

В. Л. БРАИЛОВСКИЙ, И. Ю. БРАИЛОВСКАЯ

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗА СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК КАК ФУНКЦИИ МНОГИХ ПЕРЕМЕННЫХ

(Представлено академиком Г. И. Петровым 28 X 1970)

В настоящее время не известно какого-либо одного признака, позволяющего достаточно надежно прогнозировать вспышки. Однако ряд явлений в центрах солнечной активности часто сопутствуют и предворяют вспышку. Естественно предположить, что одновременный учет большого числа таких характеристик в единой прогнозирующей функции от многих переменных позволит построить более надежный прогноз.

В нашей работе использованы данные о всех группах пятен и оптических вспышках за 1966 г., напечатанные в бюллетенях службы солнца: 1) Солнечные данные (СССР), 2) Solar-Geophysical data, ESSA (USA), 3) Quaterly bull. on Solar Activity (IAU, Zürich). При помощи логических и статистических методов обработки этой информации на ЭВМ строится функция прогноза.

1°. Рассматривается следующая задача. Требуется прогнозировать вспышки, которые произошли в некоторой окрестности данной группы пятен; основанием для прогноза служат данные наблюдений за предшествующие дни, в частности, берутся данные за 4 дня или больше и прогноз ведется на последующие 2 дня. Используются ежедневные наблюдения: общая площадь пятен данной группы (S_p), площадь максимального пятна в ней (S_p^0), число пятен в группе (k); по каждой вспышке — момент ее начала и конца, гелиографические координаты и балл вспышки; балл состоит из двух индексов — один оценивает площадь вспышки, другой — яркость. Таким образом, в рассматриваемой окрестности группы для каждого суток можно подсчитать число вспышек, происшедших там за эти сутки (NI) и суммарный вспышечный индекс (I). Для каждой вспышки этот индекс равен произведению площади вспышки на ее яркость и на продолжительность, причем площадь и яркость оцениваются по баллу. Такой индекс для отдельной вспышки грубо оценивает ее энергию, I есть сумма индексов всех вспышек, происшедших в данные сутки в данной окрестности. Кроме того, подсчитывается число больших вспышек (NIB) и суммарный индекс по большим вспышкам (IB), где большая — это вспышка, собственный индекс которой больше некоторой величины (в данной работе большими называются вспышки, у которых индекс больше, чем у вспышки балла 1n, продолжающейся полчаса). Для этих четырех характеристик вспышечной активности (NI , I , NIB , IB) и строится прогноз.

При выборе параметров или аргументов прогнозирующей функции мы старались использовать уже имеющиеся в литературе данные о связи характеристик групп пятен и вспышек, а также результаты проведенного нами предварительного исследования свойств функций S_p , I и т. д. от времени и связи этих свойств с дальнейшей вспышечной активностью. Использована такая система параметров, вычисленных за дни наблюдений: 1) Предыстория вспышечной активности учитывается средними дисперсиями по времени и максимальными значениями величин NI , I , NIB , IB ; вводятся также параметры, характеризующие немонотонность функций и разность их значений за два последних дня наблюдений. 2) Группа пятен характеризуется средним значением логарифма числа пятен ($\ln k$), значе-

нием S_p в последний день наблюдений S_p^n , максимальным значением $S_p(\max S_p)$, количеством суток от наступления этого максимума до конца наблюдений (n_0) и средней производной S_p по времени; заметим, что n_0 показывает, на какой ветви — восходящей или нисходящей — находится группа (на восходящей $n_0 = 0$) и как далеко она продвинулась по нисходящей ветви. 3) Для характеристики структуры раздробленности группы на отдельные пятна вводятся функции S_p/k , $S_{pi} = (S_p - S_p^0) / [(k-1)S_p]$, и характеристика энтропийного типа

$$S_3 = - \left[(k-1) S_{pi} \ln S_{pi} + \frac{S_p^0}{S_p} \ln \frac{S_p^0}{S_p} \right],$$

которая определяет неравномерность распределения площади группы по отдельным пятнам; параметрами являются средние значения, дисперсии и вариации этих функций. 4) Учет влияния соседних групп пятен производится следующим образом. Вводятся функции суммарной площади $S_{p\text{ осп}}$ и суммарного числа пятен $k_{\text{осп}}$ соседних групп, попавших в рассматриваемую окрестность, а также отношение $S_{p\text{ осп}} / k_{\text{осп}}$. В качестве параметров берутся средние и дисперсии перечисленных функций.

Общее число образованных параметров равняется сорока.

Всего по данным 1966 г. образовано 393 объекта, каждый из которых характеризуется значениями названных 40 параметров. Для этих же объектов известно значение искомой функции. Как упоминалось, рассматриваются четыре варианта таких функций — значения NI , I , NIB , IB за следующие два дня. Задача состоит в том, чтобы на базе этой выборки из 393 объектов с известными значениями функции в этих точках сорокомерного пространства $f(x^i)$ ($1 \leq i \leq 393$) построить прогнозирующую функцию $\hat{f}(x)$, которая достаточно хорошо аппроксимирует $f(x)$ во всех точках пространства параметров. Процедура построения $\hat{f}(x)$ состоит в следующем. Область значений каждого параметра разбивается на небольшое число (2—4) частей. Рассматриваются всевозможные сочетания из двух параметров. Их число $\binom{40}{2}$. Для каждого из них методом наименьших квадратов строится аппроксимация $f(x)$ и оценивается ее качество по квадратичной оценке. По этой оценке отбирается наилучшая пара параметров. Для каждого объекта x^i вычисляется аппроксимация по этой паре параметров $\hat{f}_1(x^i)$, и рассматриваются первые невязки $\delta_1(x^i) = f(x^i) - \hat{f}_1(x^i)$. Затем вновь рассматриваются всевозможные парные сочетания параметров, но аппроксимация строится уже для $\delta_1(x)$, и отбирается наилучшее в этом смысле сочетание параметров. Для каждого объекта вычисляется аппроксимация $\delta_1(x)$ по этой паре параметров $\hat{f}_2(x^i)$ и строятся вторые невязки $\delta_2(x^i) = \delta_1(x^i) - \hat{f}_2(x^i)$. Затем отыскивается сочетание параметров, наилучшим образом аппроксимирующее $\delta_2(x)$, и т. д. Процедура заканчивается, когда прекращается значимое улучшение качества аппроксимации. Окончательный вид аппроксимирующей функции, используемой для прогноза,

$$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^r \hat{f}_i(x),$$

где r — число циклов аппроксимации, $\hat{f}_i(x)$ — функции двух переменных, полученная на i -м шагу.

Для оценки качества процедуры используются статистические оценки скользящего типа, описанные в (1), система функций, использованных для аппроксимации, и ее свойства изложены в (2).

2°. Рассмотрим результаты прогноза величины IB . Алгоритмом отобраны следующие сочетания параметров: 1) Среднее значение NI и n_0 , т. е. средний уровень вспышечной активности и характеристика стадии развития группы; 2) среднее значение S_3 и значение S_p в последний день; 3) сред-

ний индекс одной вспышки и дисперсия NI ; 4) $\max S_p$ и среднее NI . Таким образом, из характеристик пятен первыми отобраны максимальное и текущее значение общей площади группы, а также стадия ее развития и средняя раздробленность. Далее в отобранные сочетания вошли параметры, характеризующие изменение во времени вспышечных индексов и функций, связанных с дробленностью самой группы и соседних групп в окрестности, т. е. дисперсии и вариации соответствующих величин. Функция прогноза, построенная на девятнадцати отобранных сочетаниях параметров, давала в 70% случаев результат, отличающийся от истинного IB не более, чем на 60 (IB принимает значения от 0 до 519). Приведем пример прогноза IB для окрестности группы с высокой вспышечной активностью последовательно во времени:

$$\begin{array}{r} f \\ \uparrow \end{array} \begin{array}{cccccccc} 442 & 519 & 238 & 39 & 140 & 287 & 252 & 86 \\ 344 & 378 & 270 & 118 & 188 & 198 & 230 & 61 \end{array}$$

Для слабой группы:

$$\begin{array}{r} f \\ \uparrow \end{array} \begin{array}{cccccccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 18 & 19 & 21 & 22 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{array}$$

Для группы средней активности:

$$\begin{array}{r} f \\ \uparrow \end{array} \begin{array}{cccccccc} 235 & 146 & 27 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 232 & 90 & 55 & 37 & 0 & 0 & 17 & 0 \end{array}$$

Для сильной группы всегда прогнозируются высокие значения IB , а для слабой — низкие; при прогнозе правильно улавливается тенденция изменения вспышечной активности, однако при резких изменениях IB величина скачка сглаживается, а момент его может несколько сместиться.

Близкие как по физическому смыслу, так и по точности результаты были получены для прогноза I , NI и NIB . Так, при прогнозе NIB для сильной группы, соответствующей первому примеру, имеем:

$$\begin{array}{r} f \\ \uparrow \end{array} \begin{array}{cccccccc} 7 & 11 & 7 & 3 & 6 & 11 & 11 & 5 \\ 6 & 9 & 7 & 4 & 8 & 9 & 8 & 4 \end{array}$$

Заметим, что при оценке точности прогноза следует принять во внимание грубость использованных данных.

При работе алгоритма можно получить информацию о том, какие параметры несут близкую в смысле прогноза информацию. Например, такими близкими оказались параметры изменения I во времени и изменения во времени раздробленности группы и ее соседей в окрестности. В связи с этим был поставлен эксперимент восстановления зависимости относительного изменения индекса вспышечной активности $\Delta I/I$ (скачка I) от параметров групп пятен. Оказалось, что в первую очередь были отобраны сочетания параметров, включающие раздробленность группы и ее соседей, их изменения во времени и суммарная площадь соседей. Таким образом, в отличие от параметров, являвшихся основными при прогнозе IB и I , для скачка главными являются изменения по времени раздробленности группы и пятна в окрестности.

Для выяснения значимости в прогнозе различных параметров и их групп проводились эксперименты по построению прогнозирующей функции без использования части параметров.

Представляет интерес изучение зависимости прогнозируемой функции от малого числа параметров (например, двух) в среднем по всем остальным. Приведем пример зависимости IB от среднего NI и n_0 :

$$\begin{array}{r} \overline{NI} \\ \uparrow \end{array} \begin{array}{ccc} 148 & 62 & 36 \\ 65 & 21 & 19 \\ 25 & 19 & 9 \\ 16 & 6 & 4 \end{array} \begin{array}{l} \\ \\ \\ \rightarrow n_0 \end{array}$$

Видно, что на любой стадии развития группы (n_0) чем больше было всплеск в предыстории, тем большая величина их прогнозируется (в среднем), кроме того, на восходящей ветви среднее значение прогнозируемого индекса всегда больше, чем на нисходящей.

Заметим, что изложенная работа является первым шагом в такого рода исследовании. Использование большего объема данных и включение в них более тонких параметров позволит, как мы надеемся, решать более интересные и сложные задачи прогноза и исследования солнечной активности.

Авторы благодарны акад. Г. И. Петрову за постановку задачи и внимание к работе, М. А. Могилевскому и В. Н. Обридко за консультации.

В работе использован набор программ для ЭВМ, созданный в Институте электронных управляющих машин. Авторы благодарны участникам их разработки.

Вычислительный центр
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

Поступило
8 X 1970

Институт электронных управляющих машин
Москва

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Л. Луиц, В. Л. Браиловский, Изв. АН СССР, Техническая кибернетика, № 3 (1967). ² В. Л. Браиловский, Изв. АН СССР, Техническая кибернетика, № 2 (1969). ³ Г. Смит, Э. Смит, Солнечные вспышки, М., 1966. ⁴ Р. Брей, Р. Лоухед, Солнечные пятна, М., 1967.