

УДК 551.515.4

ЭФФЕКТЫ, НАБЛЮДАЕМЫЕ В ПОТОКЕ МЮОНОВ ВО ВРЕМЯ ГРОЗ, ПО ДАННЫМ МЮОННОГО ГОДОСКОПА УРАГАН

© 2021 г. А. П. Качур¹*, И. И. Астапов¹, Н. С. Барбашина¹, А. А. Ковыляева¹,
Ю. Б. Павлюков², А. А. Петрухин¹, Н. И. Серебрянник², В. В. Шутенко¹

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение
“Центральная аэрологическая обсерватория”, Долгопрудный, Россия

*E-mail: APKachur@mephi.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

По результатам анализа данных мюонного годоскопа УРАГАН выделены эффекты, наблюдаемые в связи с грозами, отмеченными над установкой и на удалении от нее: квазипериодические возмущения, падения скорости счета, изменения анизотропии потока мюонов. Реализован алгоритм отбора грозовых событий, имевших отклик в мюонных данных. Установлено, что резкие падения скорости счета мюонов непосредственно не связаны с выпадением осадков.

DOI: 10.31857/S0367676521110132

Мюонный годоскоп УРАГАН [1] (МГ УРАГАН) – это широкоапертурный координатный детектор, осуществляющий непрерывную регистрацию мюонов космических лучей на высоте 173 м над уровнем моря. МГ УРАГАН обеспечивает одновременную регистрацию мюонов в широком диапазоне зенитных углов (от 0° до 80°) и высокую угловую точность (0.8°).

Поток мюонов формируется в верхних слоях атмосферы и чувствителен к изменениям ее параметров. С целью изучения эффектов, наблюдаемых в потоке мюонов во время гроз, проведен анализ данных МГ УРАГАН, полученных в весенне-летние (апрель–сентябрь) периоды.

Рассмотрены временные ряды скорости счета мюонов (I_{sum}) и проекций относительного вектора анизотропии потока мюонов (\vec{r}) на географические оси и на ось \vec{z} (r_{south} , r_{east} и r_z), а также результаты вейвлет-анализа I_{sum} и характеристик зенитно-угловых распределений. Определения этих параметров приведены в [2]. Использованы мюонографии – визуализированные матрицы изменений углового распределения регистрируемого потока относительно предшествующих 24 ч, выраженные в единицах статистической погрешности. Пример мюонографии представлен на рис. 1 справа. Темное пятно в центре обозначает область недостатка мюонов. За период 2014–2019 гг. проанализировано 81 грозовое событие. Процедура анализа описана в [2, 3].

С помощью вейвлет-анализа временных рядов I_{sum} , модуля вектора локальной анизотропии (A) и

горизонтальной проекции \vec{r} (r_{hor}) показано, что в периоды грозовой активности поток мюонов претерпевает квазипериодические возмущения. Процедура вейвлет-анализа описана в [4]. Предварительные результаты приведены в [3]. Волновые процессы могут быть выявлены в характеристиках потока мюонов задолго до момента прохождения грозы вблизи МГ УРАГАН, а также могут возникать в результате грозовой активности, происходящей на значительном удалении от г. Москвы.

Рассмотрение временных рядов характеристик потока мюонов показало, что в грозовые периоды наблюдаются резкие изменения значений I_{sum} , r_{south} , r_{east} и r_z продолжительностью порядка 15 мин. В табл. 1 представлено сравнение средних значений рассматриваемых характеристик для грозовых событий, определенных с использованием данных метеостанций и доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С ФГБУ “ЦАО” [5], и для всей продолжительности весенне-летних периодов 2014–2018 гг. Данные табл. 1 показывают, что во время грозовых событий I_{sum} падает относительно среднего за весь период, что указывает на наличие недостатка мюонов. Абсолютные значения проекций r_{east} (ось запад–восток) и r_{south} (ось север–юг) также уменьшаются, а значение проекции r_z растет: среднее направление прихода мюонов во время гроз смещается на юго-запад относительно всего периода.

Падения I_{sum} и изменения анизотропии потока мюонов хорошо прослеживаются на мюонографиях грозовых событий. Их рассмотрение

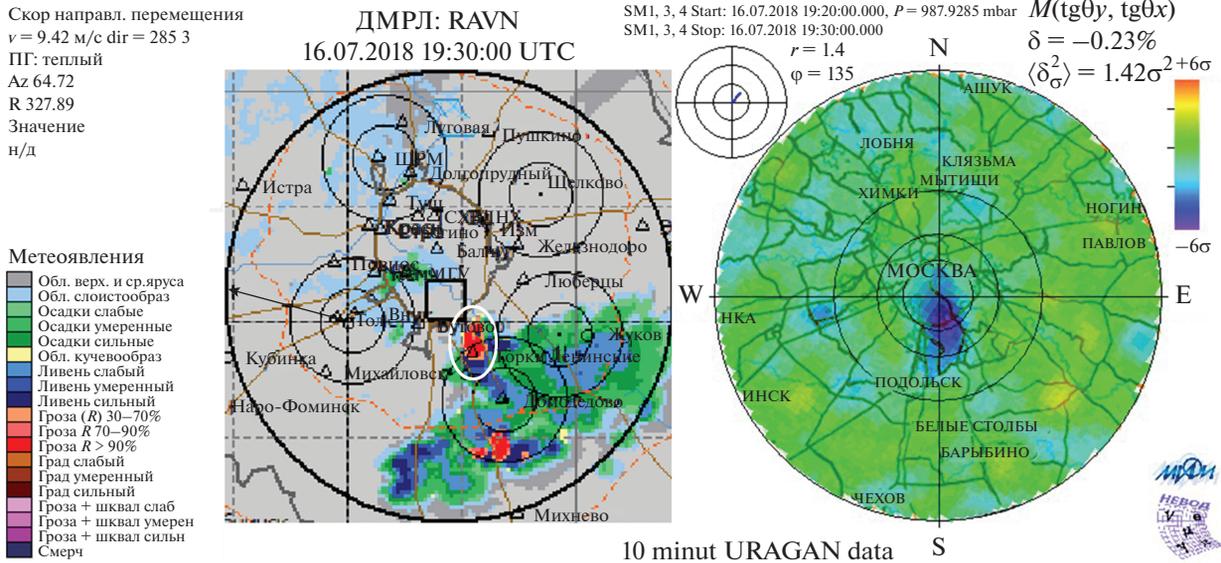


Рис. 1. Пример мюнографии – изображения усредненной за 10 мин матрицы изменений углового распределения потока мюонов (справа) – и карты метеоявлений по данным ДМРЛ (слева) для события 16 июля 2018 г. Белым овалом на метеорологической карте выделена область грозовой активности, которой соответствует темная область недостатка мюонов на мюнографии.

указывает на наличие отклика МГ УРАГАН в случаях, когда гроза не наблюдалась непосредственно над установкой. Рисунок 1 демонстрирует такой отклик для события 16 июля 2018 г.: слева на рисунке приведена метеорологическая карта, полученная по данным ДМРЛ-С ФГБУ “ЦАО”, справа – соответствующая ей мюнография. Можно отметить соответствие области грозовой активности (выделена на метеорологической карте) и области недостатка мюонов (темная область) на мюнографии. При этом над МГ УРАГАН не было отмечено грозовой активности или выпадения осадков.

На основе выявленных эффектов разработан алгоритм отбора грозовых событий, имевших отклик в мюонных данных. Отбор реализован методом выделения значительных отклонений (выбросов) текущих значений I_{sum} , r_{south} , r_{east} и r_z от их скользящего среднего. Первый этап разработки описан в [6]. Отбор заключался в выделении дат, когда имелся отклик данных МГ УРАГАН на метеоявление, зарегистрированное по данным метеостанций. Выявлялись даты гроз и ливней, при этом реакция на ливни была слабой (выявлено 11% дат). При включении в рассмотрение информации с метеорологических карт ДМРЛ-С установлено, что низкая эффективность регистрации

ливней связана с тем, что отбирались в основном грозовые события.

Алгоритм был модифицирован (интервалом времени в качестве события принят один час) и с его помощью обработаны данные за апрель–сентябрь 2014–2019 гг. Всего зарегистрировано 199 срабатываний, 8 (4%) из них – ложные. Для 14 (7%) срабатываний в московском регионе не наблюдалось грозовых очагов в пределах ± 12 ч (по данным сайта [7]). Показано, что большая часть (более 90%) не связанных с внеатмосферными эффектами выбросов в характеристиках потока мюонов связана с грозовой активностью.

Существует несколько возможных причин кратковременных (от 5 до 15 мин) падений I_{sum} на величину порядка 1% в периоды грозовой активности. Первая – барометрический эффект; он учитывается при расчете I_{sum} и не может служить основным объяснением. Вторая – влияние электрического поля грозового облака [8–10]. Оно, однако, не объясняет отсутствие повышений I_{sum} , ожидаемых в силу знакопеременной природы атмосферных электрических полей и наличия в составе КЛ как μ^+ , так и μ^- [11]. Третья возможная причина – влияние массы воды. Осадки могут увеличивать поглощение мюонов и приводить к падениям I_{sum} .

Таблица 1. Сравнение средних значений различных характеристик потока мюонов для грозовых событий и для всей продолжительности весенне-летних периодов 2014–2018 гг.

Характеристика	I_{sum}, c^{-1}	$r_{east}, 10^{-4}$	$r_{south}, 10^{-4}$	$r_z, 10^{-4}$
Грозы	1387.8 ± 0.7	1.1 ± 0.2	-2.0 ± 0.1	11.0 ± 0.1
Весенне-летние периоды	1401.72 ± 0.13	1.75 ± 0.2	-2.7 ± 0.2	8.5 ± 0.2

Среди рассмотренных событий отмечены как совпадения осадков и падений I_{sum} по времени, так и случаи, когда выпадение аналогичного количества осадков не приводило к сильному падению I_{sum} , и такие события, когда падение наблюдалось без зарегистрированных осадков.

Для сопоставления I_{sum} и уровня осадков рассмотрены данные с 01.01.2014 по 31.12.2018. Использовались пятиминутные временные ряды, полученные МГ УРАГАН и метеостанцией Vaisala. Построены корреляции за весь период, за “летние” (апрель—сентябрь) и “зимние” (октябрь—март) периоды. Построены корреляции для грозовых и негрозовых периодов. Они также разделены по сезонам. Грозовая активность определялась по данным метеостанций, картам ДМРЛ-С и информации с сайта [7]. В грозовые периоды включены все данные ± 12 ч от отметки о грозе на одной из метеостанций или по данным ДМРЛ-С.

Получены коэффициенты корреляции для зависимостей от влажности и количества осадков за 5 мин, 1 и 24 ч: I_{sum} , выбросов I_{sum} , выбросов I_{sum} значительнее 3σ . Для всех рассмотренных зависимостей с достаточным числом точек и p критерием менее 0.05 коэффициент корреляции не превышает по модулю 0.4, т.е. линейной регрессии не наблюдается.

Процент значительных выбросов I_{sum} , в течение часа до или после которых на метеостанции Vaisala отмечались осадки, от всех значительных выбросов составил 16% за весь период, 21% в летние и 9% в зимние периоды, что указывает на грозовую активность как на источник взаимосвязи значительных выбросов I_{sum} и выпадения осадков. При исключении грозовых событий из рассмотрения процент составил 9% за весь период, 10% — в летние и 9% — в зимние. При рассмотрении исключительно грозовых периодов процент составил 41% за весь период, 41% — в летние и 50% — в зимние.

Можно заключить, что резкие падения I_{sum} не связаны непосредственно с выпадением осадков и проявляются в ассоциации с ними в периоды грозовой активности. Зависимости I_{sum} от количества осадков для всего рассматриваемого периода не выявлено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что реакция МГ УРАГАН на грозовое событие (квазипериодические возмущения характеристик потока, падения скорости счета и изменения анизотропии) имеет место как в случае прохождения грозы над детектором, так и в случае, когда гроза не наблюдалась над установкой. Завершена разработка алгоритма отбора грозовых событий, имевших отклик в мюонных данных; с его помощью показано, что большая часть не связанных с внеатмосферными эффектами выбросов в характеристиках потока мюонов связана с грозовой активностью. Продемонстрировано, что падения скорости счета мюонов по данным МГ УРАГАН не вызваны непосредственно выпадением осадков и проявляются в ассоциации с ними в периоды грозовой активности.

Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барбашина Н.С., Кокоулин Р.П., Компаниец К.Г. и др. // ПТЭ. 2008. № 2. С. 26; Barbashina N.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2008. V. 51. No. 2. P. 180.
2. Barbashina N.S., Petrukhin A.A., Yashin I.I. // Proc. Int. Symp. TERA 2016 (Yerevan, 2016). P. 106.
3. Kachur A.P., Pavlyukov Yu.B., Petrukhin A.A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1390. Art. No. 012060.
4. Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al. // Adv. Space Res. 2015. V. 56. No. 12. P. 2693.
5. <http://method.meteorf.ru/norma/document/temp2.pdf>.
6. Качур А.П., Дмитриева А.Н., Ковыляева А.А., Шутенко В.В. // Учен. зап. физ. фак. МГУ. 2018. № 4. С. 1840404.
7. <http://meteocenter.asia>.
8. Лидванский А.С., Хаердинов Н.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 3. С. 415; Lidvansky A.S., Khaeridinov N.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009. V. 73. No. 3. P. 397.
9. Dorman L.I., Dorman I.V., Iucci N. et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. No. A5. Art. No. 1181.
10. Chilingarian A., Hovsepyan G., Karapetyan G., Zazyan M. // Astropart. Phys. 2021. V. 124. Art. No. 102505.
11. Лидванский А.С., Хаердинов Н.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 6. С. 888; Lidvansky A.S., Khaeridinov N.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. V. 75. No. 6. P. 837.

Effects observed in the muon flux during thunderstorms according to the muon hodoscope URAGAN data

A. P. Kachur^{a,*}, I. I. Astapov^a, N. S. Barbashina^a, A. A. Kovilyaeva^a, Yu. B. Pavlyukov^b,
A. A. Petrukhin^a, N. I. Serebryannik^b, V. V. Shutenko^a

^aNational Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

^bCentral Aerological Observatory, Dolgoprudny, 141700 Russia

*e-mail: APKachur@mephi.ru

Based on the muon hodoscope URAGAN data analysis, effects observed in connection with thunderstorms recorded above and at a distance from the muon hodoscope were identified: quasiperiodic disturbances of the muon flux characteristics, count rate decreases, and flux anisotropy changes. An algorithm for the selection of thunderstorms that had a response in muon data has been created. It was found that muon counting rate decreases are not directly related to precipitation.