

УДК 551.51

АЗИМУТАЛЬНОЕ СКАНИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ В ПОТОКЕ МЮОНОВ

© 2023 г. С. С. Тимаков¹, *, А. А. Петрухин¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Россия, Москва

*E-mail: SSTimakov@mephi.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Рассмотрен новый подход к анализу интенсивности потока мюонов с различных азимутальных направлений, позволяющий обнаруживать волны в атмосфере от масштабных атмосферных явлений (фронты, грозовые ячейки).

DOI: 10.31857/S0367676523701909, EDN: OTCLCN

ВВЕДЕНИЕ

Поток мюонов в атмосфере зависит от ее состояния (давления, температуры, влажности). Это открывает путь исследования атмосферных параметров путем измерения характеристик потока мюонов [1]. Но наибольший интерес вызывают исследования связи изменений потока мюонов с мощными атмосферными процессами (грозы, ураганы, торнадо и т.п.). Цель таких исследований — поиск возможных предвестников опасных явлений для их раннего обнаружения.

Такие исследования существенно расширились после создания первых мюонных годоскопов [2, 3] и разработки метода мюонографии [4]. В результате были получены зависимости пространственно-угловых характеристик потока мюонов от параметров атмосферных процессов [5]. Проведенное сопоставление данных мюонного годоскопа УРАГАН с данными доплеровского метеорадара (ДМРЛ-С) выявило хорошее согласие областей грозовой активности и понижения потока мюонов [6].

Однако эти исследования проводились с уже произошедшими явлениями и их результаты не могли быть предвестниками таких событий. По-видимому, единственным способом получения ранней информации о приближающихся опасных процессах является регистрация вызываемых ими волн в атмосфере, которые модулируют поток мюонов и соответственно могут быть зарегистрированы. В настоящей работе для достижения этой цели используются данные мюонного годоскопа УРАГАН в виде зенитно-азимутальных матриц 90×90 по θ и ϕ с шагом $\Delta\theta = 1^\circ$ и $\Delta\phi = 4^\circ$ [7], где каждая ячейка соответствует своим диапа-

зонам зенитного и азимутального углов прилета мюонов, а значения в ячейке — числу частиц, зарегистрированных за минуту. Для анализа таких матриц разработан новый подход.

АЗИМУТАЛЬНОЕ СКАНИРОВАНИЕ

Новый способ анализа данных мюонных годоскопов включает в себя вейвлет-анализ интенсивности потока мюонов с выделенных направлений в диапазоне зенитных и азимутальных углов:

$$\theta_d = [0, \theta_{\text{const}}], \quad \phi_d = [\phi_0, \phi_0 + \Delta\phi], [\phi_0 + \pi, \phi_0 + \Delta\phi + \pi], \quad (1)$$

где θ_{const} — верхняя граница зенитных углов прилета мюонов, которые будут отбираться для дальнейшего анализа; ϕ_0 — выбранное азимутальное направление; $\Delta\phi$ — интервал, в котором осуществляется интегрирование по азимутальному углу. Таким образом, из всей полусферы прилета мюонов выделяется полоса в пространстве углов, которая может вращаться по азимутальному углу. Для этой полосы вычисляется частота регистрации мюонов. Если в атмосфере присутствует волна с достаточно большой амплитудой, она смещает слой генерации мюонов на высотах около 15–20 км, что вызывает изменения в потоке мюонов, наиболее хорошо заметные в том случае, если все мюоны в потоке были отобраны с направлений, проходящих через одну и ту же фазу этой волны.

Допустим, что волна идет в направлении Восток–Запад ($\phi_w = 90^\circ, 270^\circ$). Тогда колебание суммарного потока мюонов с азимутальных направлений $\phi_d = [178^\circ, 182^\circ], [358^\circ, 2^\circ]$ будет про-

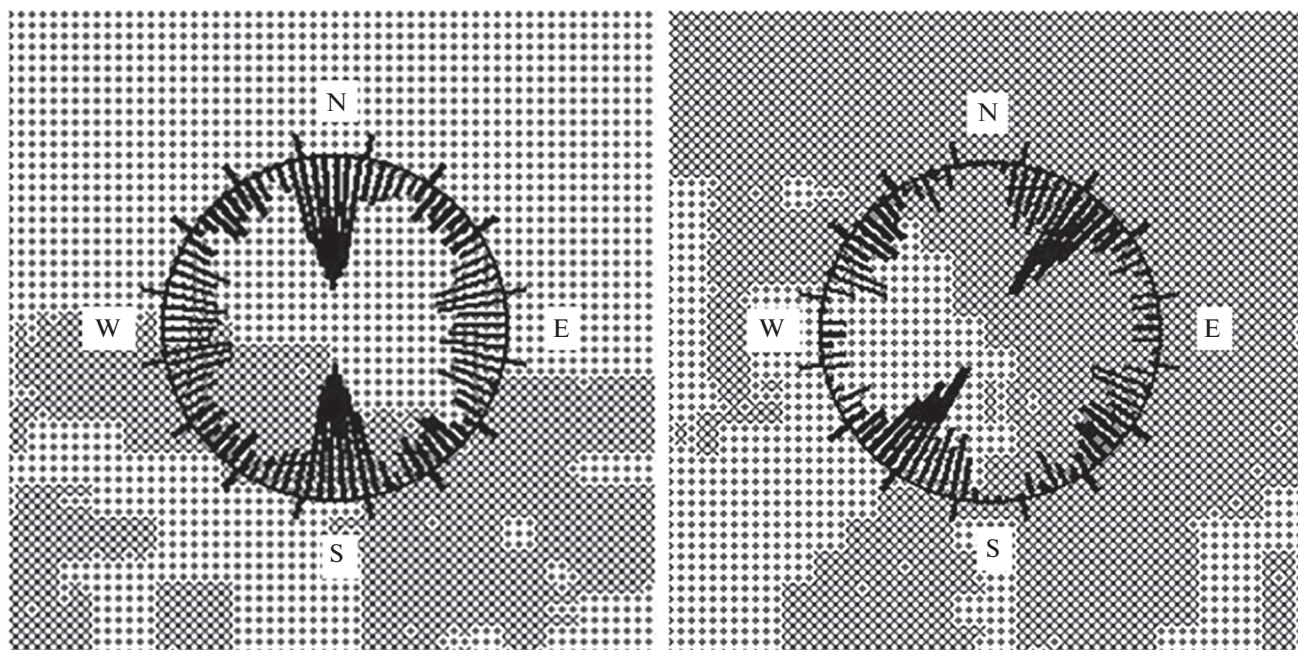


Рис. 1. Величина коэффициентов вейвлет-разложения для азимутального сканирования на схематических картах облачности вблизи Москвы. Темная область обозначает наблюдаемые со спутника облака, диаметр окружности около 300 км, Москва расположена в центре. Слева: для 2 мая 2021 0:45, справа: для 3 мая 2021 7:30. Время дано в формате UTC.

являться одинаково для отобранных направлений. Таким образом, получается некоторый “радар”, эффективно регистрирующий волны, которые идут в направлении, перпендикулярном той плоскости, в которой мы отбираем мюоны. Этот “радар” может применяться для поиска волн, которые могли бы служить предвестниками различных погодных явлений.

На практике это выглядит следующим образом. Имеются зенитно-азимутальные матрицы для каждой минуты в интервале наблюдения. В заранее выбранном интервале времени, с заданным шагом вычисляется частота регистрации мюонов для всех ячеек, попавших в диапазон (1). Это продлевается со всеми азимутальными направлениями в диапазоне $\phi_0 = [0, 360]$. Таким образом, получается 90 временных рядов интенсивности, соответствующих 90 направлениям для каждого угла по азимуту с шагом в 4 градуса.

Затем эти ряды подвергаются вейвлет-анализу, в них ищутся волны и всплески с периодами от 1 до 8 ч путем вычисления коэффициентов вейвлет-преобразования. Для этого используется комплексный вейвлет Морли [8]:

$$\Psi_{ab} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right); \quad a, b \in \mathbb{R}; \quad a \neq 0, \quad (2)$$

$$\psi(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{\alpha}\right) \exp(i2\pi t),$$

где b — смещение вейвлета на временном ряду; a — масштабный коэффициент. Коэффициенты вейвлет-разложения для выбранного направления вычисляются по формуле:

$$W_{ab} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{ab}^*(t) dt. \quad (3)$$

Таким образом, для каждого рассматриваемого момента времени всего имеется 90 значений коэффициентов вейвлет-разложения. Конкретный диапазон величины этих коэффициентов зависит от параметров разложения, однако на промежутке времени в несколько дней их можно разделить на несколько групп: самые маленькие порождены флуктуациями потока, тогда как большие вызваны прохождением атмосферных волн. Настройка на волны определенного периода происходит путем задания масштабного коэффициента. Поиск волн с периодами меньше 1 ч сильно затруднен из-за разброса частоты регистрации мюонов, верхняя граница устанавливается произвольно.

Весь этот комплекс действий представляет собой азимутальное сканирование атмосферы. Для удобства, для каждого момента времени значения коэффициентов вейвлет-разложения можно изображать на снимках со спутников и сравнивать с погодной обстановкой рядом с Москвой. Поскольку установка УРАГАН состоит из 3 независимых друг от друга супермодулей, каждый из ко-

торых является самостоятельной установкой, мы можем проверять результаты сканирования, полученные для каждого супермодуля, что позволяет исключать сомнительные события и значительно снижает фон.

Рассмотренный подход был применен для анализа экспериментальных данных. В период с 1 по 4 мая 2021 г. над Европой находился циклон. Его сопровождали отчетливые атмосферные фронты, которые проходили через Москву. Это хорошо видно на спутниковых снимках из открытых источников, а также из архива погоды метеорологической службы Германии [9, 10].

В ночь 2 мая теплый фронт наступал на Москву с юга. Это отразилось в результатах азимутального сканирования: на протяжении нескольких часов с южного направления обнаруживается ярко выделенный отклик, изображенный на рис. 1 (слева). Значения коэффициентов вейвлет-разложения для каждого направления изображены в виде палочек, нанесенных с внутренней стороны окружности к ее центру. Коэффициенты получены для периода около 2 ч. Отметим, что наравне с югом наблюдается аналогичный сигнал с севера. Это ограничение нового подхода — мы обнаруживаем волну в экспериментальных данных интенсивности потока мюонов, но мы не можем определить, с какого направления движется исходная атмосферная волна, которая вызвала наблюдаемое изменение: с севера на юг, или с юга на север.

Рассмотрим второй фронт. Утром 3 мая холодный фронт наступает на Москву с юго-западного направления. Оттуда же наблюдается отклик азимутального сканирования для периода около 2 ч (рис. 1 справа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный подход к анализу данных наиболее чувствителен к атмосферным фронтам (особенно теплым) и иным крупным нестационарным атмосферным явлениям. Характер отклика в подавляющем большинстве случаев длится не дольше рассматриваемого диапазона периодов: если была обнаружена волна с периодом 2 ч, то она регистрируется на протяжении этого же

промежутка времени. Это может указывать на то, что отклик вызван отличающимися характеристиками атмосферы (температура, давление) перед фронтом и за ним, которые и влияют на высоту слоя генерации мюонов.

Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание № FSWU-2023-0068, проект “Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриева А.Н., Астапов И.И., Ковыляева А.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 5. С. 625; *Dmitrieva A.N., Astapov I.I., Kovylyayeva A.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 5. P. 558.
2. *Барбашина Н.С., Коккоулин Р.П., Компаниец К.Г. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 7. С. 1072; *Barbashina N.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2007. V. 71. No. 7. P. 1044.
3. *Борог В.В., Гвоздев А.В., Дронов В.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. атм. и океана. 1999. Т. 35. № 1. С. 24; *Borog V.V., Gvozdev A.V., Dronov V.V.* // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 1999. V. 35. No. 1. P. 18.
4. *Барбашина Н.С., Борог В.В., Дмитриева А.Н. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 7. С. 1069; *Barbashina N.S., Borog V.V., Dmitrieva A.N. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2007. V. 71. No. 7. P. 1041.
5. *Михайленко А.С., Ампилов Н.В., Барбашина Н.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 6. С. 877; *Mikhaylenko A.S., Ampilov N.V., Barbashina N.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. V. 75. No. 6. P. 827.
6. *Барбашина Н.С., Астапов И.И., Белякова Т.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 250; *N. S. Barbashina N.S., Astapov I.I., Belyakova T.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 230.
7. *Шутенко В.В., Астапов И.И., Барбашина Н.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 714; *Shutenko V.V., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 5. P. 660.
8. *Астафьева Н.М.* // УФН. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145; *Astaf'eva N.M.* // Phys. Usp. 1996. V. 29. No. 11. P. 1085.
9. https://www1.wetter3.de/archiv_dwd_en.html.
10. <https://weather.us/satellite/russia-west/satellite-hd-15min/20210503-0645z.html>.

Azimuthal scanning of the atmosphere in a muon flux

S. S. Timakov^{a,*}, A. A. Petrukhin^a

^a*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

^{*}*e-mail: SSTimakov@mephi.ru*

A new approach to the analysis of the intensity of the muon flux from different azimuthal directions is considered, which makes it possible to detect waves in the atmosphere from large-scale atmospheric phenomena (fronts, thunderstorm cells).