

Обнаружение молниевых разрядов с использованием приборов напряженности электрического поля

Е.А. Коровин¹, Готюр И.А, М.В. Львова², В.В. Занюков², И.Е. Юсупов³, Г.Г. Щукин⁴

¹ Военно-космическая академия имени Александра Федоровича Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13
E-mail: evgen_korovin@mail.ru.

² Главная геофизическая обсерватория имени Александра Ивановича Воейкова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7
E-mail: rita_lvova@mail.ru.

³ Санкт-Петербургский государственный университет
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9
E-mail: igor_yusupov@mail.ru.

⁴ АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт»
199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Кожеевская линия, д. 41
E-mail: ggshchukin@mail.ru

Представлены результаты синхронной регистрации напряженности электрического поля и электромагнитного излучения молниевых разрядов в ближней зоне. Предложен алгоритм автоматической идентификации скачков электрического поля по данным прибора напряженности поля, позволивший провести сравнительный анализ вероятности обнаружений молний различными по принципу действия датчиками.

Ключевые слова: измеритель напряженности электрического поля, электрическое поле атмосферы, фазовый анализатор грозоопасности.

Detection of lightning discharges using electric field mill

Е.А. Korovin¹, М.В. Lvova², V.V. Zanyukov², I.E. Yusupov³, G.G. Shchukin⁴

¹ *Mozhaisky Military Space Academy.*

² *Main Geophysical Observatory.*

³ *Saint-Petersburg State University.*

⁴ *State Research Navigational and Hydrographic Institute.*

The results of synchronous recording of electric field intensity and electromagnetic radiation of lightning discharges in the near zone are presented. An algorithm for automatic identification of electric field surges based on field intensity device data is proposed, which allows for a comparative analysis of the probability of lightning detection by sensors with different operating principles.

Keywords: electric field mill, atmospheric electric field, phase thunderstorm analyzer.

Введение

Электрическое поле, регистрируемое у поверхности Земли в условиях «хорошей погоды», обусловлено наличием положительно заряженной в результате действия конвективных генераторов ионосферы и позволяет вести наблюдения за глобальной электрической цепью [1]. Заряды, формируемые в облаках и нарушающие условия

«хорошей погоды», в значительной степени меняют величину электрического поля, что может использоваться в целях сверхкраткосрочного прогнозирования гроз и сопутствующих опасных явлений, таких как град, ураганы, смерчи. Наблюдения за электрическим полем на космодромах позволяет реализовать своевременное выявление электрически опасных зон и предотвратить возникновение нештатных ситуаций во время пуска ракет-носителей, обусловленных инициацией молниевых разрядов при вхождении в облака [2, 3].

Молнии, нейтрализующие электрические заряды в облаках либо между облаком и Землей, также находят отражение в значениях электрического поля. Это проявляется в виде резкого скачка напряженности поля с последующей релаксацией и восстановлением в течение нескольких секунд до величины исходного значения. Выявление таких «скачков» позволяет с высокой вероятностью определить приближение опасных явлений на расстоянии до 30 км, а отдельных сильноточных разрядов до 70 км [4]. В исследовании [5] показана значительно большая эффективность обнаружения молний при использовании измерителей напряженности электрического поля, нежели классических сетей мониторинга грозовой активности.

В данной работе предложена методика анализа данных приборов электрического поля (ПНП), позволяющая автоматически идентифицировать скачки, обусловленные молниевыми разрядами (МР). Проведен совместный анализ данных приборов мониторинга грозовой активности, фиксирующих электромагнитное излучение МР в диапазоне 300 Гц – 128 кГц с данными ПНП.

Исходные данные

В качестве исходных данных в работе использованы измерения, полученные в грозовой день 30.06.2023. Гроза началась около 9 UTC на северо-востоке от г. Санкт-Петербурга и двигалась на юго-запад, пройдя через п. Воейково Ленинградской области около 10:40 UTC. На рис. 1. показаны карты метеоявлений, фиксируемых метеорологическим локатором, функционирующим в п. Воейково, через 10-минутные интервалы. Цветные точки обозначают наличие метеоявлений, черные крестики показывают положения грозовых разрядов. Положение пункта регистрации обозначено зеленым треугольником. Радиус внешней окружности составляет 100 км, внутренней – 50 км.

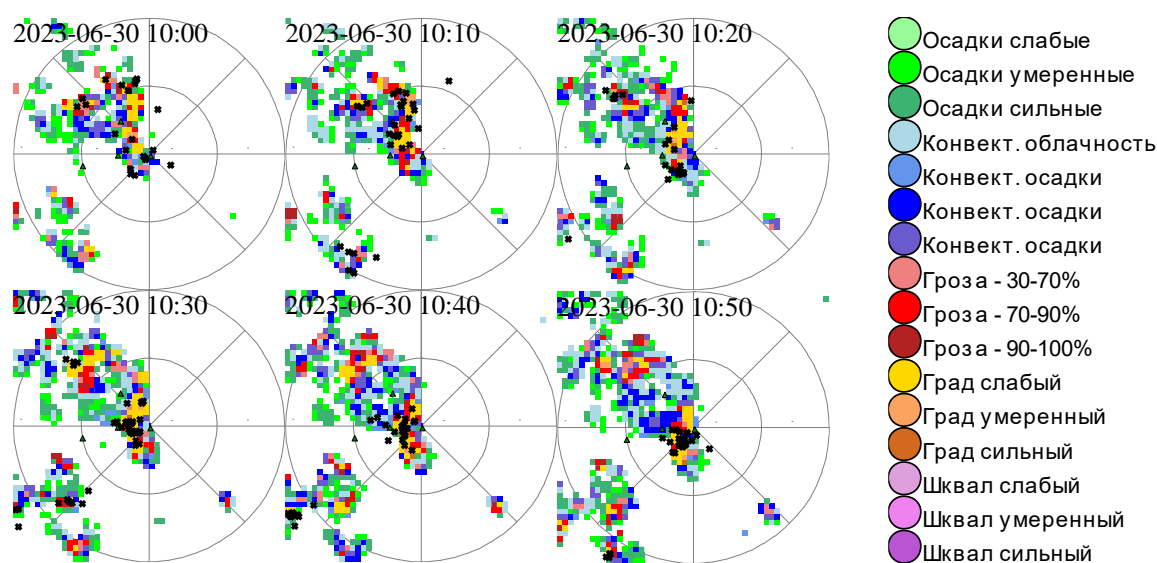


Рис. 1. Грозовая активность на фоне метеоявлений

Инструменты

Измерения напряженности атмосферного электрического поля проводились прибором напряженности поля «Рябина» [6], разработанным на кафедре геофизического обеспечения ВКА имени А.Ф. Можайского. Диапазон измеряемых значений электрического поля ± 30 кВ/м при частоте следования данных 10 значений поля в секунду (рис. 2). Напряженность электрического поля в работе прибора определяется как градиент потенциала со знаком «плюс» (так называемая конвенция знака «атмосферного электричества», когда поле хорошей погоды составляет около $+130$ В/м).

Для регистрации электромагнитного излучения МР (атмосфериков) и определения их координат использовались датчики молний: фазовый анализатор грозоопасности ФАГ-2Н [7], разработанный ООО «Цифровой Дракон», с точностью определения азимута 8° и дальности 5% (рис. 3) и универсальный датчик мониторинга грозовой активности, разработанный на кафедре геофизического обеспечения ВКА имени А.Ф. Можайского [8]. Напряженность электрического поля в этих приборах определяется как градиент потенциала, исходя из общепринятой «физической» конвенции знака. Дополнительно использовались данные о координатах МР, зарегистрированных разностно-дальномерной системой местоопределения гроз Blitzortung [9].



Рис. 2. Внешний вид ПНП «Рябина»



Рис. 3. Антенный блок ФАГ-2Н

Алгоритм идентификации МР

На фоне электрического поля (рис. 4) МР выглядят как всплески с резким возрастанием и плавным спадом амплитуды (рис. 5). Для идентификации атмосферика необходимо провести проверку на превышение порога, заданного относительно текущего значения поля. При этом градиент нарастания поля должен превышать заданную величину (200 В/м за 1 с), а абсолютное значение градиента спада не должно превышать этой величины в течение времени, определяемого временем релаксации. Применение данного алгоритма позволяет по данным ПНП определить время и амплитуду скачков напряженности электрического поля, обусловленных МР

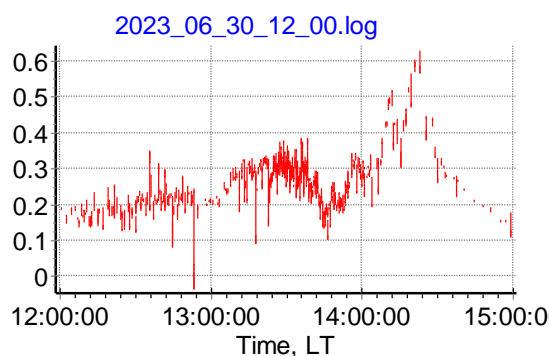


Рис. 4. Данные ПНП

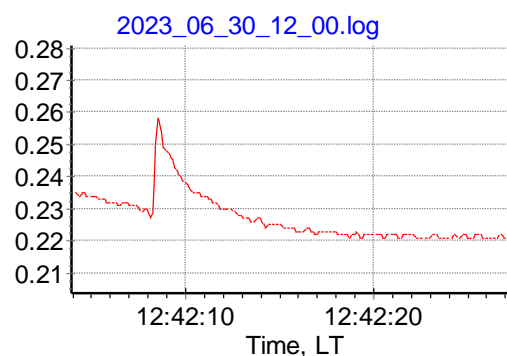


Рис. 5. Скачок напряженности поля

Для автоматической идентификации МР по данным ПНП разработано программное обеспечение, реализующее данный алгоритм. Результат работы на различных временных интервалах приведен на рис. 6. Моменты начала изменения поля обозначены зелеными точками.

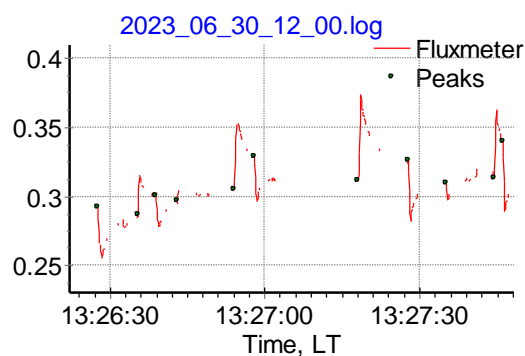
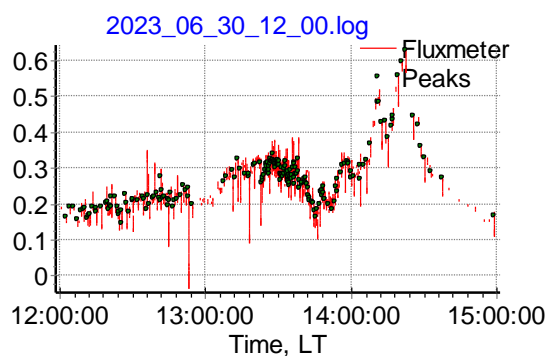


Рис. 6. Идентификация скачков поля по данным ПНП

Для синхронизации данных ПНП и датчиков молний был выполнен анализ количества синхронных событий. Для этого методом подбора временной добавки Δt , определяющей задержку данных различных приборов, был выявлен максимум количества синхронных срабатываний, указывающий на разность установки времени ПЭВМ, реализующей регистрацию данных ПНП, и времени датчиков молний, синхронизируемым по сигналам навигационных систем (рис. 8).

Анализ полученных результатов

Синхронизация данных позволила провести совместный анализ количества обнаруживаемых МР, полярности скачков электрического поля, регистрируемого ПНП и датчиками молний. На рис. 9 представлено электрическое поле (линия) и события грозоанализатора (точки на оси времени) за выбранный интервал времени с 10:26:00 по 10:27:30 (этот интервал взят авторами без всякого умысла, на других интервалах времени результат аналогичен). Номерами отмечены синхронные события, являющиеся результатом МР в грозовом очаге, расположенном на расстоянии 30...40 км к востоку от пункта регистрации (рис. 1, 2023-06-30 10:30).

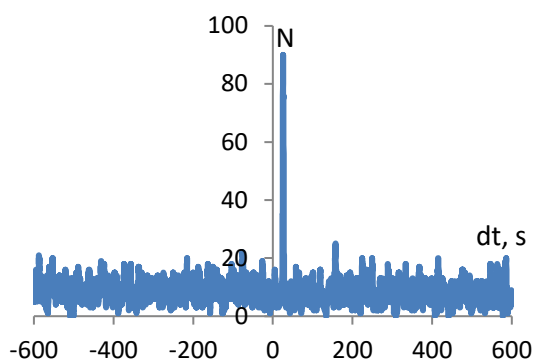


Рис. 8. Синхронизация данных приборов

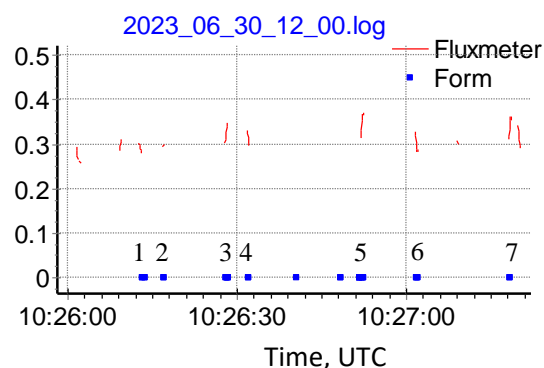


Рис. 9. Совместное представление данных ПНП (красная линия) и грозоанализатора ФАП (синие точки)

На рис. 10 приведены формы атмосфериков, регистрируемых грозоанализатором в указанные на рисунке 9 цифрами 1-7 моменты времени.

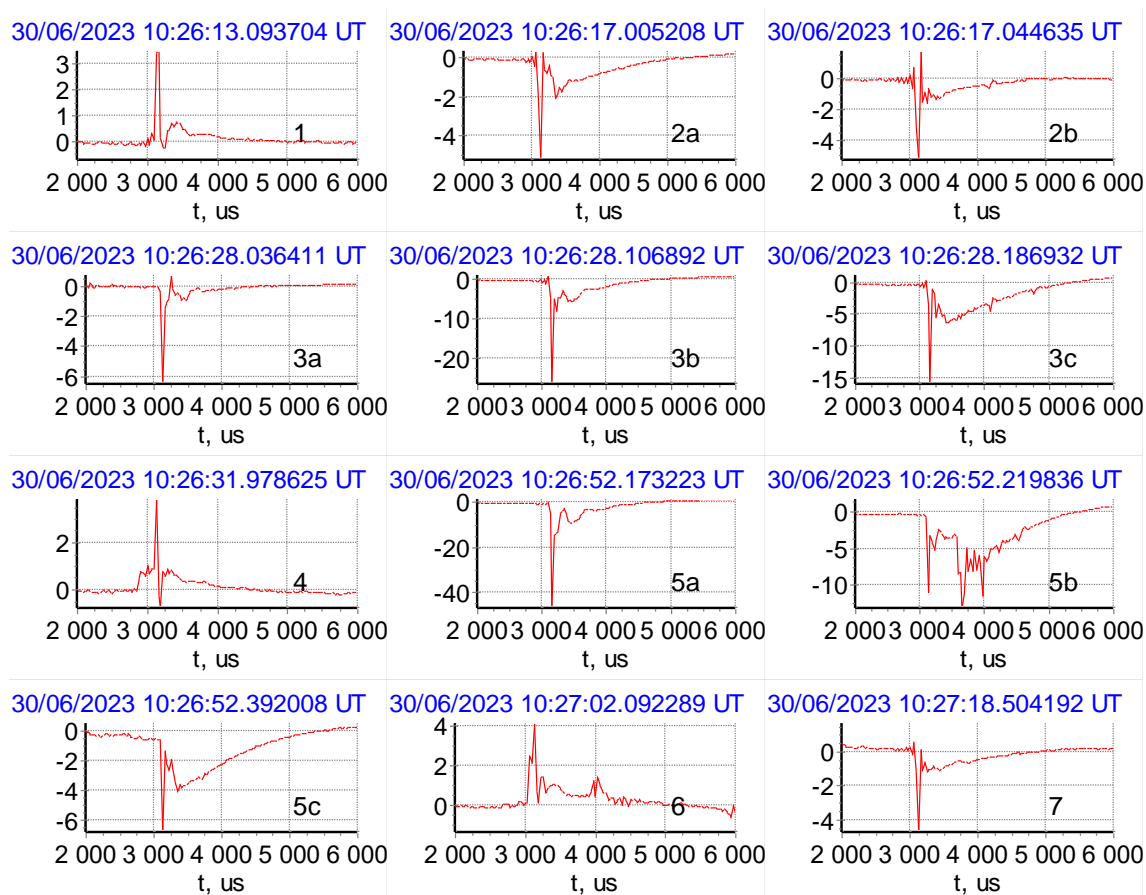


Рис. 10. Формы зарегистрированных атмосфериков

Событие 1. Наблюдается скачок на фоне электрического поля вниз. Электрическая компонента атмосферика имеет положительный знак.

Событие 2. Чуть заметный скачок электрического поля направлен вверх. Грозоанализатор зарегистрировал два разряда отрицательной полярности.

Событие 3. Скачок на фоне электрического поля вверх. Три атмосферика отрицательной полярности. До окончания релаксации, произошел следующий скачок.

Событие 4. Скачок вниз. Атмосферик положительной полярности.

Событие 5. Скачок вверх. Три атмосферика отрицательной полярности, причем первый атмосферик типа облако-земля. Определение его как разряд на землю обусловлено крутым фронтом, длительной первой полуволной и, главное, большой амплитудой, которая при пересчете на расстояние 100 км достигает значения 10 В/м.

Событие 6. Скачок вниз на фоне электрического поля и атмосферик положительной полярности.

Событие 7. Скачок вверх и отрицательный атмосферик.

Противоположность знаков синхронных скачков электрического поля, регистрируемых ПНП и грозоанализатором, представленных на рис. 9-10, определяется разными конвенциями по знаку.

Вероятность обнаружения МР определяется чувствительностью приборов. ПНП позволяет с учетом коэффициента редукации регистрировать скачки поля, превышающие значение 2 В/м. Грозоанализаторы имеют на порядки большую чувствительность, обеспечивающую регистрацию МР на расстояниях несколько тысяч километров. Для ограничения числа срабатываний в этих датчиках устанавливают порог, обеспечивающий заданную вероятность обнаружения МР в пределах рабочей зоны. При установке большого порога (низкой чувствительности) грозорегистратор может пропускать слаботочные МР, регистрируемые ПНП. Снижение порога срабатывания приводит к обратному эффекту – датчики молний обнаруживают значительно больше МР (рис. 11). В данном случае атмосферика регистрировались универсальным датчиком мониторинга грозовой активности [8] с повышенной чувствительностью.

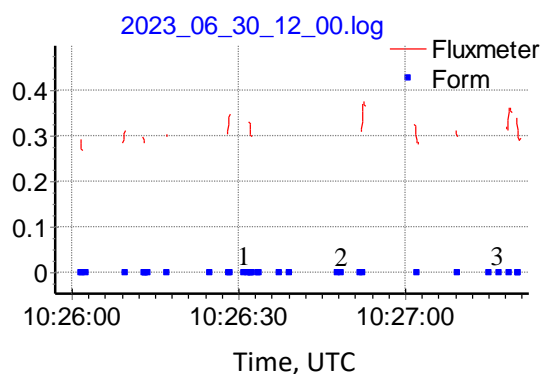


Рис. 11. Соотнесение событий регистрации МР ПНП (красная линия) и универсального датчика мониторинга грозовой активности (синие точки)

Фиксируемые в обозначенные цифрами 1-3 моменты времени формы атмосфериков представлены на (рис. 13). Данные формы соответствуют внутриоблачным разрядам, невидимым ПНП. Напомним, выборка атмосфериков, регистрируемых грозорегистратором, производилась только по грозовому очагу, расположенному на расстоянии 30...40 км к востоку от пункта регистрации. Другие срабатывания, зарегистрированные грозоанализатором и не отмеченные ПНП, получены из грозовых очагов к северу и югу от пункта регистрации.

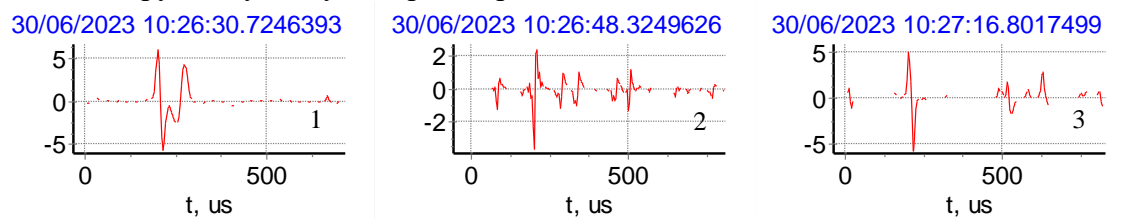


Рис. 13. Формы зарегистрированных атмосфериков

Заключение

ПНП является эффективным средством выявления в ближней (до 30...40 км) зоне электрически опасных облаков, а также позволяет наблюдать изменения поля в результате МР. Вероятность обнаружения МР, особенно разрядов внутриоблачных, у данного типа приборов, как правило, ниже в сравнении с грозоанализаторами. Обнаружение с использованием измерений ПНП большего числа МР относительно данных грозоанализаторов возможно лишь в случае принудительной установки у последних высокого порога срабатывания.

Программа для выделения атмосфериков на фоне электрического поля написана при поддержке СПбГУ, шифр проекта 124032000029-9.

Литература

1. Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // *Успехи физических наук*, 2010. – Т. 180. – № 5. – С. 527-534.
2. D. Aranguren, J. Montanyá, G. Solá, V. March, D. Romero, and H. Torres. On the lightning hazard warning using electrostatic field: Analysis of summer thunderstorms in Spain // *J. Electrostat*, 2009. – Vol. 67. – P. 507–512.
3. M.J. Murphy, R.L. Holle, and N.W.S. Demetriades. Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations // *20th International Lightning Detection Conference*. – Vaisala Inc., Tucson, AZ, U.S, 2008.
4. Korovin, E.A.; Gotyur, I.A.; Kuleshov, Y.V.; Shchukin, G.G. Lightning discharges registration by the electric field mill. *IOP Conf.Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019,698, 44047.
5. Y. P. Mikhailovsky [et al.]. The features of thunderstorm activity control by different radiophysical measuring instruments (radar, lightning detection systems, ground-based fluxmeters) // *IEEE 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP)*. – Kazan, 2019. – P. 576–579. – DOI: 10.1109/RWP.2019.8810351.
6. Коровин Е.А., Юсупов И.Е., Готюр И.А., Самойлова И.С., Щукин Г.Г. Усовершенствованный прибор напряженности электрического поля // В сборнике: *Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской открытой научной конференции*. – Муром, 2022. – С. 571-576.
7. Фазовый анализатор грозоопасности ФАГ-2Н / ООО «Цифровой Дракон». – Режим доступа: <http://www.digital-dragon.ru/products/testing-equipment/thunder-analyser>.
8. Денисенков Д.А., Коровин Е.А. Универсальный датчик системы мониторинга грозовой активности // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*, 2016. – № 653. – С. 164-168.
9. Blitzortung.org, -Режим доступа: <https://www.blitzortung.org>