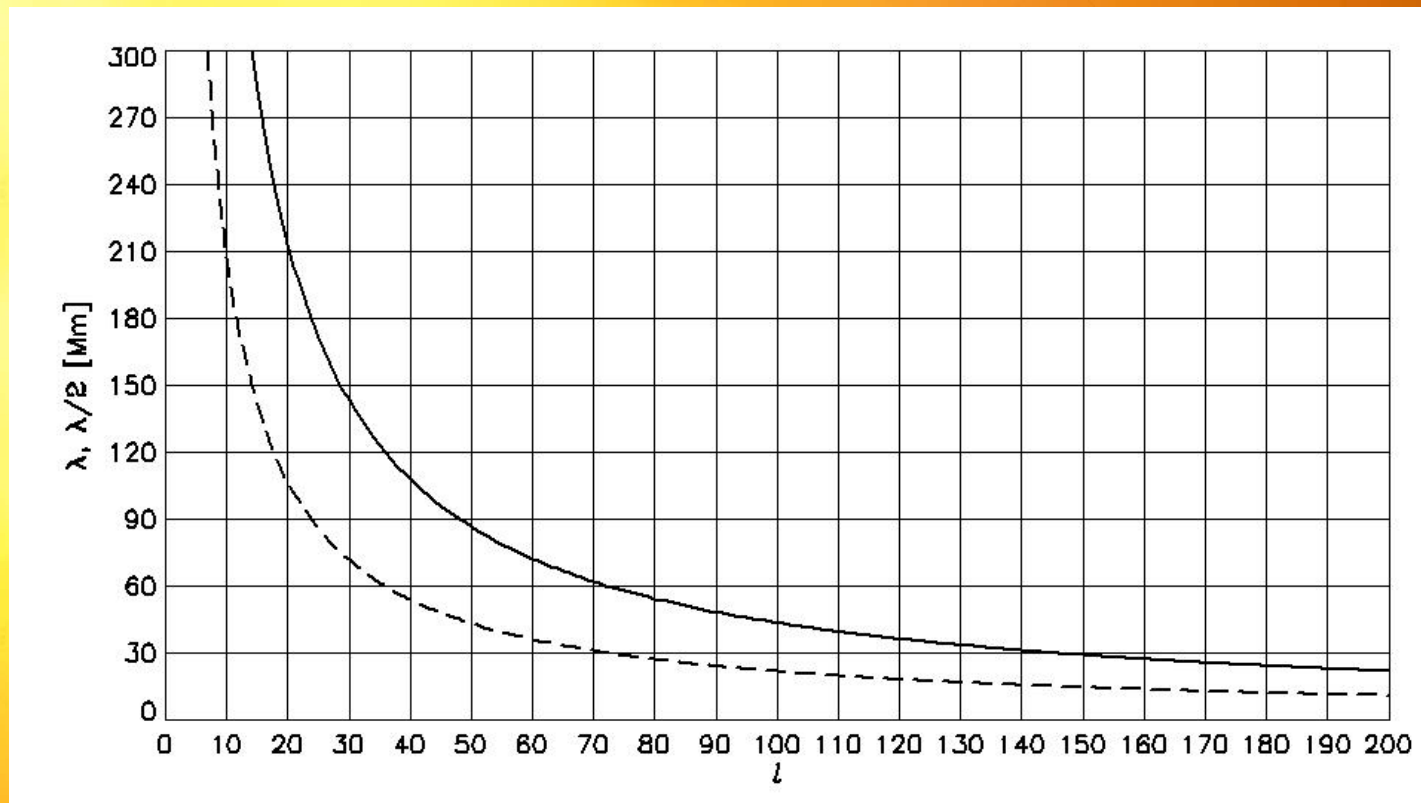


Распределение p_ℓ^Σ по глубине d и степеням ℓ

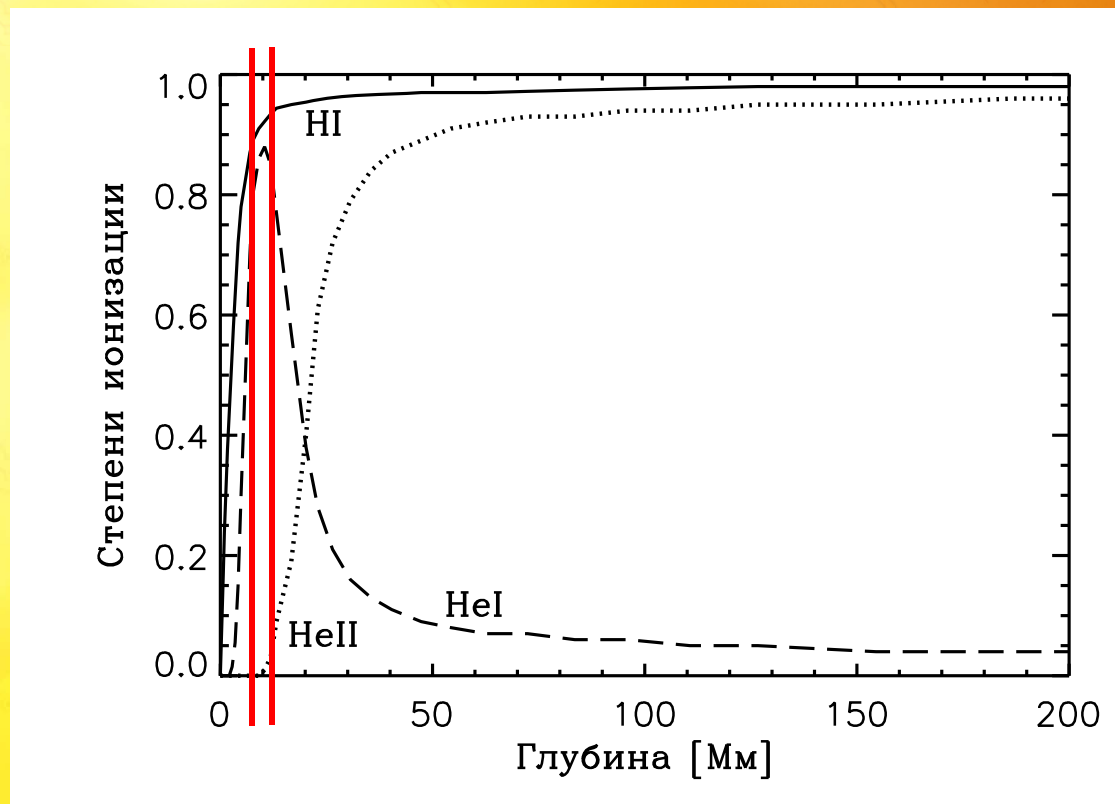


Оценка масштаба по формуле Джинса

$$\lambda = \frac{2\pi r}{\sqrt{l(l+1)}}$$



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