

УДК 551.594:528.8

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СПЕКТР МОЛНИЙ ИЗ АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКОЙ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РЕЗОНАНСА ШУМАНА

© 2023 г. А. Л. Филатов¹, *, Л. А. Луканина¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязинский филиал,
Фрязино, Россия

*E-mail: a.filatov@fireras.su

Поступила в редакцию 12.06.2023 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 28.06.2023 г.

Изучена проблема определения низкочастотного электромагнитного спектра излучения из зон молниевой активности на основе анализа данных, полученных со скоростной кинокамеры космического базирования. Предложен новый способ получения электромагнитного спектра молний на основе гипотезы о корреляции между временными зависимостями интенсивности излучения одного и того же молниевых разряда, измеренного в оптическом и в радиодиапазонах. Обоснована необходимость проведения исследований влияния локальных молний на процессы, связанные с резонансом Шумана.

DOI: 10.31857/S0367676523702629, EDN: DDCNQY

ВВЕДЕНИЕ

Изобретатель радиосвязи А.С. Попов сперва сконструировал радиоприемник для приема электромагнитных сигналов атмосферного происхождения и только затем начал испытывать искровую передаточную радиосистему, которая явилась прототипом беспроводной телеграфии. Последователи Александра Степановича одновременно изучали использование электромагнитных волн для передачи информации и помехи от разрядов молний, которые мешают этому процессу. В результате исследований был получен и опубликован в Большой советской энциклопедии показанный на рис. 1 усредненный спектр радиоволн, излучаемых разрядом молнии [1].

В конце прошлого века было показано, что молния излучает электромагнитные волны, часть спектра которых, расположенная вблизи частот резонанса Шумана (РШ), являются не только помехой, но и индикатором глобальных климатических процессов. На рис. 2 показана иллюстрация стоячей электромагнитной волны в резонаторе Земля – ионосфера, которую в 1952 г. предложил В.О. Шуман [2]. Были экспериментально зафиксированы корреляции глобальной грозовой активности [3] и температурой в тропиках во время цикла Эль Ниньо [4] с амплитудой колебаний, находящихся вблизи основной частоты РШ ($f \approx 8$ Гц). Как известно, определить местоположение источ-

ника любого электромагнитного излучения путем триангуляции можно с точностью до длины волны, в частности на частотах РШ это точность составляет ~ 1000 км. Для моделирования влияния молниевой активности на РШ применяется ста-

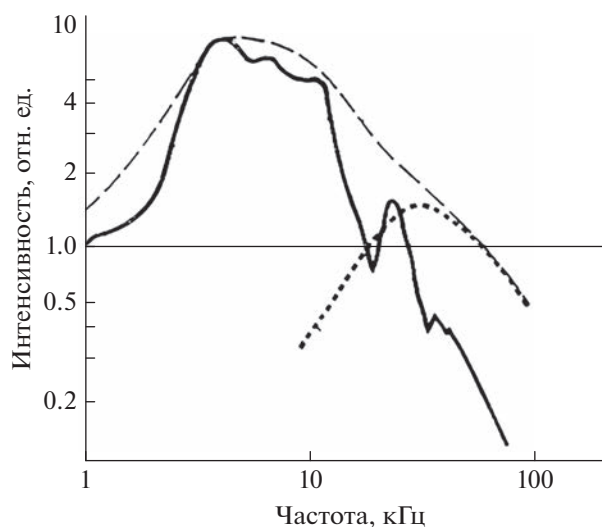


Рис. 1. Спектр радиоволн, излучаемых разрядом молнии. Сплошная линия – спектр основного разряда, точечный пунктир – спектр подразряда, штриховой пунктир – суммарный спектр.



Рис. 2. Иллюстрация стоячей электромагнитной волны в волноводе Земля–ионосфера. 1 – Земля $R \approx 6400$ км, 2 – зазор $h \approx 80$ км со слабо ионизированной атмосферой, 3 – ионосфера, 4 – символическое изображение пространственно-локализованной в зазоре (2) стоячей электромагнитной волны, узлы и пучности которой находятся в электромагнитном пространстве.

тистическое понятие глобальной молнии [5]. Частотное и пространственное распределения всех молний на Земле получают с помощью оптического картирования детекторами космического базирования [6]. Уточнение полученных данных о глобальной молнии корректируют путем восстановления глобального профиля расстояния до молнии по фоновому сигналу РШ [7].

Цель настоящей работы – проанализировать возможности перехода от исследования, которое связано с влиянием глобального молниевых процесса на явления, связанные с резонансом Шумана, к исследованию влияния отдельной, локализованной в пространстве и времени молнии, на эти процессы.

АНАЛИЗ

Искровые разряды в атмосфере отличаются по продолжительности, форме и пространственной локализации. Как известно [8, 9], молнии облако–земля могут быть нисходящими, когда разряд развивается от облака к земле, и восходящими – при развитии разряда от земли к облаку. По знаку переносимого заряда они делятся на положительные и отрицательные. Типичный разряд молнии длится

0.2 с, при этом обычно он состоит из нескольких коротких разрядов длительностью 30–50 мкс. Внутриоблачные молнии могут наблюдаться как вспышки света в облачной массе и распространяться на несколько километров, при этом их линейная длина не превышает размеров облака. Межоблачные разряды достигают в длину нескольких десятков километров, и значительную часть своего пути проходят вне облаков. Также, как и внутриоблачные разряды, они являются безэлектродными, в отличие от молний облако–земля, где в роли электрода выступает земная поверхность [8, 9]. В последнее время были открыты новые проявления молниевой активности, например спрайты, которые наблюдаются на высотах от 65 до 75 км над зонами сильной грозовой активности. Средняя частота возникновения 0.5–1 случай в минуту и длительность от 1 до 150–200 мс. Вертикальный размер порядка 50–60 км, горизонтальный – 20–30 км.

Зафиксирована корреляция между появлением редкого вида молний – спрайта и всплеска Q -типа в экспериментальных измерениях магнитной составляющей электромагнитных волн [10]. На рис. 3а показан опубликованный в [11] фрагмент измерений, содержащий квазипериодические колебания и всплеск Q -типа, а на рис. 3б – электромагнитный спектр этого всплеска, вычисленный из временной зависимости при помощи фурье-преобразования.

В лабораторных исследованиях искрового разряда [12] регистрируются радио-, оптическое, рентгеновское излучение и нейтроны. Плотность энергии излучения в различных диапазонах частот зависит от состава и давления газа среды, в которой протекает разряд. При этом временная зависимость интенсивности излучения во всех диапазонах частот в линейном приближении определяется зависимостью силы тока разряда от времени. Поэтому, представляется возможным получить спектр радиосигнала из временной зависимости интенсивности излучения, полученной в оптическом диапазоне, аналогично тому, как показано на рис. 3. Таким образом, можно вычислить приблизительный спектр радиоизлучения молнии путем фурье-преобразования от временной зависимости интенсивности оптического излучения, полученной из покадрового анализа быстрой космической съемки зон молниевой активности.

Ошибки в радиоспектре, полученном по предложенной технологии, будут возникать не только из-за наличия разных видов нелинейностей, присутствующих в разных спектральных диапазонах при преобразовании протекающего тока в излучение. Необходимо учитывать наличие нескольких параллельных каналов одной и той же молнии и излучение от нескольких молний. Например, спрайты регистрируются над зонами сильной грозовой активности [10], и в объектив камеры космического

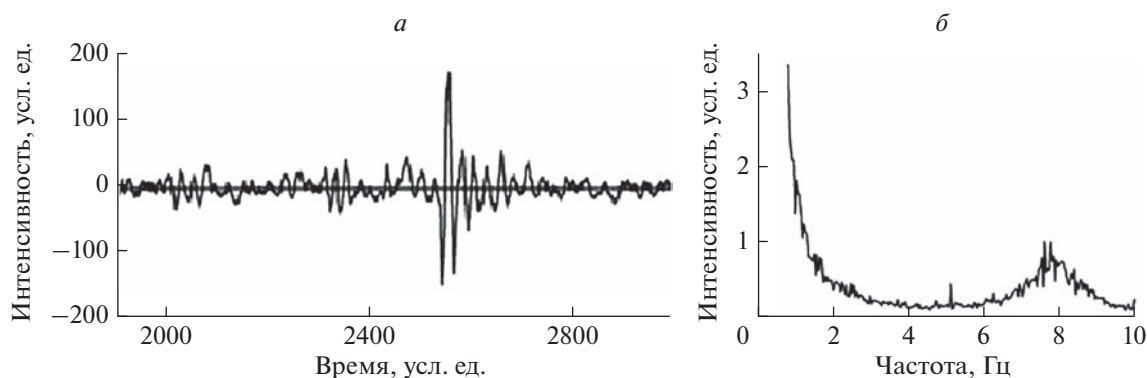


Рис. 3. Типичные временные и частотные зависимости интенсивности всплесков Q -типа.

базирования может попасть оптическое излучение одновременно и от линейной молнии, и от спрайта. В лабораторных условиях их можно было бы легко разделить спектрометрами [13], тогда как в условиях космоса целесообразно использовать акусто-оптические фильтры [14, 15].

Роскосмос планирует вывести на геостационарную орбиту детекторы молний (ГДМ), аналоги которых ранее базировались на низкоорбитальных спутниках, в том числе на Международной космической станции (МКС) [16]. NASA в рамках программы Geostationary Lightning Mapper уже разместило детекторы молний на геостационарных спутниках GOES-16 и GOES-17 [17, 18], на которых установлены кинокамеры с ПЗС матрицей (1372×1300 пикселей), обеспечивающие быстродействие 500 кадров в секунду. В соответствии с теоремой Котельникова такое быстродействие съемки достаточно для восстановления радиосигналов с рабочей полосой до 100 Гц, которая используется в национальных исследовательских центрах для круглосуточного мониторинга РШ. В России такие исследования проводятся в Томском государственном университете [19].

За время, прошедшее после разработки аппаратуры для детекторов молний космического базирования, коммерческие фирмы усовершенствовали технологии изготовления матриц оптических детекторов [20]. Например, в свободном доступе предлагается высокоскоростная камера с матрицей (2560×1920 пикселей), обеспечивающая быстродействие 2000 кадров в секунду. Длительность записи на предельном потоке сохраняется во встроенной памяти 256 ГБ и составляет почти 26 с. Продолжающийся прогресс в области разработки высокоскоростных камер и предложенный выше способ получения радиочастотного спектра, создают хорошие перспективы для использования данных скоростной космической киносъемки для исследования более высокочастотных плазменных процессов, чем резонанс Шумана [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выдвинута и обоснована гипотеза о существовании корреляции между временными зависимостями интенсивности излучения одного и того же молниевых разряда, измеренного в оптическом и радиодиапазонах. Предложено вычислять спектр радиоизлучения молний путем фурье-преобразования экспериментально измеренной временной зависимости интенсивности ее излучения в оптическом диапазоне. Функциональные возможности кинокамер, установленных на геостационарных детекторах молний, позволяют изучать плазменные явления в диапазоне частот, соответствующих резонансу Шумана.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградова М.Б. / В кн.: Большая советская энциклопедия. М.: Совет. энцикл., 1960. С. 160.
2. Schumann W.O. // Zeitschrift für Naturforschung A. 1952. V. 7. No. 3–4. P. 250.
3. Balser M., Wagner C.A. // J. Geophys. Res. 1962. V. 67. No. 2. P. 619.
4. Williams E.R. // Science. 1992. V. 256. No. 5060. P. 118.
5. Heckman S.J., Williams E., Boldi B. // J. Geophys. Res. 1989. V. 103. No. D24. P. 31775.
6. Christian H.J., Blakeslee R.J., Boccippio D.J. et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. No. D1. P. ACL 4-1.
7. Shvets A.V. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2001. V. 63. No. 10. P. 1061.
8. Бекряев В.И. Молнии, спрайты и джеты. СПб: Изд. РГГМУ, 2009. С. 96.
9. Иудин Д.И., Давыденко С.С., Готлиб В.М. и др. // УФН. 2018. Т. 188. № 5. С. 850; Iudin D.I., Davydenko S.S., Gotlib V.M. et al. // Phys. Usp. 2018. V. 61. No. 8. P. 766.
10. Guha A., Williams E., Boldi R. et al. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2017. V. 165–166. No. 25. P. 1364.

11. Пчелкин В.В., Белоглазов М.И., Васильев А.Н. и др. // Геомагн. и аэроном. 2010. Т. 50. № 5. С. 651; *Pchelkin V.V., Beloglazov M.I., Vasiliev A.N. et al.* // Geomagn. Aeron. 2010. V. 50. P. 623.
12. Агафонов А.В., Богаченков В.А., Огинов А.В. и др. // XLII Междунар. Звенигород. конф. по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2015). С. 210.
13. Филатов А.Л., Бышевский-Конопко О.А., Яременко Н.Г. и др. // ПТЭ. 2022. № 1. С. 97; *Filatov A.L., Byshovsky-Konopko O.A., Yaremenko N.G. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2022. V. 65. P. 80.
14. Филатов А.Л. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 11. С. 1654; *Filatov A.L.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. P. 1371.
15. Филатов А.Л. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 1. С. 20; *Filatov A.L.* // Tech. Phys. Lett. 2021. V. 47. No. 1. P. 16.
16. Квитка В.Е., Корх А.В. // Вестн. РГРТУ. 2018. № 66-1. С. 42.
17. <https://www.goes-r.gov/spacesegment/glm.html>.
18. *Bruning E.C., Tillier C.E., Edgington S.F. et al.* // J. Geophys. Res. 2019. V. 124. No. 24. P. 14285.
19. http://sosrff.tsu.ru/?page_id=7.
20. <https://evercam.ru/produktsiya/52/>.
21. Филатов А.Л. // Солн.-земн. физ. 2022. Т. 8. № 3. С. 18; *Filatov A.L.* // Sol.-Terr. Phys. 2022. V. 8. No. 3. P. 21.

Electromagnetic spectrum of lightning from space high-speed shooting analysis to study Schumann resonance

A. L. Filatov^a, *, L. A. Lukanina^a

^a Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Fryazino Branch, Fryazino, 141190 Russia

*e-mail: a.filatov@fireras.su

The problem of determining the low-frequency electromagnetic radiation spectrum of lightning activity zones based on the analysis of data obtained from a space-based high-speed camera is investigated. A novel method is proposed for obtaining the electromagnetic spectrum of lightning, based on the hypothesis of the correlation of the time dependences of the radiation intensity of the same lightning discharge, measured in the optical and electromagnetic ranges. The necessity of conducting studies of the influence of local lightning on the processes associated with the Schumann resonance is substantiated.