

УДК 523.9-327: [523.945.3+523.98]

## ЗАВИСИМОСТЬ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНИ СОЛНЕЧНЫХ СУПЕРГРАНУЛ ОТ ПОВЕРХНОСТНОЙ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И ВРАЩЕНИЯ

© 2023 Г. М. Соумья<sup>1\*</sup>, Г. Раджани<sup>2</sup>, У. Панивени<sup>3</sup>, Р. Срикант<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Инженерно-технологический институт для женщин Гиты Шишу Шикшана Сангха, Метагалли, Майсур, Карнатака, 570016 Индия

<sup>2</sup>Инженерный колледж Общества народного образования, Мандья, Карнатака, 571401 Индия

<sup>3</sup>Институт научных исследований Пурнапраджна, Деванахалли, Бангалор, Карнатака, 562110 Индия

Поступила в редакцию 13 мая 2023 года; после доработки 13 сентября 2023 года; принята к публикации 16 сентября 2023 года

На основе анализа временных рядов фильтрограмм Са II К проведено исследование продолжительности жизни и масштабов супергранул в активных и спокойных областях хромосферы Солнца, а также их взаимосвязи. Важно отметить, что, в отличие от масштаба супергранул и фрактальной размерности, продолжительность жизни супергранул не проявляет существенной зависимости от солнечной широты. Это говорит о том, что продолжительность жизни ячеек не зависит от дифференциального вращения Солнца и возможного сверхбыстрого вращения супергранул. На основе сравнения распределений двух параметров супергранул была получена функциональная зависимость, которая представляет собой линейную связь между продолжительностью жизни ячейки и ее площадью. Это можно объяснить, предполагая, что эволюция супергрануляционной сетки происходит через диффузию магнитного поля. Важным результатом нашего анализа является также установление того факта, что скорость диффузии в спокойных областях хромосферы примерно на 10% больше, чем в активных областях.

Ключевые слова: Солнце: грануляция — Солнце: активность

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Супергранулярная сетка представляет собой явление поверхностной солнечной конвекции, которое имеет важное значение для переноса солнечного потока. Впервые сильная связь между хромосферной сеткой и структурой супергрануляции была замечена Лейтоном на основе данных доплерограмм (Leighton et al., 1962; Leighton, 1963). В последующих исследованиях для изучения солнечной конвекции и магнетизма были использованы спектрогелиограммы Са II К, а затем и фильтрограммы, которые представляют собой важные инструменты (Chatzistergos et al., 2022). Ячейки супергрануляционной сетки, которые называются «супергранулами», характеризуются распределением с продолжительностью жизни  $T \approx 25^h$  и масштабом  $L \approx 35$  Мм. Начиная с ранних работ Simon and Leighton (1964), эти два параметра, а также связанные с супергранулами скорости и магнитные поля, были исследованы и описаны в широком диапазоне значений множеством ученых.

Ссылки на такие работы можно найти в McIntosh et al. (2011), Chatterjee et al. (2017), Mandal et al. (2017), Rajani et al. (2022) и других исследованиях. Сравнительно недавно, для изучения супергрануляции, были использованы такие космические приборы Helioseismic Magnetic Imager (HMI) на борту Solar Dynamics Observatory (SDO) и Michelson Doppler Imager (MDI) на борту Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) Williams et al. (2014).

Полученные значения продолжительности жизни супергрануляции демонстрируют некоторую вариабельность в зависимости от используемого метода и области исследования. Например, в работе Janssens (1970), использующей фильтрограммы H $\alpha$ , была получена оценка продолжительности жизни  $T \approx 21^h$ . Livingston and Orrall (1974) получили схожее значение, около  $22^h$ . В работе Singh et al. (1994), проведенной на основе наблюдений за супергранулами и отслеживания их появления и исчезновения, был сделан вывод, что продолжительность жизни супергранул обычно составляет несколько часов. С другой стороны, те же

\*E-mail: sowmyabharth5@gmail.com

авторы заметили, что некоторые исключительные супергранулы, обнаруженные вблизи активных областей, могут сохраняться в течение нескольких дней. Путем визуального исследования отдельных супергранул, Wang and Zirin (1988) обнаружили, что продолжительность жизни таких супергранул может составлять  $T > 50^h$ , и указали на то, что она может быть даже больше, чем та, которую получают с использованием метода кросс-корреляции (cross-correlation, CC) (Rogers, 1970). Различие обусловлено более высокой чувствительностью последнего к изменениям формы супергранул. Simon and Leighton (1964) оценили продолжительность жизни супергранул CC-методом и получили значение в 20 часов, используя временной ряд спектрогелиограмм Ca II K. Worden and Simon (1976) также применили CC-метод для оценки продолжительности жизни и получили значение в  $36^h$  часов, используя данные магнитограмм, используя CC-метод, наблюдая сетки Fe I  $\lambda 8988$  и Ca II K, Duvall (1980) и Raju et al. (1998b) получили оценки продолжительности жизни супергранул в  $42^h$  and  $25^h$  соответственно.

Преимущество методов визуального анализа состоит в том, что они позволяют напрямую отслеживать сложные морфологические изменения, такие как слияние, разделение, миграция, исчезновение и появление магнитных потоков, которые составляют эволюцию супергрануляционной сетки (Harvey and Martin, 1973; Wang et al., 1995). Поэтому оценка продолжительности жизни, полученная с использованием этого метода, может более точно отражать процессы, лежащие в основе динамики супергранул. Напротив, корреляционные методы неспособны выявить различные аспекты эволюции ячеек. Они могут не учесть некоторые важные детали, такие как исчезновение или появление определенных особенностей супергранул и изменения их формы, вызванные перемещением магнитных элементов.

На вопрос о том, продолжает ли существовать супергранула после завершения своей корреляционной продолжительности, имеются противоречивые данные: Wang and Zirin (1988) это утверждают, но сопоставимые результаты, полученные Rogers (1970) и Janssens (1970), с использованием соответственно методов корреляции и морфологии для данных H $\alpha$ , говоря об обратном. Аналогично, оценки продолжительности жизни, проведенные Singh et al. (1994), Raju et al. (1998a) и Paniveni et al. (2010) с использованием методов корреляции и визуального анализа на данных Ca II K, показывают схожие результаты как для активных, так и для спокойных областей супергрануляционной сетки. В случае протяженных супергрануляционных сеток, продолжительность жизни, оцененная

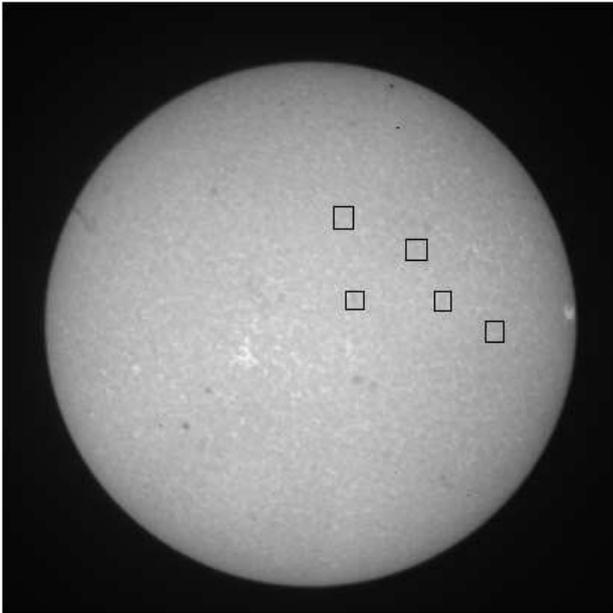
методом корреляции, может часто достигать значений 45–60 часов. Однако в контексте, связанном со сложными морфологическими изменениями, как например, в случае долгоживущих структур, такими как магнитные пуки или флокулы (Livingston and Orrall, 1974), более предпочтительным является визуальное изучение продолжительности жизни.

В данной работе исследуется и сопоставляется соотношение между продолжительностью жизни и размерами супергранул в активных и спокойных областях солнечной хромосферы с использованием временных рядов фильтрограмм Ca II K. Это исследование является продолжением работ, проведенных Singh et al. (1994) и Srikanth et al. (1999). Стоит отметить, что сетка Ca II K отслеживает концентрацию магнитного потока на границе супергранул благодаря увеличенной яркости сетки, которую они создают (Spruit et al., 1990; Hagenaar et al., 1997; Raju and Singh, 2002). Основываясь на методе анализа данных, предложенном последними авторами, мы выявляем функциональную зависимость, опираясь на распределение двух параметров супергранул. Полученные результаты подтверждают ожидаемую картину эволюции сетки, основанной на диффузии магнитных полей, а также влиянии этих полей на свойства супергранул.

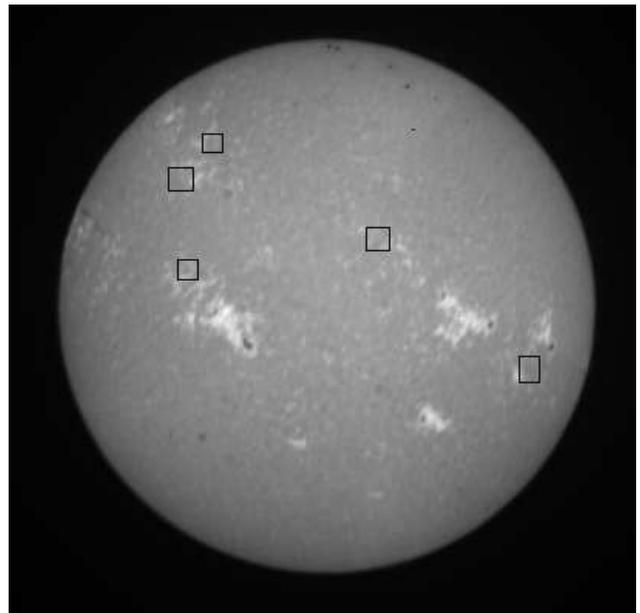
Статья построена следующим образом. В разделе 2, мы представляем используемые данные и методы их анализа. Основные результаты, касающиеся продолжительности жизни ячеек и их масштабов, представлены в разделе 3.

## 2. ДАННЫЕ И АНАЛИЗ

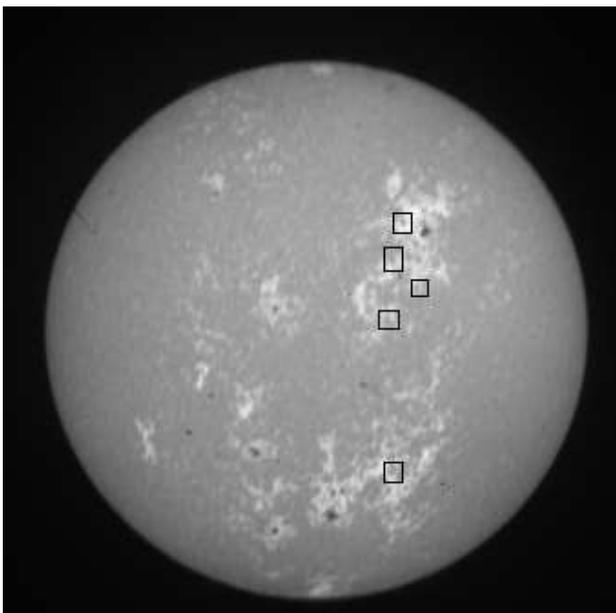
Наша работа была сосредоточена на изучении поведения супергранул в спокойных, полуактивных и активных областях. Различия в продолжительности жизни ячеек в областях с разным уровнем активности могут быть теоретически объяснены различиями в скоростях диффузии магнитного потока (Schrijver et al., 1989). Размер супергранулы  $L$  оценивался как квадратный корень из площади, ограниченной границами ячейки, которые были выделены на фильтрограммах Ca II K. Для оценки продолжительности жизни проводились наблюдения с использованием данных Солнечной обсерватории Кодайканала (Kodaikanal Solar Observatory (KSO)) за 1998, 2002, 2004 and 2007 годы, охватывая периоды спада, минимума и активной фазы солнечного цикла. В данном анализе использовались данные, включающие около 1200 Ca II K фильтрограмм для 23-го солнечного цикла. Для сглаживания влияния шумов, вызванных пятиминутными осцилляциями, использовалось усреднение по времени за 10 минут. Этот метод давал примерно шесть кадров данных за час. Для оценки



**Рис. 1.** Ячейки спокойных областей: Выборка супергранул в спокойных областях солнечной хромосферы (из архива 23-го цикла KSO).



**Рис. 3.** Ячейки полуактивных областей: выборка супергранул в полуактивных областях солнечной хромосферы (из архива 23-го цикла KSO).



**Рис. 2.** Ячейки активных областей: выборка супергранул в активных областях солнечной хромосферы (из архива 23-го цикла KSO).

продолжительности жизни в данном периоде рассматривалось примерно  $72^h$  данных, что составляло примерно 432 кадра с 10-ти минутным интервалом между кадрами. Определенная супергранула отслеживается последовательно на разных кадрах, и продолжительность ее жизни рассчитывается как

временной интервал между кадрами ее первого появления и исчезновения (Paniveni et al., 2004). Продолжительность жизни супергранулы оценивалась для спокойных, активных и полуактивных областей. Под спокойными областями понимаются те, которые находятся далеко от магнитно-активных областей (см. рис. 1). Супергранулы активных областей находятся непосредственно рядом с активными областями (см. рис. 2), в то время как супергранулы полуактивных областей находятся в местах с промежуточной магнитной активностью (см. рис. 3).

В предыдущих исследованиях продолжительность жизни супергранул получали с помощью метода кросс-корреляции, применяемого к данным временных рядов (Srikanth et al., 1999). В этом методе анализируется поведение супергранул, предполагая, что они диффундируют внутри магнитной сетки, и продолжительность жизни определяется на основе временного масштаба этой диффузии. В отличие от этого, оценки продолжительности жизни, которые основаны на визуальном анализе, как это было сделано в данной работе, неявно связаны со временем, которое затрачивает плазма на перемещение от центра супергранулы к ее краям (Krishan, 1999). Поэтому ожидается, что визуальный анализ позволит определить время оборота завихрений. Несмотря на то, что оценка продолжительности жизни супергранул методом визуального анализа довольно трудоемка, она все же довольно надежна (Paniveni et al., 2010). Наш объем выборки небольшой, но выявляет характерные особен-

ности, сопоставляя различные фазы активности и области на поверхности солнца.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Зависимость продолжительности жизни ячейки от Солнечной широты

Наши оценки продолжительности жизни ячеек в спокойных областях сопоставимы с ранее опубликованными данными, которые основаны на данных Kodaikanal Solar Observatory (KSO) (Chatterjee et al., 2017; Mandal et al., 2017; Rajani et al., 2022; Sowmya et al., 2022). Например, оценка для спокойных и полуактивных областей в наших данных соответствует результатам, полученными Singh et al. (1994), которые определили, что продолжительность жизни находится в интервале  $T \in [15; 40]$  часов, с наиболее вероятной продолжительностью  $22^h$ . Продолжительность жизни активных областей, по данным этих авторов, практически вдвое больше, чем у спокойных областей, что согласуется с нашими результатами (см. таблицу 1).

На рис. 4 представлен график зависимости продолжительности жизни ячеек от их широты. Масштаб и фрактальная размерность супергранул также изменяются в зависимости от широты. Это может быть связано с дифференциальным вращением Солнца Sowmya et al. (2022). Масштаб супергранул показывает вертикально-горизонтальную асимметрию на более высоких широтах (Raju, 2020). Таким образом, наши наблюдения указывают на то, что продолжительность жизни ячеек не зависит от солнечного вращения, в то время как пространственные характеристики ячеек действительно оказывают влияние.

Таким образом, наши наблюдения не подтверждают, что продолжительность жизни супергранул зависит от сверхбыстрого вращения, то есть возможно более быстрого вращения супергранул по сравнению с магнитными структурами и плазмой на Солнце. Однако следует отметить, что сверхбыстрое вращение является искусственным явлением, вызванным проекционными эффектами в данных, полученных с помощью доплеровских измерений (Meunier and Roudier, 2007).

#### 3.2. Нахождение функциональной зависимости между продолжительностью жизни ячейки и ее размера

Такие параметры, как продолжительность жизни ячейки  $T$  и масштабы длины  $L$ , очевидно, взаимосвязаны. Мы можем непосредственно оценить функциональную зависимость  $L$  от  $T$  с помощью аппроксимации кривой. Также мы ожидаем, что эта

**Таблица 1.** Продолжительность жизни супергранул на Солнце в тихих, полуактивных и активных областях

Область	Время жизни, часы
Спокойная	$23.58 \pm 1.3$
Полуактивная	$34 \pm 1.7$
Активная	$54.4 \pm 1.6$

зависимость будет отражена в распределении этих двух параметров, представленных на рис. 5 и 6. Эта информация также может быть использована для оценки функциональной зависимости между  $L$  и  $T$  для спокойных или активных областей.

Здесь мы используем косвенный метод для оценки функциональной зависимости между  $L$  и  $T$  путем оценки преобразования, которое отображает распределение  $T$  относительно распределения  $L$ . В некоторой упрощенной форме мы предполагаем, что их соответствующие распределения достаточно представить двумя параметрами:

- 1) асимметрией  $\varsigma$ , которая является мерой отклонения распределения относительно среднего значения  $\mu$ , и
- 2) эксцессом  $\kappa$ , который является мерой «хвостатости» распределения.

В статистике, для случайной величины, описываемой вероятностным распределением  $f(x)$ , скошенность (skewness) — это количественная характеристика асимметрии  $f(x)$ . Она вычисляется с использованием третьего стандартизованного момента и определяется следующим образом:

$$\varsigma = \frac{1}{\alpha^3} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 f(x) dx, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — это стандартное отклонение. Распределение может быть скошенным вправо (положительно скошенным) или влево (отрицательно скошенным), когда оно имеет более выраженный хвост на положительной (или отрицательной) стороне относительно среднего значения. Распределение с нулевой асимметрией симметрично относительно среднего значения и не имеет скошенности ни вправо, ни влево. В качестве базовых примеров: нормальное распределение имеет нулевую асимметрию, экспоненциальное распределение имеет асимметрию  $\varsigma = 2$ , для логнормального распределения, описывающего случайную величину  $X$ , логарифм которой  $\ln(X)$  распределен нормально с дисперсией  $\beta$ , асимметрия равна

$$\varsigma = (e^\beta + 2)\sqrt{e^\beta - 1}.$$

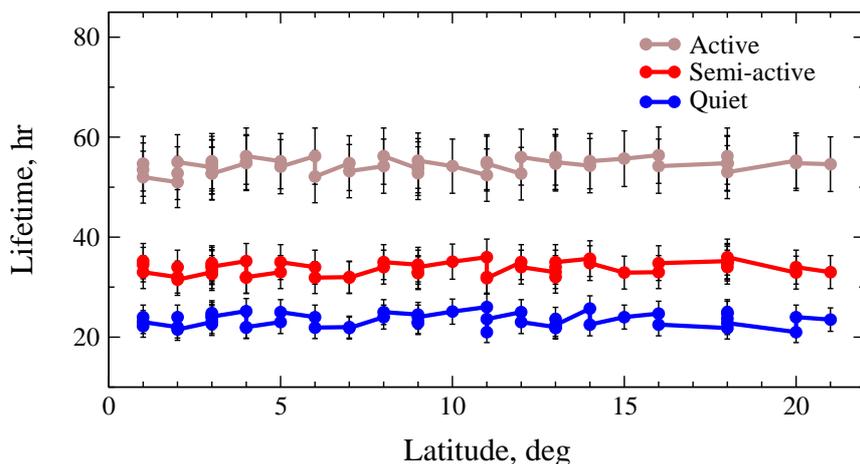


Рис. 4. График продолжительности жизни супергранул (в часах) в зависимости от солнечной широты (в градусах) на основе данных 23-го солнечного цикла.

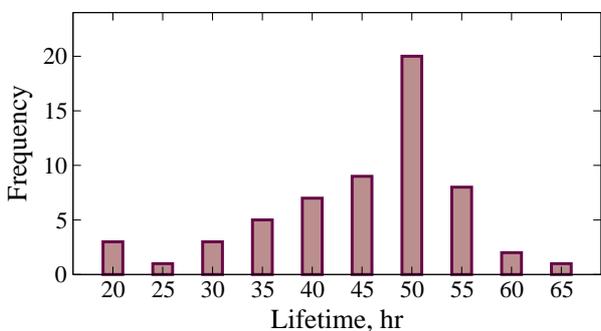


Рис. 5. Гистограмма продолжительности жизни сетки ячеек Ca II K в активной области. Кривая показывает левосторонний хвост. Значения скошенности (skewness) и эксцесса (kurtosis), вычисленные для этого распределения, представлены в таблице 2.

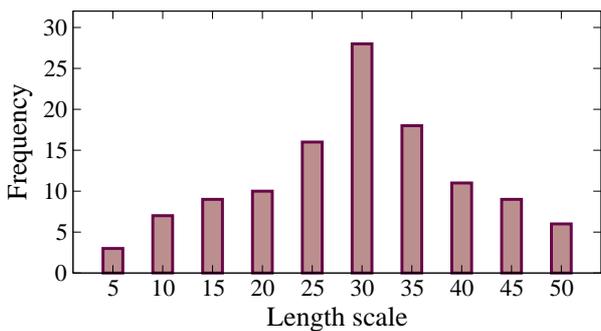


Рис. 6. Гистограмма масштаба длины супергранул в активной области. Значения скошенности (skewness) и эксцесса (kurtosis), вычисленные для этого распределения, представлены в таблице 2.

Для случайной величины, описываемой вероятностным распределением  $f(x)$ , эксцесс это количественная характеристика «хвостатости» распре-

Таблица 2. Статистика распределения продолжительности жизни и масштаба сетки ячеек Ca II K для активных и спокойных областей. Заметим, что все распределения плоские (platykurtic), то есть имеют более низкий эксцесс, чем у нормального распределения, для которого эксцесс  $\kappa = 3$

Область	Масштаб длины		Время жизни	
	активная	спокойная	активная	спокойная
Асимметрия	0.463	0.779	0.865	1.278
Эксцесс	2.757	2.638	2.045	2.028

ления  $f(x)$ . Эксцесс измеряет насколько хвостато распределение, то есть насколько сильно оно имеет выбросы в экстремальных значениях, вместо того, чтобы данные сосредотачивались ближе к среднему значению. Эксцесс вычисляется с использованием четвертого стандартизованного момента и определяется следующим образом:

$$\kappa = \frac{1}{\alpha^4} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^4 f(x) dx. \quad (2)$$

В качестве базовых примеров: нормальное распределение имеет эксцесс  $\kappa = 3$ ; распределение Лапласа имеет эксцесс  $\kappa = 6$ , равномерное распределение имеет эксцесс  $\kappa = 1.8$ . Эксцесс указывает на то, насколько «концентрированы» данные вокруг среднего значения. Распределение может быть либо плоским (платикуртическим, platykurtic), либо острокуртическим (лептокуртическим, leptokurtic), в зависимости от того, меньше или больше его эксцесс по сравнению с нормальным распределением. Асимметрия и эксцесс для наших данных представлены в таблице 2.

Когда случайная величина  $X$  подвергается пре-

образованию  $\eta$ , то свойства распределения преобразованной переменной  $\eta(X)$ , в частности, асимметрия  $\varsigma$  и эксцесс  $\kappa$ , в общем случае могут отличаться от свойств распределения  $X$ . Например, мы видели, что нормальное распределение некоторой случайной величины  $X$  имеет нулевую асимметрию, в то время как логнормальное распределение (которое характеризует  $e^X$ ) имеет положительную асимметрию. Это означает, что если мы позволим продолжительности жизни ячейки и масштабу быть связанными через  $T \equiv \eta(L)$ , то правильное преобразование  $\eta$  должно гарантировать, что асимметрия и эксцесс  $\eta(L)$  будут близки к соответствующим значениям распределения  $T$ . Однако существует бесконечное множество функций  $\eta$ , которые могут удовлетворить этому требованию. Поэтому мы должны ограничить выбор функции  $\eta$  до разумного набора функций с двумя параметрами, чтобы этот подход был пригодным для анализа. Это делается следующим образом.

Под действием обратимого преобразования  $\eta$  для случайной переменной  $x$ , заданной как  $y \equiv \eta(x)$ , функция распределения  $f(x)$  становится  $g(y)$ , которая определяется следующим образом:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x)dx = \int_{\phi(x_1)}^{\phi(x_2)} g(y)dy, \quad (3)$$

в силу сохранения вероятности. Положительная определенность  $f(x)$  подразумевает:

$$g(y)|dy| = f(x)|dx|,$$

откуда следует

$$g(y) = f[\eta^{-1}(y)]|(\eta^{-1})'(y)|, \quad (4)$$

где символ  $'$  обозначает первую производную.

Допустим  $T = \eta(L)$ . Далее, пусть  $f(L)$  и  $g(T)$  обозначают соответствующие функции распределения. Для того чтобы наш метод был применим, мы должны ограничиться двухпараметрическим семейством преобразований. Разумно ограничить  $\eta$  полиномиальным отношением вида

$$T = aL^n + b. \quad (5)$$

Согласно уравнению (4)

$$g(T) = \frac{f(L)}{[(L - b)^{n-1}a]^{\frac{1}{n}} n} \quad (6)$$

Теперь мы применяем описанный метод к нашим данным о продолжительности жизни супергранул в зависимости от их масштаба (длины).

В таблице 2 представлены данные асимметрии и эксцесса для активных областей, которые были показаны на гистограммах, на рис. 5 и 6, а также для спокойных областей (для сокращения информации

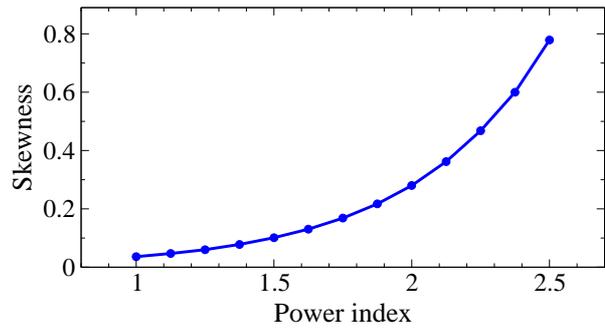


Рис. 7. График асимметрии распределения для различных показателей степени масштаба длины. Асимметрия распределения продолжительности жизни составляет 0.865.

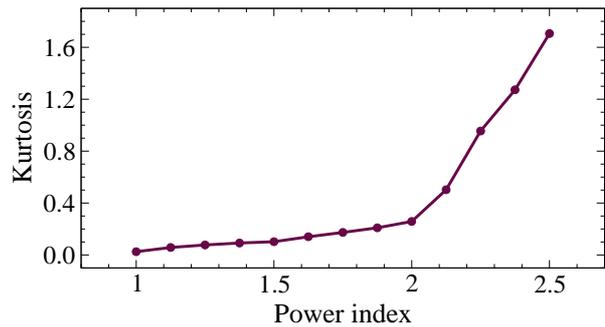


Рис. 8. График распределения эксцесса для различных степеней «n» масштаба длины.

не представлены). Исходя из анализа асимметрии, мы приходим к выводу, что как в активных, так и в спокойных областях масштабы супергранул менее асимметричны, чем продолжительность их жизни. Эта характеристика, кажется, является общей для супергранул, независимо от уровня солнечной активности.

Для определения значения параметра  $n$  для данной области (активной или спокойной), значения асимметрии и эксцесса для преобразованного масштаба длины строятся как функции  $n$  в диапазоне  $1.0 \leq n \leq 2.5$ . Графики для обоих параметров, а именно асимметрии  $\varsigma(n)$  и  $\kappa(n)$ , представлены на рис. 7 и 8 соответственно. Как и ожидалось, оба графика демонстрируют монотонное увеличение для значений  $x \geq 1.0$ .

В случае активных областей для наблюдаемой асимметрии распределения продолжительности жизни, равной  $\varsigma = 0.463$  (таблица 2), асимметрия распределения масштаба длины соответствует диапазону, изображенному на рис. 7, который составляет  $2.125 \leq n \leq 2.25$ . Аналогично, для наблюдаемого эксцесса распределения продолжительности жизни  $\kappa = 2.75$ , эксцесс преобразованного распределения масштаба длины соответствует диапазону  $1.875 \leq n \leq 2$ , как показано на рис. 8.

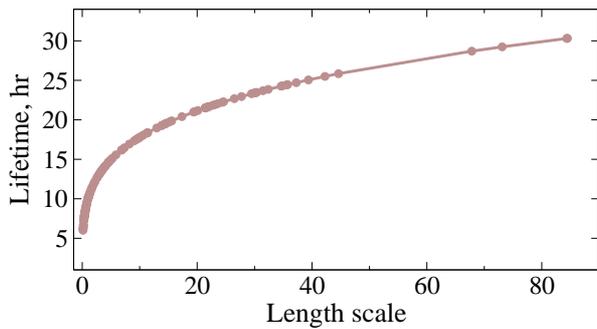


Рис. 9. Продолжительность жизни как функция масштаба длины для ячеек сетки Ca II К в активной области. Функция аппроксимации дана уравнением (7).

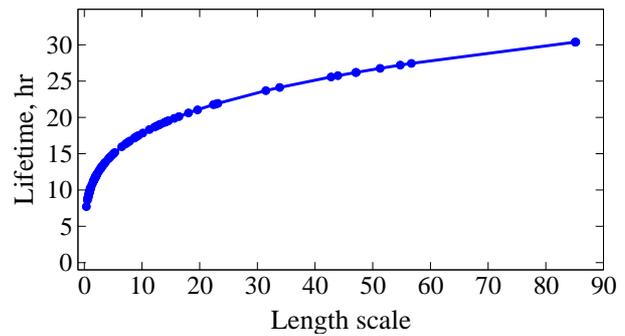


Рис. 10. Продолжительность жизни (в часах) как функция масштаба длины для ячеек сетки Ca II К в спокойной области. График аппроксимирован с использованием функциональной формы, представленной в уравнении (5).

Мы выбираем  $n = 2$ , и алгоритм Монте-Карло с наименьшими квадратами дает следующую функцию:

$$T = 7.45 + 3.5A, \quad (7)$$

где  $T$  указано в часах, а площадь области супергрануляции  $A \equiv L^2$  измеряется в  $\text{Мм}^2$ . То есть, учитывая погрешности, вместо уравнения (7), мы можем использовать функцию аппроксимации  $T = \alpha + \beta A$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  — это константы аппроксимации, выраженные в единицах  $T$  и  $TL^{-2}$  соответственно, при этом  $\alpha = 7.45 \pm 0.025$  часов и  $\beta = 3.5 \pm 0.01 \text{ Мм}^2$ . На рис. 9 представлены наблюдаемые данные зависимости продолжительности жизни от масштаба в активных областях, а также аппроксимация, основанная на уравнении (7). Это показывает достаточно хорошее согласие между ними.

Для спокойных областей аналогичные расчеты дают следующие результаты: для данных асимметрии распределения масштаба длины и продолжительности жизни диапазон значений  $2 \leq n \leq 2.125$ , а для данных эксцесса распределения масштаба длины и продолжительности жизни  $1.75 \leq n \leq 2$ . Аналогично уравнению (7), для спокойных областей, алгоритм Монте-Карло по наименьшим квадратам дает следующую функцию:

$$T = 6.75 + 3.25A, \quad (8)$$

где  $T$  измеряется в часах и  $L^2$  в единицах  $\text{Мм}^2$ . Так же как и ранее, с указанием погрешностей, мы можем предложить вместо уравнения (8), функцию приближения  $T = \mu + \nu A$ , где  $\mu$  и  $\nu$  — это константы приближения, выраженные в единицах  $T$  и  $TL^{-2}$  соответственно, с  $\mu = 6.75 \pm 0.023$  часов и  $\nu = 3.25 \pm 0.02 \text{ Мм}^2$ . На рис. 10 представлены наблюдаемые данные зависимости продолжительности жизни от масштаба в спокойных областях, а также аппроксимация на основе уравнения (8). Это показывает достаточно хорошее согласие между ними.

Уравнения (7) и (8) согласуются с зависимостью, описанной в работах Singh et al. (1994) и Srikanth et al. (1999). В этих исследованиях была выявлена линейная зависимость между продолжительностью жизни супергранул и их масштабом. Эту зависимость можно в целом объяснить через модель, в которой продолжительность жизни супергранул связана с диффузией магнитных элементов. Однако стоит отметить, что вышеупомянутые исследования ограничивались изучением только спокойных областей на Солнце, в то время как наше исследование расширяет этот аспект и включает в себя сравнительный анализ спокойных и активных областей.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании мы анализировали продолжительность жизни и характеристики размера супергрануляционных ячеек в активных и спокойных областях солнечной хромосферы, а также взаимосвязь между ними, используя временной ряд фильтрограммы Ca II К. Наши результаты показали, что продолжительность жизни супергранул не проявляет существенной зависимости от солнечной широты, что свидетельствует о том, что продолжительность жизни ячеек не зависит от дифференциального вращения Солнца. Эта независимость отличается от зависимости масштабов супергранул и их фрактальной размерности от солнечной широты. Например, Raju et al. (1998b) отмечали, что размеры супергранул, наблюдаемые в Ca II К могут изменяться до 7% в зависимости от солнечной широты. Sowmya et al. (2022) сообщают об антикорреляции между фрактальной размерностью и широтой в полосе между  $20^\circ$  с.ш. и  $20^\circ$  ю.ш.

Наши результаты относительно зависимости продолжительности жизни от масштаба могут быть интерпретированы как попытка разъяснить относительную динамику активных и спокойных областей Солнца. Из уравнений (7) и (8),

мы видим, что угловой коэффициент составляет  $3.5 \text{ часа Мм}^{-2}$ , что немного больше в случае активных областей, по сравнению с спокойными областями, где угловой коэффициент составляет  $3.25 \text{ часа Мм}^{-2}$ . Это различие можно интерпретировать как следствие того факта, что продолжительность жизни и масштаб супергрануляционных ячеек в активных и спокойных областях могут зависеть от их взаимодействия с окружающими магнитными полями. Если быть более конкретным, то, отмеченное различие в уклонах может быть объяснено двумя взаимосвязанными факторами:

- 1) уменьшением размеров ячейки в условиях магнитной активности (Singh and Varpu, 1982), и
- 2) увеличением продолжительности жизни ячейки в активных регионах, как указано в таблице 1.

Воздействие магнитного потока можно понимать как результат удержания (вмороженности) плазмы магнитным полем (Sowtha et al., 2022).

Следовательно, угол наклона  $dT/dA$  в уравнениях (7) или (8) может быть интерпретирован как обратное значение коэффициента диффузии  $D$ , связанного с ячейкой, то есть как  $1/D$ . Для активных областей у нас получается  $D = 10^6 / (3.5[\pm 0.01] \times 3600) \approx 79.3 \pm 0.2 \text{ км}^2 \text{ с}^{-1}$ . Аналогично, для спокойных областей мы получаем примерно  $D \approx 85.5 \pm 0.5 \text{ км}^2 \text{ с}^{-1}$ . Интуитивно понимается, что более длительное время жизни ячеек в активной области обусловлено более низкой скоростью диффузии, и наши результаты подразумевают, что в активной области диффузия происходит примерно на  $79.3/85.5 \approx 0.93$  медленнее, чем в спокойной области. Заметим, что это согласуется с недавними исследованиями (Abramenko, 2017; 2018), демонстрирующими сверхдиффузию в спокойных областях и практически нормальную диффузию в активных областях. Важно отметить, что различие в скорости диффузии между спокойными и активными областями становится более заметным, особенно когда рассматриваются ячейки с масштабом более 5 Мм (Abramenko, 2018). Это соответствует диапазону масштабов, рассматриваемому в наших данных. Таким образом, результаты нашего исследования согласуются с наблюдениями, проведенными в работе Abramenko (2018), и подтверждают, что более высокая скорость диффузии в спокойных областях по сравнению с активными областями заметно проявляется при анализе ячеек с масштабом более 5 Мм.

Таким образом, относительная диффузия между активными и спокойными областями вероятно зависит от фазы солнечного цикла. Например, в период солнечного минимума большие солнечные ячейки в активных областях могут сохранять свою

структуру и идентичность до 10 месяцев, в то время как в период солнечного максимума продолжительность жизни таких исключительно больших ячеек редко превышает четыре месяца. Эти аспекты могут стать предметом будущих исследований, и продолжить тему, представленную в данной работе.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим рецензента за внимательное рассмотрение рукописи и комментарии, которые помогли нам улучшить ясность и представление статьи.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета организаций. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. I. Abramenko, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471** (4), 3871 (2017).
2. V. I. Abramenko, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **480** (2), 1607 (2018).
3. S. Chatterjee, S. Mandal, and D. Banerjee, *Astrophys. J.* **841** (2), article id. 70 (2017).
4. T. Chatzistergos, N. A. Krivova, and I. Ermolli, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **9**, id. 336 (2022).
5. T. L. Duvall, *Solar Physics* **66** (2), 213 (1980).
6. H. J. Hagenaar, C. J. Schrijver, et al., *Astrophys. J.* **481** (2), 988 (1997).
7. K. L. Harvey and S. F. Martin, *Solar Physics* **32** (2), 389 (1973).
8. T. Janssens, *Solar Physics* **11** (2), 222 (1970).
9. V. Krishan, *Astrophysical Plasmas and Fluids* (Dordrecht, Springer, 1999), pp. 197–234.
10. R. B. Leighton, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **1**, 19 (1963).
11. R. B. Leighton, R. W. Noyes, and G. W. Simon, *Astrophys. J.* **135**, 474 (1962).
12. W. Livingston and F. Orrall, *Solar Physics* **39**, 301 (1974).
13. S. Mandal, S. Chatterjee, and D. Banerjee, *Astrophys. J.* **844** (1), article id. 24 (2017).
14. S. W. McIntosh, R. J. Leamon, R. A. Hock, et al., *Astrophys. J.* **730** (1), article id. L3 (2011).
15. N. Meunier and T. Roudier, *Astron. and Astrophys.* **466** (2), 691 (2007).

16. U. Paniveni, V. Krishan, J. Singh, and R. Srikanth, arXiv preprint physics/0407079 (2004).
17. U. Paniveni, V. Krishan, J. Singh, and R. Srikanth, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **402** (1), 424 (2010).
18. G. Rajani, G. M. Sowmya, U. Paniveni, and R. Srikanth, Research in Astronomy and Astrophysics **22** (4), id. 045006 (2022).
19. K. Raju, Astrophys. J. **899** (2), id. L35 (2020).
20. K. Raju and J. Singh, Solar Physics **207**, 11 (2002).
21. K. Raju, R. Srikanth, and J. Singh, Solar Physics **178** (2), 251 (1998a).
22. K. Raju, R. Srikanth, and J. Singh, Solar Physics **180** (1), 47 (1998b).
23. E. H. Rogers, Solar Physics **13** (1), 57 (1970).
24. C. Schrijver, J. Cote, C. Zwaan, and S. Saar, Astrophys. J. **337**, 964 (1989).
25. G. Simon and R. Leighton, Astrophys. J. **140**, 1120 (1964).
26. J. Singh and M. K. V. Bappu, Solar Physics **71**, 161 (1982).
27. J. Singh, B. Nagabhushana, G. Babu, and W. Uddin, Solar Physics **153** (1), 157 (1994).
28. G. M. Sowmya, G. Rajani, U. Paniveni, and R. Srikanth, Research in Astronomy and Astrophysics **22** (9), id. 095018 (2022).
29. H. C. Spruit, A. Nordlund, and A. Title, Annual Rev. Astron. Astrophys. **28** (1), 263 (1990).
30. R. Srikanth, K. Raju, and J. Singh, Solar Physics **184** (2), 267 (1999).
31. H. Wang and H. Zirin, Solar Physics **115** (2), 205 (1988).
32. J. Wang, H. Wang, F. Tang, et al., Solar Physics **160** (2), 277 (1995).
33. P. E. Williams, W. D. Pesnell, J. G. Beck, and S. Lee, Solar Physics **289**, 11 (2014).
34. S. P. Worden and G. W. Simon, Solar Physics **46** (1), 73 (1976).

## Dependence of Solar Supergranular Lifetime on Surface Magnetic Activity and Rotation

G. M. Sowmya<sup>1</sup>, G. Rajani<sup>2</sup>, U. Paniveni<sup>3</sup>, and R. Srikanth<sup>3</sup>

<sup>1</sup> GSSS Institute of Engineering and Technology for Women, Metagalli, Mysuru, Karnataka, 570016 India

<sup>2</sup> PES College of Engineering, Mandya, Karnataka, 571401 India

<sup>3</sup> Poornaprajna Institute of Scientific Research, Devanahalli, Bangalore, Karnataka, 562110 India

The lifetimes and length-scales for supergranular cells in active and quiescent regions of the Solar chromosphere, and the relation between the two, were studied using a time series of Ca II K filtergrams. The lifetimes, in contrast to supergranular length scale and fractal dimension, show no significant dependence on Solar latitude, suggesting that cell lifetimes are independent of the differential rotation and a possible supergranular super-rotation. The functional form of the relation was obtained guided by a comparison of the distributions of the two supergranular parameters. We infer a linear dependence of cell lifetime on area, which can be understood by the assumption of the network's evolution via a diffusion of the magnetic field. Our analysis suggests that the diffusion rate in quiet regions is about 10% greater than in active regions.

Keywords: *Sun: granulation—Sun: activity*