

УДК 551.593

РЕГИСТРАЦИЯ ЭЛЬФОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «УФ АТМОСФЕРА» С БОРТА МКС И ИХ РЕКОНСТРУКЦИЯ

© 2024 г. С. Шаракин¹, Д. Баргини^{2, 3, 4}, М. Баттисти^{2, 5}, А. Белов^{1, 6}, М. Бертаина^{2, 3},
М. Бьянчиотто^{2, 3}, Ф. Бисконти⁷, К. Блексли⁸, С. Блин⁵, Дж. Камбье^{7, 9}, Ф. Капель¹⁰,
М. Казолино^{7, 8, 9}, Т. Эбисузаки⁸, Й. Эзер¹¹, Ф. Феню¹², М. А. Франчески¹³, А. Гольцио^{2, 3},
Ф. Городецкий⁵, Ф. Каджино¹⁴, Х. Касуга⁸, П. Климов¹, М. Манфрин^{2, 3}, В. Маржаль¹⁷,
Л. Марчелли⁷, Х. Миямото^{2, 3}, М. Миньон², А. Мурашов¹, Т. Наполитано¹³, Х. Охмори⁸,
А. Олинто¹¹, Э. Паризо⁵, П. Пикоцца^{7, 9}, Л. В. Пиотровски¹⁶, З. Плебаняк^{7, 9}, Г. Прево⁵,
Э. Реали^{7, 9}, М. Риччи¹³, Дж. Ромоли^{7, 9}, Н. Сакаки⁸, К. Шинозаки¹⁵, Я. Шабельски¹⁷,
К. Де Ла Тай¹⁸, Й. Такидзава⁸, М. Врabelь¹⁵, Л. Винке¹⁹, М. Зотов¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобелевца, Москва, Россия

²Национальный институт ядерной физики, Турин, Италия

³Физический факультет, Туринский университет, Италия

⁴Национальный астрофизический институт, Турин, Италия

⁵Университет Париж-Сите, Национальный центр научных исследований,
лаборатория астрочастиц и космологии, Париж, Франция

⁶Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия.

⁷Национальный институт ядерной физики Рим Тор Вергата, Рим, Италия

⁸РИКЕН, Вако, Япония

⁹Физический факультет Университета Тор Вергата, Рим, Италия

¹⁰Физический институт Макса Планка, Мюнхен, Германия

¹¹Кафедра астрономии и астрофизики, Чикагский университет, Иллинойс, США

¹²Итальянское космическое агентство, Рим, Италия

¹³Национальный институт ядерной физики, Фраскати, Италия

¹⁴Университет Конан, Кобе, Япония

¹⁵Национальный центр ядерных исследований, Лодзь, Польша

¹⁶Физический факультет Варшавского университета, Варшава, Польша

¹⁷Академия прикладных наук имени Стефана Батория, Скерневице, Польша

¹⁸Центр микроэлектроники, Политехнический институт, Палезо, Франция

¹⁹Факультет физики, Колорадская горная школа, Голден, США

*e-mail: sharakin@mail.ru

Поступила в редакцию 16.08.2023

После доработки 09.09.2023

Принята к публикации 11.09.2023

В данных орбитального многоканального детектора «УФ атмосфера» (Mini-EUSO) на сегодняшний день надежно идентифицировано более трех десятков суб-миллисекундных событий типа ELVES («эльфы»), являющихся следствием взаимодействия фронта электромагнитного импульса от грозового разряда и нижнего слоя ионосферы. Каждое событие имеет характерный кольцевой паттерн свечения и занимает значительную часть поля зрения детектора, а сигнал в отдельном канале имеет асимметричный профиль с ярко выраженным пиком. Распределение времен пиков содержит информацию как о локализации разряда, так и о высоте свечения.

В настоящей работе предлагается байесовская (вероятностная) модель реконструкции событий типа «эльф», реализованная методами вероятностного программирования в PyMC-5. На примере нескольких событий показаны возможности модели по определению положения разряда. Намечены способы модификации модели для восстановления ориентации разряда и уточнения высоты свечения.

DOI: 10.31857/S0023420624040049, EDN: JJDBLS

ВВЕДЕНИЕ

С осени 2019 г. на околоземной орбите работает детектор «УФ атмосфера» (Mini-EUSO) [1–3] — один из важных этапов научной программы международной коллаборации JEM-EUSO¹, направленной на исследование космических лучей предельно высоких энергий. Детектор прикреплен с внутренней стороны к УФ-прозрачному иллюминатору российского модуля «Звезда» Международной Космической Станции (МКС) и ориентирован (примерно) в нади́р. Он представляет собой линзовый телескоп (диаметр входного зрачка 25 см, фокусное расстояние 30 см), в фокусе которого установлен фотоприемник из 36 мультианодных фотоэлектронных умножителей (МАФЭУ). Фотоприемник имеет 2304 высокочувствительных канала, которые просматривают площадь 100000 км² с временным разрешением 2.5 мкс. Кроме основного режима, осуществляющего запись данных по триггеру, параллельно ведется непрерывный мониторинг с временным разрешением 41 мс. Спектральная чувствительность прибора определяется характеристиками используемого фотокатода и BG3-фильтра и находится в ближнем УФ-диапазоне (300...400 нм). Подробнее о приборе и его характеристиках можно узнать в публикациях [4, 5], а об его триггере — в работах [6, 7].

Широкое поле зрения и высокие временное разрешение и чувствительность делают Mini-EUSO особенно эффективным для исследования различного рода транзиентных (быстропеременных) оптических явлений в верхней атмосфере (TLE, от англ. transient luminous event) [8, 9]. Один из наиболее распространенных типов TLE — так называемые ELVES², представляющие собой суб-миллисекундную вспышку в форме быстро расширяющегося кольца на высоте около 90 км. В русскоязычной литературе ELVES очень часто называют просто «эльфами», возможно, из-за их быстротечности и неуловимости.

Появление эльфов связывают с воздействием мощного электромагнитного импульса (ЭМИ) молниевых разряда на нижние слои ионосферы [10, 11], в результате которого на высотах 85...95 км происходит заметное повышение концентрации электронов, их нагревание и ионизация молекул воздуха. Область повышенной ионизации локализована по высоте и распространяется соответственно расширению сферического фронта ЭМИ. Высвечивание в линиях первой отрицательной и второй положительной системы азота и приводит к наблюдаемому эффекту «сверхсветового» роста кольца эльфа [12].

Эльфы многократно наблюдались как с земли (см., например, [11, 13]), так и из космоса — начиная со случайного фотографирования с борта Спейс Шаттла [14] и заканчивая систематическими измерениями с помощью детекторов ISUAL [15] и TUS [16, 17]. Результаты работы ISUAL свидетельствуют [18], что эльфы являются наиболее часто встречающимся классом TLE. Регистрация эльфов детектором Mini-EUSO — следующий важный шаг в исследовании эльфов, явления, представляющего интерес не только само по себе (как относительно новое и до сих пор мало изученное), но и с целью уточнения различного рода процессов, происходящих как внутри грозового облака, так и в нижнем слое ионосферы [19, 20].

Поиск событий типа ELVES происходит в данных Mini-EUSO, полученных на фоне грозовой активности. Несмотря на сложность выделения паттерна активного³ сигнала в таких условиях, на сегодняшний момент было обнаружено более 30 эльфов [21]. Предварительный, но подробный анализ большинства этих событий представлен в работах [9, 22], в настоящей же работе приводится один из весьма перспективных подходов к реконструкции таких событий (и некоторые результаты его применения), основанный на байесовском выводе и вероятностном программировании.

ЭЛЬФЫ MINI-EUSO

Оптика детектора Mini-EUSO строит на фотоприемнике динамическое изображение эльфа (удаленного от МКС на сотни километров), обновляя его каждый такт GTU = 2.5 мкс (от англ. gate time unit). В поле зрения детектора чаще всего попадает лишь часть кольца свечения, а длительность события составляет 100...400 мкс, т.е. от нескольких десятков до одной-двух сотен тактов. Поле зрения отдельного канала фотоприемника на высоте 90 км составляет 4.7×4.7 км, в формирование динамического изображения типичного эльфа вовлекаются сотни каналов.

Несколько «мгновенных фотографий» одного из зарегистрированных событий приведено на рис. 1. На нем поле зрения каждого из 2304 каналов («пиксель») спроецировано на высоту 90 км. Группировка пикселей по 64 соответствует одному МАФЭУ, а горизонтальные и вертикальные белые полосы — конструктивным «мертвым» зонам между соседними МАФЭУ (четыре МАФЭУ, расположенные в правом верхнем углу рисунка, в этот момент работали в режиме пониженной чувствительности). Каждый снимок получен в результате вычитания фона (использовалось медианное значение

¹ Joint Exploratory Missions for an Extreme Universe Space Observatory.

² Emission of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic pulse sources.

³ Будем называть активными как каналы, в которых обнаружен сигнал эльфа, так и сами эти сигналы, т.е. характерное превышение сигнала над фоном.

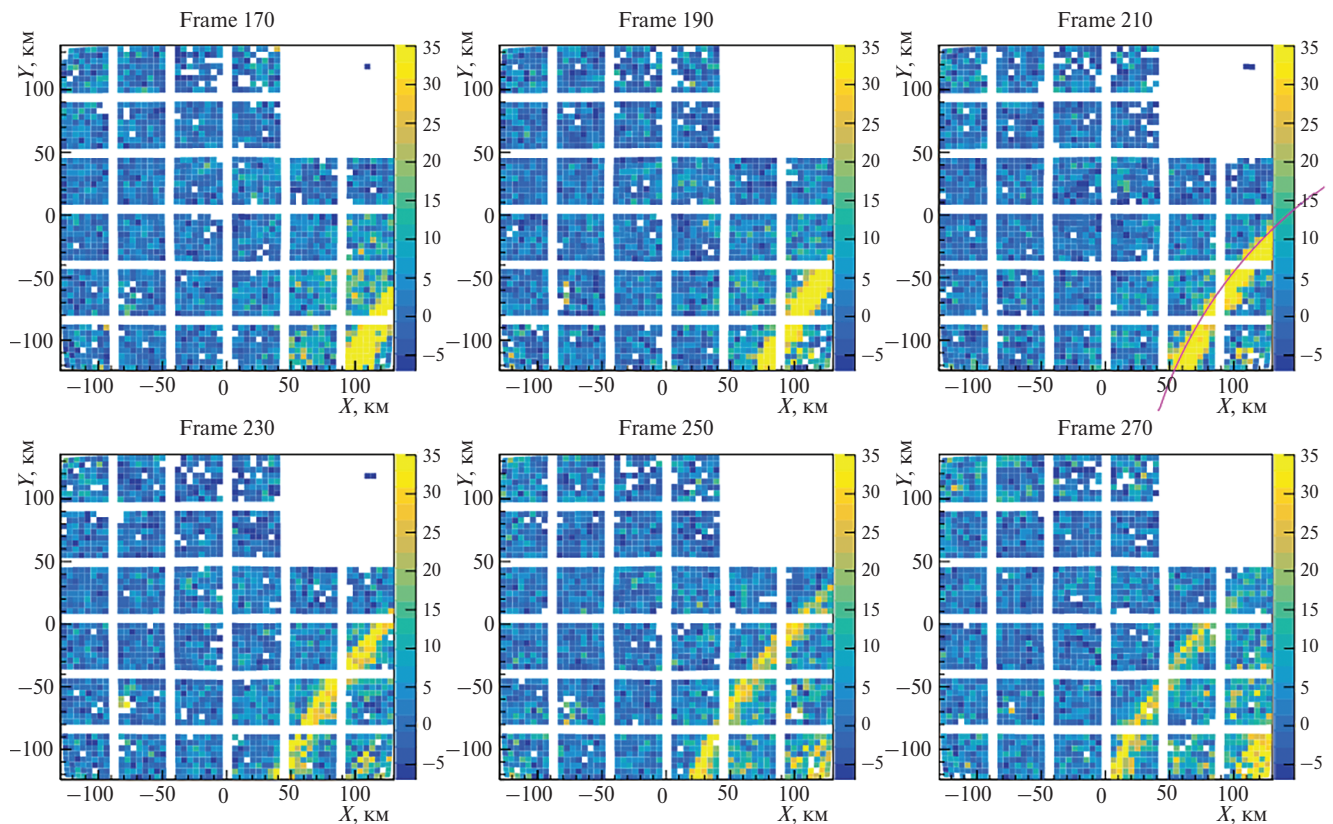


Рис. 1. Событие типа ELVES, зарегистрированное 12.V.2019. Приведены шесть мгновенных снимков (проекции на высоту 90 км) с интервалом в 20 GTU = 50 мкс. На кадре 210 розовой линией изображен результат реконструкции текущего положения фронта.

сигнала в канале непосредственно перед развитием эльфы с учетом временной задержки, различной по разным направлениям — только в этом случае паттерн изображения имеет форму кругового кольца. Ширина кольца связана как с профилем импульса тока, породившего эльф молниевых разряда, так и с особенностями взаимодействия ЭМИ с нижним слоем ионосферы, а также с размером и формой функции рассеяния точки (ФРТ) оптической системы детектора. Интенсивность свечения (представлена на рис. 1 в фотонах за GTU, см. вертикальную шкалу справа) при расширении кольца быстро уменьшается, что и определяет общую длительность зарегистрированного события; для события, изображенного на рисунке, она составила примерно 380 мкс.

Сигнал эльфы в отдельном канале представлен на рис. 2, точнее на нем изображены сигналы двух соседних по диагонали каналов — каналов (36,14) и (37,13) (нумерация столбцов — строк начинается с левого нижнего угла фотоприемника) — т.е. примерно вдоль движения кольца эльфы. В обоих сигналах отчетливо прослеживается характерный асимметричный профиль — с быстрым нарастанием и относительно более медленным спадом. Такое «подобие» сигналов наблюдается практически во всех активных каналах и позволяет применять

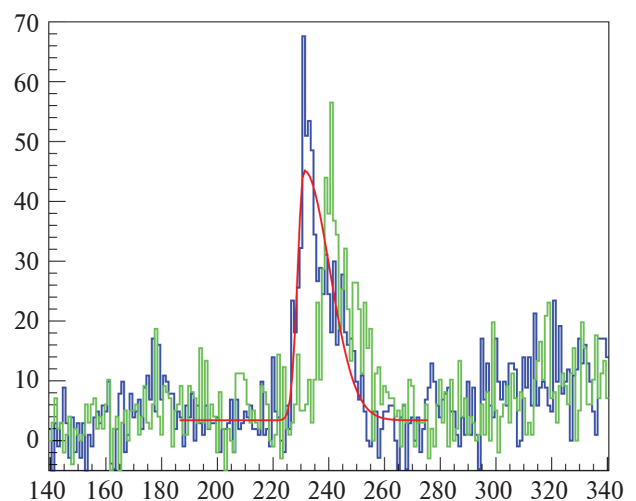


Рис. 2. Сигнал эльфы ELVES20190512 в отдельном канале (по горизонтальной оси — время в тактах GTU = 2.5 мкс, по вертикально — сигнал в фотонах за GTU). Синяя линия — канал (37,13), зеленая — канал (36,14). Для первого из сигналов красным изображен асимметричный профиль, полученный в результате аппроксимации би-гауссовой функцией.

для их аппроксимации одну и ту же параметрическую функцию. В настоящей работе использовались два варианта асимметричного профиля:

би-гауссова функция (склейка в общем максимуме двух гауссиан разной ширины) и гаусс-экспоненциальный профиль. Положение пика сигнала во времени определяется расположением канала на фотоприемнике, т.е. той пространственной областью эльфы, которая просматривается данным каналом. Например, если положение пика сигнала определять по би-гауссовому профилю, то для двух изображенных сигналов задержка по времени равна 20.6 мкс, тогда как расстояние между центрами полей зрения каналов составит 6.6 км (на высоте 90 км).

С кинематической точки зрения временная задержка связана с разницей в расстоянии, которое проходит ЭМИ от источника S (молниевое разряда) до области свечения в атмосфере. Если положить, что пику свечения соответствует высвечивание с одного и того же уровня в атмосфере H_e (высоты эльфы), то величина задержки Δt_{12} определяется положением источника $S(x_0, y_0, z_0)$ и полями зрения каналов:

$$c\Delta t_{12} = \sqrt{h_0^2 + (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} - \sqrt{h_0^2 + (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2},$$

где $h_0 = H_e - z_0$, $c \approx 0.75$ км/GTU — скорость света. Здесь была введена (декартова) горизонтальная система координат, привязанная к надирной точке детектора. В этой системе детектор расположен в точке $D(0, 0, H_d)$, высота орбиты МКС H_d (≈ 420 км) для каждого события известна с хорошей точностью, а центры полей зрения имеют на высоте $z = H_e$ координаты (x_1, y_1) и (x_2, y_2) , выражаемые через полярный θ и азимутальный ϕ углы:

$$x_i = (H_d - H_e) \tan \theta_i \cos \phi_i,$$

$$y_i = (H_d - H_e) \tan \theta_i \sin \phi_i.$$

Углы $\theta_i, \phi_i, i = 1, 2$, определяют направление на центр поля зрения i -го канала, и легко вычисляются для каждого канала при учете ориентации детектора.

БАЙЕСОВСКАЯ МОДЕЛЬ РЕКОНСТРУКЦИИ ЭЛЬФА

Любая реконструкция подразумевает построение параметрической модели изучаемого явления (непараметрические модели в настоящей работе не рассматриваются) и получение тех или иных количественных оценок на параметры, основываясь на данных. В случае физических явлений данные обычно представляют собой результаты специально запланированного и проведенного эксперимента. При этом модель может включать как модель

собственно изучаемого явления, так и модель процедуры измерения.

При байесовском подходе модель носит вероятностный характер — задается в виде распределения вероятностей [23, 24]. Цель реконструкции в таком случае — получить так называемое *постериорное распределение* на параметры Θ модели, $p(\Theta|D)$, где D — экспериментальные данные (чаще всего так или иначе заранее обработанные). Для получения этого распределения необходимо, опираясь на имеющуюся исходную информацию, задать априорное распределение (прайор) $p(\Theta)$, сформулировать вероятностную модель измерения посредством функции правдоподобия $p(D|\Theta)$ и воспользоваться теоремой Байеса:

$$p(\Theta|D) \propto p(\Theta) \cdot p(D|\Theta).$$

Здесь коэффициент пропорциональности, численно равный $1/p(D)$, не зависит от параметров и определяет лишь общую нормировку постериорного распределения.

Само постериорное распределение дает исчерпывающую информацию о параметрах модели. Однако часто бывает удобнее выразить результат в виде набора небольшого количества чисел. Тогда обычно оценивают центр распределения, например как среднее, и его ширину — как стандартное отклонение (корень из дисперсии). Для реалистических моделей параметр Θ представляет собой многомерную величину, и в качестве результатов байесовского вывода можно представить одномерные постериорные распределения, маргинализированные по всем параметрам кроме одного, а также в виде парных корреляционных функций.

Иногда в набор Θ входят параметр(ы) η , необходимый(ые) только для формулировки вероятностной модели в терминах относительно простых распределений (например, из экспоненциального семейства). По таким вспомогательным параметрам в конце производится маргинализация

$$p(\Theta|D) = \int p(\Theta, \eta|D) d\eta \propto \int p(D|\Theta, \eta) p(\Theta) p(\eta) d\eta$$

(для простоты предположим, что прайор факторизуется). Обращаем внимание, что в байесовском подходе происходит усреднение по всем значениям параметра η , а не подстановка той или иной его оценки (что привело бы к уменьшению дисперсии распределения).

Байесовский подход в последние годы привлекает все большее внимание [25] ввиду того, что были созданы очень эффективные (и простые в использовании) сэмплеры — генераторы выборки из постериорного распределения, основанные на использовании марковских цепей Монте-Карло

JAGS⁴, STAN⁵, PyMC⁶ и др. Такие подходы даже получили название вероятностного программирования. В настоящей работе вероятностная модель (см. ниже) реализована средствами питоновской библиотеки PyMC-5. Различные способы графического построения маргинализированных распределений осуществлялись средствами библиотеки ArviZ ([https:// www.arviz.org](https://www.arviz.org)).

В предыдущем разделе результаты измерений эльфы проецировались на плоскость $z = H_r = 90$ км, подразумевая, что именно ей и соответствует высота свечения ($H_e = H_r$). При этом производилась и коррекция времени: детекторное время T сдвигалось на величину, определяемую временем следования излучения из области свечения $A_i(x_i, y_i, H_r)$ до детектора D, $c\Delta T_i = (H_d - H_r)/\cos \theta_i$. Если же такой коррекции не производить и в качестве экспериментальных данных считать детекторные времена пиков сигнала в каждом активном канале, $T_i, i = 1, \dots, N$ (N — количество активных каналов), то связь данных с положением источника ЭМИ будет следующая:

$$cT_i = cT_0 + \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + (H_d - H_e)^2} + \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (H_e - z_0)^2} + \xi_i.$$

Здесь T_0 играет роль вспомогательного параметра, и добавляется последнее слагаемое — случайная ошибка измерений времени пика ξ_i .

Таким образом, можно сформулировать вероятностную модель, определяемую параметрами $\Theta = \{x_0, y_0, z_0, T_0, H_e\}$, задав на них априорные распределения и уточнив их (рассчитав по теореме Байеса постериорные распределения) с помощью набора экспериментальных данных $D = \{T_i, \theta_i, \phi_i\}$. Важным этапом формулировки модели является выбор распределения ошибок измерения ξ_i . Разумным допущением для них будет условие независимости их совместного распределения (функция правдоподобия при этом факторизуется). Обычно используется нормальная (гауссова) модель ошибок (во многом по причинам простоты), однако в нашем случае не целесообразна.

Выше при построении модели неявно использовалось допущение, что пику сигнала соответствует прохождение фронта ЭМИ через центр поля зрения канала. Эта гипотеза оправдана в случае, если оптика детектора формирует симметричное изображение не очень большого размера. По результатам калибровочных испытаний ФРТ телескопа имеет размер 1.2 пикселя и действительно не содержит значительных асимметричных отклонений. Однако в краевых пикселях, т.е. в каналах,

расположенных на границе МАФЭУ, часть энергии мгновенного изображения попадает в мертвую зону и поэтому здесь может происходить рассогласование центра поля и положения центра измеренного изображения (центроида). Представляется, что исключение всех подобных каналов из выборки данных нецелесообразно, так как в некоторых случаях они составляют значительную часть всего набора. Можно отдельно рассматривать такие пиксели в выборке и приписывать им повышенную ошибку измерений. В данной работе модель сделана более робастной к такого рода отклонениям, путем замены нормального распределения ошибок измерения на более широкое распределение. Более того, чтобы данные сами смогли подобрать характерный вид распределения, было использовано распределение Стьюдента (с нулевым средним)

$$\xi_i \sim \text{StudentT}(\sigma_0, \nu),$$

в котором параметр σ_0 определяет характерную величину ошибки, а число степеней свободы ν контролирует наличие указанных выше и других отклонений центроида (в пределе $\nu \rightarrow \infty$ снова приходим к гауссовой модели ошибок, $\nu = 1$ соответствует распределению Коши). По своему смыслу σ_0, ν , также как и T_0 , являются вспомогательными параметрами.

Для завершения построения вероятностной модели достаточно задать прайоры на всю совокупность параметров — как параметров модели явления, так и параметров измерения. При реализации модели в PyMC-5 были выбраны малоинформативные равномерные прайоры на все параметры, кроме σ_0, ν (для которых, в виду их положительности, предпочтение было дано HalfNormal) и для H_e .

Выбор прайора H_e позволяет контролировать систематическую ошибку метода реконструкции (понимаемую как ошибку при выборе модели) путем сравнения получаемых постериорных распределений при фиксации H_e на разных высотах (практически использовался нормальный прайор со средними 90, 87.5 и 92.5 км и стандартным отклонением 0.5 км) и при нормальном прайоре со стандартными отклонениями $\sigma_0 = 2.5$ и 5 км.

На рис. 3 приведены результаты сэмплирования для события ELVES20190512 при выборе прайора $p(H_e) = N(H_e|90, 2.5)$. Слева представлено одномомерное постериорное распределение $p(H_0, H_e)$, где $H_0 = z_0 + \rho^2/(2 R_E)$ — высота источника ЭМИ с поправкой на сферичность земной атмосферы ($R_E \approx 3680$ км — средний радиус Земли). Здесь HDI (highest density interval) — постериорная мера так называемого байесовского доверительного интервала (credible interval), означающая, что с вероятностью 94% (горизонтальное) расстояние от центра поля зрения до источника ЭМИ лежит в пределах

⁴ [https:// mcmc-jags.sourceforge.io/](https://mcmc-jags.sourceforge.io/)

⁵ [https:// mc-stan.org/](https://mc-stan.org/)

⁶ [https:// www.pymc.io/welcome.html](https://www.pymc.io/welcome.html)

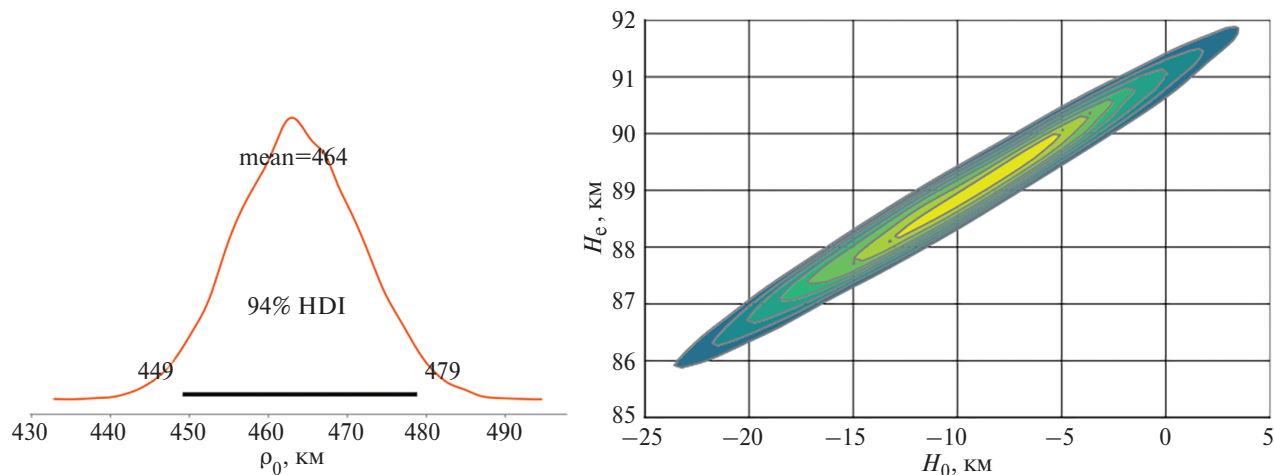


Рис. 3: Постериорное распределение для события ELVES20190512. Слева — одномерное распределение расстояния до центра кольца ρ_0 , справа — двумерное распределение высоты источника ЭМИ H_0 и высоты свечения H_e .

(449, 479) км. Контурсы на рис. 3 справа проведены для HDI = 10% (внутренний), 20%, ..., 70%.

Ввиду того, что одномерные распределения имеют гауссоподобную форму (что во многом связано с объемом информации, передаваемым в данных — почти 700 оценок T_i), результаты реконструкции можно сформулировать и как постериорное среднее плюс / минус стандартное отклонение: $x_0 = 381.5 \pm 6.5$, $y_0 = -263.8 \pm 4.5$, $H_0 = -10.0 \pm 8.5$, $H_e = 88.9 \pm 1.9$ (все в километрах).

Видно (см. рис. 3 справа), что оценки H_0 и H_e сильно скоррелированы — это одна из причин, почему в данном методе довольно трудно оценить высоту источника ЭМИ без дополнительной информации о высоте H_e . В частности, даже несмотря на большой объем данных в этом событии, неопределенность оценки H_0 высока (отрицательное значение постериорного среднего не должно смущать, так как физически разумные значения для молнии по типу облако — земля, 1...5 км, находятся в пределах 2σ).

Постериорная оценка параметра v равна 3.3 ± 0.5 , т.е. данные свидетельствуют, что распределение ошибок измерений заметно отличается от нормального.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Важно подчеркнуть, что выбранный тип данных, время пика сигнала T , дает информацию как о локализации источника ЭМИ, так и о высоте, на которой генерируется под его воздействием свечение. Как следствие, байесовский вывод позволяет делать предсказания по обоим параметрам, H_0 и H_e . Однако само понятие высоты слоя свечения несколько условно, потому что моделирование в рамках FDTD-моделей совместной системы уравнений Максвелла и Ланжевена (см., например,

[26, 27]) свидетельствует, что область свечения от типичного молниевых разряда облако — земля имеет значительный размер по высоте (несколько километров). Таким образом, предложенная в настоящей работе простая модель позволяет оценивать лишь некоторую эффективную высоту свечения. Для более детального анализа ситуации нужна и более сложная модель, учитывающая эту «неплоскостность» эльфа.

Для событий, подобных ELVES0190512, для которых в поле зрения детектора попадает лишь малая часть всего кольца свечения, кривизна кольца относительно невелика (поздние стадии развития эльфа). По кинематическим данным трудно локализовать источник ЭМИ с высокой точностью — можно показать, что для таких событий H_0 и ρ_0 постериорно сильно скоррелированы.

С другой стороны, байесовская реконструкция таких событий приводит к сильным ограничениям на возможный интервал значений H_e (обратите внимание, как уменьшилось стандартное отклонение H_e для ELVES0190512 при переходе от априорного к постериорному распределению, см. также рис. 3 справа), если ввести разумные предположения о параметре H_0 [28] (например, в форме прайора на него, предварительно переписав модель через H_0 вместо z_0). В частности, для двух из зарегистрированных Mini-EUSO эльфов, монте-карловское сэмплирование сходится только при локализации параметра H_e , достоверно отличного от референсной высоты в 90 км. Для одного события постериорное распределение позиционирует свечения на эффективной высоте около 80 км, для другого — ближе к 95 км. Второе из этих событий, ELVES20200821 (см. рис. 4 слева), наряду с ELVES0190512, относится к одному из самых крупномасштабных: на момент регистрации диаметр кольца свечения превышал 800 км.

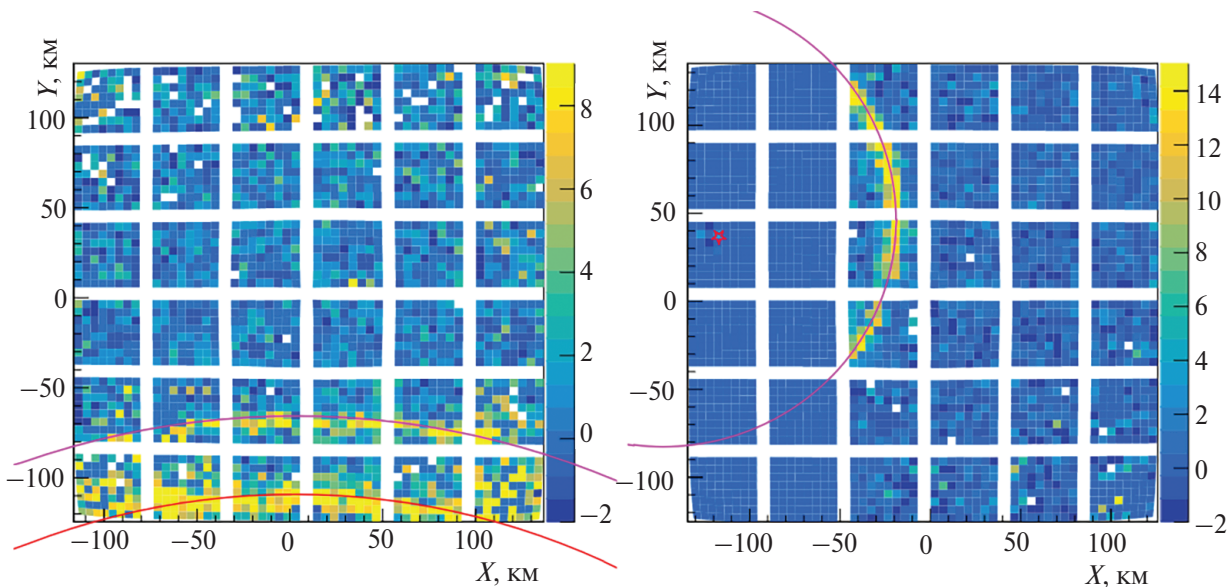


Рис. 4: Слева — событие ELVES20200821, представляющее собой последовательность колец свечения гигантского диаметра. Справа — событие ELVES20200526, для которого удастся локализовать источник ЭМИ (звездочка слева указывает направление на источник).

На самом деле это событие имеет сложный характер и представляет собой последовательность колец — на рисунке хорошо просматривается второе кольцо, отстающее по времени от первого примерно на 100...150 мкс (неопределенность оценки связана с широким профилем сигнала второго кольца). Впервые регистрация многократных эльфов из космоса была произведена детектором «ТУС» [16, 29]. Двойные эльфы могут быть связаны с отражением ЭМИ от проводящей поверхности. В этом случае задержка сигнала может стать надежным способом оценки H_0 , слабо коррелирующей с H_e [30].

На рис. 4 справа изображено событие другого типа — благодаря большой кривизне кольца для него удастся локализовать источник ЭМИ как в горизонтальной плоскости, так и по высоте. Для ELVES20200526 $H_0 = 3.4 \pm 5.7$ км, причем ошибка напрямую связана с неопределенностью H_e . Обратите внимание, что несмотря на переключения в режим пониженной чувствительности 24 МАФЭУ, расположенных в левой части фотоприемника, область разряда просматривается, и она практически совпадает с направлением на реконструированный источник.

Реконструкция по меньшей мере двух зарегистрированных Mini-EUSO эльфов локализует источник ЭМИ относительно высоко — предварительные оценки дают H_0 вблизи 11 и 29 км (во втором случае — со значительной неопределенностью, $\sigma_{H_0} > 10$ км). Такое высокое расположение разряда может удивить, так как значения находятся на границе и выше тропопаузы, однако ЭМИ от разрядов на таких высотах регистрируются [31, 32]. Это

может означать, что речь идет о так называемом компактном внутриоблачном разряде или CID (от англ. compact intracloud discharge), которому сейчас все чаще отводят важную роль в механизме инициации молний [33, 30]. Для таких событий можно расширить набор данных, включив в него время каждого из пиков в активном сигнале. При этом вероятностную модель реконструкции целесообразно формулировать в виде двух блоков. В первом — оценить H_0 (и другие параметры) по временной задержке между пиками в тех каналах, где такие многократные пики надежно идентифицируются, а во втором — перейти к предложенной в настоящей работе модели, выбирая в качестве прайоров распределения, полученные на первом этапе.

В настоящей работе вероятностная модель включает в себя только локализацию источника ЭМИ, но не его ориентацию. По этой причине в качестве данных достаточно было выбрать время пика активного канала. На самом деле, как нетрудно убедиться, амплитуда сигнала меняется вдоль кольца, что, по всей видимости, связано с невертикальной ориентацией эффективного диполя разряда. Если дополнить в качестве данных D информацией не только о положении пика(ов) во времени T , но и его (их) величине A (амплитуде или суммарном сигнале), то можно сформулировать расширенную модель, в которой в качестве неизвестных параметров будут дополнительно входить и углы ориентации диполя. В настоящий момент завершается работа по детальному анализу активных сигналов всех зарегистрированных Mini-EUSO эльфов, первые результаты доступны в работе [22]. Эта работа по выявлению «морфологии

сигналов» поможет, в частности, выяснить какие из многопиковых событий являются следствием отражения от земли, а какие — проявлением сложной структуры импульса тока самого разряда [27, 30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Орбитальное «фотографирование» эльфа — способ проникнуть внутрь грозовой тучи. В этом динамическом отпечатке электрического разряда зашифрована информация о целом комплексе явлений, связанном с грозовой активностью — как во время самого молниевых разряда, так и в период, непосредственно предшествующий ему, т.е. при инициации молнии.

Детектор «УФ атмосфера» (Mini-EUSO), наблюдающий атмосферу с борта МКС, получил детальные данные более трех десятков событий типа эльф, частично или полностью попавших в его поле зрения. Впечатляет масштаб зарегистрированных событий: с учетом того, что на данный момент обработан еще далеко не весь объем данных детектора, и его работа продолжается. Вполне ожидаемо обнаружить в будущем эльф диаметром до 1000 км — возможность обнаружения эльфов столь больших размеров появилась благодаря довольно высокой чувствительности Mini-EUSO.

В настоящей работе построена вероятностная модель реконструкции эльфов, реализованная методами вероятностного программирования в PyMC. На нескольких примерах событий, зарегистрированных Mini-EUSO, показано применение байесовской реконструкции положения электрического разряда, породившего эльф, и высоты свечения. Намечены пути дальнейшего усовершенствования модели, позволяющей оценивать ориентацию разряда и структуру импульса тока в разряде, а также учитывать дополнительную информацию при отражении сигнала от поверхности земли.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа выполнена при финансовой поддержке ГК Роскосмос и при участии коллаборации JEM-EUSO. Статья подготовлена по материалам исследований, выполненных в космическом эксперименте «УФ атмосфера» на российском сегменте МКС.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Casolino M., Klimov P., Piotrowski L.* Observation of ultra high energy cosmic rays from space: Status and

perspectives // *Progress of Theoretical and Experimental Physics*. 2017. Iss. 12. Art. ID. 12A107. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptx169>

2. *Capel F., Belov A., Casolino M. et al.* Mini-EUSO: A high resolution detector for the study of terrestrial and cosmic UV emission from the International Space Station // *Advances in Space Research*. 2018. V. 62. Iss. 10. P. 2954–2965. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.08.030>
3. *Bacholle S., Barrillon P., Battisti M. et al.* Mini-EUSO mission to study Earth UV emissions on board the ISS // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2021. V. 253. Iss. 2. P. 36. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/abd93d>
4. *Capel F., Belov A., Cambiè G. et al.* Mini-EUSO data acquisition and control software // *J. Astronomical Telescopes, Instruments and Systems*. 2019. V. 5. Iss. 4. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.5.4.044009>
5. *Casolino M., Barghini D., Battisti M. et al.* Observation of night-time emissions of the Earth in the near UV range from the International Space Station with the Mini-EUSO detector // *Remote Sensing of Environment*. 2023. V. 284. Art. ID. 113336. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113336>
6. *Belov A., Bertaina M., Capel F. et al.* The integration and testing of the Mini-EUSO multi-level trigger system // *Advances in Space Research*. 2018. V. 62. Iss. 10. P. 2966–2976. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.044>
7. *Bertaina M., Barghini D., Battisti M. et al.* Description and performance results of the trigger logic of TUS and Mini-EUSO to search for Ultra-High Energy Cosmic Rays from space // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2023. V. 1045. Art. ID. 167601. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167601>
8. JEM-EUSO Collaboration Science of atmospheric phenomena with JEM-EUSO // *Experimental Astronomy*. 2015. V. 40. P. 239–251. <https://doi.org/10.1007/s10686-014-9431-0>
9. *Marcelli L., Arnone E., Barghini M. et al.* Observation of ELVES with Mini-EUSO telescope on board the International Space Station // *Proc. 37th International Cosmic Ray Conference*. 2021. <https://doi.org/10.22323/1.395.0367>
10. *Inan U.S., Bell T.F., Rodriguez J.V.* Heating and ionization of the lower ionosphere by lightning // *Geophysical Research Letters*. 1991. V. 18. Iss. 4. P. 705–708. <https://doi.org/10.1029/91GL00364>
11. *Fukunishi H., Takahashi Y., Kubota M. et al.* Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere // *Geophysical Research Letters*. 1996. V. 23. Iss. 16. P. 2157–2160. <https://doi.org/10.1029/96GL01979>
12. *Chang S.C., Kuo C.L., Lee L.J. et al.* ISUAL far-ultraviolet events, elves, and lightning current //

- J. Geophysical Research: Space Physics. 2010. V. 115. Iss. A7.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014861>
13. Newsome R.T., Inan U.S. Free-running ground-based photometric array imaging of transient luminous events // J. Geophysical Research: Space Physics. 2010. V. 115. Iss. A7.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014834>
 14. Boeck W.L., Vaughan O.Jr., Blakeslee R. et al. Lightning induced brightening in the airglow layer // Geophysical Research Letters. 1992. V. 19. Iss. 2. P. 99–102.
<https://doi.org/10.1029/91GL03168>
 15. Chern J.L., Hsu R.R., Su H.T. et al. Global survey of upper atmospheric transient luminous events on the ROCSAT-2 satellite // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2003. V. 65. Iss. 5. P. 647–659.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00317-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00317-6)
 16. Klimov P., Khrenov B., Kaznacheeva M. et al. Remote sensing of the atmosphere by the ultraviolet detector TUS onboard the Lomonosov satellite // Remote Sensing. 2019. V. 11. Iss. 20. Art. ID. 2449.
<https://doi.org/10.3390/rs11202449>
 17. Klimov P.A., Sharakin S.A., Kaznacheeva M.A. Double elves measured by the TUS space detector // Proc. Intern. Conf. Atmosphere, Ionosphere, Safety. 2020. P. 137–140.
 18. Chen A.B., Kuo C.L., Lee Y.J. et al. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events // J. Geophysical Research: Space Physics. 2008. V. 113. Iss. A8.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013101>
 19. Adashko J.G., Gurevich A. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere. Book Series. Physics and Chemistry in Space. Springer Berlin Heidelberg, 1978.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-87649-3>
 20. Taranenko Y.N., Inan U.S., Bell T.F. Interaction with the lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning: heating, attachment, and ionization // Geophysical Research Letters. 1993. V. 20. Iss. 15. P. 1539–1542.
 21. Piotrowski L.W. for the JEM-EUSO Collaboration. A search for Elves in Mini-EUSO data using CNN-based one-class classifier // Proceedings of Science. 2023. V. 444. Art. ID. 333.
<https://doi.org/10.22323/1.444.0333>
 22. Romoli G. for the JEM-EUSO Collaboration. Study of multiple ring ELVES with the Mini-EUSO telescope on-board the International Space Station // Proceedings of Science. 2023. V. 444. Art. ID. 223.
<https://doi.org/10.22323/1.444.0223>
 23. Jaynes E.T. Probability theory: The logic of science. Cambridge University Press, 2003.
 24. Sivia D.S., Skilling J. Data Analysis: A Bayesian Tutorial (Oxford science publications). Oxford University Press, 2006.
 25. Martin O. Bayesian Analysis with Python: Introduction to statistical modeling and probabilistic programming using PyMC3 and ArviZ. Packt Publishing Ltd, 2018.
 26. Inan U.S., Sampson W.A., Taranenko Y.N. Space-time structure of optical flashes and ionization changes produced by lightning-EMP // Geophysical Research Letters. 1996. V. 23. Iss. 2. P. 133–136.
<https://doi.org/10.1029/95GL03816>
 27. Marshall R.A. An improved model of the lightning electromagnetic field interaction with the D-region ionosphere // J. Geophysical Research: Space Physics. 2012. V. 117. Iss. A3.
<https://doi.org/10.1029/2011JA017408>
 28. Uman M.A. Lightning. Courier Corporation, 2012.
 29. Kaznacheeva M.A., Klimov P.A., Khrenov B.A. Transient UV background when registering EASes with the TUS orbital detector // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2019. V. 83. P. 1024–1027.
<https://doi.org/10.3103/S1062873819080173>
 30. Marshall R.A., Da Silva C.L., Pasko V.P. Elve doublets and compact intracloud discharges // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. Iss. 14. P. 6112–6119.
<https://doi.org/10.1002/2015GL064862>
 31. Smith D.A., Heavner M.J., Jacobson A.R. et al. A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records // Radio Science. 2004. V. 39. Iss. 1. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1029/2002RS002790>
 32. Nag A., Rakov V.A., Cramer J.A. Remote measurements of currents in cloud lightning discharges // IEEE transactions on electromagnetic compatibility. 2010. V. 53. Iss. 2. P. 407–413.
 33. Kostinskiy A.Y., Marshall T.C., Stolzenburg M. The mechanism of the origin and development of lightning from initiating event to initial breakdown pulses (v. 2) // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125. Iss. 22. Art. ID. e2020JD033191.
<https://doi.org/10.1029/2020JD033191>