

# ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

В. А. КОВАЛЕНКО и В. Н. МАЛЫШКИН

*Сиб ИЗМИРАН, Иркутск, СССР*

**Абстракт:** Исследуется связь потока энергии и скорости солнечного ветра с интенсивностью зеленой корональной линии. Получено, что минимум потока энергии соответствует максимально усиленной линии 5303 Å. Рассмотрен энергетический баланс короны. Показано, что поперечные магнитные поля в короне существенно влияют на параметры солнечного ветра. Значительное понижение скорости и потока энергии солнечного ветра в максимуме солнечной активности (1969—1970 гг.) объясняется перезамыканием магнитных полей северного и южного полушария вблизи экватора.

**Abstract:** The change of an energy flux and the solar wind velocity for the period 1962—1970 is considered. It is found that minimal solar wind energy fluxes correspond to the coronal regions with maximally intensified  $\lambda$  5303 line. It is also shown that a high temperature in a low corona is not a sufficient condition for the ejection of a large velocity stream of the solar plasma.

The energy flux and the solar wind velocity on the Earth's

В настоящее время свойства непрерывно истекающей в межпланетное пространство солнечной плазмы (солнечного ветра) довольно хорошо изучены как с помощью космических аппаратов, так и косвенными методами: по кометным хвостам, вариациям космических лучей, исследованию радиоизлучения дискретных источников и т. д. Солнечный ветер со сверхзвуковыми скоростями 300–700 км/сек, имеет концентрацию  $1-10 \text{ см}^{-3}$  на орбите Земли и вытягивает магнитные поля короны, напряженностью  $1-10$  гамм на 1 а.е.

Такая картина межпланетного пространства качественно согласуется с гидродинамическими моделями солнечного ветра [1–6].

Однако теоретические модели, в лучшем случае, дают параметры ветра, близкие к средним наблюдаемым, и не объясняют временные и пространственные вариации скорости, концентрации и потока энергии солнечного ветра.

Происхождению вариаций скорости солнечного ветра посвящено большое количество

heliolatitudes are less than on the phases of increase and decrease of 11-year cycle (1962, 1967) both during the solar activity minimum (1964—1966) and during the solar activity maximum (1969—1970). The energy balance of corona is considered. It is shown that the quasi-stationarity of coronal formations may be supported by transversal magnetic fields in corona which decrease the corona thermal conduction and solar wind energy flux, simultaneously increasing its density and, consequently, the energy flux of the emission. It is supposed that the transversal magnetic fields in the corona up to the heights  $\geq 0.5 R_{\odot}$  can be generated by means of the magnetic fields reconnection both in neighbour sunspot groups and in the magnetic fields of the northern and southern solar hemisphere, when a great number of sunspot in the both hemisphere approaches to the equator (1969—1970). Such a reconnection may cause the decrease of the velocity and solar wind energy flux, and also the appearance of an intensity maximum in coronal  $\lambda$  5303 line on equatorial latitudes at this period.

экспериментальных работ [7–12], в которых делается попытка связать высокоскоростные потоки с различными проявлениями солнечной активности (флоккулами, интенсивностью зеленой корональной линии, радиоусилениями). Противоречивые результаты, полученные в [7–12], не объясняют происхождение вариаций параметров солнечного ветра и их связь с солнечной активностью. В то время как для построения теории солнечного ветра, так и для объяснения комплекса геофизических явлений, необходимо знать как проявляются изменения солнечной активности в параметрах солнечного ветра.

## Интенсивность зеленой корональной линии и поток энергии солнечного ветра

Из фотосферы выходит поток энергии в виде волн  $F_{\pi} \sim 5 \cdot 10^{29}$  эрг/сек [13]. Большая часть этой энергии поглощается в хромосфере,

а некоторая часть поступает в корону. Согласно теоретическим моделям [1–6] поток энергии, уносимый солнечным ветром, увеличивается при возрастании температуры короны. В работах [14, 15] показано, что для периода 1957–1963 гг. интенсивность зеленой корональной линии пропорциональна температуре короны. Поэтому следует ожидать положительной корреляции между интенсивностью линии 5303 Å и потоком энергии солнечного ветра.

Нами были рассмотрены данные по интенсивности ( $I$ ) зеленой корональной линии (5303 Å) [16] и потоку энергии солнечного ветра.

$$F_{c.v.} = \frac{1}{2} m_p n v (v^2 + w^2), \quad (1)$$

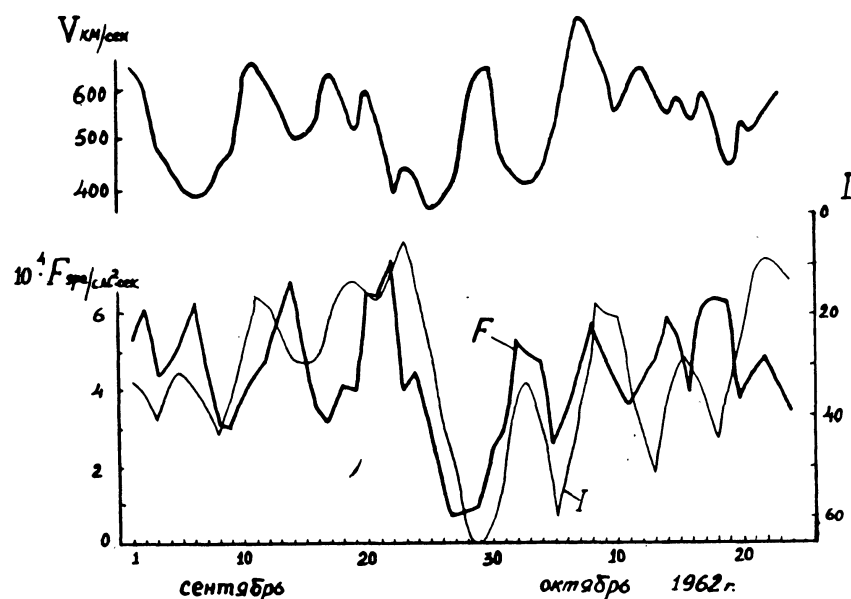


Рис. 1.

где  $n$  и  $v$  – концентрация и скорость ветра вблизи орбиты Земли,  $w = \left(\frac{2Gm_{\odot}}{r_{\odot}}\right)^{0.5}$  – скорость гравитационной утечки частиц от Солнца.

Данные по скорости и потоку энергии солнечного ветра за период сентябрь–октябрь 1962 г. [7] в предположении  $V = \text{const}$  были приведены к Солнцу согласно уравнению спирали Архимеда. Рассчитанный по формуле (1) поток энергии солнечного ветра представлен на рис. 1. Здесь же показана интенсивность линии 5303 Å, усредненная по восточному

и западному лимбу для гелиошироты 10 N, и скорость солнечного ветра  $V$ . Был проведен кросскорреляционный анализ между потоком энергии ветра и интенсивностью зеленой корональной линии. Максимум коэффициента корреляции  $\rho = -0,62$  соответствует сдвигу в нуль дней. Учитывая ограниченность данных по интенсивности линии 5303 Å и их точность, а также возможные искажения при трансформации параметров ветра к Солнцу, было проведено усреднение данных по солнечному ветру за несколько суток (рассматривались отдельно высокоскоростные потоки и промежутки между ними), в соответствии с этим усреднились и корональные измерения. Полученная зависимость потока энергии от интенсивности зеленой линии приведена на рис. 2. Оче-

видно, что максимальным значениям интенсивности зеленой короны, которые, как правило, локализуются над группами пятен, соответствуют минимальные значения потока энергии. Поток энергии максимален при средних значениях интенсивности линии (25–40 единиц эквивалентной ширины). При понижении интенсивности линии меньше 20 единиц поток энергии имеет тенденцию уменьшаться.

На рис. 3 представлены интенсивность зеленой линии короны и поток энергии солнечного ветра вблизи Солнца с 1962 по 1970 гг., усредненные по периодам, за которые данные по

солнечному ветру были в нашем распоряжении [17–22]. Интенсивность линии 5303 Å использовалась тех гелиоширот, на которые проецировались космические аппараты. Связь между потоком энергии солнечного ветра и интенсивностью зеленой короны в цикле солнечной активности оказывается аналогичной связи, полученной для 1962 г.

контролируются не только температурой короны и потоком энергии диссипирующих волн.

### Баланс энергии в короне

Рассмотрим баланс энергии, поступающей в корону  $F_{\Pi}$  и вытекающей из нее  $F_{\nu}$ , который определяется:

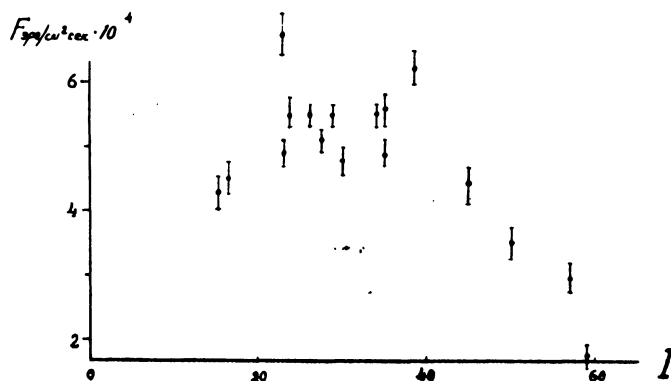


Рис. 2.

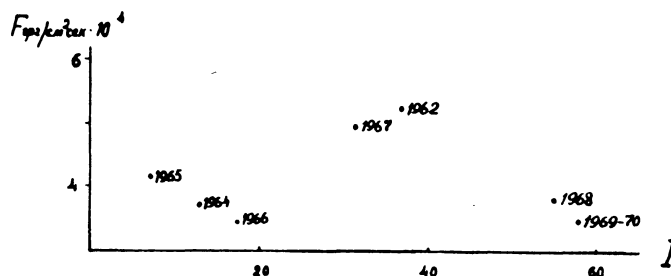


Рис. 3.

Оказывается, что поток энергии на гелиоширотах Земли понижается как в период максимума солнечной активности и после него (1968–1970 гг.), так и вблизи минимума солнечной активности (1964–1966 гг.). Кроме того, из рассмотренного следует, что поток энергии солнечного ветра неоднозначно связан с температурой короны. В последней модели Барнеса и др. [11] изменение скорости солнечного ветра и концентрации связывается с вариациями потока энергии диссипирующих волн. Причем в этой модели с увеличением скорости ветра концентрация уменьшается, но поток энергии солнечного ветра увеличивается. Некоторые высокоскоростные потоки солнечного ветра, представленные на рис. 1, соответствуют минимальным потокам энергии. Следовательно, параметры солнечного ветра  $n$  и  $V$

$$F_{\Pi} = F_{\nu} = F_{\nu} + F_T + F_{с.в.},$$

где  $F_{\nu}$  – поток энергии в виде излучения,  $F_T$  – поток энергии за счет теплопроводности в хромосферу,  $F_{с.в.}$  – поток энергии, уносимый солнечным ветром.

Поток энергии излучения короны в линиях различных ионов, тормозного и рекомбинационного излучений с учетом диэлектронной рекомбинации ионов рассчитан в [23]. Для средней температуры и концентрации в короне на высоте максимума линии 5303 Å [24]  $T = 1,5 \cdot 10^6$  °К,  $\Pi = 6 \cdot 10^8$  см<sup>-3</sup>, толщине слоя 20", получим  $F_{\nu} = 3 \cdot 10^4$  эрг/см<sup>2</sup> сек.

Поток энергии из короны в хромосферу за счет теплопроводности  $F_T \sim 7 \cdot 10^5$  эрг/сек см<sup>2</sup> при  $T_0 = 1,5 \cdot 10^6$  °К, градиенте температуры  $4 \cdot 10^{-4}$  °К/см. Однако, как показал Лившиц

[25], эффект теплопроводности из короны в хромосферу существенно уменьшается за счет движения вещества наружу со скоростью  $\leq 1$  км/сек. Поэтому поток энергии за счет теплопроводности в хромосферу, по-видимому, сравним с потоком энергии в виде излучения.

Поток энергии, уносимый солнечным ветром, определенный по (1), обусловлен как теплопроводностью короны наружу, так, и волновым источником, составляет  $\approx 5 \cdot 10^4$  эрг/сек  $\text{см}^2$  для средних значений  $n$  и  $V$ .

Таким образом, потоки энергии в солнечный ветер, на излучение короны и уходящий в хромосферу (определенный, к сожалению, не очень надежно) оказываются сравнимы между собой.

Для активных областей, характеризующихся усиленным свечением в линии 5303 Å, поток энергии солнечного ветра существенно меньше среднего и составляет  $\approx 2 \cdot 10^4$  эрг/сек  $\text{см}^2$  (рис. 1). Согласно [23, 26], с увеличением температуры короны поток энергии на излучение уменьшается, и при  $T = 1,7 \cdot 10^6$  °К равен  $\sim 2 \cdot 10^4$  эрг/сек  $\text{см}^2$ , если концентрация в короне не изменилась. Нескомпенсированный суммарный поток энергии оказывается равным  $\sim 4 \cdot 10^4$  эрг/сек  $\text{см}^2$ , если справедливо постоянство  $F_T$ . Это должно привести к еще большему увеличению температуры короны, т.е. к ее тепловой неустойчивости, что противоречит экспериментальным данным.

Из рассмотренного следует, что для поддержания теплового баланса короны необходим регулятор энергии. Мы полагаем, что таким регулятором являются поперечные магнитные поля в короне, которые существенно уменьшают ее теплопроводность [27]. При этом поток частиц и энергии в солнечный ветер уменьшается, что должно привести к увеличению концентрации и температуры в короне.

Поток энергии на излучение возрастает с увеличением концентрации ( $F_\nu \sim n^2$ ) и компенсирует уменьшение потока энергии в солнечный ветер, что обеспечивает квазистационарность активных корональных образований и энергетический баланс в них. Для приведенного выше случая энергетический баланс в короне будет обеспечен, если увеличить концентрацию в 1,7 раза. Радионаблюдения короны на 169 МГц показывают, что в местах усиленной линии 5303 Å концентрация увеличена в несколько раз по сравнению со спокойной короной [10]. Соответствие между расчи-

танными конфигурациями магнитных полей и корональными структурами, полученное в [27], подтверждает высказанное предположение о роли магнитных полей в короне.

Поток энергии из короны в хромосферу за счет теплопроводности также уменьшается при появлении поперечной компоненты магнитного поля.

Из рис. 3 видно, что с увеличением солнечной активности (1964–1967 гг.) поток энергии в солнечный ветер и на излучение короны увеличивается. Это может быть обусловлено двумя причинами:

1. увеличением общего потока, поступающего в корону на данные гелиошироты;

2. уменьшением оттока энергии из короны в хромосферу за счет появления поперечных магнитных полей до высот, соответствующих максимуму температуры в короне ( $\sim 40$  тыс. км). В период от 1967 к 1970 гг. поток энергии в солнечный ветер уменьшается, в то время как активность гелиоширот  $\pm 15^\circ$  продолжает увеличиваться. Это можно понять, если предположить, что поперечные магнитные поля напряженностью  $\sim 1$  гс простираются до высот  $\approx 0,5 Z_0$ . Они могут образовываться путем перезамыкания полей как соседних групп пятен, так и магнитных полей северного и южного полушарий Солнца. Действие этих полей приводит к уменьшению потока частиц и энергии в солнечный ветер, увеличению температуры короны и ее концентрации. Последнее усиливает поток энергии на излучение и обеспечивает тепловой баланс короны. После установления квазистационарного состояния короны с повышенной концентрацией, избыточный поток частиц, по-видимому, стекает в хромосферу или идет на образование протуберанцев [28]. Известно [29], что плотность короны в максимуме солнечной активности  $\sim$  в 2 раза больше, чем в минимуме для экваториальной области, к которой и относятся все вышеперечисленные результаты. Поток энергии в коротковолновом диапазоне вблизи Земли также увеличивается от минимума солнечной активности к максимуму более, чем в 2 причем это изменение происходит за счет излучения короны [30].

Перезамыкание магнитных полей северного и южного полушарий Солнца, когда большое число групп пятен обоих полушарий максимально приближается к экватору (1969–1970 гг.), может быть причиной появления максиму-

ма интенсивности зеленой корональной линии на экваториальных широтах в 1969 г. и двухвершинности хода интенсивности линии 5303 Å в 11-летнем цикле, полученного Гневшевым [31]. Фотографии короны в рентгеновских лучах [32] подтверждают, что между активными областями северного и южного полушарий существует связь.

### Скорость солнечного ветра и интенсивность зеленой корональной линии

Патаком [12] была рассмотрена корреляция между интенсивностью линии 5303 Å и скоростью солнечного ветра для периода 1962 и 1964 гг. Автор нашел положительную связь со сдвигом +2 дня ( $\rho = 0,5$ ) для 1962 г. и 0 дней для 1964 г. с таким же коэффициентом корреляции. Такие времена запаздывания нельзя объяснить с учетом измеренных скоростей солнечного ветра (это требует  $V > 1000$  км/сек, таких скоростей не наблюдалось). В то же время на кросскорреляционных кривых, представленных в [12], существует не менее значимый отрицательный максимум коэффициента корреляции ( $\rho = -0,5$ ) со сдвигом 4–6 дней, который автор не рассматривает. Если учесть, что средняя скорость солнечного ветра от Солнца до Земли должна быть меньше измеренной вблизи 1 а.е. [1], то отрицательная связь между скоростью солнечного ветра и интенсивностью зеленой корональной линии кажется более обоснованной. Для 1964 г. вообще трудно понять положительную связь с нулевым запаздыванием, в то время как отрицательная требует скоростей 300–400 км/сек, что соответствует реально наблюдаемому [18].

Подобная связь была рассмотрена нами для периода 1968–1970 гг. Использовалась та же методика, что и в [12]. Полученные кросскорреляционные кривые между интенсивностью линии 5303 Å и скоростью солнечного ветра приведены на рис. 4а,б. Из рис. 4 видно, что для времен запаздывания 3–5 дней, соответствующих измеренным скоростям, положительная связь явно отсутствует. Максимумы положительной корреляции, соответствующие сдвигу в 8 дней для 1968 г. и –6, +9 дней для 1969–1970 гг., не отражают физической связи между скоростью солнечного ветра и интенсивностью зеленой короны. Появление этих

максимумов можно понять, исходя из того, что характерные размеры областей, из которых истекают высокоскоростные потоки, примерно такие же, как и областей с усиленной линией 5303 Å. При соответствующих сдвигах это приведет к положительной и отрицательной корреляции.

Таким образом, между скоростью солнечного ветра и интенсивностью линии 5303 Å, с учетом реального времени запаздывания, положительная связь отсутствует. Не исключено, что изменения интенсивности зеленой корональной линии в отдельные периоды косвенно отражают вариации скорости солнечного ветра. При усреднении  $I$  ( $\lambda = 5303$  Å) и  $V$  с.в. за несколько солнечных оборотов между ними появляется положительная связь: для 1962 г. с 1964 г. и 1967 г. с 1968 г. [12]. При сравнении 1968 г. с 1969–1970 гг. такая связь нарушается.

### Сравнение вариаций скорости солнечного ветра с фотосферной активностью

Чтобы отделить пространственные вариации скорости солнечного ветра от временных, рассмотрим квазистационарный высокоскоростной поток А, который существует в течение 5 солнечных оборотов (1767–1771). На рис. 5 представлены данные скорости солнечного ветра, приведенные к Солнцу. Для каждого оборота показана солнечная активность на соответствующих потоку А долготах (флуккулы, пятна и магнитные поля).

Поток А<sub>1</sub> проецируется на область фотосферы, в которой отсутствуют какие-либо видимые проявления активности.

Биполярные группы пятен на долготах 310–325° соответствуют понижению скорости, локальному уменьшению концентрации и потока энергии (см. рис. 1).

Для второго оборота характерно появление биполярной группы вблизи 40° и группы с правильным устойчивым головным пятном на 10°.

Скорость ветра (поток А<sub>2</sub>) на долготах 10–50° уменьшилась по сравнению с А<sub>1</sub>, что можно отнести к влиянию групп пятен, появившихся на этих долготах. В то же время на долготах 320–340° скорость потока А<sub>2</sub> существенно возрастает. Биполярная группа, сущес-

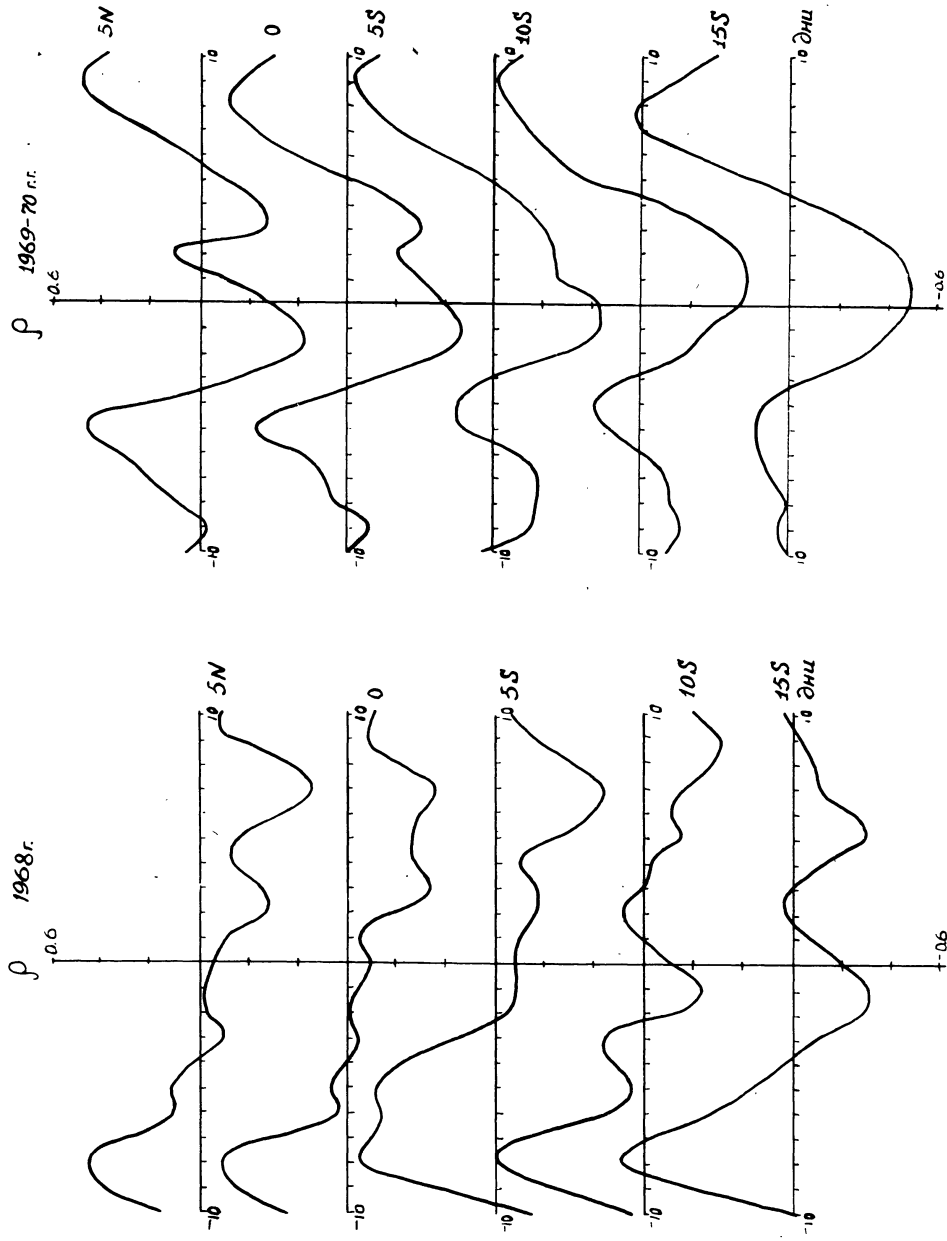


FIG. 4.

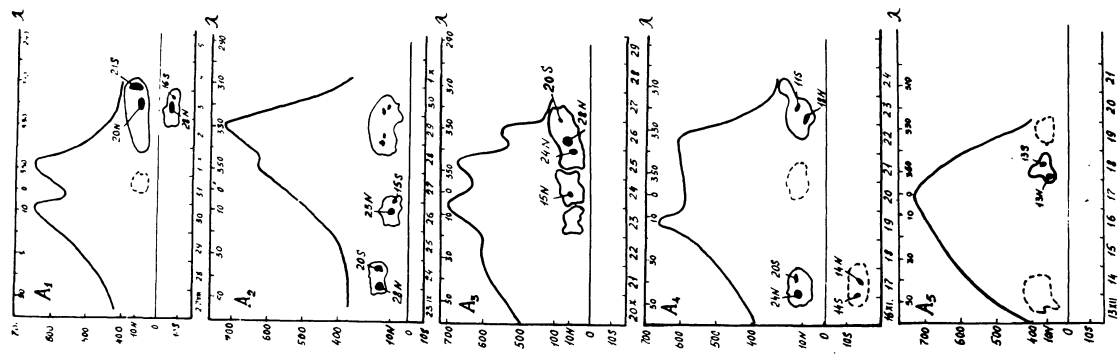


FIG. 5.

твоявшая на этих долготах в предыдущем обороте распадается на поры. Характерно, что и концентрация, и поток энергии для  $A_2$  – минимальные за весь рассмотренный период, а интенсивность зеленой корональной линии максимальна. Это можно объяснить, предположив, что магнитные поля групп пятен на долготях  $10$ – $50^\circ$  перезамыкаются между собой и образуют единую магнитную конфигурацию с поперечными полями.

Третий оборот характеризуется исчезновением групп пятен на  $\lambda = 40$ – $50^\circ$  и соответствующим увеличением скорости на этих долготах. Появление группы пятен на  $\lambda = 330$ – $350^\circ$  приводит к понижению скорости потока. Следует отметить, что для 3-го оборота характерно преобладание пятен одной полярности. Воздействие биполярных групп на  $\lambda = 40$ – $50^\circ$  в южном и северном полушариях для четвертого оборота аналогично воздействию групп пятен на  $\lambda = 10$ – $50^\circ$  во втором обороте.

Поток  $A_5$  локализуется в сравнительно спокойной области фотосферы. Биполярная группа  $\lambda = 350$ – $360^\circ$  соответствует концу потока.

Из рассмотренного видно, что вблизи высокоскоростного потока на протяжении пяти солнечных оборотов присутствуют или появляются группы пятен. Создается впечатление, что эти пятна являются индикатором существования квазистационарных условий, обеспе-

чивающих большую скорость солнечного ветра.

Непосредственно над биполярными (или мультиполярными) группами пятен скорость солнечного ветра понижена и близка к фоновой, концентрация – ниже фоновой. По-видимому, магнитные поля таких групп пятен создают «закрытые» области в короне, из которых истечение солнечного ветра затруднено.

Подобные «закрытые» области в короне могут образовываться путем перезамыкания магнитных полей северного и южного полушарий Солнца, когда средняя гелиоширота групп пятен приближается к минимальной, а их число достаточно велико (1969–1970 гг.). Поэтому следует ожидать, что скорость солнечного ветра для этого периода будет понижена. И действительно, как показывают измерения на космических аппаратах [33], скорость солнечного ветра так же, как и поток энергии в 1969–1970 гг., минимальны за весь период измерений с 1962 по 1970 гг.

Таким образом, проведенный анализ данных по солнечной активности и вариациям параметров солнечного ветра, позволяет сделать вывод о том, что магнитные поля в короне играют существенную роль как в регулировании энергетического баланса короны, так и параметров солнечного ветра.

## Литература

1. ПАРКЕР, Е. (1965): Динамические процессы в межпланетной среде. Мир.
2. NOBLE, L. M., SCARF, F. L. (1963): *Astrophys. J.*, **138**, 1169.
3. PARKER, E. N. (1964): *Astrophys. J.*, **139**, 93.
4. BARNES, A. (1968): *Astrophys. J.*, **154**, 751.
5. BARNES, A. (1969): *Astrophys. J.*, **155**, 311.
6. HARTLE, R. E., BARNES, A. (1970): *J. Geophys. Res.*, **75**, 6915.
7. СНАЙДЕР, К. У. и НЕЙГЕБАУЭР, М. (1968): Солнечный ветер. Ред. Р. Дж. Маккин и М. Нейгебауэр. Мир, 31.
8. ИВАНОВ, К. Г. (1966): Геомagnetизм и аэрономия, с. 191.
9. ROOSEN, J. (1969): *Solar Phys.*, **8**, 450.
10. COUTURIER, P., LEBLANC, Y., (1970): *Astron. Astrophys.*, **7**, 254.
11. BARNES, A., HARTLE, R. E. (1972): C.P. Sonnett et al. (Eds), (1972): In: *Solar Wind*. Washington.
12. ПАТНАК, Р. Н. (1971): *Solar Phys.*, **20**, 462.
13. OSTERBROCK, D. E. (1961): *Astrophys. J.*, **134**, 347.
14. BILLINGS, D. E., HATT, W. A. (1968): *Astrophys. J.*, **151**, 743.
15. ПАТНАК, ВИКРАМ САРАВАИ (1970): *Planet. Space Sci.*, **18**, 81.
16. *Quart. Bull. Solar Activ.*, 1961–1970.
17. SYNDER, C. W., NEUGEBAUER, H. (1966): *J. Geophys. Res.*, **71**, 4469.
18. OLBERT, S. (1968): In: R. L. Carovilliane (Ed.), *Physics of Magnetosphere*, p. 641. Dordrecht, Holland.
19. KOVALEVSKY, V. I. (1971): *Space Sci. Rev.*, **12**, 187.
20. МИХАЛОВ, J. D., WOLFE, J. H. (1971): *Cosmic Electrodynamics*, **2**, 326.
21. GOLDSTEIN, B., SISCOE, G. L. (1972): In: G. P. Sonnett et al. (Eds), *Solar Wind*, p. 507. Washington.
22. ОБАЯШАИ, Т. (1971): *STAC-B Charts*, Tokyo.
23. ВИЛЬКОВИНСКИЙ, Э. Я. (1972): *Астрон. ж.*, **49**, 1125.
24. МАКАРОВА, В. В., МАКАРОВ, В. И. и НИКОЛЬСКИЙ, Г. М. (1971): *Астрон. ж.*, **48**, 360.
25. ЛИВШИЦ, М. А. (1964): *Астрон. ж.*, **41**, 473.
26. COX, D. P., TUCKER, W. H. (1969): *Astrophys. J.*, **157**, 1157.
27. СПИТЦЕР, Л. (1957): *Физика полностью ионизованного газа*. ИЛ.
28. ПИКЕЛЬНЕР, С. Б. (1971): *Астрон. ж.*, **48**, 357.

29. ЗЫРИН, Г. (1969): Солнечная атмосфера. Мир.  
30. ИВАНОВ-ХОЛОДНЫЙ, Г. С. и НИКОЛЬСКИЙ  
Г. М. (1969): Солнце и ионосфера. М., Наука.  
31. ГНЕВЫШЕВ, Н. Н. (1963): Астрон. ж., 40, 401.
32. VAIANA, G. S., KRIEGER, A. S., Van SPEYBRECK,  
L. P. (1971): Proc. of IAU Symposium No. 43. Paris 1970.  
33. GOSLING, J. T., HANSEN, R. T., BAME, S. J.  
(1971): J. Geophys. Res., 76, 1811.