

## **Электромагнитное излучение СДВ диапазона грозовых очагов в районе Карибского бассейна**

Е.А. Коровин<sup>1</sup>, С.В. Чернышев<sup>1</sup>, Г.Г. Щукин<sup>2</sup>, И.Е. Юсупов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Военно-космическая академия имени Александра Федоровича Можайского  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13

E-mail: vka@mail.ru

<sup>2</sup> АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт»

199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, д. 41

E-mail: ggshchukin@mail.ru

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет

199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

E-mail: igor\_yusupov@mail.ru

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований электромагнитного излучения сверхдлинноволнового (СДВ) диапазона молниевых разрядов, выполненных в ходе экспедиции на океанографическом исследовательском судне «Адмирал Владимирский» в районе Карибского бассейна весной–летом 2025 г. С помощью универсального датчика мониторинга грозовой активности зарегистрировано более 2 млн атмосфериков с расстояний от нескольких десятков до нескольких тысяч километров. Рассмотрена трансформация форм атмосфериков при распространении в волноводе Земля–ионосфера. По выборке сигналов ближней зоны (50–150 км) выполнена классификация форм атмосфериков, выделены основные типы молниевых разрядов и оценено их соотношение. Показано влияние движения и качки судна на результаты определения параметров принимаемого излучения.*

*Ключевые слова: атмосферик, электромагнитное излучение молнии, СДВ диапазон, грозовая активность, волновод Земля–ионосфера, классификация форм, молниевый разряд, Карибский бассейн*

## **Electromagnetic radiation of the VLF band from thunderstorm centers in the Caribbean basin region**

E.A. Korovin<sup>1</sup>, S.V. Chernyshev<sup>1</sup>, G.G. Shchukin<sup>2</sup>, I.E. Yusupov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mozhaisky Military Space Academy.

<sup>2</sup> State Research Navigational and Hydrographic Institute.

<sup>3</sup> Saint-Petersburg State University.

*The paper presents the results of experimental studies of the very low frequency (VLF) electromagnetic radiation of lightning discharges carried out during the expedition of the oceanographic research ship “Admiral Vladimirsky” in the Caribbean basin region in the spring and summer of 2025. Using a universal thunderstorm activity monitoring sensor, more than 2 million atmosphericics were recorded at distances ranging from several tens to several thousand kilometers. The transformation of atmospheric waveforms during propagation in the Earth–ionosphere waveguide is examined. Based on a sample of near-zone signals (50–150 km), the atmospheric waveforms are classified, the main types of lightning discharges are identified, and their ratio is estimated. The influence of the ship’s motion and rolling on the determination of the parameters of the received radiation is shown.*

*Keywords: atmospheric (sferic), lightning electromagnetic radiation, VLF band, thunderstorm activity, Earth–ionosphere waveguide, waveform classification, lightning discharge, Caribbean basin*

## **Введение**

Молниевые разряды (МР) являются мощным источником импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ), значительная часть энергии которого сосредоточена в сверхдлинноволновом (СДВ) диапазоне. Формируемое разрядом излучение, регистрируемое на удалении от грозового очага, принято называть атмосфериком. Малое затухание радиоволн СДВ диапазона при распространении в волноводе Земля–ионосфера обеспечивает регистрацию атмосфериков на расстояниях, значительно превышающих прямую видимость, что лежит в основе работы пассивных радиотехнических средств мониторинга грозовой активности [1, 2].

Временная форма атмосферика несёт информацию о типе молниевых разряда (облако–земля, внутриоблачный), его полярности и параметрах тока в канале молнии. Вместе с тем, при распространении сигнала в волноводе Земля–ионосфера его форма претерпевает существенную трансформацию, обусловленную дисперсией и многократными ионосферными отражениями [3, 4]. Эта трансформация является основным источником погрешностей разностно-дальномерных систем местоопределения, поскольку приводит к нестабильности привязки момента регистрации сигнала [3]. Снижение влияния данного фактора возможно за счёт использования банка канонических форм атмосфериков и модели канала распространения [5–7].

Район Карибского бассейна характеризуется высокой и устойчивой грозовой активностью, что делает его удобным полигоном для исследования характеристик ЭМИ молниевых разрядов и пополнения банка канонических форм атмосфериков. В ходе экспедиции с 13 марта по 13 августа 2025 г. на океанографическом исследовательском судне «Адмирал Владимирский» выполнялась непрерывная регистрация атмосфериков СДВ диапазона. В настоящей работе представлены результаты обработки полученных данных: рассмотрены особенности регистрации ЭМИ в условиях морской экспедиции и результаты классификации форм сигналов ближней зоны. Методические аспекты подготовки аппаратуры и предварительные оценки точности пеленгования изложены в работе [8].

## **Аппаратура и условия проведения эксперимента**

Регистрация ЭМИ молниевых разрядов обеспечивалась универсальным датчиком мониторинга грозовой активности (далее — датчик молний, ДМ) [9], доработанным для применения в условиях морской экспедиции [8]. Датчик осуществляет приём электрической и магнитной составляющих поля атмосферика в полосе частот 300 Гц – 128 кГц с последующей дискретизацией частотой 256 тыс. выборок в секунду разрядностью 24 бита. Длина регистрируемой записи выбирается из ряда 256, 512, 1024, 2048 или 4096 отсчётов. В ходе экспедиции использовалась запись длиной 1024 отсчёта, что при длительности атмосферика, как правило, не превышающей 300 мкс, обеспечивает регистрацию сигнала с запасом и позволяет экономно расходовать память платформы сбора данных.

Для подавления помех судовых систем энергообеспечения, включая сеть частотой 400 Гц, в тракт цифровой обработки введён фильтр верхних частот с частотой среза 3 кГц с возможностью его отключения. Уровень шумов и помех в открытом море оказался достаточно низким — существенно ниже значений, характерных для наземных пунктов наблюдения, поэтому в большинстве сеансов фильтрация принимаемого сигнала не использовалась [8].

Экспедиция продолжалась с 13 марта по 13 августа 2025 г. Путь судна показан на рис. 1. Градация цвета соответствует интервалам по 30 суток (от красного к белому). В

районе Карибского бассейна, где наблюдалась наиболее интенсивная грозовая активность, судно находилось с 1 апреля по 26 июля 2025 г.



Рис. 1. Путь судна в ходе экспедиции (район Карибского бассейна выделен окружностью)

### Учёт движения и качки судна

В отличие от стационарных пунктов наблюдения, размещение ДМ на борту судна требует учёта его перемещения и пространственной ориентации. При регистрации каждого атмосферика датчик фиксирует собственные координаты, что позволяет определять текущий курс судна по двум последовательным точкам. Предыдущая точка выбирается из условия, что расстояние между положениями  $dr$  превышает заданный порог. Варьирование порога даёт возможность разделять регулярное перемещение судна и быстрые флуктуации, обусловленные качкой и погрешностью определения координат.

При малом значении порога ( $dr = 100$  м) на прямолинейном участке движения в рассчитанном курсе выделяется гармоническая составляющая с периодом около 4 минут (рис. 2), которую следует отнести к качке судна. По приближённым оценкам, отклонение судна от вертикали при сильной качке достигало  $25^\circ$ . При увеличении порога до  $dr = 10$  км гармоническая составляющая исчезает, что подтверждает её связь именно с качкой, а не с погрешностью навигационных измерений.

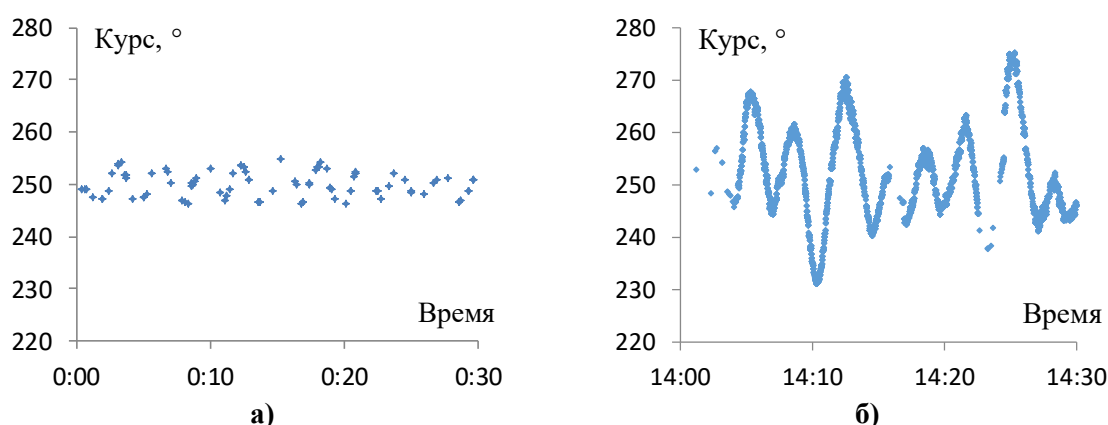


Рис. 2. Курс судна на спокойном (а) и возмущённом качкой (б) участках

Качка существенна для интерпретации результатов: наклон корпуса судна изменяет ориентацию магнитных антенн ДМ и тем самым влияет на регистрируемую магнитную составляющую атмосферика, внося поляризационные погрешности в оценку направления на молниевый разряд. Учёт этого фактора необходим как при пеленговании, так и при анализе формы магнитной компоненты сигнала.

### Формы атмосфериков и их трансформация с расстоянием

За время экспедиции зарегистрировано более 2 млн атмосфериков. Чувствительность аппаратуры оказалась достаточной для приёма ЭМИ молниевых разрядов с расстояний в несколько тысяч километров. Примеры атмосфериков, зарегистрированных с больших расстояний (электрическая составляющая  $E_z$ ), приведены на рис. 3.

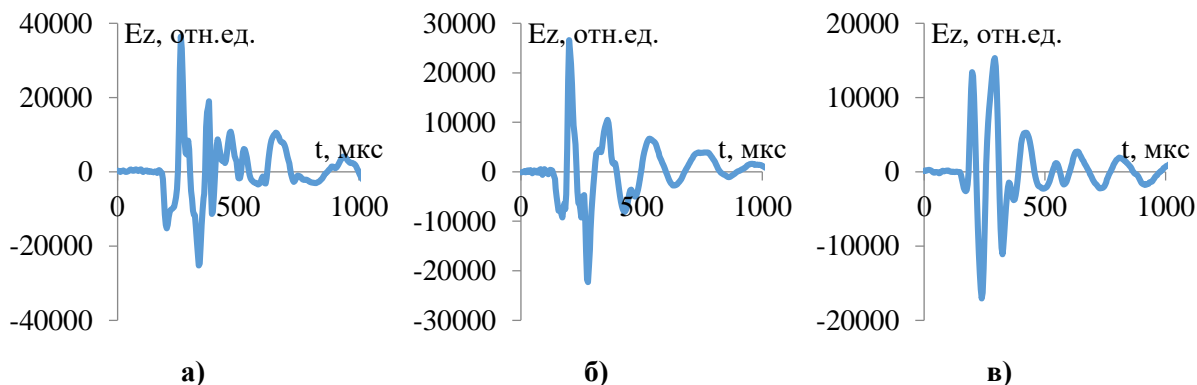


Рис. 3. Атмосферики, зарегистрированные с расстояний: а) 1000 км; б) 2000 км; в) 3000 км

С увеличением расстояния наблюдается характерное перераспределение амплитуд полуволн сигнала: амплитуда первых полуволн уменьшается, последующих — возрастает. Это обусловлено эффектами распространения радиоволн СДВ диапазона в волноводе Земля–ионосфера [3]. Практическим следствием такой трансформации является то, что при регистрации сигнала по порогу привязка момента прихода осуществляется, как правило, не по первой, а по второй или третьей полуволне. Для разностно-дальномерных систем местоопределения это приводит к погрешностям локации молниевых разрядов.

Форма сигнала, наименее искажённая эффектами распространения, регистрируется в ближней зоне. Для получения «чистого» атмосферика приём следует выполнять с расстояний 50–150 км [10]. Примеры таких сигналов приведены на рис. 4, где стрелками отмечены ионосферные отражения, не затрагивающие основное тело атмосферика. На указанных расстояниях электрическую и магнитную составляющие сигнала можно считать пропорциональными второй производной дипольного момента источника [10], что делает выборку ближней зоны наиболее пригодной для анализа форм и пополнения банка канонических форм атмосфериков.

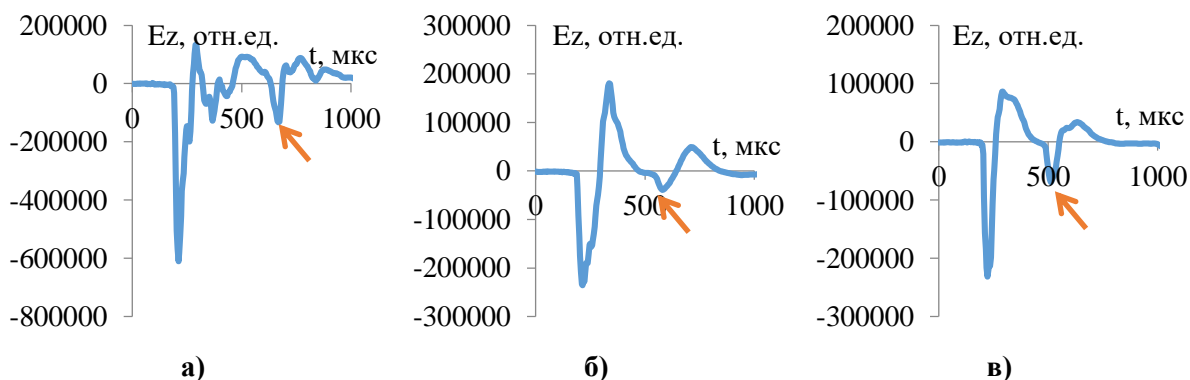
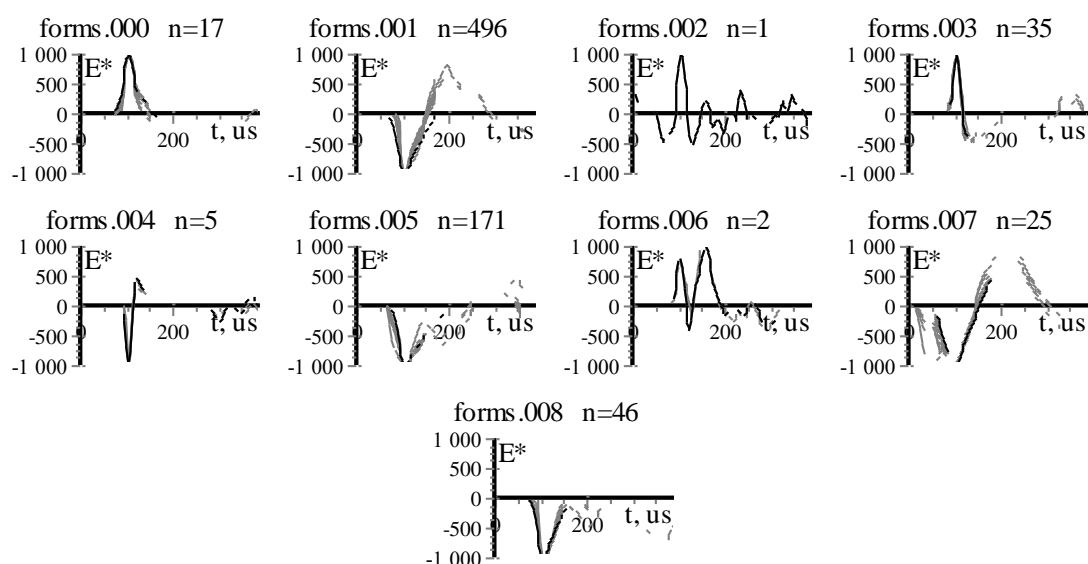


Рис. 4. Атмосферики, зарегистрированные с расстояний: а) 50 км; б) 100 км; в) 150 км  
Классификация форм атмосфериков

Для классификации использовались атмосферерики, зарегистрированные с расстояний 50–150 км, которые определялись по данным разностно-дальномерной системы Blitzortung [11]. За время нахождения судна в районе Карибского бассейна число атмосферериков в данном интервале расстояний относительно датчика молний и синхронных с регистрациями системы Blitzortung составило 795 реализаций. Классификация выполнялась по методике [7] с использованием программы [12]. В результате выделено 9 форм, из которых 6 наиболее представительных охватывают 787 реализаций (99 %). Результат классификации приведён на рис. 5.



**Рис. 5. Результат классификации форм атмосферериков (n – число реализаций в форме)**

Наиболее многочисленные формы forms.001 ( $n = 496$ ), forms.005 ( $n = 171$ ), forms.007 ( $n = 25$ ) и forms.008 ( $n = 46$ ) соответствуют разрядам типа облако–земля отрицательной полярности — суммарно 93% выборки. Разряды облако–земля положительной полярности представлены формой forms.000 ( $n = 17$ ) — около 2%. Внутриоблачные разряды положительной полярности (форма forms.003,  $n = 35$ ) составляют около 4%, отрицательной полярности (форма forms.004,  $n = 5$ ) — около 0,6%. Преобладание в выборке разрядов типа облако–земля объясняется условием синхронизации с системой Blitzortung, которая регистрирует преимущественно этот тип разрядов.

### **Заключение**

В ходе экспедиции на океанографическом исследовательском судне «Адмирал Владимирский» выполнена представительная регистрация электромагнитного излучения СДВ диапазона молниевых разрядов в районе Карибского бассейна — зарегистрировано более 2 млн атмосферериков с расстояний от нескольких десятков до нескольких тысяч километров.

По выборке сигналов ближней зоны выполнена классификация форм атмосферериков: выделено 9 форм, шесть из которых охватывают 99 % реализаций. Установлено, что в синхронной с системой Blitzortung выборке преобладают разряды типа облако–земля отрицательной полярности (93 %).

Показано, что при размещении датчика на борту судна необходим учёт его движения и качки: качка с периодом около 4 минут и отклонением корпуса от вертикали до  $25^\circ$  изменяет ориентацию магнитных антенн и влияет на регистрируемую магнитную составляющую атмосферерика.

Полученные результаты и сформированная выборка форм атмосфериков создают основу для дальнейшего исследования региональных, суточных и сезонных особенностей электромагнитного излучения грозowych очагов, а также для повышения точности систем мониторинга грозовой активности.

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №12-34-56789.*

### **Литература**

1. Кононов И.И., Юсупов И.Е. Пассивные радиотехнические методы и средства мониторинга грозовой активности // Материалы V Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018.
2. Richard P. SAFIR – an operational system for thunderstorm early localization and lightning hazard warning // Proc. 23rd ICLP. – Firenze, 1996. – P. 67–72.
3. Kononov I.I., Ivanov V.I., Krutoy D.M., Yusupov I.E. Systematic errors of middle- and long-range DTOA lightning location systems caused by propagation effects // Proc. 20th Int. Lightning Detection Conf. – Tucson, USA, 2008.
4. Kononov I.I., Ivanov V.I., Krutoy D.M., Yusupov I.E. Some features of atmospheric waveforms transformation in the process of their propagation over the Earth and its influence on the accuracy of DTOA lightning location systems // 19th Int. Lightning Detection Conf., 24–25 April 2006. – Tucson, Arizona, USA.
5. Said R.K., Inan U.S., Cummins K.L. Long-range lightning geolocation using a VLF radio atmospheric waveform bank // Journal of Geophysical Research. – 2010. – Vol. 115, D23108. doi:10.1029/2010JD013863.
6. Кононов И.И., Юсупов И.Е. Канонические волновые формы сильноточных компонент молниевых вспышек // Тезисы докладов XVI Региональной конференции по распространению радиоволн. – СПб, 2010. – С. 165–168.
7. Кононов И.И., Юсупов И.Е., Крутой Д.М. Методика и результаты формирования банков канонических форм атмосфериков // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. – 2012. – С. 131–133.
8. Коровин Е.А., Чернышев С.В., Щукин Г.Г., Юсупов И.Е. Экспериментальные исследования гроз в районе Карибского бассейна // Разработка, испытания и эксплуатация вооружения и военной техники. Военная метрология. – 2025.
9. Денисенков Д.А., Коровин Е.А. Универсальный датчик мониторинга грозовой активности // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – № 653. – С. 164–168.
10. Kononov I.I., Yusupov I.E. A simplified «engineering» return stroke model // Proc. 31st ICLP. – Vienna, Austria, 2012.
11. Network for Lightning and Thunderstorms in Real Time. – URL: <https://www.blitzortung.org>.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665798 Российская Федерация. «Программа классификации атмосфериков СДВ диапазона по типам форм» (Class) / И.И. Кононов, И.Е. Юсупов. – Оpubл. 28.11.2019.