

УДК 537.591.15

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕН ПРИХОДА ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ ШАЛ МГУ МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА

М. Ю. Зотов, Г. В. Куликов, Ю. А. Фомин

(НИИЯФ)

E-mail: fomin@eas.sinp.msu.ru

Представлены результаты нелинейного анализа моментов регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), полученные на установке «Прототип ШАЛ-1000», работающей в составе установки ШАЛ МГУ. В частности, найдены кластеры ШАЛ, а также наборы ливней, демонстрирующие признаки хаотической динамики. Обсуждаются возможные механизмы возникновения данных явлений.

1. Анализ экспериментальных данных методами кластерного анализа

Анализ моментов регистрации 1668489 ШАЛ, полученных на установке «Прототип ШАЛ-1000» в период с августа 1997 г. по февраль 1999 г., проведенный методами классической статистики, привел к обнаружению выборок, не удовлетворяющих гипотезе об однородности [1]. Для выявления возможных причин этого явления был применен подход, базирующийся на методах кластерного анализа.

На основании результатов анализа закона распределения моментов регистрации ШАЛ [2] нами было принято, что с учетом барометрического эффекта [3] имеющиеся данные представляют собой стационарный временной ряд, а само распределение числа ШАЛ, регистрируемых в единицу времени, подчиняется закону Пуассона с параметром $\lambda \approx 5.77$ ШАЛ/мин. Поиск кластеров ШАЛ осуществлялся следующим образом:

1. Фиксировалось некоторое достаточно малое число $\varepsilon > 0$ и некоторая продолжительность интервала наблюдения T .

2. На основе известной интенсивности λ процесса Пуассона находилось такое число K , при котором вероятность того, что за время T зарегистрируется более K ШАЛ, имеет величину порядка ε .

3. В качестве кластера идентифицировалась такая последовательность ливней, в которой за время, не превосходящее T , было зарегистрировано более K ливней.

Таким образом, кластеры представляют собой «всплески» темпа счета ШАЛ.

Сама методика поиска кластеров заключалась в следующем. Выбирался начальный момент времени $t_0 = 0$, от него откладывался «контрольный» интервал длины T и подсчитывалось число N_T ливней, зарегистрированных в течение данного интервала времени. Если $N_T \leq K$, то набор ливней, принадлежащих данному интервалу, кластером не считался. В противном случае ($N_T > K$) считалось, что обнаружен кластер. После этого левый конец

«контрольного» интервала перемещался в точку t_1 (момент регистрации первого ливня в анализируемой выборке), и анализ повторялся. Процедура продолжалась до момента исчерпания всего набора данных.

Конкретные параметры отбора кластеров представлены в таблице. Для данных значений величин K и T было найдено 18 групп ШАЛ длительностью от 4.6 с до 15 мин. Ряд кластеров был обнаружен при нескольких ослабленных требованиях на величину K [4, 5].

Параметры отбора кластеров ШАЛ

$T, \text{ с}$	K	$P(N_T > K)$	$T, \text{ мин}$	K	$P(N_T > K)$
5	7	$4.6 \cdot 10^{-8}$	2	30	$1.5 \cdot 10^{-6}$
10	9	$7.8 \cdot 10^{-8}$	3	39	$2.1 \cdot 10^{-6}$
15	11	$4.5 \cdot 10^{-8}$	4	48	$1.8 \cdot 10^{-6}$
20	12	$1.3 \cdot 10^{-7}$	5	57	$1.2 \cdot 10^{-6}$
25	13	$2.6 \cdot 10^{-7}$	6	65	$1.3 \cdot 10^{-6}$
30	15	$7.4 \cdot 10^{-8}$	7	73	$1.3 \cdot 10^{-6}$
35	16	$1.1 \cdot 10^{-7}$	8	81	$1.2 \cdot 10^{-6}$
40	17	$1.4 \cdot 10^{-7}$	9	89	$1.0 \cdot 10^{-6}$
45	18	$1.7 \cdot 10^{-7}$	10	96	$1.5 \cdot 10^{-6}$
50	19	$1.9 \cdot 10^{-7}$	11	104	$1.1 \cdot 10^{-6}$
55	20	$2.0 \cdot 10^{-7}$	12	111	$1.4 \cdot 10^{-6}$
60	21	$2.0 \cdot 10^{-7}$	13	119	$1.0 \cdot 10^{-6}$
65	22	$2.0 \cdot 10^{-7}$	14	126	$1.2 \cdot 10^{-6}$
70	23	$2.0 \cdot 10^{-7}$	15	133	$1.4 \cdot 10^{-6}$
75	24	$1.8 \cdot 10^{-7}$	16	141	$9.6 \cdot 10^{-7}$
80	25	$1.7 \cdot 10^{-7}$	17	148	$1.0 \cdot 10^{-6}$
85	26	$1.6 \cdot 10^{-7}$	18	155	$1.1 \cdot 10^{-6}$
90	27	$1.4 \cdot 10^{-7}$	19	162	$1.1 \cdot 10^{-6}$
			20	169	$1.2 \cdot 10^{-6}$

Анализ найденных кластеров позволил разделить их на три типа. Во-первых, это кластеры, внутри которых при принятых правилах отбора нет других кластеров. Ко второму типу относятся кластеры, содержащие внутри себя другой кластер, имеющий меньшую продолжительность. И, наконец, «всплески» третьего типа состоят из нескольких частично перекрывающихся кластеров. Более подробное изложение результатов изучения кластеров ШАЛ можно найти в [5].

2. Нелинейный анализ кластеров ШАЛ

Обнаружение почти двух десятков «всплесков» ШАЛ, многие из которых состоят из целого набора кластеров, представляется достаточно неожиданным. Такие события представляют собой локальные отклонения от экспоненциального распределения, которому удовлетворяет подавляющее большинство проанализированных данных. Для того чтобы яснее понять динамику поведения выборок, содержащих кластеры, были использованы методы нелинейного анализа временных рядов, основанные на теореме Такенса [6] и алгоритме Грассбергера–Прокаччия [7] (подробный обзор см. в [8]). В рамках этого подхода экспериментальные данные были представлены в виде скалярного временного ряда x_1, x_2, \dots, x_n , где $x_i = t_i - t_{i-1}$ — временной интервал (задержка) между моментами регистрации двух последовательно идущих ливней t_{i-1} и t_i . За начало отсчета было принято время $t_0 = 0$, соответствующее полночи, а сами задержки измерялись в секундах. Далее на основе временного ряда $\{x_i\}_1^n$ строились m -мерные векторы задержек $\mathbf{x}_i = (x_i, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau})$, где τ — некоторое произвольное, но фиксированное приращение, а m — целое число, называемое размерностью вложения. Затем для некоторого диапазона расстояний ρ вычислялась величина $K(\rho)$, равная числу векторов задержек, сдвинутых друг относительно друга по крайней мере на W индексов, и таких, что попарные расстояния между ними не превышают ρ :

$$K(\rho) = \sum_{i=1}^{M-W} \sum_{j=i+W}^M \Theta(\rho - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|), \quad (1)$$

где Θ — функция Хэвисайда, $M = n - (m - 1)\tau$. (Норма в (1) может быть выбрана достаточно произвольно, однако наше исследование показало, что наиболее адекватные результаты дает равномерная метрика.) После этого находилась корреляционная размерность $D_2(\rho) = d \lg C_2(\rho) / d \lg \rho$, где корреляционная сумма $C_2(\rho) = K(\rho) / I$, а $I = (M - W)(M - W + 1) / 2$ — полное число пар векторов. Если на графике зависимости D_2 от ρ при достаточно малых ρ и достаточно больших m наблюдается приблизительно горизонтальный участок (плато), то можно говорить о возможном существовании в рассматриваемой выборке хаотической динамики. При этом значение $D_2(\rho)$ в области плато представляет самостоятельный физический интерес, поскольку дает оценку снизу числа степеней свободы изучаемого явления.

Описанный метод был применен к анализу имеющихся экспериментальных данных. Так же как и при поиске кластеров, экспериментальные задержки для обеспечения стационарности временного ряда были пересчитаны для единого атмосферного давления 742 мм рт. ст. Длины выборок, как правило, принимали значения $N = 128, 256$ и 512 , что

связано с удобством применения методов классического анализа Фурье. Для всех таких наборов были рассчитаны корреляционные размерности при значениях параметров $\tau = 1$, $W = 1$ и $m = 1, \dots, 12$. Для отдельных наборов величина τ варьировалась в диапазоне от 1 до 10, а величины W и m — в диапазоне от 1 до 20. В любом случае значения τ и m выбирались таким образом, чтобы число векторов задержек было не менее 100. Для проведения вычислений был использован свободно распространяемый пакет программ GNU Octave [9].

Оказалось, что для подавляющего большинства наборов задержек график $D_2(\rho)$ не содержит плато. Однако в окрестности кластеров ШАЛ, зарегистрированных 14 мая, 11 ноября и 28 декабря 1998 г., а также 8 января 1999 г., были обнаружены последовательности ливней с признаками хаотической динамики. Рассмотрим последнее из этих событий.

Данный «всплеск» ШАЛ состоит из набора вложенных друг в друга кластеров, при этом «внешний» кластер состоит из 134 ливней (№ 145–278 в наборе данных этого дня), зарегистрированных между 00:19:47.03 и 00:32:26.31 по московскому времени (рис. 1). Наивысший темп счета приходится на 38 ливней начиная с ШАЛ № 146, зарегистрированных в течение 100.51 с.

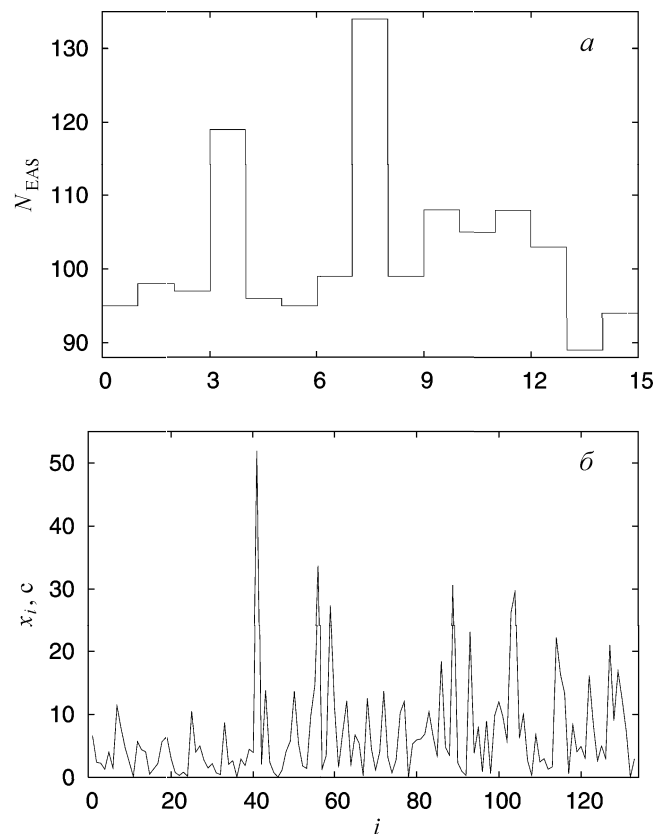


Рис. 1. (а) Темп счета ШАЛ на интервале времени, содержащем кластер, зарегистрированный 8 января 1999 г. Интервал наблюдения охватывает промежуток с 22:51:07 7 января до 02:01:07 8 января. Ширина бина — 760 с. N_{EAS} — число ШАЛ в бине. Кластер представлен центральным бином. (б) Временные задержки x_i между моментами регистрации ШАЛ, образующих кластер

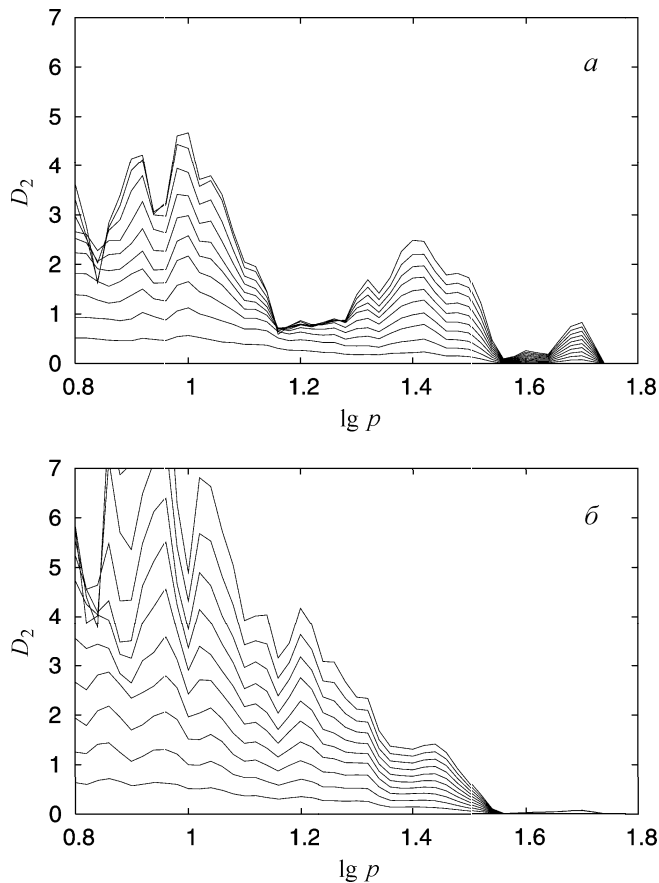


Рис. 2. Графики корреляционной размерности для двух выборок, содержащих части кластера ШАЛ, зарегистрированного 8 января 1999 г. Корреляционная размерность вычислена в равномерной метрике для значений параметров $\tau = 1$, $W = 1$, и $m = 1, \dots, 10$. Выборки состоят из ШАЛ № 105–233 и 185–313 на рисунках (а) и (б) соответственно

На рис. 2 показаны графики корреляционной размерности, вычисленной для двух разных выборок, содержащих части внешнего кластера. Обе выборки состоят из 128 задержек. Первая выборка начинается на ШАЛ № 105, зарегистрированном в 00:13:16.08, и включает группу наиболее коротких задержек. Вторая выборка начинается с ШАЛ № 185 и указанную группу не содержит. Как видно из рисунка, для первой выборки наблюдается явно выраженное плато со значением $D_2 \approx 0.74$, в то время как для второй выборки какое-либо плато отсутствует. (В этом смысле график корреляционной размерности второй выборки является типичным для всего набора экспериментальных данных.) Для выборки, состоящей из всего внешнего кластера, плато на графике $D_2(\rho)$ не наблюдается.

Для выяснения, представляет ли первая выборка хаотический или стохастический процесс, был применен ряд методов, в том числе метод суррогатных данных [10]. Оказалось, что для суррогатных данных графики $D_2(\rho)$ плато не содержат. Это свидетельствует о том, что порядок следования задержек, составляющих выборку, важен для появления плато, что в свою очередь свидетельствует в пользу гипотезы о хаотической природе наблюдаемого явления, поскольку для стохастического процесса такой поряд-

док не существует. К аналогичному заключению приводят также результаты ряда других примененных нами тестов [11].

Таким образом, как видно на примере данного события, всплески темпа счета ШАЛ могут приводить к появлению признаков хаотической динамики в соответствующих временных рядах. При этом продолжительность таких всплесков может быть весьма незначительной, что особенно ярко видно на примере кластеров, зарегистрированных 14 мая (8 ШАЛ) и 28 декабря 1998 г. (18 ШАЛ).

Заключение

Как видно из представленных выше результатов, полученных по данным установки «Прототип ШАЛ–1000», детальное исследование распределений времен прихода ШАЛ от первичных частиц с энергией выше 10^{14} эВ дает возможность выявлять необычную динамику в распределении задержек между моментами регистрации ливней. Хотя для подавляющего большинства данных моменты регистрации ШАЛ удовлетворяют экспоненциальному распределению, в ряде случаев регистрируемые временные ряды оказываются неоднородными, что не позволяет описывать их единым распределением. Кроме этого с большой вероятностью установлено существование кластеров ШАЛ, а в некоторых случаях обнаружены признаки проявления детерминированного хаоса.

Несомненный интерес представляет понимание механизмов, порождающих хаос в космических лучах. В разных работах уже были высказаны различные предположения о возможной природе хаотической динамики в моментах регистрации ШАЛ. Так, в работе [12] в качестве возможных источников частиц, приводящих к нелинейным особенностям в распределении времен прихода ливней, рассматриваются частицы облаков космической пыли. В работе [13] высказывается гипотеза, согласно которой хаотические события порождаются космическими лучами от остатка сверхновой, расположенной не очень далеко от солнечной системы, и в процессе своего распространения образующими фрактальную волну. С другой стороны, хаотическая динамика может возникнуть и за счет фрактальных свойств среды, через которую распространяются космические лучи [14]. В свою очередь нами был высказан ряд предположений о возможной природе образования кластеров, связанной с неоднородностью магнитных полей в Галактике и приводящей к некоторому «уплотнению» (или фокусировке) космических лучей в процессе их распространения [15], а также предложена качественная модель магнитного линзирования [11]. Однако все эти предположения являются не более чем рабочими гипотезами и нуждаются в дальнейшем анализе и проработке.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой научно-технической програм-

мы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002–2006 гг., контракт № 40.014.1.1.1110, а также гранта РФФИ 02-02-16081.

Литература

1. Зотов М.Ю., Куликов Г.В., Фомин Ю.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2004. № 3. С. 37.
2. Веденеев О.В., Зотов М.Ю., Игошин А.В. и др. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2001. **65**, № 8. С. 1224.
3. Fomin Yu.A., Igoshin A.V., Kalmykov N.N. et al. // Proc. 26th ICRC. Salt Lake City, 1999. **1**. P. 286.
4. Веденеев О.В., Зотов М.Ю., Куликов Г.В., Фомин Ю.А. // Изв. РАН. Сер. Физ., 2001. **65**, № 11. С. 1674.
5. Fomin Yu.A., Kulikov G.V., Zotov M.Yu. // Clusters of EAS with Electron Number $\gtrsim 10^4$. Preprint 2002-9/693, Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, 2002; astro-ph/0203478.
6. Takens F. // Lecture Notes in Mathematics. 1981. **898**. P. 366.
7. Grassberger P., Procaccia I. // Phys. Rev. Lett. 1983. **50**. P. 346.
8. Schreiber T. // Phys. Rep. 1999. **308**. P. 1.
9. Eaton J.W. GNU Octave: A High-Level Interactive Language for Numerical Computations. Edition 3 for version 2.0.13, 1997; <http://www.octave.org/>
10. Theiler J., Eubank S., Longtin A. et al. // Physica D. 1992. **58**. P. 77.
11. Fomin Yu.A., Kulikov G.V., Zotov M.Yu. // Astropart. Phys. 2004. **20**. P. 413; astro-ph/0207190.
12. Chikawa M., Hasebe N., Katayose Y. et al. // Proc. 24th ICRC. Rome, 1995. **1**. P. 277.
13. Ohara S., Konishi T., Kato Y. et al. // Proc. 27th ICRC. Hamburg, 2001. **1**. P. 208.
14. Lagutin A.A., Uchaikin V.V. // Proc. 27th ICRC. Hamburg, 2001. **5**. P. 1900.
15. Зотов М.Ю., Куликов Г.В., Фомин Ю.А. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2003. **67**. С. 1452.

Поступила в редакцию
08.10.03