

УДК 523.942.3

В. Н. Карпинский

Быстрая крупномасштабная перестройка структуры солнечной грануляции

По снимкам Советской стратосферной солнечной обсерватории обнаружено, что за время 300 с (среднее время жизни гранул) происходит общая перестройка структуры солнечной грануляции на площади $(4-6) \cdot 10^8$ км². Число гранул изменяется в 1.4—1.7 раза, общая площадь, занимаемая гранулами, — в 1.4 раза, их средняя площадь — в 2 раза, в противофазе с числом гранул. Изменяется частота слияния гранул, а также частота их деления. Эволюция гранул нестационарна и несимметрична к обращению времени [4].

FAST LARGE-SCALE RESTRUCTURING OF SOLAR GRANULATION, by Karpinskiy V. N.—Using direct photographs taken with the Soviet Solar Stratospheric Observatory it was found that a change in the nature of the solar granulation structure occurs during a lifetime of granules (300 s) [4]. The change of the granule number $N(t_k)$ by the factor of 1.4—1.7 over the photospheric area $(4-6) \cdot 10^8$ км² is statistically significant. The total granular area S changes by the factor 1.4 and the mean area of the granules — by the factor 2 in the antiphase with N . When the granule number increases, new granules arise due to fragmentation 3.6 times more frequently than the old ones vanish due to merging. When the granule number decreases, their merging is twice as frequent as fragmentation.

The evolution of the granules is asymmetric with respect to time inversion. These peculiarities reflect real physical variations of the photospheric structure. They are coherent in the large area, comparable with the size of supergranules and are likely to be of global character.

Описание эволюции солнечной грануляции является пробным камнем для разрабатываемых сейчас ее моделей. Из-за неповторимости картины, разнообразия и сложности структуры сопоставление не может быть выполнено просто путем сравнения реализаций. Оно возможно только на уровне совокупности основных закономерностей структуры грануляции, ее эволюции. Выявлению их посвящены работы [6—11]. Однако глубина, разнообразие и надежность таких данных остаются еще недостаточными. Это связано со сложностью структуры и ограничениями пространственного разрешения ее деталей при наблюдениях.

В настоящей работе по материалам с высоким разрешением, полученным из стратосферы, исследованы основные закономерности эволюции грануляции, составляющие ее элементарные события, симметрия их и всего процесса к обращению времени (замене t на $-t$), ее нестационарность.

Использована последовательность из девяти прямых фотоснимков грануляции высшего качества (пространственное разрешение 0.25"), полученных в полете Советской стратосферной солнечной обсерватории 30 июля 1970 г. [5]. В табл. 1 указано всемирное время для каждого кадра и интервал времени от начала серии t_k . Исследовалась общая для всех снимков прямоугольная область невозмущенной фотосферы площадью $6.4 \cdot 10^8$ км² ($34 \times 35''$) с координатами ($\varphi = 25^\circ$, $\lambda = -4^\circ$, $\theta = 21^\circ$). Для четырех кадров (они подчеркнуты в табл. 1) построены карты изофот через 3 % в интервале ΔI ($-24 \div +27$ %). Средняя яркость фотосферы принималась за 100 % [1, 2]. Для остальных кадров использовались их крупномасштабные ($1'' = 7.3$ мм) фотоотпечатки. Область делилась на девять равновеликих прямоугольных площадок.

Подсчитывалось число гранул $N_l(t_k)$ в площадке l ($l=1, 2, \dots, 9$) на каждом кадре k и среднее по девяти площадкам:

$$N_A(t_k) = \sum_{l=1}^9 N_l(t_k)/9.$$

Результаты приведены в табл. 1. Понятие гранула, необходимое для ее однозначного выделения как структурного элемента, определено в [3, 4]. Гранула, ее площадь отождествлялись с областью изофот, которые замкнуты вокруг одного максимума яркости, не превышающего уровень $\Delta I = +6\%$ (гранулярный уровень), или одиночного выброса вверх на этом уровне. Наружная граница гранулы определяется самой низкой и внешней замкнутой изофотой, включающей данный максимум или выброс и не содержащей других максимумов и выбросов на уровнях менее $\Delta I = +6\%$.

Таблица 1. Число гранул на площадках для последовательности кадров и статистические параметры площадок

k	Номер кадра	UT	t_k, c	$N_l(t_k)$									$N_A(t_k)$
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	2158	9 ^h 10 ^m 50 ^s	0	34	33	34	34	31	32	35	41	32	34
2	2167	9 12 50	120	42	45	47	50	43	39	40	43	44	44
3	2176	9 14 20	210	40	44	48	45	42	37	39	42	47	43
4	2188	9 16 20	330	37	43	43	43	42	30	40	40	37	39
5	2200	9 18 20	450	32	39	38	37	38	30	32	38	37	36
6	2215	9 20 50	600	32	34	36	34	38	34	38	39	31	35
7	2224	9 22 20	690	36	36	33	33	38	34	32	35	36	35
8	2239	9 24 50	840	37	42	44	41	45	40	38	37	42	41
9	2245	9 25 50	900	45	42	42	42	48	36	45	39	38	42
			\bar{N}_l	37	40	41	40	40	35	38	39	38	39
			\hat{n}_l	-2	0	1	1	1	-4	-2	0	-	
			\hat{x}_l	0.7	1.0	1.2	1.2	0.6	0.4	0.3	0.4	1.2	
			\hat{r}_l	0.82	0.97	0.96	0.94	0.83	0.62	0.67	0.44	0.88	
			\hat{r}'_l	0.85	0.91	0.93	0.93	0.80	0.67	0.57	0.67	0.93	
			α	10 ⁻⁶	10 ⁻²	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	0.03	10 ⁻³	0.66	10 ⁻⁵	

На рис. 1 приведены зависимости $N_l(t_k)$ для всех площадок (толстая линия) и $N_A(t_k)$ (тонкая), их средние значения

$$\bar{N}_l = \sum_{k=1}^9 N_l(t_k)/9; \quad \bar{N}_A = \sum_{l=1}^9 N_l/9.$$

Есть основания полагать, что существует общее на различных площадках систематическое изменение числа гранул со временем, выходящее за пределы случайного разброса — статистического шума. Эта гипотеза требует статистического обоснования. Мы оценили коэффициенты корреляции зависимостей $N_l(t_k)$ для разных площадок: $r\{N_{l1}(t_k), N_{l2}(t_k)\}$.

В совокупности шести площадок ($l=1, 2, 3, 4, 5, 9$) хотя бы одна из коррелятивных связей значимо отличается от случайной для уровня значимости $\alpha=0.05$ ($r>0.68$). Для повышения статистической точности мы объединили их в среднюю площадку B . Зависимость $N_B(t_k)$ представлена на рис. 2, *a*. Моделью числа гранул, соответствующей гипотезе, может быть случайный процесс с изменяющимся во времени

математическим ожиданием и статистическим рассеянием:

$$N_l(t_k) = n_0 + n_l + \kappa_l n(t_k) + v_{kl},$$

где n_0 — постоянная составляющая математического ожидания; n_l — его изменения для разных площадок; $\kappa_l n(t_k)$ — его регулярная составляющая для площадки l , изменяющаяся во времени; v_{kl} — статисти-

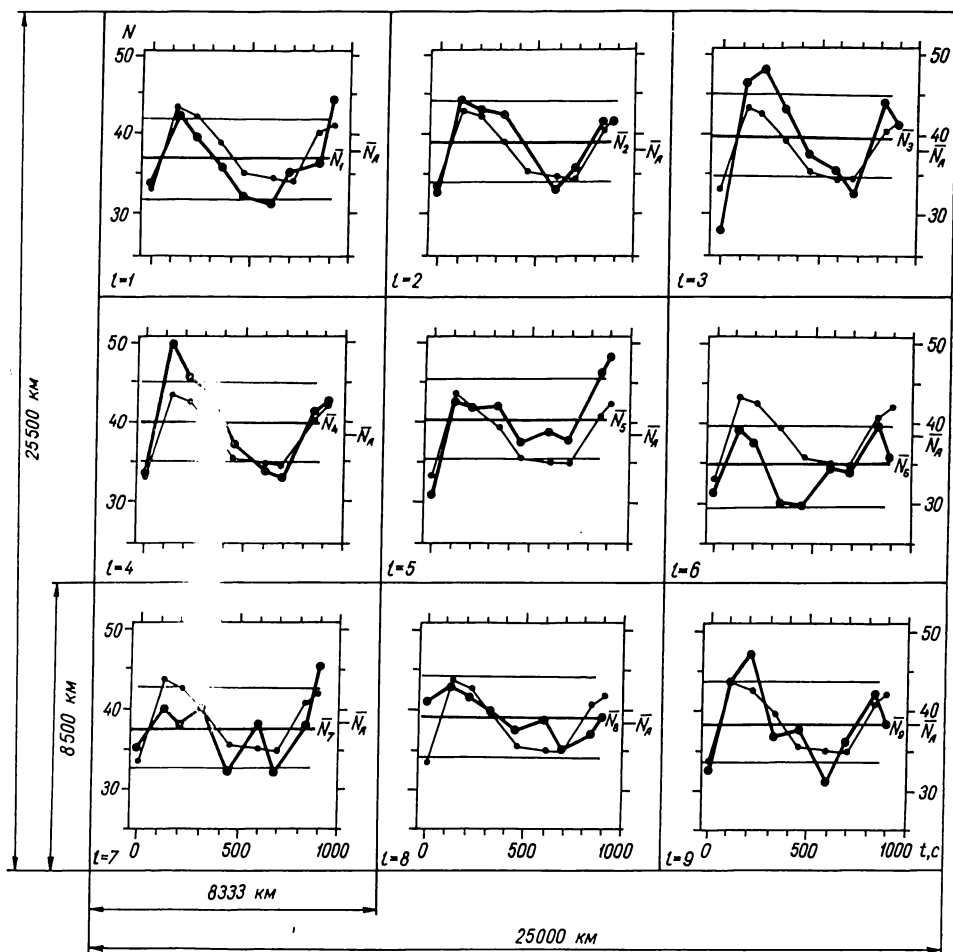


Рис. 1. Изменение числа гранул со временем для девяти равновеликих частей области фотосферы Солнца ($34 \times 35''$)

ческий шум с постоянным стандартным отклонением $\sigma\{v_{kl}\} = \sigma$. Он не коррелирован для разных кадров и площадок, а также с $n(t_k)$. Для площадки B

$$N_B(t_k) = \frac{1}{6} \sum_l N_l(t_k) = n_0 + n(t_k) + \frac{1}{6} \sum_l v_{kl}, \quad k = 1 \div 9, \quad l = 1 \div 5, 9;$$

причем κ_l , n_l и $n(t_k)$ выбраны так, что

$$\sum_l \kappa_l / 6 = 1; \quad \sum_l n_l = 0; \quad \sum_k n(t_k) = 0.$$

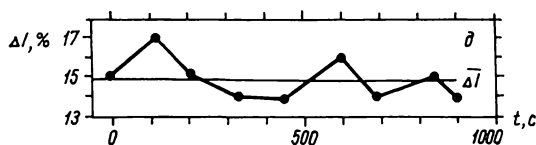
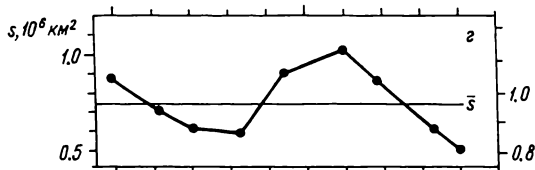
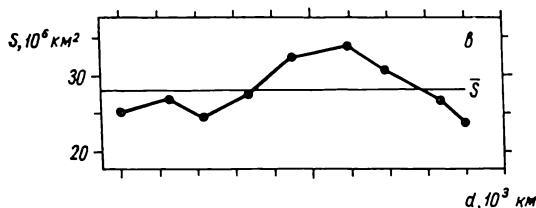
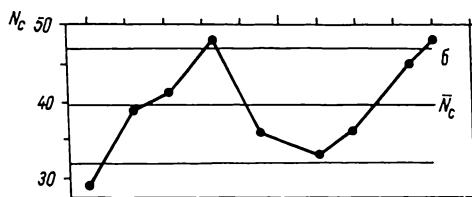
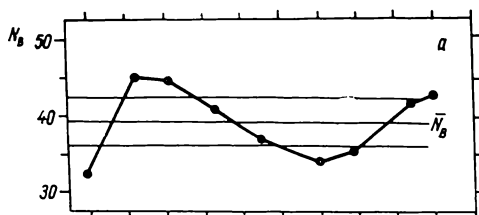
Обозначим

$$\bar{N}_B = \sum_k \sum_l N_l(t_k) / 54 = n_0 + \sum_k \sum_l v_{kl} / 54;$$

$$\bar{N}_l = \sum_k N_l(t_k) / 9 = n_0 + n_l + \sum_k v_{kl} / 9.$$

Оценим параметры модели:

$$\hat{n}_0 = \bar{N}_B = 39.2; \hat{\sigma}^2 = \frac{27}{20} [\hat{\sigma}^2 \{N_l(t_k) - N_B(t_k)\} - \hat{\sigma}^2 \{\bar{N}_l - \bar{N}_B\}] = 6.34; \sqrt{\hat{\sigma}^2} = 2.5; \hat{n}_l = \bar{N}_l - \bar{N}_B \text{ (данные приведены в табл. 1);}$$



$$\hat{\sigma}^2 \{n_l\} = \hat{\sigma}^2 \{\bar{N}_l - \bar{N}_B\} - 5\hat{\sigma}^2/54 = 1.0; \hat{n}(t_k) = N_B(t_k) - \bar{N}_B \text{ (зависимость следует из рис. 2, а);}$$

$$\hat{\sigma}^2 \{n(t_k)\} = \hat{\sigma}^2 \{N_B(t_k) - \bar{N}_B\} - 4\hat{\sigma}^2/27 = 21.7;$$

$$\sqrt{\hat{\sigma}^2 \{n(t_k)\}} = 4.7; \hat{\kappa}_l =$$

$$= [N_l(t_k) - \bar{N}_l] / [N_B(t_k) - \bar{N}_B]$$

(табл. 1). Все оценки, кроме последней, несмещенные. Смещение κ_l совершенно несущественно.

В табл. 1 приведены также непосредственные оценки коэффициента корреляции $\hat{r}_l = r\{N_l(t_k), N_B(t_k)\}$ между ходом числа гранул для каждой площадки l и средней пло-

Рис. 2. Изменение характеристик грануляции со временем: а — числа гранул для средней из шести площадок $N_B(t_k)$; б — числа гранул для площадки С — $N_C(t_k)$; в — полной площади, занимаемой гранулами $S(t_k)$; г — средней площади на одну гранулу $s(t_k)$; д — среднего перепада яркости гранулы $\Delta l(t_k)$

щадки B и соответствующие расчетные оценки \hat{r}'_l :

$$\hat{r}'_l = \frac{\hat{\kappa}_l \hat{\sigma}^2 \{n(t_k)\} + 0.148 \hat{\sigma}_l^2}{\sqrt{(\hat{\kappa}_l)^2 \hat{\sigma}^2 \{n(t_k)\} + 0.89 \hat{\sigma}_l^2} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \{n(t_k)\} + 0.148 \hat{\sigma}^2}}$$

Здесь $\hat{\sigma}_l^2$ — оценка стандартного отклонения статистического шума для каждой площадки. При расчетах мы полагали $\hat{\sigma}_l^2 = \hat{\sigma}^2$. Оценки \hat{r} и \hat{r}'_l согласуются. Это подтверждает, что величина статистического шума не изменяется от площадки к площадке и условие $\hat{\sigma}^2 \{v_{kl}\} = \sigma^2 = \text{const}$ выполняется. Исключение составляет площадка с $l=8$. Для нее $\hat{\sigma}_l = 2.5 \hat{\sigma}$.

На рис. 1 для всех площадок представлены линии $N_l \pm 2\sqrt{\hat{\sigma}^2}$, а на рис. 2, а — линии $\bar{N}_B \pm 3\sqrt{\hat{\sigma}^2/6}$, показывающие статистический разброс для $N_l(t_k)$ и $N_B(t_k)$ соответственно. Уровень значимости α отличия изменений от случайных приведен в табл. 1.

Из изложенного следует: 1. Реальны систематические коррелированные изменения числа гранул во времени на площадках $l=1, 2, 3, 4, 5, 9$ (общая площадь $4.3 \cdot 10^8$ км²). Уровень значимости отличия их от случайных $\alpha < 0.01$. Число гранул изменяется в 1.2—1.5 раза за время от 2 до 5 мин. Их относительное изменение характеризуется стандартным отклонением

$$\hat{\kappa}_l [\hat{\sigma} \{n(t_k)\} / \hat{n}_0] = \pm 8.4 \div 17 \%;$$

2. Для статистического разброса шума $\sqrt{\hat{\sigma}^2 / \hat{n}_0} = 0.4$ при $n_0 = 39.2$. Постоянство числа гранул соблюдается более строго, чем при распределении Пуассона $\sigma / \sqrt{n_0} = 1$; 3. Изменение n_l для разных площадок мало: $\hat{\sigma} \{n_l\} / \hat{n}_0 = 2.5 \%$. Исключение составляет площадка $l=6$ ($\hat{n}_6 / \hat{n}_0 = 12 \%$); 4. На площадках $l=6, 7, 8$ систематическое изменение числа гранул значимо не проявляется. Причина этого — малая амплитуда κ_l , а для площадки $l=8$ — еще и возрастание шума в 2.5 раза.

Качественные отличия структуры грануляции, изменения плотности гранул для площадок $l=1-5, 9$ отчетливо видны непосредственно на снимках, соответствующих минимумам и максимумам числа гранул.

Детальное исследование параметров гранул и характера их эволюции проведено для компактного семейства гранул, занимающего часть площадок $l=1, 2$ общей площадью $0.7 \cdot 10^8$ км² (площадка С). Эволюция его отражалась деревом графов. Вершины соответствуют от-

Таблица 2. Изменение грануляции на площадке С

k	t_k, c	$N(t_k)$	ΔN_{+1}	ΔN_{-1}	ΔN_{+2}	ΔN_{-2}	ΔN_{+}	ΔN_{-}	ΔN	$S(t_k), 10^4 \text{ км}^2$	ΔS_0	ΔS_{+1}	ΔS_{-1}	ΔS_{+2}	ΔS_{-2}	ΔS	$s(t_k), 10^4 \text{ км}^2$	$\Delta I(t_k), \%$
1	0	29								2531							86	15
2	120	39	5	0	6	1	11	1	12	2685	73	73	0	-35	44	155	69	17
3	210	41	0	3	7	2	7	5	12	2575	-78	0	-58	0	26	-110	60	15
4	330	48	0	0	12	5	12	5	17	2738	165	0	0	-21	19	163	57	14
5	450	36	1	1	3	15	4	16	20	3257	220	25	-10	15	269	519	90	14
6	600	33	0	3	7	7	7	10	17	3310	-10	0	-60	-40	163	53	100	16
7	690	36	0	0	4	1	4	1	5	3092	-198	0	0	-15	-5	-218	86	14
8	840	45	3	1	8	1	11	2	13	2671	-250	30	-44	-162	5	-421	60	15
9	900	48	0	1	6	2	6	3	9	2384	-220	0	-19	-58	10	-287	50	14
Среднее		39.4								2805							73	15

Примечание. $\hat{\sigma} \{N_C(t_k)\} = \sqrt{\sum_{k=1}^9 [N_C(t_k) - \bar{N}_C]^2 / 8} = 6.6$; $\hat{\sigma} = 2.5$ — шум; $\hat{n}_C = 1$; $\hat{\kappa}_C = 1.3$;

$\hat{r}_C = 0.77$; $\hat{r}'_C = 0.94$.

дельным гранулам и кадрам, характеризуются площадью этой гранулы $S_m(t_k)$, максимальным пиковым перепадом яркости для вершины гранулы ΔI_m относительно средней яркости фотосферы $\bar{\mathcal{J}}$, где $\Delta I_m = (\mathcal{J}_m - \bar{\mathcal{J}})/\bar{\mathcal{J}}$, и другими параметрами. Из экстенсивных характеристик площадки, кроме $N(t_k)$, находились зависимости полной площади, занимаемой гранулами $S(t_k)$, средней площади гранулы $s(t_k) = S(t_k)/N(t_k)$ и среднего перепада их яркости

$$\Delta I(t_k) = \frac{1}{N(t_k)} \sum_{m=1}^{N(t_k)} \Delta I_m(t_k).$$

Они представлены на рис. 2, б—д, где показаны также их средние величины. На рис. 2, г справа дана шкала среднего диаметра гранулы d . Указаны уровни $\bar{N} \pm 3\sigma$ для шума.

Оценены коэффициенты корреляции между: числом гранул на площадках B и C ($\hat{r} = 0.77$); $N(t_k)$ и $S(t_k)$ ($\hat{r} = -0.46$); $N(t_k)$ и $s(t_k)$ ($\hat{r} = -0.89$); $S(t_k)$ и $s(t_k)$ ($\hat{r} = 0.80$); $s(t_k)$ и $\Delta I(t_k)$ ($\hat{r} = 0.19$).

Графы, связывающие вершины дерева, отражают элементарные события эволюции гранул: появление новой гранулы — ее «рождение» (число таких событий обозначим ΔN_{+1} , ее исчезновение — «смерть» (ΔN_{-1}), парные деления (ΔN_{+2}) и слияния (ΔN_{-2}). Деление и слияние кратности более двух рассматривались как последовательно парные. Они не часты (один случай деления на четыре части и семь — на три при 34 парных делениях; три слияния по три при 28 парных слияниях). $\Delta N_{+} = \Delta N_{+1} + \Delta N_{+2}$ и $\Delta N_{-} = \Delta N_{-1} + \Delta N_{-2}$ — полное число событий, приводящих к увеличению и уменьшению числа гранул соответственно; $\Delta N = \Delta N_{+} + \Delta N_{-}$ — полное число событий, качественно изменяющих гранулу как индивидуальное структурное образование. Качественная неизменность гранулы является не событием, а состоянием, процессом. Число событий изменяется в среднем пропорционально интервалу времени, а число гранул, остающихся качественно неизменными, уменьшается с увеличением промежутка.

В табл. 2 для площадки C кроме $N(t_k)$, $S(t_k)$, $s(t_k)$ и $\Delta I(t_k)$ даны ΔN и ΔS для всех типов событий. В примечании к таблице приведены оценки стандартного отклонения для $\bar{N}(t_k)$ и шума, статистические характеристики C относительно B . Предполагается, что между кадрами не происходит нескольких последовательных обратных событий, «нейтрализующих» друг друга и остающихся незаметными.

Частоту элементарных событий, приводящих к изменению числа гранул, характеризует средний промежуток времени τ_j между последовательными событиями данного типа j , рассчитанный на одну гранулу. Если за время Δt в ансамбле \bar{N} гранул произошло ΔN_j таких событий, то $\bar{\tau}_j = \Delta t \bar{N} / \Delta N_j$. Величина $\bar{\tau}_{+1}$ — среднее время, за которое в ансамбле \bar{N} гранул «родится» \bar{N} новых гранул. Для полного числа всех событий $\bar{\tau}$ будет средним временем между двумя любыми событиями, которые изменяют гранулу качественно, т. е. средним временем существования гранулы, ее качественной неизменности как единой изолированной структуры.

Величины $\bar{\tau}_j$ для разных видов элементарных событий приведены в табл. 3 отдельно для участка: I — роста $N(t)$ ($t=0-330$ и $t=600-900$ с); II — интервалов с примерно одинаковым $N(t)$ в начале и конце ($t=0-600$ и $t=330-900$ с); III — ветви спада $N(t)$ ($t=330-600$ с). Представлены величины неопределенности оценки, соответствующие 95 %-ному доверительному интервалу.

С элементарными событиями связано изменение общей площади гранул. Обозначим ее ΔS и индексом, соответствующим типу событий, аналогично тому, как сделано для ΔN . Дополнительно нужно ввести

прирост площади ΔS_0 , происходящий в периоды, когда гранулы качественно неизменны. Тогда полное изменение площади составит $\Delta S = \Delta S_0 + \Delta S_{+1} + \Delta S_{-1} + \Delta S_{+2} + \Delta S_{-2}$. Все приращения суммируются по интервалам времени.

Для изменения средней площади в некотором интервале 1—2 можно записать:

$$\Delta S_{12} = \frac{S_2}{N_2} - \frac{S_1}{N_1} = \frac{\Delta S}{N_2} + S_1 \left(\frac{1}{N_2} - \frac{1}{N_1} \right) = \frac{\Delta S_0}{N_2} + \frac{\Delta S_{+1}}{N_2} + \frac{\Delta S_{-1}}{N_2} + \frac{\Delta S_{+2}}{N_2} + \frac{\Delta S_{-2}}{N_2} + S_1 \Delta_{12} \left(\frac{1}{N} \right).$$

Первые пять слагаемых отражают изменения средней площади гранул, происходящие за счет определенного вида изменений полной площади, а последнее — прирост, связанный с изменением только числа гранул. Изменение полной S и средней s площади гранул на площадке C , их составляющих для участков роста (I), с постоянными значениями S и s в начале и конце интервала (II) и спада (III) приведены в табл. 4.

Результаты настоящей работы:

1. Из рис. 2, б следует, что число гранул на площадке C изменяется в 1.5 раза за время 300 с (возможный период 10—11 мин). Процесс значимо отличается от шума ($\alpha < 10^{-3}$). Приблизительно в противофазе изменяется площадь, занимаемая гранулами, и как следствие, в два раза изменяется средняя площадь гранул. Корреляция между числом гранул и средней площадью высокая. Вариации средней пиковой яркости малы и нерегулярны.

2. Из табл. 3 видно, что качественное изменение гранул происходит преимущественно за счет их деления и слияния, причем в пять-шесть раз чаще, чем «рождение» и исчезновение гранул.

3. Для квазистационарного случая (II) в табл. 3 взаимно обратные процессы деления и слияния имеют одинаковую частоту — соблюдается симметрия во времени.

4. Симметрия нарушается для участков роста и спада $N(t)$ прежде всего за счет изменения частоты слияния гранул. На ветви роста они происходят в 3.6 раза реже, чем деления, а на ветви спада в 2.2 раза чаще. Такое поведение вряд ли может быть случайным и является подтверждением, хотя и косвенным, реальности изменений процессов.

5. Изменение числа гранул не симметрично к обращению времени. При замене t на $-t$ деления на участке роста становятся слияниями

Таблица 3. Средний промежуток времени (в мин) между последовательными элементарными событиями, приводящими к изменению числа гранул

τ_j	I. Рост			II. Равенство			III. Спад						
	$k=1-4$ $k=6-9$	$k=1-6$ $k=4-9$	$k=4-6$	$k=1-4$ $k=6-9$	$k=1-6$ $k=4-9$	$k=4-6$	$k=1-4$ $k=6-9$	$k=1-6$ $k=4-9$	$k=4-6$				
$\bar{\tau}_{+1}$	55	+130 -20	75	+130 -30	180	∞ -120	$\bar{\tau}_+$	8	+3 -2	11	+4 -2	16	+24 -6
$\bar{\tau}_{-1}$	85	+730 -40	65	+85 -25	45	∞ -20	$\bar{\tau}_-$	25	+24 -8	11	+4 -2	7	+4 -2
$\bar{\tau}_{+2}$	10	+4 -2	13	+5 -3	18	+30 -7	$\bar{\tau}$	6.3	+2 -1	5.7	+1 -1	4.8	+2 -1
$\bar{\tau}_{-2}$	35	+50 -15	14	+5 -3	8	+6 -2							

на участке спада. Частота слияний при этом уменьшается в два раза. Для других элементарных процессов такая асимметрия явно не обнаруживается.

6. Время жизни гранулы как индивидуального образования — промежуток между последовательными качественными ее изменениями — составляет 5.5 мин, изменяется мало. Оно примерно равно времени перестройки структуры в целом.

Таблица 4. Изменение общей площади ΔS , занятой гранулами, средней площади гранул Δs , их составляющих в интервалах роста (I), постоянства (II) и спада (III). Участки для S и s различны

Характеристика $S(t)$	I. Рост	II. Равенство		III. Спад	
	$k=3-5$	$k=2-8$		$k=6-9$	
S_2	3394	2739		2445	
S_1	2640	2754		3394	
$\Delta S_{12}=S_2-S_1$	754	-15		-949	
ΔS_0	370	-150		-680	
ΔS_{+1}	25	56		31	
ΔS_{-1}	-68	-197		-65	
ΔS_{+2}	-15	-224		-242	
ΔS_{-2}	442	500		7	

$s(t)$	$k=4-6$	$k=1-7,$ $k=3-8$	$k=1-4,$ $k=6-9$
s_2	100	86	60
s_1	57	86	63
$\Delta s_{12}=s_2-s_1$	+43	0	-3
$\Delta S_0/N_2$	+6	+5	-2
$\Delta S_{+1}/N_2$	+1	+3	+1
$\Delta S_{-1}/N_2$	-2	-4	-3
$\Delta S_{+2}/N_2$	-1	-3	-5
$\Delta S_{-2}/N_2$	+14	+15	+11
$\Delta S/N_2$	+18	+16	+4
$S_1 \left(\frac{1}{N_2} - \frac{1}{N_1} \right)$	+25	-16	-5

7. Как следует из табл. 4, слияние гранул сопровождается ростом общей их площади S , а деление — ее уменьшением. Участкам качественной неизменности гранул свойственна скорее тенденция уменьшения площади со временем, чем, как отмечалось раньше, ее увеличение [10].

8. В интервале постоянства S увеличение площади при слиянии гранул компенсируется за счет ее уменьшения при делении, при исчезновении гранул и на стадии их качественной неизменности.

9. Рост S происходит за счет слияния гранул и в периоды их качественной неизменности (табл. 4).

10. Спад S связан со стадией качественной неизменности, а также с делением гранул (табл. 4).

11. Для изменения S характерна существенная асимметрия к обращению времени: на стадии качественной неизменности гранул; слияний и делений в интервале постоянства S ; слияний на ветви спада S и делений на ветви роста.

12. Изменения средней площади гранул s (табл. 4) происходят в большей степени за счет изменения их числа, чем общей площади. Связанные с S изменения s , их асимметрия при обращении времени отражают отмеченные выше особенности.

Три причины могут вызвать изменение характеристик гранул, отличное от реального, систематического: а) изменение качества изобра-

жения от кадра к кадру; б) ошибки подсчета числа гранул, оценки их площадей и яркостей; в) статистический разброс, шум.

Нами проверено, что расфокусировка изображения, заведомо превосходящая изменение резкости между кадрами, практически не изменяет числа гранул. Изменения качества изображения и ошибки измерения должны были сказаться, прежде всего, на оценках пиковой яркости, чего нет. Найденные изменения площади выходят за рамки «чистой статистики» и свидетельствуют о физических изменениях в структуре фотосферы.

Таким образом, на площади, сравнимой с размером супергранулы, за короткое время (300 с) происходит общая перестройка тонкой структуры фотосферных неоднородностей. При этом изменяются: средняя площадь гранулы — в 2 раза, частота их слияний — в 4.5 раза, число гранул и занимаемая ими полная площадь — в 1.5 раза.

Характер нестационарности солнечной грануляции таков, что время перестройки структуры в целом и время жизни элементов (гранул) равны.

Ряд событий эволюции гранул существенно асимметричен к обращению времени; например, изменения площади, когда гранулы качественно неизменны, при их делении и слиянии. Частота слияния гранул в период роста их числа отлична от частоты деления при уменьшении числа гранул. Обнаруженная нестационарность требует нового подхода к сопоставлению отдельных определений, характеристик грануляции к оценке их изменений со временем. До сих пор считалось возможным пренебрегать крупномасштабными процессами при построении численных газодинамических моделей. Для правильного понимания динамики фотосферы существенны типичность такой перестройки, ее истинные масштабы и неизвестные механизмы. Такие исследования очень нужны. Столь крупные изменения, вероятно, должны проявляться в бисекторах фраунгоферовых линий, а возможно, и в радиоизлучении даже при значительном пространственном усреднении порядка 10 000 км по поверхности Солнца.

Карты изофот, использованные в работе, составлены в группе системных исследований отдела физики Солнца ГАО АН СССР. Все измерения характеристик гранул выполнены Л. М. Правдюк. Полезные замечания при обсуждении работы сделали Т. А. Агекян, Г. Б. Гельфрейх, И. Ф. Никулин, А. И. Оль. В оформлении статьи участвовала Н. С. Петрова. Всем им автор приносит благодарность.

1. Андрейко А. В., Кушнир М. В. Машинное построение карт условного рельефа по фотографическим наблюдениям Солнца // Солнеч. данные.— 1975.— № 12.— С. 88.
2. Карпинский В. Н. Морфологическая модель тонкой структуры поля яркости фотосферы Солнца // Там же.— 1980.— № 2.— С. 91—102.
3. Карпинский В. Н. Морфологические элементы и характеристики тонкой структуры поля яркости фотосферы вблизи центра солнечного диска // Там же.— 1980.— № 7.— С. 94—103.
4. Карпинский В. Н. Крупномасштабные изменения в характере солнечной грануляции с периодом около 10 минут // Астрон. циркуляр.— 1988.— № 1525.— С. 19—20.
5. Крат В. А., Дулькин Л. З., Карпинский В. Н. и др. Третий полет Советской стратосферной солнечной обсерватории // Там же.— 1970.— № 597.— С. 1—3.
6. Bahng J., Schwarzschild M. Lifetime of solar granules // *Astrophys. J.*— 1961.— 134, N 2.— P. 312—322.
7. Dialelis D., Macris C., Prokakis Th., Sarris E. The lifetime and evolution of solar granules // *Astron. and Astrophys.*— 1986.— 168, N 1/2.— P. 330—334.
8. Kawaguchi J. Morphological study of the solar granulation. II. The fragmentation of granules // *Solar Phys.*— 1980.— 65, N 2.— P. 207—220.
9. Kitai R., Kawaguchi J. Morphological study of the solar granulation. I. Dark dot formation in the cell // *Ibid.*— 1979.— 64, N 1.— P. 3—12.
10. Mehlretter J. P. Balloon-borne imagery of the solar granulation. II. The lifetime of solar granulation // *Astron. and Astrophys.*— 1978.— 62, N 3.— P. 311—316.
11. Oda N. Morphological study of solar granulation. III. The mesogranulation // *Solar Phys.*— 1984.— 93, N 2.— P. 243—255.