

Выявление радиоизлучения каскадных ливней космических лучей высоких энергий в многолетних непрерывных наблюдениях на радиотелескопе метровых волн БСА ФИАН

© В. А. Самодуров^{1,2}, Р. Д. Дагкесаманский², А. С. Позаненко³, А. В. Долгушев⁴, Е. А. Исаев², В. В. Орешко²

¹НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия

²ПРАО АКЦ ФИАН, г. Пушchino, Россия

³ИКИ РАН, г. Москва, Россия

⁴ООО «Яндекс», г. Москва, Россия

Реферат

Одной из интереснейших задач астрофизики является исследование источников и механизмов образования космических лучей высоких и сверхвысоких энергий. Предполагается, что первичные космические лучи в энергетическом диапазоне 10^{16} – 10^{19} эВ порождаются как галактическими, так и (на более высоких энергиях) внегалактическими источниками. Один из способов регистрации космических лучей высокой энергии — фиксация излучения, порождаемого ШАЛ (Широкими Атмосферными Ливнями) от проникновения частиц космических лучей в атмосферу Земли. Максимум излучения от ШАЛ приходится на частоты от 100 до 110 МГц, на которых работает БСА ФИАН.

В работе изложены методика и результаты анализа сотен тысяч импульсных сигналов с нулевой дисперсионной задержкой сразу во многих лучах диаграммы БСА для 2012–2020 гг. Для разных зон неба проанализированы интервалы наблюдений длительностью от одного года до 8 лет. Показано, что не реже, чем раз в несколько минут мы регистрируем события, проявляющие себя во многих лучах БСА ФИАН как сильный всплеск длительностью не более 12.5 мс (это наиболее короткий временной масштаб наших данных). Анализ показал, что весьма существенная часть этих данных (до десятков процентов от всего массива), по-видимому, генерируется именно ШАЛ. Распределение числа событий, судя по первым результатам анализа, находится в анти-корреляции с уровнем фона Галактики, что может давать косвенные указания в основном на внегалактическую природу космических частиц, порождающих ШАЛ. Проведен анализ сигналов и разделение их на различные фракции («дневную» и «ночную»). Они могут быть порождены разными сортами начальных космических частиц. Например, в верхних слоях атмосферы могут заканчивать свой путь высокоэнергичные фотоны (пик статистики — днем), а в нижних — классические тяжелые космические лучи (протоны, другие ядра атомов).

Ключевые слова: методика обработки, широкие атмосферные ливни (ШАЛ), космические лучи, длинноволновое радиоизлучение.

Контакты для связи: Самодуров Владимир Алексеевич (samod@mail.ru).

Для цитирования: Самодуров В. А., Дагкесаманский Р. Д., Позаненко А. С., Долгушев А. В., Исаев Е. А., Орешко В. В. Выявление радиоизлучения каскадных ливней космических лучей высоких энергий в многолетних непрерывных наблюдениях на радиотелескопе метровых волн БСА ФИАН // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 67. С. 8–13.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.67.8-13>

Detection of Radio Emission from Cascade Showers of High-Energy Cosmic Rays in many Years Observations Using the Meter-Wave Radio Telescope BSA of LPI

V. A. Samodurov^{1,2}, R. D. Dagkesamanskiy², A. S. Pozanenko³, A. V. Dolgushev⁴, E. A. Isaev², V. V. Oreshko²

¹National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

²Pushchino Radio Astronomy Observatory ASC LPI, Pushchino, Russia

³Space Research Institute, Moscow, Russia

⁴Yandex Company, Moscow, Russia

Abstract

One of the fundamental problems of astrophysics is the study of sources and mechanisms for the formation of high and ultrahigh energy cosmic rays. It is assumed that primary cosmic rays in the energy range 10^{16} – 10^{19} eV are generated by both galactic and (at higher energies) extragalactic sources. One of the ways to detect high-energy cosmic rays is to fix the radiation generated by EAS (Extensive Atmospheric Showers) from the penetration of cosmic ray particles into the Earth's atmosphere. The maximum emission from EAS falls on frequencies from 100 to 110 MHz, at which the BSA of LPI radio telescope operates.

The paper presents the methodology and results of the analysis of hundreds of thousands of impulse signals with zero dispersion delay in many beams of the BSA diagram for 2012–2020 at once. Observation intervals ranging from one

year to 8 years were analyzed for different sky zones. It is shown that at least once every few minutes we register events that manifest themselves in many beams of the BSA of LPI as a strong burst with a duration of no more than 12.5 ms (this is the shortest time scale of our data). Analysis of the data showed that a very significant part of these data (up to tens of percent of the entire array), apparently, is generated by EAS. The distribution of events, judging by the first results of the analysis, is approximately in anti-correlation with the background of the Galaxy, which can give indirect indications mainly of the extragalactic nature of cosmic particles that generate EASs. Signals were analyzed and divided into different fractions (“day” and “night”). They can be generated by different sorts of initial cosmic particles. For example, in the upper layers of the atmosphere, high-energy photons can end their journey (the peak of statistics is during the day), and in the lower layers, classical heavy cosmic rays (protons, other nuclei of atoms).

Keywords: processing technique, extensive air showers (EAS), cosmic rays, longwave radio emission.

Contacts: Vladimir A. Samodurov (samod@mail.ru).

For citation: Samodurov V. A., Dagkesamanskij R. D., Pozanenko A. S., Dolgushev A. V., Isaev E. A., Oreshko V. V. Detection of radio emission from cascade showers of high-energy cosmic rays in many years observations using the meter-wave radio telescope BSA of LPI // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 67. P. 8–13.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.67.8-13>

Введение

Одной из интереснейших задач астрофизики является исследование источников и механизмов образования космических лучей высоких и сверх-высоких энергий ([Гинзбург, 1957](#)). Предполагается, что первичные космические лучи в энергетическом диапазоне 10^{16} – 10^{19} эВ порождаются как галактическими, так и (на более высоких энергиях) — внегалактическими источниками ([Урысон, 1998](#)). Причем предполагается, что самая высокоэнергетическая часть спектра приходит к нам из-за пределов нашей галактики.

Один из способов регистрации космических лучей высокой энергии — фиксация излучения, порождаемого ШАЛ (Широкими Атмосферными Ливнями) от проникновения частиц космических лучей в атмосферу Земли. Известно ([Казарина, 2015](#)), что максимум излучения от ШАЛ приходится на частоты от 100 до 110 МГц, на которой работает Большая Синфазная Антенна (БСА) Физического института им. П. Н. Лебедева (ФИАН).

В работе изложена методика и результаты анализа сотен тысяч импульсных сигналов с нулевой дисперсионной задержкой сразу во многих лучах диаграммы БСА для 2012–2020 гг. Проведен анализ таких сигналов и разделение их на различные фракции. Анализ данных показал, что весьма существенная часть этих данных (до десятков процентов от всего массива), по-видимому, генерируется именно ШАЛ.

В записях данных с радиотелескопа БСА ФИАН регулярно обнаруживаются импульсные сигналы (зачастую одновременно во многих лучах радиотелескопа), которые обычно не показывают признаков диспергирования. Распределение их на первый взгляд совершенно случайно, и многие годы при обработке предполагалось, что данные сигналы являются обычными помехами техногенного характера — либо внешнего характера (грозы, работающие механизмы и аппаратура с электрической и электронной составляющей), либо

внутреннего (помехи от аппаратуры по приемному тракту).

Однако при детальном анализе сотен тысяч подобных образцов, накопленных за многие годы при помощи модернизированной многолучевой диаграммы БСАЗ (запуск в 2012 г.) обнаруживается, что как минимум часть таких данных имеет космическое происхождение, поскольку меняется в зависимости от прямого восхождения и склонения.

В настоящей работе, исследованы статистика сигналов короткой длительности, обнаруживаемые в сырых данных без признаков дисперсии вдоль частоты наблюдений. Мы рассматриваем статистику обнаружений импульсных источников излучения и отождествление этих источников с помехами и реальными сигналами, имеющими, по всей видимости, внеземное происхождение и как наиболее вероятный источник таковых — регистрация многочисленных ШАЛ.

Наблюдения

Наблюдения проводились на меридианном телескопе БСА ФИАН. Подробности наблюдений на многолучевой антенне БСА ФИАН уже описаны ранее ([Самодуров и др., 2023](#)). Здесь отметим лишь, что данные регистрируются на трех стойках приемной аппаратуры со 128 отдельных лучей БСА в полосе наблюдений 109.0–111.5 МГц. При этом регистраторы разделены на 2 стойки по 48 лучей и еще одну, принимающую сигналы с 32 лучей БСА. Первая верхняя стойка регистрирует $+21.38^\circ < \delta < +42.13^\circ$, вторая регистрирует более южный набор лучей $-8.2^\circ < \delta < +20.83^\circ$. При этом, к сожалению, при $\delta \leq +3.1^\circ$ качество данных резко ухудшается, отягощаясь помехами техногенного характера (предположительно работа аэродромных систем Домодедово). В результате для склонений $\delta \leq +3.1^\circ$ около 85 % наблюдательных данных практически непригодно для полноценного анализа. Напротив, для склонений $\delta \geq +3.1^\circ$ ситуация обратная — пригодно для обработки и анализа 85–90 % наблюдательных данных.

Третья стойка регистрации данных была запущена в 2020–2021 гг. в полосе склонений $+42^\circ < \delta < +56^\circ$ (то есть крайний луч направлен в зенит).

Во всех трех стойках аппаратуры ведется одновременная регистрация данных в двух режимах: «малые данные» (временное разрешение 0.1 сек; регистрация в 6 частотных каналах) и «большие данные» (временное разрешение 12.5 мс, регистрация в 32 частотных каналах). В данной работе приводится анализ статистики найденных импульсных событий в основном для «малых данных» (с временным разрешением 0.1 с; 6 частотных каналов), где через обработку прошло около 10 ТБ наблюдательных данных.

Обработка данных

Формат данных наблюдений и их предварительная обработка уже описаны нами в работе (Самодуров и др., 2023). Здесь лишь кратко заметим, что суть предварительной обработки данных состоит в том, что данные разбивались на 10-секундные отрезки для каждого луча и каждой частоты, при этом для каждого отрезка данных находились средние значения, среднеквадратичные отклонения, минимальные, максимальные значения — для которых находились также отметки времени их генерации. По меткам времени для максимумов данных на каждой частоте находились дисперсионные задержки.

Дальнейшая обработка определяется поставленными задачами. Так, если перед нами стоит задача найти сигналы со значимыми дисперсионными задержками, то при обработке данных пишутся в текстовые логи обработки для последующего статистического анализа именно такие сигналы, которые имеют свойства пульсаров (показывают разные отметки времени генерации максимумов на разных частотах).

Но можно настроить параметры генерации логов обработки на выделение сигналов без дисперсионных задержек (то есть максимум отмечается одновременно на всех частотах) и, вдобавок, приходящих одновременно на несколько лучей диаграммы БСА ФИАН. Именно такие характеристики имеют не только паразитные техногенные помехи, но и импульсы от ШАЛ. В данной работе приводятся результаты обработки данных для полосы склонений $+21.38^\circ < \delta < +42.13^\circ$.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена статистика многолетних данных для 32-частотных данных 1-й стойки (регистрация более южных по склонению 48 лучей БСА ФИАН) для полосы склонений $+21.38^\circ < \delta < +42.13^\circ$. Хорошо видно, что двугорбое распределение данных практически аналогично рис. 1 в работе (Самодуров и др., 2023). То есть картина повторяется, несмотря на разные области неба и

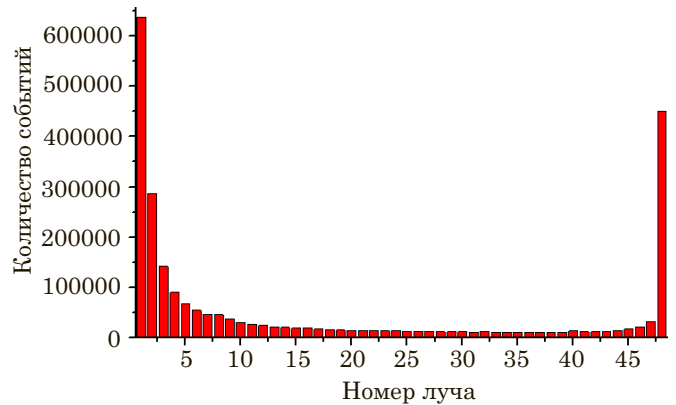


Рис. 1. Гистограмма распределения импульсов: по вертикали — количество детектированных импульсов (Y) относительно количества лучей (X), в которых были одновременно детектированы импульсы. Данные 1-й стойки приемной аппаратуры ($+21^\circ < \delta < +42^\circ$), 32-частотные данные для 17.06.2014 — 30.06.2020 гг., всего 2441762 взаимосвязанных события

разные типы данных. Слева отображаются импульсы, проявляющие себя только в 1–2 лучах — обычно это реальные космические источники. В правой части рисунка находят отражение все помехи и, вероятно, некие реальные сигналы с широких небесных полей. Таковыми как раз и могут быть сигналы от ШАЛ, порождаемых влетающими в атмосферу космическими частицами

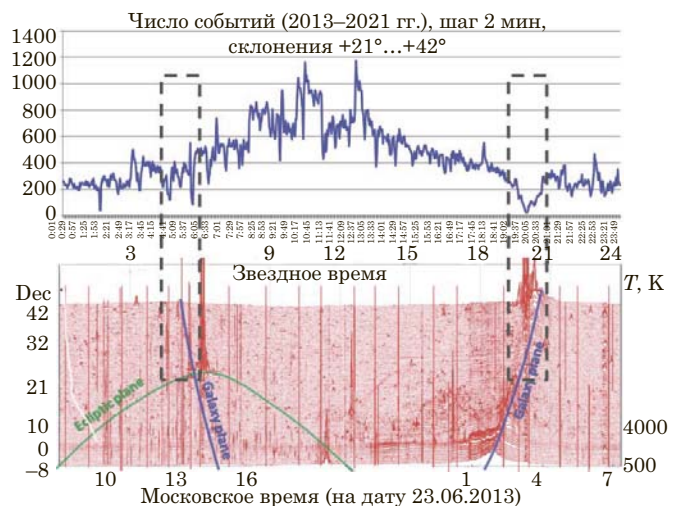


Рис. 2. Верхняя часть рисунка: звездное время (ось X) / число импульсов (ось Y) в 48 лучах первой стойки для 6 частотных данных, сумма по 2 мин за 2013–2021. Максимум отчетливо совпадает с зоной вне плоскости Галактики, локальный минимум около 20:00 — напротив, приходится на плоскость Галактики. В нижней части рисунка отрисована яркость радиоизлучения с 96 лучей 1-й и 2-й стойки приемной аппаратуры, отчетливо видна плоскость Галактики. Прямоугольниками здесь отмечены зоны плоскости Галактики на 1-й стойке (верхняя часть данных). Отчетливо заметны уменьшение числа событий на верхнем рисунке в зонах, где проходит плоскость Галактики (и растет уровень фона) вниз

высоких энергий. При каждом таком событии генерируются радиоволны (Казарина, 2015). Ниже мы отметим, что таких событий, по-видимому, более половины. Заметим, что ШАЛ, вероятно, проявляют себя не только во многих соседних лучах БСА ФИАН сразу, но и в некоторых отдельных лучах, вплоть до проявлений только на одном луче. Более подробный анализ этого будет проведен в отдельной работе.

Ниже (рис. 2) прямоугольниками отмечены зоны плоскости Галактики (вверху — многолетняя статистика событий с 1-й стойки аппаратуры, внизу — отрисовка уровней 96-лучевого сигнала сразу с двух стоек аппаратуры). Отчетливо заметны снижение числа событий на верхнем рисунке в хорошем соответствии с увеличением уровня сигнала в районе плоскости Галактики. То есть число событий находится в антикорреляции с уровнем сигнала при прохождении через плоскость Галактики, что можно ожидать от статистики ШАЛ (от внегалактических источников, теряющих интенсивность из-за высвечивания в плоскости нашей Галактики). Из просмотра разности статистики в максимуме и минимуме данных можно дополнительно сделать заключение, что число ШАЛ в статистике явлений порядка десятков процентов (до 80 % в предположении, что с зоны плоскости Галактики приходят только помехи, а ШАЛ практически подавлены). То есть в основном мы сталкиваемся в данных не с импульсами от помех, а с влиянием на наши данные ШАЛ.

Но самое неожиданное обнаруживаем при рассмотрении статистики событий в зависимости от времени суток по UT (рис. 3). Для зоны склонений $+3^\circ < \delta < +42^\circ$ с 2013 по 2022 гг. найдено 351 тыс. взаимосвязанных импульсных событий с нулевыми дисперсионными задержками (примерно 5–6 событий в час). Отчетливо видно увеличение числа таких событий с 9:30 до 17:00 по UT, или с полудня (12:30 МСК = +3 h) до вечера (20:00 МСК). Можно было бы предположить, что так проявляют себя какие-либо техногенные помехи. Но, если мы разложим статистику числа событий еще и по звездному времени (оно равно координате по прямому восхождению на небе, или RA — от англ. right ascension), то выясним, что события для разных диапазонов по RA для выборки $11 < UT < 16:30$ (зона максимума на рис. 3) и события для $UT < 9$ вместе с отрезком $20 < UT$ (вне максимума на рис. 3) ведут себя по-разному.

Видно, что вне плоскости Галактики (примерно в диапазоне $6h < RA < 18h$) регистрируется сильное превышение в статистике данных для «дневных данных». Вне солнечного дня ($11 < UT < 16:30$), то есть для выборки $UT < 9$ и $UT > 20$ (рис. 4b) нет столь выраженного влияния числа событий в зависимости от расстояния к плоскости Галактики. Объяснить разную зависимость числа событий «днем» и «ночью» от RA весьма затруднительно. Одно из возможных объяснений — это то, что днем ионосфера находится в более возбужденном состоянии и может легче порождать ШАЛ в радиодиапазоне.

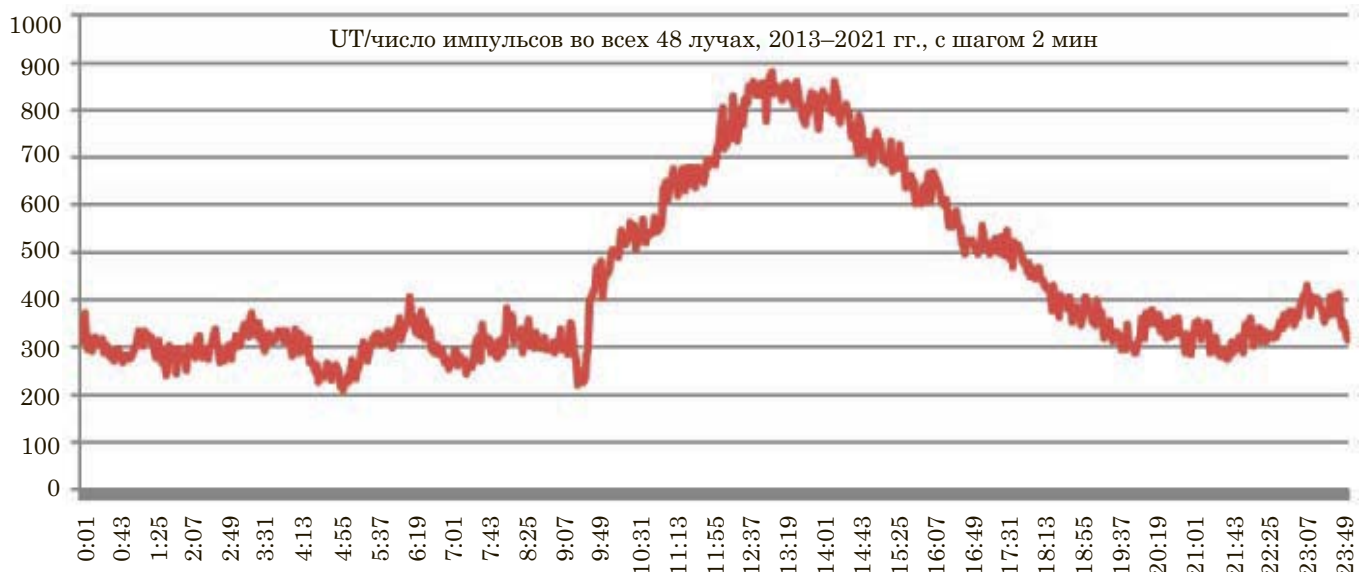


Рис. 3. UT (ось X) / число импульсов (ось Y) в 48 лучах первой стойки для 6 частотных данных, сумма событий внутри отрезков по 2 мин за 2013–2021 гг. Всего на графике присутствует 351 тыс. взаимосвязанных событий. Отчетливо виден рост событий начиная 9:30 по UT (12:30 по московскому времени), максимум в районе 13:00 по UT (17 часов по московскому), и более медленное спадание статистики к 19:30 UT (22:30 по московскому)

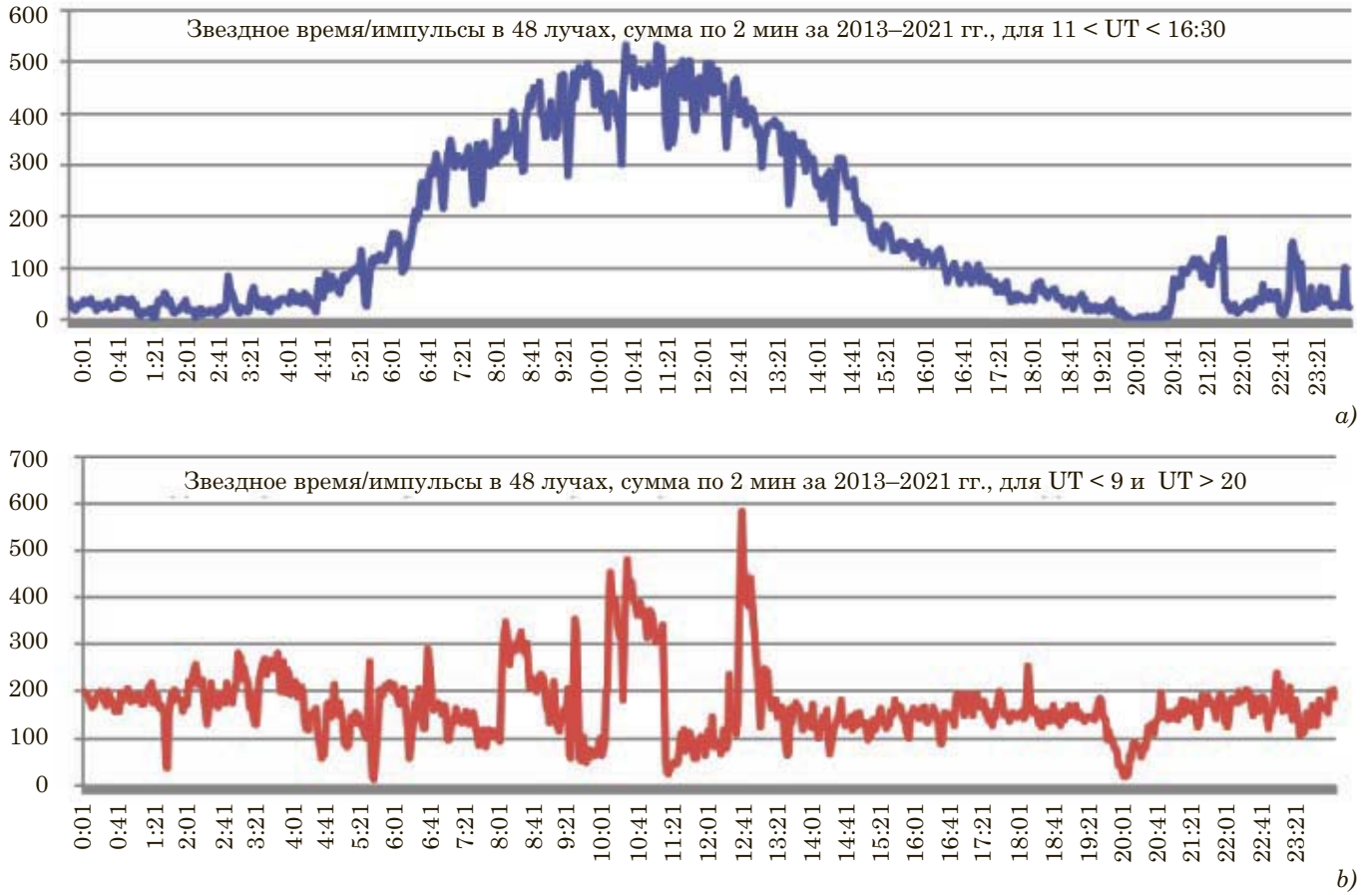


Рис. 4. На *a*: вне плоскости Галактики (в диапазоне $6h < RA < 18h$) сильное превышение в статистике данных для «дневных данных» (одна точка — число событий внутри 2 минут вдоль координаты RA за все время многолетних наблюдений); *b*: вне солнечного дня («ночные данные») — зависимость числа событий от расстояния к плоскости Галактики выражена заметно слабее (хотя и не исчезает полностью)

Еще одно возможное объяснение — что существует 2 фракции ШАЛ: «дневная», порождаемая верхней атмосферой (т. е. ионосферой, которая днем более прогрета и активна), и «ночная» (порождаемая нижними слоями атмосферы). Они могут быть порождены разными популяциями начальных космических частиц. Например, в верхних слоях атмосферы могут заканчивать свой путь высокоэнергичные фотоны, а в нижних — классические тяжелые космические лучи (протоны, другие ядра атомов).

Заключение

Из анализа многолетних данных нами выделено несколько сот тысяч событий, по всей видимости, явно связанных с ШАЛ (на это указывает нулевая дисперсионная задержка, зависимость статистики данных от RA и, наконец, антикорреляция данных с Галактическим фоном). Всего для 6-частотных наблюдений для зоны склонений $+3^\circ < \delta < +42^\circ$ с 2013 по 2022 гг. найдено 351 тыс. взаимосвязанных импульсных событий с нулевыми дисперсионными задержками (примерно 5–6 событий в час, или одно событие раз в 10 минут). В диапазоне склонений $+42^\circ < \delta < +56^\circ$ был проанализирован интервал наблюдений с 21.10.2021 по

31.08.2022 г., и здесь было найдено более 160 тыс. взаимосвязанных событий, то есть на один час в среднем приходится 21.4 события, или примерно одно событие раз в 3 минуты. Объем накопленной статистики на 2–3 порядка богаче объема данных, приведенных в (Mulrey, 2020).

Распределение числа событий, по первым результатам анализа, находится примерно в антикорреляции с уровнем фона Галактики, что может давать косвенные указания в основном на внегалактическую природу космических частиц, порождающих ШАЛ. Особенно необычно, что для «дневных» и «ночных» событий ход распределения статистики событий по RA заметно различается. Можно предположить, что днем ШАЛ происходят в основном в ионосфере, показывая при этом более четкую антикорреляцию с фоном галактики. Возможно, что существует 2 фракции ШАЛ: «дневная», порождаемая верхней атмосферой (т. е. ионосферой, которая днем более прогрета и активна), и «ночная» (порождаемая нижними слоями атмосферы). Они могут быть порождены разными сортами начальных космических частиц. Например, в верхних слоях атмосферы могут заканчивать свой путь высокоэнергичные фотоны, а в

нижних — классические тяжелые космические лучи (протоны, другие ядра атомов).

Анализируя статистику импульсных событий, не показывающих дисперсионную задержку, можно заключить, что до 80–90 % событий, которые ранее мы ранее приписывали исключительно техногенным помехам или грозовым явлениям, на деле порождаются ШАЛ.

Благодарности

Авторы благодарят антенную группу ПРАО АКЦ ФИАН за обеспечение многолетних кругло-суточных наблюдений на БСА ФИАН. Данное исследование выполнено с использованием суперкомпьютерного комплекса НИУ ВШЭ.

Литература

Mulrey K. et al. On the cosmic-ray energy scale of the LOFAR radio telescope // arXiv:2005.13441v2 [astro-ph.HE] 29 Sep 2020 (дата обращения: 29.09.2020).

Tyul'bashev S. A., Tyul'bashev V. S., Oreshko V. V., et al. // Astronomy Reports. 2016. Vol. 60, 220. doi: 10.1134/S1063772916020128.

Гинзбург В. Л. Происхождение космических лучей // Журнал «Успехи физических наук». 1957. Т. 62., № 2. С. 37–98.

Казарина Ю. А. Исследование структуры радиоизлучения каскадного ливня от космических лучей высоких энергий в Тункинском эксперименте. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Иркутский государственный университет. 2015. 104 с.

Самодуров В. А., Тюльбашев С. А., Торопов М. О. и др. Статистика обнаружений импульсных сигналов в площадке со склонениями от +52° до +56° на частоте 111 МГц // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 66. С. 30–37.

Урысон А. В. Космические лучи сверхвысоких энергий: возможное происхождение и спектр // ЖЭТФ. 1998. Т. 113, № 1. С. 12–20.