

СПЕКТРАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АКТИВНЫХ ПРОТУБЕРАНЦЕВ

Э. А. Гуртовенко, Н. Н. Мороженко, А. С. Рахубовский

В июле 1966 г. в ГАО АН УССР по международной программе PFP (протонные вспышки) велись наблюдения активной области № 21034. Координационная группа (обсерватория Медон) предложила нам обработку и анализ спектров активных протуберанцев 9 и 11 июля.

Наблюдения протуберанцев проведены с H_{α} -фильтром и на спектрографе с дисперсией 1.2 (II порядок) и 0.8 Å/mm (III порядок) [1].

Координаты протуберанцев 9 и 11 июля (обозначим их соответственно А и В) одинаковы: $\phi = +40^\circ$, $\lambda = +90^\circ$. Приведем результаты наблюдений каждого протуберанца.

Протуберанец 9 июля 1966 г. Кинематографические наблюдения велись в интервале 0632—1402 UT. В течение указанного периода протуберанец настолько сильно изменял свою яркость и форму, что скорее следовало бы говорить о комплексе явлений типа выбросов протуберанцев в одном и том же месте на лимбе.

Характерными особенностями развития протуберанца, которые можно проследить по H_{α} -фильтрограммам, являются его компактность и большая яркость в начальной стадии близ максимума яркости (рис. 1, а), образование впоследствии ярких точечных корональных сгущений и пальцеобразных выбросов (рис. 1, б), существовавших довольно длительное время.

Значения яркости I протуберанца, выраженные в единицах яркости диска близ края, для некоторых моментов в начальной фазе развития приведены в табл. 1. Эти данные получены в результате измерений H_{α} -фильтрограмм и относятся к наиболее ярким участкам протуберанца. Если оптическая толщина протуберанца τ_0 небольшая, то в проекции на диск эмиссия его практически суммируется с эмиссией диска (подложки). При наблюдениях с нашим фильтром [2] яркость диска в линии H_{α} составляет около 0.35 единиц яркости диска, наблюдаемого с тем же фильтром в непрерывном спектре близ линии H_{α} . Соответствующие значения яркости протуберанца I_c в единицах яркости непрерывного спектра при условии, что протуберанец

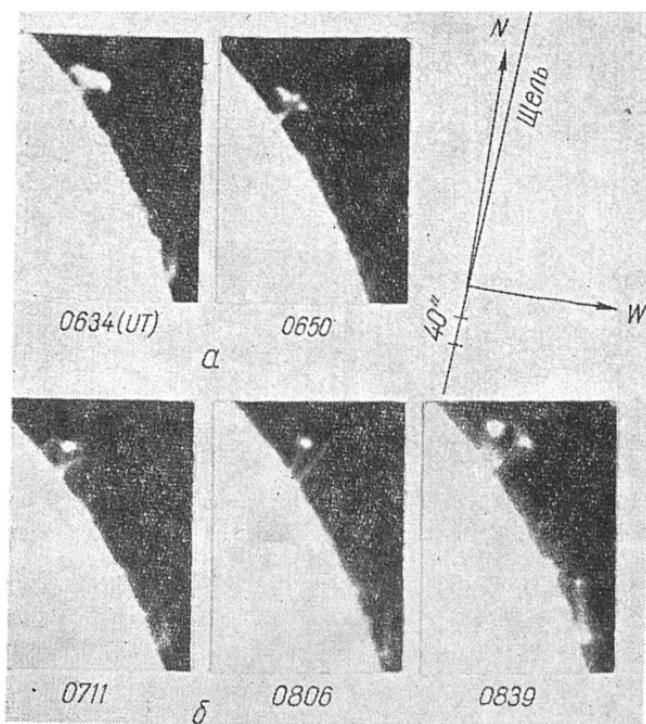


Рис. 1. H_{α} -фильтрограммы протуберанца 9 июля 1966 г.

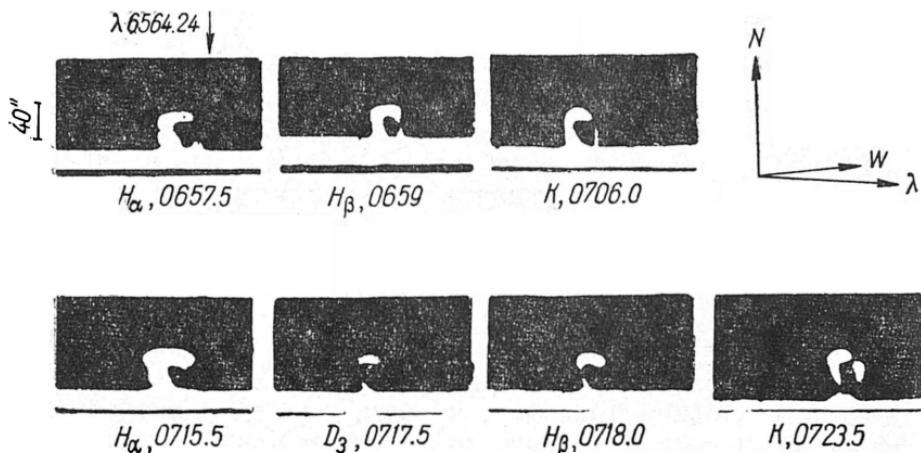


Рис. 2. Спектрограммы некоторых линий протуберанца 9 июля 1966 г.

наблюдается в проекции на диск близ лимба, представлены в табл. 1. Эти значения превосходят предельную величину яркости $I_c \approx 0.45$, принимаемую в качестве критерия принадлежности к явлению вспышек. В данном случае наиболее яркие узлы протуберанца в начальной стадии его развития регистрировались бы при наблюдении на диске в виде слабых вспышек или ярких точек.

Явления типа вспышек-протуберанцев наблюдаются очень часто. Неясно, занимают ли они какую-либо промежуточную ступень между классами вспышек и протуберанцев. Нам кажется, что четкой границы между вспышками и активными протуберанцами на лимбе вообще установить нельзя.

Спектральные наблюдения проведены в интервале 0655—0727 в линиях H_{α} — H_{12} , K , $H\text{Ca}^+$, D_3 He. Эмиссия в линиях D_1 , D_2 Na I визуально не была обнаружена, поэтому спектрографирование в линиях металлов не производилось.

На полученных спектrogramмах эмиссия наблюдается в линиях H , K , D_3 , H_{α} — H_8 , причем в линии H_8 прослеживается только наиболее яркий узел.

Как известно, для вспышек [3, 4] максимум эмиссии металлов запаздывает по отношению к максимуму водородной эмиссии на несколько минут. По данным наших наблюдений период спектрографирования приходится как раз на послемаксимальную фазу протуберанца-вспышки, т. е. в данном случае наблюдается чисто «неметаллическая» вспышка (если считать его вспышкой). С другой стороны, наличие или отсутствие свечения металлов отмечается и в протуберанцах, в том числе и спокойных. Таким образом, особенностью спектра исследуемого протуберанца является отсутствие эмиссии в линиях металлов.

Спектrogramмы протуберанца в разных линиях для некоторых моментов приведены на рис. 2, а зарисовки по H_{α} -фильтрограммам через небольшие промежутки времени для всего интервала спектрографирования — на рис. 3. Для некоторых зарисовок показаны положения щели в момент спектрографирования.

Отличительной чертой спектrogramм во всех линиях является своеобразный эмиссионный контур, свидетельствующий о наличии в протуберанце сложных макроскопических движений,

Таблица 1

Время наблюдения UT	I	I_c
0632	0.88	0.66
0639	1.15	0.75
0644	0.88	0.66
0651	0.72	0.60
0711	0.81	0.63

Форма линии напоминает петлю с левой коротковолновой широкой ветвью, которая в верхней части переходит в простирающуюся вдоль дисперсии «шапку», и правой длинноволновой ветвью, примыкающей в верхней части протуберанца к «шапке». Одна из первых спектрограмм в линии H_{α} получена в 0657. В этот момент щель пересекала два ярких узла a и b , видимых на H_{α} -фильтрограмме (см. рис. 1, 3). Узел a имеет

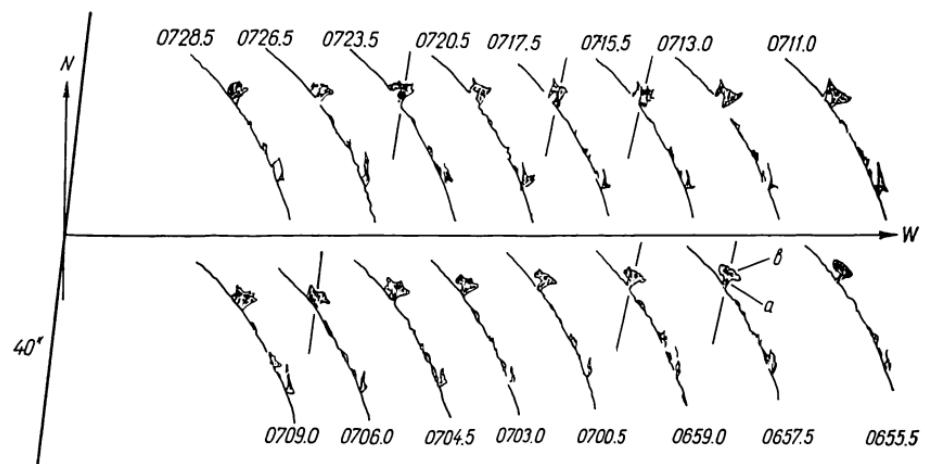


Рис. 3. Вид протуберанца 9 июля 1966 г. в период спектрографирования (зарисовки по H_{α} -фильтрограммам).

небольшую отрицательную скорость. Выше над узлом эмиссия в левой ветви профиля остается также яркой, однако отрицательная лучевая скорость ее возрастает по мере увеличения высоты, поэтому она становится слабо видимой на H_{α} -фильтрограмме. Узел b принадлежит «шапке», почти не имеет лучевой скорости, но обладает значительной дисперсией лучевых скоростей, которые заключены в пределах примерно от +60 до —40 км/сек.

Правая длинноволновая ветвь (компоненты) линии H_{α} имеет по всей высоте протуберанца одинаковую лучевую скорость +60 км/сек. Эта ветвь бледнируется с теллурической линией $\lambda 6564.24 \text{ \AA}$, которая отчетливо видна на фоне эмиссии. Характерными особенностями длинноволновой компоненты являются также ее сравнительно небольшая яркость и небольшая ширина. Возможно, она возникает в однородном обособленном облаке или потоке вещества, движущемся с постоянной скоростью.

Форма других линий в спектре протуберанца подобна линии H_{α} . Более того, описанный характер движения вещества (см. рис. 2) на протяжении всего интервала спектрографирования (около 25 мин) остается довольно стабильным. На спектрограмме в линии H_{α} можно отметить лишь небольшое ослабление яркости и расширение правой ветви петли.

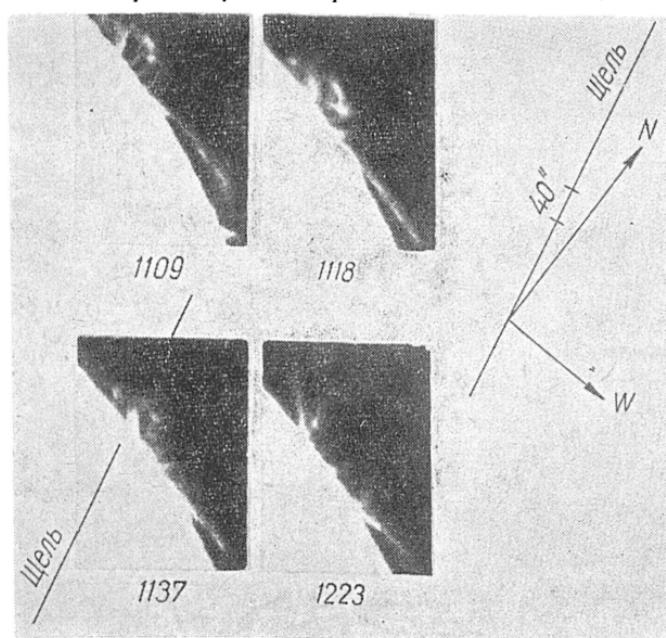


Рис. 4. H_{α} -фильтрограммы прогуберанца 11 июля 1966 г.

Протуберанец 11 июля 1966 г. Наблюдался с H_{α} -фильтром с 1108 до момента распада (около 1230). Протуберанец возник в промежутке времени 1058—1108. В этот период наблюдения не велись, а в 1058 в том же месте на лимбе отмечались другие мелкие образования.

Характерными особенностями развития, которые можно заметить на H_{α} -фильтрограммах, являются бурные изменения, носящие характер взрыва в начальной стадии развития, и образование корональных ярких сгущений, связанных с фотосферой слабыми струями вещества. Несколько отпечатков H_{α} -фильтрограмм приведены на рис. 4.

Спектрографирование в линиях H_{α} — H_8 , H , K , D_3 начато в 1125 в конце начальной взрывной фазы и продолжалось до

1215, когда протуберанец уже почти распался. Яркость линий H_{α} и H , K Ca^+ невелика. В линии H_{α} эмиссия уже совсем не видна. В линиях металлов эмиссия отсутствует.

Особенностью спектра в начальный период наблюдений является различие лучевых скоростей отдельных сгустков вещества (рис. 5), что подтверждает взрывной характер первой

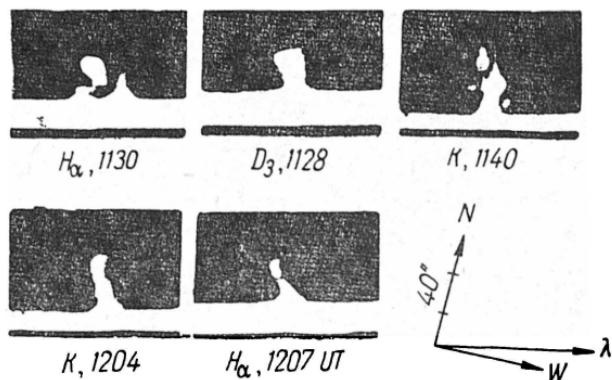


Рис. 5. Спектрограммы некоторых линий протуберанца 11 июля 1966 г.

стадии развития. Вследствие этого линии не имеют компактной формы (например, линия K 1140, рис. 5). По существу фотометрический разрез эмиссии в линии можно получить только для отдельных узлов, смещенных как по высоте (вдоль линии), так и в направлении дисперсии. Движения вещества в этот период очень запутаны.

Характер взрыва менее четко выражен во второй стадии развития (1200—1215). Линии более компактны и стабильны. В этот период в линиях H и K четко наблюдается узкая правая компонента, слабо видимая в линии H_{α} из-за малой ее яркости (см. рис. 5). Она смещена в красную сторону на величину, соответствующую лучевой скорости около 40 км/сек. Удивительно то, что в период после взрыва протуберанца форма его спектральных линий очень похожа на «спектральную петлю» в протуберанце А, с тем лишь различием, что величина лучевых скоростей компонент несколько меньше, а правая ветвь простирается на большую высоту и не обрывается на высоте «шапки».

Нам кажется, что это сходство формы линий в протуберанцах А и В не случайно. Оно указывает на наличие в активной области стабильного магнитного поля, регулирующего харак-

тер движения вещества в активных протуберанцах. Петлеобразный вид спектральных линий позволяет отнести эти протуберанцы к системе петельных протуберанцев (СПП), образующихся в процессе развития больших вспышек. В подтверждение этому можно привести исследованную В. Баниным [5] большую вспышку близ лимба, из которой возник активный протуберанец типа СПП с точно такой же петельной формой эмиссионных линий.

Спектрофотометрические исследования

Поскольку конструкция телескопа, на котором проводились наблюдения [1], не позволяет проводить одновременно фотографирование разных участков спектра, все линии сняты в разное время с интервалом 1—5 мин. Повторные снимки одних и тех же линий показывают, что протуберанец А в этот период развивался сравнительно медленно и за время фотографирования

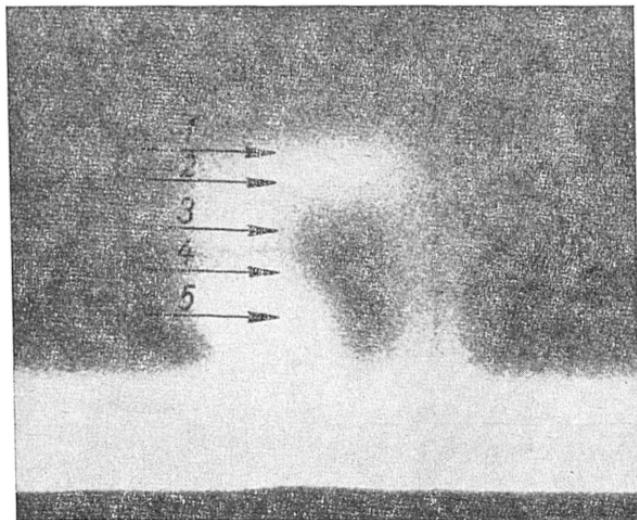


Рис. 6. Схема фотометрических разрезов эмиссии линий протуберанца 9 июля 1966 г.

в контурах линий заметных изменений не произошло. Поэтому данные, полученные для одной и той же линии в разное время, при обработке усреднялись. Чтобы полнее охватить картину развития протуберанца, в наблюдаемых линиях было сделано по пять фотометрических разрезов (рис. 6).

Картина развития протуберанца В значительно сложнее. Расположение и форма узлов от снимка к снимку менялись, поэтому ни усреднять данные, ни обобщать выводы по разным

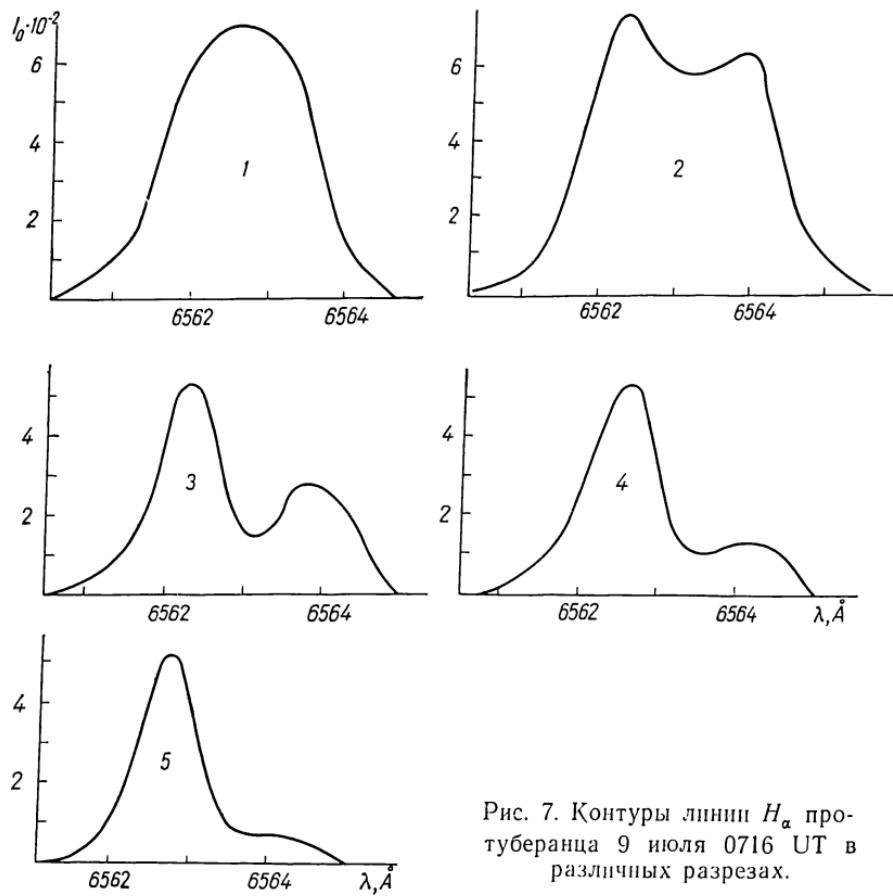


Рис. 7. Контуры линии H_{α} протуберанца 9 июля 0716 UT в различных разрезах.

линиям в данном случае невозможно. В линиях, полученных в стадии стабилизации протуберанца (1204, 1206, 1207), сделано по три фотометрических разреза.

Данные наблюдений. Контуры линий протуберанца А во всех разрезах, кроме первого, имеют сложную форму из-за частичного блендингования синей и красной компонент петли (рис. 7). В разрезах 3—5 компоненты достаточно широко раздвинуты и выделить их в чистом виде довольно просто. В раз-

резе 2, где синяя и красная компоненты почти сливаются, однозначно разделить контуры не удалось, поэтому там возможны наибольшие ошибки.

Для протуберанца В строились контуры линий различных узлов. Контуры узлов, отклоненных в синюю (узел I) и красную (узел II) стороны, также, как правило, перекрывались, и при обработке нужно было выделять соответствующие компоненты.

Полученные контуры использовались для определения эквивалентных ширин A , оптических толщ τ_0 и допплеровских полуширин $\Delta\lambda_D$ (табл. 2, 3). Оптические толщи линий H_α и H , K были определены из зависимости центральной интенсивности I_0 от τ_0 , полученной с помощью таблиц Н. А. Яковкина и Р. И. Костика [6] для резонансных линий. Метод Яковкина — Костика был выбран нами потому, что он не накладывает ограничений на поведение функции источника с глубиной и позволяет путем сравнения теоретического контура с наблюдаемым уточнить найденное из графика предварительное значение τ_0 . В данном случае уточнить τ_0 не удалось из-за аномальной формы контуров (о форме контуров подробнее будет сказано ниже). По этой же причине применение метода Яковкина — Костика недостаточно корректно и полученное τ_0 можно рассматривать лишь как приближенное.

Указанный метод можно применять к линиям только резонансным или типа резонансных (например, H_α или линии с нижним метастабильным уровнем). Поэтому оптические толщи в линиях H_β — H_ϵ не были определены. Однако можно утверждать, что они не велики, так как для более плотного протуберанца оптическая толща в линии H , не превышает трех.

Оптические толщи протуберанца А в линии D_3 были оценены сравнением с теми же линиями спокойных протуберанцев. Значения τ_0 в линиях D_3 , как и для слабых спокойных протуберанцев, оказались очень маленькими, в пределах 0.1—0.01.

Допплеровские полуширины линий H_α , оптические толщи которых больше единицы, мы попытались оценить по крыльям контуров. Поскольку в крыльях линий, расширенных тепловыми максвелловскими скоростями атомов, оптические толщи невелики и форма их определяется гауссианой, можно записать

$$I_\lambda = \frac{I_0}{F_0} e^{-v^2}, \quad (1)$$

Таблица 2

Разрез	$A_c \cdot 10^{-5}$	$A_k \cdot 10^{-5}$	τ_{oc}	τ_{ok}	$\Delta \lambda_{Dc}$	$\Delta \lambda_{Dk}$	$I_{oc} \cdot 10$	$I_{ok} \cdot 10$
H_α								
1	7.76	—	1.91	—	0.957	—	0.650	—
2	6.41	3.020	2.62	1.35	0.713	0.584	0.709	0.536
3	2.52	0.767	1.33	0.30	0.530	0.742	0.537	0.218
4	3.24	0.377	1.05	0.13	0.548	0.693	0.591	0.118
5	2.92	0.214	1.56	0.09	0.518	0.677	0.578	0.087
H_β								
1	0.670	—	—	—	0.615	—	0.139	—
2	1.140	0.118	—	—	0.700	0.361	0.223	0.046
3	0.354	0.215	—	—	0.354	0.450	0.120	0.070
4	0.361	0.079	—	—	0.353	0.313	0.125	0.037
5	0.434	0.084	—	—	0.414	0.217	0.160	0.040
H_γ								
1	0.166	—	—	—	0.505	—	0.042	—
2	0.330	0.088	—	—	0.488	0.391	0.096	0.031
3	0.076	0.171	—	—	0.304	0.332	0.049	0.055
4	0.059	0.037	—	—	0.202	0.132	0.032	0.036
5	0.161	0.024	—	—	0.287	0.169	0.065	0.019
H_δ								
1	0.082	—	—	—	0.446	—	0.026	—
2	0.024	—	—	—	0.330	—	0.095	—
3	0.026	0.010	—	—	0.108	0.326	0.035	0.043
4	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—
H_ϵ								
1	0.130	—	—	—	0.379	—	0.043	—
2	0.170	—	—	—	0.456	—	0.055	—
3	--	—	—	—	—	—	—	—
K								
1	0.498	—	0.43	—	0.470	—	0.132	—
2	1.073	0.447	0.95	0.44	0.431	0.362	0.290	0.132
3	0.540	0.200	0.71	0.30	0.265	0.304	0.225	0.090
4	0.448	0.155	0.79	0.35	0.226	0.160	0.244	0.110
5	0.605	0.139	0.79	0.37	0.307	0.132	0.253	0.117
D_s								
1	0.542	—	0.075	—	0.586	—	0.120	—
2	0.615	0.361	0.085	0.045	0.586	0.533	0.147	0.086
3	0.305	0.192	0.044	0.030	0.566	0.497	0.086	0.063
4	0.230	0.073	0.052	0.025	0.364	0.337	0.089	0.051
5	0.166	0.034	0.039	0.010	0.475	0.331	0.057	0.019

Таблица 3

Линия	Время съемки	Разрез	Узел I (синий)				Узел II (красный)			
			$A \cdot 10^{-5}$	τ_0	$\Delta \lambda_D$	$I_0 \cdot 10$	$A \cdot 10^{-5}$	τ_0	$\Delta \lambda_D$	$I_0 \cdot 10$
H_α	1125	2	4.44	1.6	0.66	0.590	1.78	0.74	0.825	0.360
		1	3.00	0.67	1.23	0.340	0.74	0.27	1.14	0.150
	1129	2	1.27	0.65	0.56	0.330	3.10	0.88	0.89	0.420
		1	5.04	1.83	0.79	0.630	0.52	0.30	0.62	0.170
	1130	2	—	—	—	—	4.44	1.66	0.65	0.600
		1	1.76	0.83	0.49	0.400	1.02	0.58	0.68	0.290
		3	1.70	0.30	1.04	0.310	—	—	—	—
	1207	2	1.44	0.60	0.77	0.312	—	—	—	—
		1	1.12	0.59	0.70	0.298	0.314	0.23	0.49	0.145
	H_β	1127	2	0.575	—	0.82	0.098	0.190	—	0.56
K	1127	—	0.420	—	0.53	0.105	0.142	—	0.62	0.030
	1134	2	0.324	0.28	0.45	0.085	0.300	0.28	0.74	0.085
		1	0.690	0.46	0.65	0.140	—	—	—	—
	1140	2	0.3. 0	0.28	0.34	0.085	0.330	0.25	0.66	0.075
		1	0.700	0.37	0.69	0.116	—	—	—	—
	1204	2	0.270	0.31	0.36	0.098	0.087	0.17	0.28	0.052
		1	0.308	0.29	0.41	0.088	0.138	0.16	0.42	0.050
		3	—	—	—	—	0.166	0.14	0.43	0.045
	1216	2	0.470	0.40	0.46	0.120	—	—	—	—
		1	0.308	0.26	0.48	0.080	0.101	0.11	0.38	0.035
D_3	1126	2	0.445	—	0.98	0.080	0.085	—	0.64	0.025
	1128	—	0.238	—	0.52	0.075	0.051	—	0.38	0.025

где $F_0 = \frac{1 - e^{-\tau_0}}{\tau_0}$ — фактор самопоглощения для центра линии; $v = \Delta\lambda / \Delta\lambda_D$.

При разных значениях $\Delta\lambda$ можно получить достаточно надежное $\Delta\lambda_D$. В процессе определения $\Delta\lambda_D$ выяснилось, что форма контуров линий H_α в крыльях не описывается гауссианой, а весь контур в целом не описывается максвелловским распределением скоростей. Допплеровские ширины, найденные по разным значениям $\Delta\lambda$ с помощью формулы (1), уменьшаются по мере приближения к ядру линии. Этот эффект был обнаружен и в других линиях. Поэтому значения $\Delta\lambda_D$, приведенные в табл. 2 и 3, нужно понимать лишь как параметры, определяющие средние значения характеристических скоростей. Для оптических тонких линий $H_\beta - H_\epsilon$, H , K , D_3 величины $\Delta\lambda_D$ оценены по полуширинам контуров. Значения эквивалентных ширин

Разрез	Водород				
	$N_2 \cdot 10^{-13}$	$N_3 \cdot 10^{-10}$	$N_4 \cdot 10^{-10}$	$N_5 \cdot 10^{-10}$	$N_6 \cdot 10^{-10}$
<i>Синие</i>					
1	1.34	7.32	2.45	1.82	2.19
2	1.35	6.05	4.20	3.60	5.73
3	0.50	2.38	1.29	0.84	0.70
4	0.66	3.05	1.33	0.64	—
5	0.60	2.75	1.60	1.75	—
<i>Красные</i>					
1	—	—	—	—	—
2	0.573	2.86	1.55	0.960	—
3	0.160	0.72	0.80	0.644	0.296
4	0.065	0.36	0.29	0.404	—
5	0.043	0.20	0.41	0.262	—

A (выраженные в эргах) для H_{α} исправлены за самопоглощение.

Данные табл. 2 и 3 явились исходными для оценки физических условий в протуберанцах. По эквивалентным ширинам из формулы

$$A = \frac{N_m A_m h\nu}{4\pi}$$

были получены населенности N_m соответствующих верхних уровней атомов водорода, ионизованного кальция и гелия. Населенности N_i нижних уровней линий H_{α} , H и K были получены по τ_0 , поэтому значения их не достаточно надежны. Данные о населенностях приведены в табл. 4 и 6. По допплеровским полуширинам вычислялись турбулентные скорости (табл. 4, 5 и 6).

Определение электронных температур. По населенностям возбужденных уровней водорода определены электронные температуры в местах свечения водорода. При этом использовалась формула Саха—Больцмана, записанная в виде

$$b_m N^+ n_e = \frac{N_m}{m^2} K_0 T_e^{3/2} e^{-\frac{\chi_m}{kT_e}}, \quad (2)$$

Таблица 4

Ионизованный кальций				Гелий
$N_7 \cdot 10^{-10}$	$N_1 \cdot 10^{-12}$	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$\frac{N_2}{N_1} \cdot 10^4$	$N \cdot 10^{-9}$
<i>компоненты</i>				
6.35	4.05	0.84	2.06	2.81
1.52	8.10	1.80	2.22	3.20
—	3.77	0.90	2.39	1.58
—	3.49	0.75	2.15	1.19
—	4.83	1.01	2.09	0.86
<i>компоненты</i>				
—	—	—	—	—
—	3.16	0.744	2.35	1.87
—	1.80	0.332	1.85	1.00
—	1.11	0.259	2.33	0.38
—	0.98	0.232	2.37	0.18

где

$$K_0 = \frac{(2\pi mk)^{3/2}}{h^3} = 2.42 \cdot 10^{15};$$

N^+ , N_m — содержание ионов и атомов в возбужденном состоянии m на луче зрения; χ_m — потенциал ионизации уровня m ; n_e — электронная плотность; b_m — параметр, характеризующий степень отклонения от термодинамического равновесия. Исследования показывают [7], что для низких уровней $b_m \gg 1$. С увеличением m значение b_m стремится к единице и при $\chi_m = 0$ $b_m = 1$. Это свойство b_m использовано при определении электронной температуры.

Правая часть уравнения (2) может быть вычислена для известных N_m и заданного T_e и представлена графически. Экстраполируя полученный график к точке $\chi_m = 0$, в точке пересечения с осьюходим соответствующее значение $b_m N^+ n_e$, для которого $b_m = 1$. Иначе говоря, находим величину $N^+ n_e$ для заданного T_e , которую подставляем в уравнение ионизационного равновесия

$$N_1 \Phi_1 + N_2 \Phi_2 = N^+ n_e \Sigma R_m, \quad (3)$$

где Φ_1 , Φ_2 — коэффициенты фотоионизации; R_m — коэффициент рекомбинаций на уровень m . Значения Φ определялись по формуле

$$\Phi_m = W \frac{8\pi}{c^2} k_m \nu_m^3 Ei \left(\frac{\kappa_m}{k T_m} \right),$$

где W — коэффициент дилюции (у нас $W=0.3$); k_m , T_m — коэффициент поглощения и планковская температура на пределе соответствующей серии (у нас $T_1=6900^\circ$, согласно данным работы [8], и $T_2=6000^\circ$).

Для определения ΣR_m подсчитывались отдельные значения R_m по формуле Силие [9] до $m=30$. В уравнении (3) учтены только радиационные процессы, поскольку в протуберанцах они играют доминирующую роль. Ионизацию с уровней $m \geq 3$ не учитывали, так как произведение $N_2 \Phi_2$ на несколько порядков больше $N_m \Phi_m$.

Из уравнения (3) можно найти значения N_1 , а затем и отношение N_2/N_1 . Населенность второго уровня N_2 определяется L_a -излучением Солнца, температура которого из-за большой оптической толщины линий L_a оказалась очень близкой к электронной [10]. Поэтому отношение N_2/N_1 можно найти по формуле Больцмана с $T=T_e$. Если полученное по формуле Больцмана значение T_e не совпадает с принятым ранее, нужно сделать второе приближение, и так до тех пор, пока значения T_e , принятые при вычислении $N^+ n_e$ и полученное по формуле Больцмана, не совпадут с достаточной степенью точности. Электронные температуры, найденные описанным методом для каждого разреза протуберанца А, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Разрез	$v_t(H)$, км/сек	$v_t(Ca II)$, км/сек	$v_t(D_\alpha)$, км/сек	$v_l(H)$, км/сек	$v_l(Ca II)$, км/сек	$v_l(D_\alpha)$, км/сек	T_e
<i>Синие компоненты</i>							
1	35.2	36.0	28.5	0.0	0.0	0.0	7800
2	32.3	33.0	28.5	10.6	8.4	15.6	7500
3	19.5	20.2	27.5	25.0	28.2	23.4	7800
4	20.5	17.2	16.2	18.8	23.6	10.3	7900
5	20.0	23.4	22.5	12.7	16.0	7.7	7300
<i>Красные компоненты</i>							
1	—	—	—	—	—	—	—
2	22.8	27.6	25.7	50.4	38.7	37.5	7600
3	21.2	23.2	23.9	45.4	54.0	53.0	7600
4	23.1	12.2	14.6	49.1	55.5	58.5	7300
5	22.1	10.1	14.3	49.8	59.3	63.5	—

Таблица 6

Ли- ния	Время съемки	Раз- рез	Узел I (синий)				Узел II (красный)			
			$N_i \cdot 10^{-12}$		v_{tr} км/сек	v_{lp} км/сек	$N_i \cdot 10^{-12}$		v_{tr} км/сек	v_{lp} км/сек
			$N_m \cdot 10^{-10}$	$N_m \cdot 10^{-10}$			$N_m \cdot 10^{-10}$	$N_m \cdot 10^{-10}$		
H_α	1125	2	7.70	4.20	30.2	16.0	4.40	1.70	37.7	13.7
	1	6.00	2.80	56.2	8.8	2.20	0.70	52.1	20.0	
	2	2.70	1.20	25.7	19.8	5.70	3.20	40.4	14.3	
	1	10.50	4.75	36.0	10.8	1.30	0.49	28.4	16.6	
1130	2	—	—	—	—	7.80	4.18	29.2	10.0	
	1	3.00	1.66	22.4	16.0	2.90	0.96	30.7	11.7	
	3	2.30	1.60	48.0	6.7	—	—	—	—	
	2	3.40	1.36	35.1	11.7	—	—	—	—	
1207	1	3.00	1.06	31.8	8.1	0.82	0.30	22.4	11.5	
	—	—	2.11	51.0	6.1	—	0.70	34.5	14.4	
H_β	1127	—	—	—	—	—	—	—	—	
	1127.5	—	—	—	—	—	—	—	—	
K	1134	2	3.10	0.054	34.2	19.5	2.91	0.050	34.2	6.4
	1	7.30	0.115	50.4	8.7	—	—	—	—	
1140	2	2.70	0.050	25.9	21.5	4.10	0.055	50.1	7.1	
	1	6.60	0.116	52.5	11.3	—	—	—	—	
1204	2	2.50	0.045	27.1	3.9	1.00	0.014	21.3	11.2	
	1	2.90	0.051	31.2	11.9	1.50	0.023	31.8	8.5	
	3	—	—	—	—	1.40	0.028	33.0	10.5	
1216	2	4.10	0.078	35.1	1.3	—	—	—	—	
	1	3.50	0.051	36.6	10.0	1.40	0.017	29.0	8.9	
	3	—	—	—	—	0.77	0.011	22.9	11.5	
D_3	1126	—	0.230	49.8	3.2	—	0.044	32.1	20.7	
	1128	—	0.123	26.5	—	—	0.026	19.3	—	

Точность определения T_e в значительной степени зависит от точности нахождения N_m . В данном случае ошибка приблизительно равна $\pm 1000^\circ$. Электронная температура исследуемых протуберанцев в местах свечения водорода находится в пределах 7000—8000°.

Турбулентные и лучевые скорости. Источники возбуждения. Турбулентные скорости определялись по формуле

$$c^2 \left(\frac{\Delta \lambda_D}{\lambda} \right)^2 = \frac{2RT_e}{\mu} + v_t^2.$$

Необходимо отметить, что при наблюдаемой ширине линий вклад первого члена правой части этого уравнения при $T_e = 8000^\circ$ пренебрежимо мал. Линии расширены главным образом турбулентными скоростями. При определении v_t использовались значения $\Delta \lambda_D$, приведенные в табл. 2 и 3. Лучевые скорости оценивались приближенно по величине смещения эмиссионных линий относительно соответствующей фраунгоферовой линии. Полученные v_t и v_l приведены в табл. 5 и 6.

Для определения источников возбуждения мы применили решение обратной задачи теории диффузии излучения, полученное Р. И. Костиком [11]. В табл. 7 приведены значения

Таблица 7

H_α			$K \text{ Ca II}$		
τ	$G(\tau) \cdot 10^2$	$g(\tau) \cdot 10^2$	τ	$G(\tau) \cdot 10^2$	$g(\tau) \cdot 10^2$
1.900	4.36	4.07	0.430	2.85	3.30
1.730	3.83	3.28	0.393	2.78	3.19
1.330	3.20	2.47	0.300	2.68	3.02
0.700	2.62	2.36	0.158	2.58	3.00
0.352	2.52	2.77	0.079	2.53	3.13
0.147	2.62	3.34	0.033	2.58	3.17
0.052	3.20	3.77	0.012	2.68	3.27
0.015	3.83	3.99	0.003	2.78	3.29
0.002	4.36	4.07	0.001	2.85	3.30

функции $g(\tau)$, описывающей распределение источников в случае возбуждения атомов только фотосферным излучением, и источники $G(\tau)$, найденные по контуру линии с помощью таблиц из работы Р. И. Костика [11], для линий H_α и K .

Функцию $g(\tau)$ находим по приближенным формулам [12]

$$g(\tau) = g^1(\tau) + g^1(\tau_0 - \tau),$$

$$g^1(\tau) = \frac{W}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} I(v) e^{-v^2} E_2(\tau e^{-v^2}) dv,$$

где $I(v)$ — интенсивность в соответствующих точках фраунгофера контура; $E_2(\tau e^{-v^2})$ — интегрально-показательная функция второго порядка.

Обсуждение результатов

Движение вещества. Если отвлечься от расширения эмиссионных линий, обусловленного температурой, турбулентцией и, возможно, другими физическими эффектами, то контур «спектральной петли» в протуберанцах А и В в стадии стабилизации можно считать своеобразной огибающей вектора скоростей вещества в плоскости, содержащей луч зрения. Трудно установить, характеризует ли петля скорости вещества, движущегося неразрывно по замкнутой траектории, или же она отображает наложение скоростей нескольких отдельных потоков. Однако преимущественное движение вещества происходило в плоскости, содержащей луч зрения. Об этом можно судить из сопоставления «спектральной петли» и H_α -фильтограмм. В этом случае пространственную траекторию движения основной массы вещества можно представить в виде арки. В вершине арки в неподвижном корональном сгущении образуются два потока материи, движущиеся с ускорением в двух противоположных направлениях к определенным центрам в фотосфере.

Возможно также, что «спектральная петля» представляет результат наложения эмиссии отдельных независимых потоков вещества, обладающих разными средними скоростями, а также градиентами скоростей внутри потоков. В этом случае красную компоненту (правую ветвь петли) можно отнести к сравнительно однородному облаку или потоку, обладающему стабильной скоростью. Не исключена возможность, что это устойчивый поток корпускул. Пространственная скорость его может значительно превышать наблюдаемую лучевую скорость, особенно, если направление его движения близки к радиальному.

Прежде чем обсуждать результаты спектрофотометрии, необходимо еще раз отметить, что точность построения контуров

из-за частичного блендирования синей и красной компонент не очень высока. Кроме того, в обработку был включен весь спектральный материал, в том числе и некоторые снимки посредственного качества.

На основании анализа табл. 2 и 3 можно сделать вывод о том, что оба протуберанца оптически тонкие во всех линиях, кроме H_{α} . В то же время линии очень широкие, поэтому их полные интенсивности довольно значительны. Например, в сечении 1 (см. табл. 2) наблюдаемая полная интенсивность составляет около $0.45 \cdot 10^6$ эрг \cdot см $^{-2}$ \cdot сек $^{-1}$ или 0.75 единиц энергии, пропускаемой H_{α} -фильтром ГАО АН УССР [2] около края диска в непрерывном спектре близ линии H_{α} . Эта величина близка к интенсивности наиболее ярких узлов (см. табл. 1), измеренных по H_{α} -фильтрограммам в начальной фазе развития протуберанца.

Населенности основного и возбужденных уровней водорода, а также ионизованного кальция и гелия такие же, как и в спокойных протуберанцах средней яркости [13, 14]. Для CaII в табл. 4 приведены значения отношения населенностей N_2/N_1 , которые очень близки к аналогичным величинам в спокойных протуберанцах [15].

Значения функций $G(\tau)$ (табл. 7), описывающих истинное распределение источников в среде для линий H_{α} и K , близки к значениям $g(\tau)$, найденным в предположении, что механизмом возбуждения является рассеяние фотосферной радиации.

Эти данные свидетельствуют о том, что основным механизмом возбуждения линий в протуберанцах 9 и 11 июля 1966 г. является рассеяние фотосферной радиации. В этом отношении они ничем не отличаются от спокойных протуберанцев. Однако оптические толщи их немного меньше, чем в среднем в спокойных протуберанцах. Следует отметить, что при небольших оптических толщах в активных протуберанцах, обладающих большими скоростями, возможен своеобразный эффект аномально повышенной эмиссии в линиях даже в том случае, если действует только возбуждение фотосферной радиацией. При большой радиальной скорости протуберанец может поглощать излучение из непрерывного спектра близ линии H_{α} [12]. Не исключено, что такой протуберанец или отдельные его части при наблюдении на диске близ края будут регистрироваться с H_{α} -фильтром в виде ярких образований. Этим, по-видимому, объясняется большая яркость некоторых активных протуберанцев, в частности петлеобразных.

Из табл. 5, 6 видно, что турбулентные скорости исследуемых протуберанцев очень велики. В петлеобразном протуберанце А они достигают максимального значения в верхней части петли (шапке) и убывают по мере приближения к фотосфере. Причем в ионизированном кальции и гелии турбулентные скорости ведут себя одинаково в красной и синей компонентах, в то время как в водороде турбулентные скорости красной компоненты почти не меняются.

В протуберанце В в его взрывной стадии турбулентные скорости в разрезах, более близких к фотосфере (разрез 1), уменьшаются, а в петлеобразной (1204, 1206, 1207) в пределах ошибок стабилизируются и почти не зависят от высоты разреза над фотосферой.

Недоплеровский характер контуров линий говорит о том, что турбулентные скорости в разных частях протуберанца по лучу зрения различны и увеличиваются от центра к поверхностным слоям.

Лучевые скорости отдельных частей протуберанцев довольно велики. В протуберанце А лучевые скорости синей компоненты по мере приближения к фотосфере увеличиваются от 0 до 36 км/сек и затем убывают до 20 км/сек. Лучевые скорости красной компоненты водорода почти не меняются и достигают примерно 60 км/сек. Однако v_L красной компоненты ионизированного кальция и гелия по мере приближения к фотосфере возрастают от 38 до 63 км/сек.

В протуберанце В во взрывной стадии лучевые скорости узлов, смещенных в синюю сторону, вблизи фотосферы (разрез 1) увеличиваются, а для узлов, смещенных в красную сторону, уменьшаются. В петлеобразной стадии так же, как и для протуберанца А, лучевые скорости уменьшаются при приближении к фотосфере. Однако через петлю протуберанца В было сделано всего два фотометрических разреза и поэтому в данном случае трудно делать какие-либо уверенные выводы.

Выводы

1. Исследованные протуберанцы являются, по-видимому, лишь звеном из серии активных лимбовых образований, которые возникали и развивались в одном месте активной области в течение длительного времени. Развитие их характеризуется быстры-

ми изменениями форм. Период распада форм одного типа порядка нескольких десятков минут (от 20 мин до 1 ч).

2. В более спокойной стадии форма спектральных линий имеет сложную петлеобразную структуру, указывающую на наличие или особой траектории движений, или же нескольких отдельных потоков вещества.

3. По-видимому, в спокойной фазе развития движение вещества в протуберанцах, наблюдавшихся в разные дни, имеет сходный характер, что указывает на наличие стабильного магнитного поля, регулирующего характер движений материи в образованиях типа активных протуберанцев.

4. По типу спектра протуберанцы относятся к «неметаллическим» с умеренным количеством линий водорода.

5. Температуры, полные населенности уровней, плотности вещества и механизм возбуждения эмиссионных линий в этих протуберанцах такие же, как и в обычных спокойных протуберанцах.

6. Протуберанцы резко отличаются от спокойных большой величиной турбулентных скоростей, не описывающихся нормальным распределением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуртовенко Э. А., Дидаченко Е. И. — Изв. ГАО АН УССР, 1960, 3, 2.
2. Гуртовенко Э. А. — В кн.: Наблюдения Солнца. МГГ. Изд-во АН СССР, М., 1959, 25—35.
3. Степанян Н. Н. — Изв. КрАО, 1961, 26, 41.
4. Аликаева К. В. — В кн.: Спектрофотометрические исследования активных образований на Солнце. «Наукова думка», К., 1964, 73—80.
5. Банин В. Г. — Изв. КрАО, 1966, 35, 190.
6. Яковкин Н. А., Костик Р. И. — Астрофизика, 1966, 2, 379.
7. Томас Р., Атей Р. Физика солнечной хромосферы. «Мир», 1965.
8. Нігауата Т. — Publ. Astr. Soc. Japan, 1963, 15, 2, 104—132.
9. Cilie G. G. — Monthly Notices, 1932, 92, 82.
10. Яковкин Н. А. — Солнечные данные, 1963, 8, 167.
11. Костик Р. И. — Астрофизика, 1967, 3, 1, 17.
12. Яковкин Н. А., Зельдина М. Ю. — Солнечные данные, 1964, 9, 62.
13. Мороженко Н. Н. — В кн.: Вопросы астрофизики. «Наукова думка», К., 1966, 21—36.
14. Гуртовенко Э. А., Семенова Н. Н. — Изв. ГАО АН УССР, 1961, 4, 31.
15. Мороженко Н. Н. — Бюлл. Солнечные данные, 1964, 5, 63.

ACTIVE PROMINENCES IN THE REGION N 21034
ON JULY 9 AND 11, 1966

E. A. HURTOVENKO, N. N. MOROZHENKO, A. S. RAKHUBOVSKY

A b s t r a c t

The spectra of active prominences on July 9 and 11, 1966 have been analysed.

The main peculiarity of the spectral line profiles is their loop-like shape which reveals the existance of large and complicated movements in the prominences under investigation.

The physical conditions in the prominences are found to be the same as in quiescent prominences. But there is a sharp difference between them for turbulent velocities in the prominences of 9 and 11 July, 1966 were very large and amounted to the same order of magnitude as in limb—flares. This «microturbulence» do not correspond to the normal distribution of velocities.