

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО ДЕТЕКТОРА МОЛНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ЯВЛЕНИЙ

POSSIBILITY OF USING GLM DATA FOR STUDYING PLASMA PHENOMENA

А.Л. Филатов

*Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,
Москва, Россия, a.filatov@fireras.ru*

A.L. Filatov

*Fryazino Branch, Kotelnikov Institute of Radio Engineering
and Electronics RAS,
Moscow, Russia, a.filatov@fireras.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются научные и технические проблемы, связанные с расширением функциональных возможностей геостационарного детектора молний, который в настоящее время используется для метеорологического мониторинга. Проведен совместный анализ технических параметров детектора и результатов исследования резонанса Шумана. Выдвинута гипотеза о существовании пульсаций во временных зависимостях мощности оптического излучения молниевой активности на частотах, соответствующих резонансу Шумана. Обоснована возможность использования геостационарного детектора молний для исследования плазменных явлений. Показана целесообразность комплектации детектора акустооптическим фильтром и фотокамерой, имеющей функции переключения параметров разрешения/быстродействие, для эффективного использования этого дорогостоящего научного прибора в метеорологических и плазменных исследованиях.

Ключевые слова: геостационарный детектор молний, резонанс Шумана, акустооптический фильтр, высокоскоростная съемка.

Abstract. The article deals with scientific and technical problems associated with the functionality of the geostationary lightning mapper, which is currently used for meteorological monitoring. Results of the study into the Schumann resonance phenomenon and the technical parameters of the mapper were analyzed simultaneously. A hypothesis is offered which suggests that there are pulsations in the time dependences of the radiation power of lightning activity at frequencies corresponding to Schumann resonance. A new application of the geostationary lightning mapper for studying plasma phenomena is proposed. Adding to the mapper an acousto-optic filter and a camera, which has the functions of switching the resolution/frame rate parameters, is shown to be useful for both meteorological and plasma studies.

Keywords: geostationary lightning mapper, Schumann resonance, acousto-optical filter, high-speed shooting.

ВВЕДЕНИЕ

Для того чтобы эффективно использовать «новые крупные экспериментальные установки, которые не создавались в стране в последние 35–40 лет, комплексы инструментов с принципиально новыми возможностями измерений и экспериментов» [Жеребцов, 2020] необходимо оперативно, даже на заключительных этапах создания этих комплексов, не только устанавливать современные датчики, но и полноценно использовать заложенный в них потенциал. В последнее десятилетие произошла революция в технологиях изготовления элементов микросхем, которая позволила кардинально повысить быстродействие и увеличить количество элементов в оптических сенсорах. КМОП-фотоприемники (КМОП — комплементарная структура металл-оксид-полупроводник; англ. CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor) космической квалификации позволяют гибко изменять характеристики детекторов молний: повышать кадровую частоту и уменьшать кратность цифрового бинирования [Квитка,

2020]. Фотоприемники этого типа соответствуют идеологии «устройство на кристалле» и обеспечивают лучшие массогабаритные характеристики по сравнению с традиционными ПЗС-фотоприемниками [Романов, Тюлин, 2017; Гектин, 2019]. Основная цель работы — поиск незадействованных технических возможностей разрабатываемых геостационарных детекторов молний (ГДМ), которые можно использовать для исследования не изученных полностью плазменных явлений, а также в обосновании технических решений, необходимых для эффективного функционирования ГДМ.

АО «РКЦ «Прогресс» — НПП «ОПТЭКС» планирует комплектовать ГДМ сенсором современной модификации. В качестве прототипа при разработке ГДМ [Квитка и др., 2019] был выбран Геостационарный картограф молний (Geostationary Lightning Mapper, GLM [Goodman et al., 2013]), установленный NASA на спутнике GOES-16. ГДМ и GLM передают с геостационарной орбиты карту грозовой активности для исследования метеорологических явлений и прогнозов погоды.

В GLM используется камера с ПЗС-сенсором 1372×1300 пикселей и быстродействием 500 кадров/с [<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/flashy-first-images-arrive-from-noaa-s-goes-16-lightning-mapper>].

В ГДМ предполагается использовать КМОП-сенсор 1102×1102 пикселей с максимальным для такого разрешения быстродействием 1000 к/с [Квитка и др., 2019]. В космических приборах, как правило, проводится предварительная обработка данных для уменьшения передаваемого на Землю объема данных. Частично такая обработка, разработанная для детектора молний Международной космической станции, описана в [Квитка, Корх, 2018]. Находящиеся в открытом доступе данные, полученные при помощи GLM, имеют низкую дискретность кадров по сравнению с функциональным быстродействием 500 к/с камеры детектора

[<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/flashy-first-images-arrive-from-noaa-s-goes-16-lightning-mapper>].

Например, в видеокдрах грозовой активности над Миссури, полученные GOES-16 27 мая 2017 г. [<https://www.youtube.com/watch?v=DIYtIg0Q89k>], этот параметр составляет 1 к/с. С точки зрения Американского геофизического союза (AGU), такая временная дискретность кадров, по-видимому, является достаточной для метеорологических исследований, так как в поддерживаемых AGU публикациях предлагается обработка выложенных в открытый доступ файлов, имеющих именно такую временную дискретность [Bruning et al., 2019].

Видно, что три порядка быстродействия детектора утилизируется на борту картографов при предварительной обработке. Такое расточительное отношение к ценному ресурсу связано с отсутствием задач, ради которых целесообразно вносить изменения в программные решения, выполненные с учетом параметров датчиков прошлого поколения с существенно более низким быстродействием. Данные высокоскоростной съемки могут быть полезны для исследования плазменных явлений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При рассмотрении концептуального вопроса о возможности использования специализированного космического прибора для изучения явлений, не предусмотренных при его изготовлении, наиболее сложно найти и обосновать физическую проблему. Проанализируем электромагнитные волны в волноводе, состоящем из двух проводящих сфер: Земли и D-области ионосферы [Schumann, 1952]. Спектр этих волн соответствует резонансу Шумана (волны Шумана). Такие волны продолжают активно изучаться, в том числе с использованием детекторов космического базирования [Fernando, Pfaff, 2011, Prácsér, Bozóki, 2022].

Шуман предложил формулу резонансных частот такого волновода

$$f_n = \sqrt{(n(n+1))}V_{cp} / L_3 \approx 6.0\sqrt{n(n+1)}, \quad (1)$$

где n — номер гармоники резонансной частоты Шумана; V_{cp} — средняя скорость распространения электромагнитной волны, вычисление которой описано в [Sentman и др., 1995]; L_3 — длина окружности Земли. Экспериментальные исследования показы-

вают [Schlegel, Füllekrug, 2002], что основная резонансная частота составляет ~ 7.8 Гц и весь спектр волн Шумана сосредоточен в диапазоне 5–60 Гц. Одной из оболочек резонатора Шумана является ионосфера (плазма), поэтому волны Шумана полностью соответствуют приведенному выше авторскому определению плазменных явлений.

Решая задачу на собственные колебания системы Земля—ионосфера Шуман и его последователи не рассматривали источник энергии этих колебаний. Пеленгация грозových разрядов [Füllekrug, Constable, 2000] с использованием триангуляции волны Шумана однозначно указывает на взаимосвязь этих явлений. Хотя молнии постоянно присутствуют в том или ином районе Земли, есть временные интервалы между затуханием и резким увеличением амплитуды волн Шумана. Ежедневно на Земле фиксируется около 700000 молниевых разрядов [Holzworth et al., 2021], но только единицы инициируют необходимое для триангуляции увеличение амплитуды и, следовательно, энергии, волн Шумана. Поэтому изучение плазменных явлений в областях, в которых зафиксированы такие молниевые разряды, представляет интерес для фундаментальной науки.

Отмечается отсутствие информации об исследовании механизмов взаимосвязи молний и волн Шумана в работе [Schlegel, Füllekrug, 2002], а в обзоре параметров молнии [Chowdhuri et al., 2005] — о колебаниях мощности излучения молний на частотах гармоник резонанса Шумана. По мнению автора, существует тривиальный линейный механизм перераспределения энергии диапазона 5–60 Гц излучения молний в волны Шумана путем интерференции, но он, скорее всего, не является единственным. В неизвестном месте диапазона, например в оптическом диапазоне детектирования ГДМ, нельзя исключить существования нелинейности, которая может увеличить амплитуду волн Шумана и биение во временных зависимостях мощности оптического излучения зон молниевой активности на частотах, соответствующих резонансу Шумана. Кроме того, линейный механизм не объясняет редкого по сравнению с частотой всплеск молний резкого увеличения энергии волн Шумана.

Проведем анализ достаточности технических возможностей ГДМ для изучения молниевой активности в определенных триангуляцией областях. Характерным временем дискретизация при измерениях резонанса Шумана является 1/100 с [Schlegel, Füllekrug, 2002]. Согласно теореме Котельникова, дискретность кадров, необходимая для восстановления характеристик временного хода явлений, должна быть не меньше удвоенной характерной частоты. Экспериментально установлено, что основная энергия волны Шумана находится в диапазоне 5–60 Гц. Быстродействие камер GLM [<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/flashy-first-images-arrive-from-noaa-s-goes-16-lightning-mapper>] и ГДМ [Квитка и др., 2019] составляет 500 и 1000 к/с соответственно. Для предлагаемых исследований достаточно только программных доработок ГДМ, которые позволят совместную передачу метрологических данных и результатов измерений в областях, где зафиксировано аномальное возрастание ампли-

туды волн Шумана.

Ввиду отсутствия технических возможностей до сих пор не стояла задача изучения характеристик молниевой активности в областях, определенных методом триангуляции [Füllekrug, Constable, 2000] во время резкого увеличения амплитуды волн Шумана. Предлагается сохранять данные с точностью, необходимой для исследования плазменных явлений в зонах, после того как были определены их координаты. Проведение предложенной программной модернизации ГДМ даст возможность одновременного мониторинга зон повышенной молниевой активности с помощью ГДМ и нескольких детекторов волн Шумана, количество и расположение которых соответствуют выполнению задачи триангуляции. Детектирование плазменных явлений после программной модернизации ГДМ может привести к критическому возрастанию объемов информации, записываемой в накопители данных, потребует глубокой бортовой обработки снимков, так как пропускная способность спутниковых радиолиний ограничена. Поэтому предлагается дополнительное техническое решение — сохранить на орбите исходные снимки заранее определенной области до поступления информации о резком увеличении в ней амплитуды волн Шумана. Решение о необходимости повышения производительности бортового вычислителя и увеличения памяти запоминающего устройства, предназначенного для сохранения результатов измерений, можно будет сделать только после того, как станет известно время, необходимое для выполнения триангуляции и передачи информации на орбиту.

Дополняя подробно изученные модернизации ГДМ, необходимые для изучения плазменных явлений в зонах повышенной молниевой активности, приводящих к резкому увеличению амплитуды волн Шумана, кратко рассмотрим возможную аппаратную модернизацию. Ключевыми элементами ГДМ и GLM являются широкоугольный узкополосный светофильтр и высокоскоростная камера с сенсором, который имеет близкое к HD разрешение. Светофильтр, полоса пропускания которого составляет ≈ 2 нм, предназначен для выделения самого яркого триплета молнии 777.19, 777.42, 777.54 нм на фоне отраженного от облаков солнечного света. На сайте NASA [<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/flashy-first-images-arrive-from-noaa-s-goes-16-lightning-mapper>] отсутствует информация о типе используемого фильтра. В работе [Квитка и др., 2019] предлагается использовать интерференционный фильтр, который при полосе пропускания ≈ 2 нм эффективно работает только для светового потока, падающего в угле $\sim \pm 4.5^\circ$ к нормали. В работе [Квитка, Корх, 2018] приведен график смещения спектра пропускания светофильтра с $\Delta\lambda = 1.7$ нм в зависимости от угла падения света. Использование интерференционных фильтров не позволяет обеспечить наблюдение с геостационарной орбиты всей поверхности Земли, угловые размеры которой составляют $\sim \pm 8.7^\circ$.

В докладе [Филатов и др., 2020] была показана возможность использования в ГДМ акустооптических фильтров (АОФ), давно использующихся в космических исследованиях [Glenar et al., 1994, Pustovoit,

Pozhar, 1999]. В работе [Korablev et al., 2016] автор анализирует параметры 11 акустооптических спектрометров космического базирования. Новые тенденции в разработках АОФ, предназначенных для установки на космические аппараты, рассмотрены в [Yushkova et al., 2015]. В работе [Kozun et al., 2020] АОФ на базе кристалла парателлуриата TeO_2 планируется перенести с аэростата на низкоорбитальный спутник и использовать для дистанционного зондирования атмосферных аэрозолей и облаков. Заявленные параметры АОФ: спектральный диапазон 600–1500 нм; спектральное разрешение 1.5, 2.2, 7.7 нм на длинах волн 514, 633, 1152 нм соответственно; оптическая апертура 10×10 мм²; угловая апертура $4^\circ - 6^\circ$; потребляемая мощность < 3 Вт.

Экспериментально доказана техническая возможность создания АОФ с угловой апертурой $\approx \pm 7^\circ$ [Chang, 1974]. В связи с тем, что в отличие от интерференционного фильтра АОФ обладают ограниченным пространственным разрешением, были проведены теоретические исследования [Волошинов, Москера, 2006; Манцевич и др., 2020] с целью поиска условий, позволяющих получить максимальное угловое разрешение. В результате были созданы перестраиваемые АОФ [Епихин и др., 2013, Molchanov et al., 2014]. Наиболее подходящим для широкоугольного детектирования молний с геостационарной орбиты можно считать АОФ [Perchik, 2013], созданный для спектрального мониторинга поверхности океана. В спектральном диапазоне 430–780 нм предложенный фильтр обеспечивает полосу пропускания ≈ 2 нм, при этом пространственное разрешение фильтрации лучше, чем у фотодетекторной матрицы $\approx 800 \times 800$ элементов. Экспериментальные измерения показали, что угловая апертура этого АОФ составляет $\sim 8^\circ$, хотя предварительные теоретические расчеты предсказывали $\sim 3^\circ$. АОФ имеют возможность формировать сложные спектры пропускания [Филатов, 2021]. Фильтры этого типа можно использовать при проведении аппаратной модернизации ГДМ.

В описаниях ГДМ и GLM отсутствует информация об использовании в этих картографах возможности переключения режимов разрешения сенсора в зависимости от скорости съемки. Такой функционал предусмотрен в коммерческих камерах, например 1920×1088 при 3500 к/с и 1280×8 при 1008000 к/с [<https://evercam.ru/produksiya/8/942>]. Комплектация ГДМ фотокамерой, имеющей функции переключения разрешение/быстродействие, даст возможность оптимизировать соотношение пространственного и временного разрешения.

ВЫВОДЫ

1. Впервые выдвинута гипотеза о существовании пульсаций во временных зависимостях мощности оптического излучения зон молниевой активности на частотах, соответствующих резонансу Шумана.

2. Предложен одновременный мониторинг зон повышенной молниевой активности программно-модернизированным ГДМ с возможностью передачи с орбиты немодифицированных данных высокоскоростной камеры и несколькими детекторами

волн Шумана, количество и расположение которых соответствует выполнению задачи триангуляции. После определения в результате триангуляции времени и координат грозы, приведшей к резкому увеличению энергии волн Шумана, предложено исследовать особенности указанной области, используя уже переданные с орбиты или сохраненные в ГДМ данные.

3. Показано, что аппаратная модернизация ГДМ с использованием акустооптического фильтра и фотокамеры, имеющей функции переключения параметров разрешение/быстродействие, расширяет функциональные возможности прибора. Использование камер на базе КМОП-фотоприемников обеспечивает гибкость выбора целевых характеристик ГДМ.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Волошинов В.Б., Москера Х.С. Широкоапертурное акустооптическое взаимодействие в двулучепреломляющих кристаллах. *Оптика и спектроскопия*. 2006. Т. 101, № 4. С. 675.

Гектин Ю.М. Перспективные оптические системы космических систем ДЗЗ на базе МКА. *Цифровая трансформация космического приборостроения*. 2019. С. 227–239. Королев: АО ЦНИИмаш, 2019. 397 с.

Епихин В.М., Кияченко Ю.Ф., Мазур М.М. и др. Акустооптические спектрометры изображения видимого и ближнего ИК-диапазона. *Физические основы приборостроения*. 2013. Т. 2, № 4. С. 116–125.

Жеребцов Г.А. Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 6–18. DOI: [10.12737/szf-6220201](https://doi.org/10.12737/szf-6220201).

Квитка В.Е. Программно-аппаратный комплекс детектора молний космического базирования. Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2020.

Квитка В.Е., Корх А.В. Создание детектора молний для международной космической станции. *Вестник РГРТУ*. 2018. № 66-1 С. 42–49. DOI: [10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-42-49](https://doi.org/10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-42-49).

Квитка В.Е., Дюльдин Р.С., Ключников М.В., Прасолов В.О. Геоостационарный детектор молний. *17-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*: Труды. Москва, ИКИ РАН. 2019. С. 140.

Манцевич С.Н., Купрейчик М.И., Балакший В.И. Анализ характеристик широкоугольных акустооптических фильтров на основе кристалла парателлурита. XXII Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы»: Труды. СПб.: ГУАП, 2020. Ч. 1. С. 53.

Романов А.А., Тюлин А.Е. Шестой технологический уклад в космическом приборостроении. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2017. № 4. С. 64–82. DOI: [10.17238/issn2409-0239.2017.4.64](https://doi.org/10.17238/issn2409-0239.2017.4.64).

Филатов А.Л. Экспериментальное исследование многополосной акустооптической фильтрации при декодировании спектрально-кодированных сигналов в некогерентных системах OCDMA. *Письма в ЖТФ*. 2021. Т. 47, вып. 1. С. 20–22 DOI: [10.21883/PJTF.2021.01.50452.18432](https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.01.50452.18432).

Филатов А.Л., Яременко Н.Г., Карачевцева М.В. Сравнение характеристик интерференционного и акустооптического фильтров в монохромном детекторе молний космического базирования. *18-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*: Труды. Москва, ИКИ РАН. 2020. С. 128.

Bruning E.C., Tillier C.E., Edgington S.F., et al. Meteorological Imagery for the Geostationary Lightning Mapper. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2019. Vol. 124, iss. 24. P. 14285–14309. DOI: [10.1029/2019JD030874](https://doi.org/10.1029/2019JD030874).

Chang I.C. Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture. *Applied Technology. Appl. Phys. Lett.* 1974 Vol. 25. P. 370. DOI: [10.1063/1.1655512](https://doi.org/10.1063/1.1655512).

Chowdhuri P., Anderson J.G., Chisholm W.A., et al. Parameters of lightning strokes: A review. *IEEE Trans. Power Del.* 2005. Vol. 20, no. 1. P. 346–358.

Fernando S, Pfaff R., Freudenreich H. Satellite observations of Schumann resonances in the Earth's ionosphere. *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38, L22101. DOI: [10.1029/2011GL049668](https://doi.org/10.1029/2011GL049668).

Füllekrug M., Constable S. Global triangulation of intense lightning discharges. *Geophys. Res. Lett.* 2000. Vol. 27. P. 333.

Glenar D.A., Hillman J.J., Saiff B., Bergstralh J. Acousto-optic imaging spectropolarimetry for remote sensing. *Appl. Optics*. 1994. Vol. 33. P. 7412–7424.

Goodman S.J., Blakeslee R.J., Koshak W.J., et al. The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM). *Atmos. Res.* 2013. Vol. 125-126. P. 34–49. DOI: [10.1016/j.atmosres.2013.01.006](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.006).

Holzworth R.H., Brundell J.B., McCarthy M.P., et al. Lightning in the Arctic. *Geophys. Res. Lett.* 2021. Vol. 48, iss.7, e2020GL091366. DOI: [10.1029/2020GL091366](https://doi.org/10.1029/2020GL091366).

Korablev O.I., Trokhimovskiy A.Yu., Kalinnikov Yu.K. AOTF spectrometers in space missions and their imaging capabilities. *Proc. International Conference on Space Optics — ICSO 2016*. 2016. Vol. 10562, 105621M. DOI: [10.1117/12.2296244](https://doi.org/10.1117/12.2296244).

Kozun M.N., Bourassa A.E., Degenstein D.A., Loewen P.R. A multi-spectral polarimetric imager for atmospheric profiling of aerosol and thin cloud: Prototype design and sub-orbital performance. *Rev. Sci. Instruments*. 2020. Vol. 91, 103106. DOI: [10.1063/5.0016129](https://doi.org/10.1063/5.0016129).

Molchanov V.Y., Anikin S.P., Chizhikov S.I., et al. Acousto-optical imaging spectropolarimetric devices: new opportunities and developments *Conference “Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy”*. V At: Montréal, Quebec, Canada. 2014. Vol. SPIE 9147. DOI: [10.1117/12.2055150](https://doi.org/10.1117/12.2055150).

Perchik A.V. Spectral imaging AOTF spectrometer for world ocean observation. *Proc. SPIE 8888 “Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions”*. 2013, 88880P. DOI: [10.1117/12.2029173](https://doi.org/10.1117/12.2029173).

Prácsér E., Bozóki T. On the reliability of the inversion aimed to reconstruct global lightning activity based on Schumann resonance measurements. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2022. Vol. 235, 105892. DOI: [10.1016/j.jastp.2022.105892](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105892).

Pustovoit V.I., Pozhar V.E. Acousto-optical spectrometers for Earth Remote sensing. *Earth Observing Systems IV. Proc. SPIE*. 1999. Vol. SPIE 3750. P. 243–249.

Schlegel K., Füllekrug M. 50 Years of Schumann Resonance. *Physik in unserer Zeit*. 2002. Vol. 33, no. 6. P. 256–261.

Schumann W.O. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist. *Z. Naturforsch A*. 1952. Vol. 7, no. 2. P. 149.

Sentman D.D., Schumann Resonances. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*. Vol. 1. CRC Press, Boca Raton, USA, 1995. P. 267.

Yushkova K.B., Anikina S.P., Chizhikova S.I., et al. Recent advances in acousto-optical instrumentation for astronomy. *Acta Physica Polonica A*. 2015. No. 1. P. 81–83. DOI: [10.12693/APhysPolA.127.81](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.81).

URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/flashy-first-images-arrive-from-noaa-s-goes-16-lightning-mapper> (дата обращения 27 апреля 2022 г.).

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=DIYtIg0Q89k> (дата обращения 27 апреля 2022 г.).

URL: <https://evercam.ru/produksiya/8/942> (дата обращения 27 апреля 2022 г.).

Статья подготовлена по материалам Семнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 7–11 февраля 2022 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Филатов А.Л. О возможности использования данных геостационарного детектора молний для исследования плазменных явлений. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 3. С. 82–85. DOI: [10.12737/szf-83202212](https://doi.org/10.12737/szf-83202212).