

УДК 539.12

## МЕТОД ПОИСКА ЛОКАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ ПОТОКОВ МЮОНОВ В МАТРИЧНЫХ ДАННЫХ ГОДОСКОПА УРАГАН

© 2019 г. М. Н. Добровольский<sup>1, \*</sup>, И. И. Астапов<sup>2</sup>, Н. С. Барбашина<sup>2</sup>, А. Д. Гвишиани<sup>1, 3</sup>,  
В. Г. Гетманов<sup>1, 3</sup>, А. Н. Дмитриева<sup>2</sup>, А. А. Ковыляева<sup>2</sup>, Д. В. Перегудов<sup>1</sup>, А. А. Петрухин<sup>2</sup>,  
Р. В. Сидоров<sup>1</sup>, А. А. Соловьев<sup>1, 3</sup>, В. В. Шутенко<sup>2</sup>, И. И. Яшин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли  
имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: m.dobrovolsky@gcras.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Предложен метод поиска локальной анизотропии потоков мюонов в матричных данных годоскопа УРАГАН (МИФИ). Разработаны системы доверительных интервалов для оценок математических ожиданий матричных данных для эталонных и скользящих временных интервалов наблюдений, сформированы индикаторные функции и реализована пространственно-временная фильтрация. Приведены результаты поиска локальной анизотропии в потоках мюонов в матричных данных годоскопа УРАГАН.

DOI: 10.1134/S0367676519050120

### ВВЕДЕНИЕ

Потоки мюонов (ПМ), которые достигают поверхности Земли, подвержены по разным причинам локальной анизотропии (ЛА), состоящей в возможных изменениях интенсивностей ПМ в зависимости от азимутальных-зенитных углов и времени. Исследования ЛА для ПМ являются предметом многочисленных публикаций, созданных, главным образом, на основе использования наблюдений вариантов мюонных детекторов [1]. Достаточно интересные решения в оценивании ЛА изложены в [2], где описан анализ ПМ в зависимости от географических координат станций с мюонными детекторами. Существенно новый подход к поиску и анализу угловых и временных характеристик ПМ был разработан в НИЯУ МИФИ на базе мюонного годоскопа (МГ) УРАГАН [3, 4], в котором реализуются измерения функций распределения ПМ на основе подсчета зарегистрированных мюонов для дискретных телесных углов в течение заданного времени. В [5] для исследования и поиска ЛА в ПМ с использованием данных МГ было рассмотрено применение специальных векторов ЛА. В настоящей статье для данных от МГ предложен метод поиска ЛА для

ПМ, основанный на вычислениях систем доверительных интервалов для оценок математических ожиданий матричных данных МГ для эталонных и скользящих интервалов наблюдений, формировании индикаторных функций и реализации пространственно-временной фильтрации. Предложенный метод, в отличие от существующих, может реализовать лучшую разрешающую способность.

### МГ-МАТРИЦЫ, ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ И ИНДИКАТОРНЫЕ МАТРИЦЫ

Измеренные функции распределения интенсивностей ПМ размещаются в МГ-матрицах, держимое которых представляется в виде  $Y(i, j, Tn)$ , где  $i = \overline{1, N_1}$ ,  $i = \overline{1, N_2}$ ,  $T = 1$  мин – шаг по времени,  $n = 0, N_f - 1$ . Индексам  $i, j$  соответствуют азимутальные и зенитные углы  $\varphi_i = \Delta\varphi(i - 1)$ ,  $\vartheta_j = \Delta\vartheta(j - 1)$ , параметры  $\Delta\varphi = 1^\circ$ ,  $\Delta\vartheta = 4^\circ$  определяют дискретные телесные углы; измерения производятся в диапазонах  $- 0 \leq \vartheta_j \leq 360^\circ$ ,  $0 \leq \varphi_i \leq 76^\circ$ . Значения в ячейках МГ-матриц являются средними количествами мюонов за одну секунду, заре-

гистрированных в заданном телесном угле. ЛА в ряде случаев может быть связана с понижениями интенсивностей МП и форбуш-эффектами [6].

Для элементов МГ-матриц вычисляются оценки математических ожиданий  $m_0(i, j)$  и среднеквадратических отклонений  $\sigma_0(i, j)$  на заданном эталонном интервале длиной  $k_0$ :

$$m_0(i, j) = \frac{1}{k_0} \sum_{k=1}^{k_0} Y(i, j, Tk),$$

$$D_0(i, j) = \frac{1}{k_0 - 1} \sum_{k=1}^{k_0} (Y(i, j, Tk) - m_0(i, j))^2,$$

$$\sigma_0(i, j) = \sqrt{D_0(i, j)}.$$

Рассчитываются эталонные доверительные интервалы  $(T_{01}(i, j), T_{02}(i, j))$  для математических ожиданий при заданном уровне доверительной вероятности  $p$ :

$$T_{01}(i, j) = m_0(i, j) - c_p \frac{\sigma_0(i, j)}{\sqrt{k_0}},$$

$$T_{02}(i, j) = m_0(i, j) + c_p \frac{\sigma_0(i, j)}{\sqrt{k_0}},$$
(1)

строится система скользящих временных интервалов длительности  $k_0$ :  $(k_{s1}, k_{s2})$ ,  $s = 1, \dots, s_0$ ,  $k_{s1} \geq k_0 + 1$ ,  $k_{s2} = k_{s1} + k_0 - 1$  с доверительными интервалами  $(T_{s1}(i, j), T_{s2}(i, j))$  по (1); здесь  $c_p = t_{p, k_0-1} - (1 - p)$  – квантиль распределения Стьюдента.

Вводится критериальная функция  $\rho_s(i, j, \alpha)$  – комбинация слагаемых с весом  $\alpha$ , отвечающих за понижение средней интенсивности и повышение дисперсии соответственно

$$\rho_{1s}(i, j) = \frac{T_{01}(i, j) + T_{02}(i, j)}{T_{s1}(i, j) + T_{s2}(i, j)},$$

$$\rho_{2s}(i, j) = \frac{T_{s2}(i, j) - T_{s1}(i, j)}{T_{02}(i, j) - T_{01}(i, j)},$$

$$\rho_s(i, j, \alpha) = \rho_{1s}(i, j) + \alpha \rho_{2s}(i, j).$$
(2)

Аномальными для интервала  $s$  считаются ячейки МГ-матрицы  $(i, j)$ , в которых  $\rho_s(i, j, \alpha)$  (2) превышает заданный порог  $\rho_0$ . Вводятся индикаторные функции  $f_s(i, j)$ ; для  $\rho_s(i, j, \alpha) \geq \rho_0$  будем принимать  $f_s(i, j) = 1$ , в остальных случаях – 0; вводятся на их основе индикаторные матрицы  $F_s$ .

Для примера был рассмотрен эталонный интервал 01.07.2015, 00:00–00:19 и для него проведены вычисления по (1); для интервала 00:20–00:39 на основе (2) вычислена функция  $f_1(i, j)$  и сформирована индикаторная матрица  $F_1$ . На рис. 1 изображен фрагмент матрицы  $F_1$  для зенитных углов  $15^\circ$ – $60^\circ$ . Черным цветом обозначены ячейки  $(i, j)$ , по которым принято решение об их аномаль-

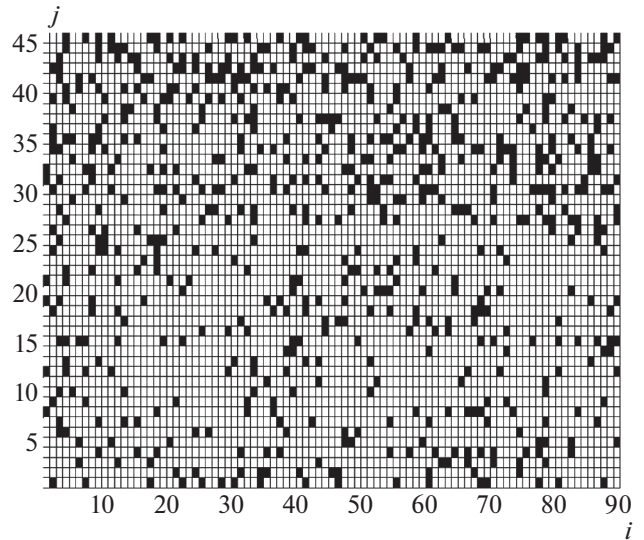


Рис. 1. Фрагмент индикаторной матрицы  $F_1$ .

ности, белый цвет обозначает противоположное решение.

### ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА ЛОКАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ

С помощью пространственно-временной фильтрации [7] индикаторных матриц уменьшаются погрешности поиска ЛА. Рассмотрены два этапа.

1. Этап пространственной фильтрации. Индикаторные матрицы разбиваются на подматрицы размерности  $(\Delta N_1, \Delta N_2)$ ,  $p = 1, \dots, p_0$ ,  $p_0 \Delta N_1 = N_1$ ,  $q = 1, \dots, q_0$ ,  $q_0 \Delta N_2 = N_2$ ; вычисляются суммы

$$l_0(p, q, s) = \frac{1}{\Delta N_1 \Delta N_2} \sum_{i=(p-1)\Delta N_1+1}^{p\Delta N_1} \sum_{j=(q-1)\Delta N_2+1}^{q\Delta N_2} f_s(i, j),$$
(3)

которые интерпретируем как значения функции анизотропии для телесных углов с индексами  $(p, q)$ . Физический смысл этих функций очевиден.

2. Этап временной фильтрации. Для заданных  $(p, q)$  формируется последовательность  $l_0(p, q, Tk_0s)$ ,  $s = 1, \dots, s_0$ . Ей ставится в соответствие аппроксимирующая функция  $\bar{l}_0(p, q, Tk_0s)$ , которая принимается в качестве результата фильтрации для времен  $Tk_0s$ ,  $s = 1, \dots, s_0$ .

Был рассмотрен пример поиска ЛА в МГ-матрицах на основе предложенного метода [8]. Время наблюдения: 01.07.2015, 00.00–00:19, ..., 01:00–01:19,  $s = 1, 2, 3$ . Сформированы телесные углы  $15 \leq j \leq 26$ , (1)  $45 \leq i \leq 55$ , (2)  $56 \leq i \leq 65$ , (3)  $66 \leq i \leq 77$ , (4)  $78 \leq i \leq 88$ , размером  $12^\circ \times 48^\circ$ . Производилось вычисление оценок функций анизотропии  $l_0(p, q, Tk_0s)$  по (3), индексы 1–4 ломан-

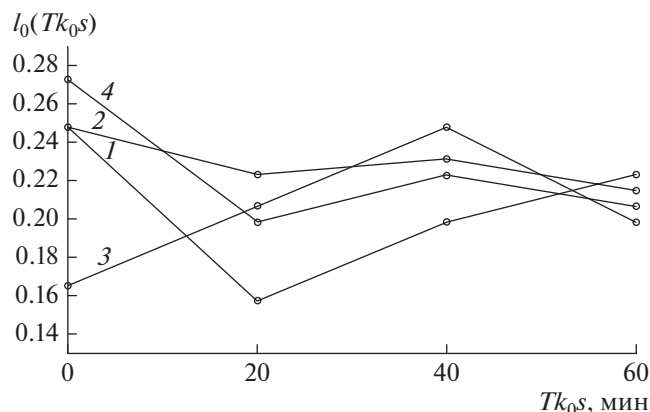


Рис. 2. Результаты вычисления функций анизотропии  $I_0(Tk_0s)$ .

ных линий соответствуют цифрам в скобках для телесных углов. На рис. 2 представлены результаты оценивания  $I_0(Tk_0s)$  для  $p = 2$ ,  $q = 5 - 8$ , позволяющие сделать вывод об имеющей место ЛА. Видно, что понижение—повышение интенсивности ПМ происходит в различной степени для различных направлений во времени; кусочно-линейная аппроксимация оценок позволяет сделать вывод, что в течение 1 ч интенсивность ПМ может изменяться на 1–3%. Благодаря введению функции анизотропии оказалось возможным количественно оценивать изменения интенсивности ПМ по направлениям, соответствующим заданным ячейкам и, таким образом, реализовывать поиск ЛА.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенный метод поиска локальной анизотропии в мюонных потоках для матриц данных годоскопа УРАГАН на основе систем доверительных интервалов, индикаторных матриц и

пространственно-временной фильтрации оказался работоспособным.

2. Вычислительные эксперименты с предложенным методом продемонстрировали возможность успешной реализации поиска ЛА в ПМ с помощью МГ УРАГАН в телесных углах с размерами  $12^\circ \times 48^\circ$ ; вычисления оценок функций анизотропии показали, что интенсивность ПМ в течение 1ч может изменяться на 1–3%.

3. Предложенный метод может быть применен для многих задач экспериментальной физики, связанных с цифровой обработкой последовательностей матричных данных с целью выявления локальных анизотропий (пространственно-временных аномалий).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 17-17-01215.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Munakata K., Kuwabara T., Bieber J.W. et al.* // Adv. Space Res. 2005. V. 36. № 12. P. 2357.
2. *Tezari A., Mavromichalaki H., Katsinas D. et al.* // Ann. Geophys. 2016. V. 34. P. 1053.
3. *Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al.* // Adv. Space Res. 2015. V. 56. № 12. P. 2693.
4. *Барбашина Н.С., Коккоулин Р.П., Компаниец К.Г. и др.* // ПТЭ. 2008. № 2. С. 26; *Barbashina N.S., Kokkouloulin R.P., Kompaniets K.G. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2008. V. 51. № 2. P. 180.
5. *Astapov I.I., Barbashina N.S., Dmitriev A.N. et al.* // Adv. Space Res. 2015. V. 56. P. 2713.
6. *Barbashina N., Ampilogov N., Astapov I. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 632. Art. no. 012049.
7. *Курячий М.И., Костевич А.Г., Гальчук И.В.* Пространственно-временная ранговая обработка изображений в видеoinформационных системах. Томск: Изд-во ТУСУР, 2013. 120 с.
8. *Dobrovolsky M.N., Getmanov V.G., Soloviev A.A. et al.* // Proc. 7th Int. Conf. Problems of Mathem. Phys. and Mathem. Modelling. Moscow: NRNU MEPhI. 2018. P. 162.