

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551(501.815 + 594 + 515.3)

Об эффективности контроля электрического состояния облаков дистанционными радиофизическими средствами в ближней зоне

Ю.П. Михайловский¹, Б.Г. Зайнетдинов¹, А.А. Синькевич¹, S.D. Pawar²,
М.Л. Торопова¹, А.Б. Куров¹, V. Gopalakrishnan^{2*}

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7, Россия

² Indian Institute of Tropical Meteorology
411008, Pashan, Pune, Maharashtra, Dr. Homi Bhabha Road, India

Поступила в редакцию 25.11.2021 г.

Анализируются результаты натурных экспериментов с грозowymi облаками (северо-запад европейской территории России, Индия) в ближней зоне (удаление от флюксметра не более 50–60 км). Состояние облаков контролировалось радиолокатором ДМРЛ-С (Россия), грозопеленгационными системами Blitzortung (Россия) и MLDN (Индия) и системой наземных флюксметров. Показано, что флюксметры фиксируют существенно большее количество молний «облако – земля» в ближней зоне, чем Blitzortung и MLDN.

Ключевые слова: радиолокатор, грозопеленгатор, флюксметр, грозовое облако, прогноз опасных явлений погоды; radar, lightning direction finder, fluxmeter, thundercloud, hazardous weather forecast.

Введение

Электрические явления в облаках принадлежат к числу наиболее опасных для самолетов и различных наземных объектов. Опасность представляют как сами токи молний, так и их мощное электромагнитное излучение. Изучение эффективности систем регистрации молний актуально и практически значимо, поскольку они во многом определяют успехи исследований физики образования опасных явлений в облаках. Работ в этой области явно недостаточно, особенно российских исследователей. В результате ученые вынуждены пользоваться данными разработчиков и изготовителей грозопеленгационных систем (ГПС), которые вызывают много вопросов.

Для изучения электрических процессов в облаках в настоящее время применяются в основном дистанционные радиофизические методы и средства: самолетные, зондовые и наземные измерители напряженности электрического поля (E) (флюксметры), метеорологические радиолокаторы и различные ГПС [1–8]. С их помощью определяется перемещение грозowych очагов и оценивается «грозоопасность» мощных кучево-дождевых облаков [3, 9–13].

Каждый из методов обладает особенностями в смысле дальности, заблаговременности и эффективности обнаружения перехода облака в грозовое состояние [2, 10, 13, 14].

Выполненный ранее анализ показал, что более чем в 80% случаев поражение самолетов молниями происходило в облаках, которые не классифицировались как грозовые существующими методами [3, 10, 15]. Установлено, что сами объекты (самолеты, ракеты, вышки) могут провоцировать появление молний в таких облаках, которые вообще не дали бы разряда [10, 15]. Обнаружение подобных облаков с помощью ГПС, регистрирующих радиоизлучение молний, невозможно. Существующие вероятностно-статистические радиолокационные (р/л) критерии грозоопасности также требуют улучшения [3, 13].

Таким образом, очевидна научная и практическая необходимость в совершенствовании методов и технологий диагноза и сверхкраткосрочного прогноза (наукастинга) электрического состояния облаков как на грозовой, так и на предгрозовой стадии развития с помощью дистанционных радиофизических методов, один из которых – использование флюксметров. Эти приборы применяются во всем мире для контроля электрического состояния облаков в ближней зоне (например, для контроля электрической опасности облаков вблизи локальных объектов – аэродромов, складов пожароопасных и взрывоопасных материалов, электрических подстанций и др.). Они могут применяться как автономно, так и в составе радиотехнических комплексов, наземных, самолетных и зондовых систем [1, 4, 8, 10, 14, 16, 17].

* Юрий Павлович Михайловский (yuralych@yandex.ru); Булат Гаянович Зайнетдинов (bulatoss@yandex.ru); Андрей Александрович Синькевич (sinkevich51@mail.ru); Sunil Dnyandeo Pawar (pawar@tropmet.res.in); Марина Леонидовна Торопова (marina-toropova@mail.ru); Александр Борисович Куров (remotesensing@mail.ru); Venkatachalam Gopalakrishnan (gopal@tropmet.res.in).

Исследованию возможностей использования данных, полученных с помощью флюксометров, для определения электрического состояния облаков в ближней зоне в различных регионах (северо-запад европейской территории России и штат Махараштра, Индия) и сравнению их с радиолокационными и грозопеленгационными характеристиками облаков посвящена настоящая работа.

Используемые аппаратура и методика

В России наблюдения проводились на полевой экспериментальной базе Главной геофизической обсерватории в пос. Воейково Ленинградской обл. В пункте наблюдения установлен измеритель напряженности электрического поля атмосферы (флюксметр) «Поле-2М», входящий в атмосферно-электрическую сеть Росгидромета (далее Сеть). Согласно требованиям Сети первичный преобразователь измерителя установлен на металлической сетке размерами $1,8 \times 1,8$ м на высоте 1 м. Измерительная пластина находится на уровне сетки и обращена вверх. Диапазон измерений составляет от -10 до 10 кВ/м, значения E получают с частотой 1 Гц. [10].

На расстоянии ~ 500 м от флюксметра установлен доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона (ДМРЛ-С) [5, 10, 18]. Для анализа использовались данные о молниевой активности, получаемые ГПС Blitzortung, в радиусе 100 км от ДМРЛ-С [10, 19]. Принципы работы этой ГПС основаны на анализе времен регистрации электромагнитного излучения молнии в различных абонентских пунктах (гиперболический метод, в котором регистрируется только вертикальная составляющая E_z [10, 19]). Рассматривались случаи развития и прохождения грозовых облаков в окрестностях пос. Воейково. Дополнительным условием было отсутствие осадков в зоне флюксметра, существенно увеличивающих погрешности измерений [10].

Полный р/л обзор пространства проводится ДМРЛ-С за 10 мин. Предполагается, что за это время отражаемость облака существенно не меняется. Для каждого обзора рассчитывалось более 20 р/л параметров. Количество молний за соответствующий р/л обзор определялось по данным флюксметра и ГПС. На основе координат молний, определяемых ГПС, вычислялись расстояния от молний до флюксметра (r), и по величине скачка E в электростатическом приближении оценивался нейтрализуемый в молнии заряд. Предполагалось, что ГПС фиксировала молнии «облако – земля» (О–З). Исходя из этого, положительному скачку E соответствовала отрицательная молния О–З и наоборот. Были рассчитаны времена «восстановления» E после молний. Эти времена использовались для оценки мощности механизма генерации зарядов облака на различных стадиях. Предполагалось, что центр отрицательного заряда располагался на уровне изотермы -20 °С, положительного – на уровне -40 °С. Для анализа применялись данные об электрическом поле с секундным осреднением. Если ГПС фикси-

ровала несколько разрядов (компонент молнии) в течение секунды, по данным флюксметра они не различались.

Анализировались также результаты исследования молниевой активности в окрестности г. Пуна ($18,55^\circ$ с.ш., $73,80^\circ$ в.д.), штат Махараштра, Индия. Использовались данные флюксметра и ГПС Maharashtra Lightning Detection Network (MLDN) [16, 20–24].

Результаты комплексных натурных экспериментов

Для анализа были выбраны три облака, развивавшихся вблизи пос. Воейково: № 1 – 1.10.2016 г. с 10:40 до 12:10 (8 обзоров ДМРЛ-С), № 2 – 26.05.2016 г. с 13:45 до 15:20 (5 обзоров ДМРЛ-С), № 3 – 6.08.2018 г. с 15:10 до 17:30 (15 обзоров ДМРЛ-С). Все три облака перемещались с запада на восток севернее пос. Воейково.

На рис. 1, а представлены изменения E во время соответствующего 10-минутного р/л обзора. Обзоры нумеруются сверху вниз и слева направо, на рис. 1, б – пример проекции Z_{\max} с шестью молниями. В 11:45 зафиксированы две молнии в интервале менее секунды и с разностью удалений от ДМРЛ-С менее 2 км. Всего был зарегистрирован 21 разряд ГПС Blitzortung и 37 – флюксметром. Из 37 разрядов, зафиксированных флюксметром, 28 скачков были положительными (из них 12 совпали по времени с разрядами ГПС), а 9 – отрицательными (с ГПС совпали 6). Минимальное удаление облака (области с максимальной отражаемостью Z_{\max}) от ДМРЛ-С $R_{Z_{\max}} = 20$ км (на обзорах 5, 6 и 7) и 30 км (на обзорах 1–4, 8–10).

В районе пос. Воейково наблюдалась только исследуемая грозовая ячейка. Это дает основание предположить, что 15 разрядов, не зафиксированные ГПС, обладают особенностями, затрудняющими их регистрацию используемой системой, например являются внутриоблачными. Результаты исследований связей электрических и радиолокационных характеристик облака № 1 представлены в [10].

Молниевые разряды в облаке № 2 представлены на рис. 2. Было зафиксировано 25 разрядов флюксметром и 18 – ГПС. Из 25 разрядов, зафиксированных флюксметром, 11 были положительными (8 совпали с ГПС), а 14 – отрицательными (4 совпали с ГПС).

Минимальные удаления зоны Z_{\max} от ДМРЛ-С ($R_{Z_{\max}} = 5$ км) были зафиксированы с 14:40 до 15:20. С 13:30 по 13:50 $R_{Z_{\max}} = 25$ км, с 14:00 до 14:20 – 20 км, в 14:30 – 10 км. ГПС зафиксировала два двоянных разряда и один строенный (т.е. разряды с интервалом менее секунды), однако 11 молний, зарегистрированных флюксметром, ей не были замечены.

Наиболее подробно было исследовано облако № 3 (рис. 3). Минимальные удаления зоны Z_{\max} от ДМРЛ-С ($R_{Z_{\max}} = 10$ км) были зафиксированы на обзорах 6 и 7. На обзоре 5 $R_{Z_{\max}} = 15$ км,

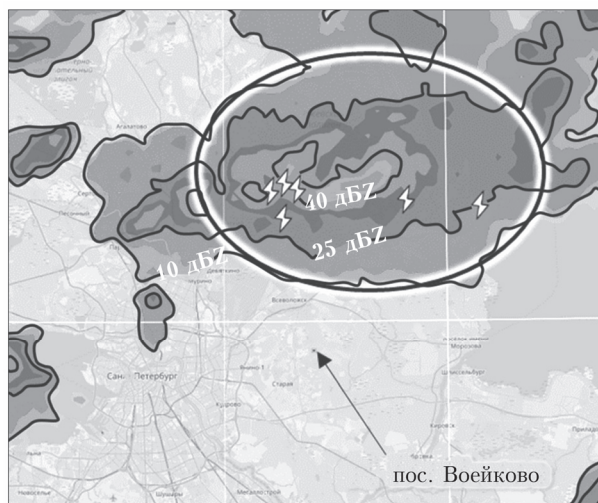
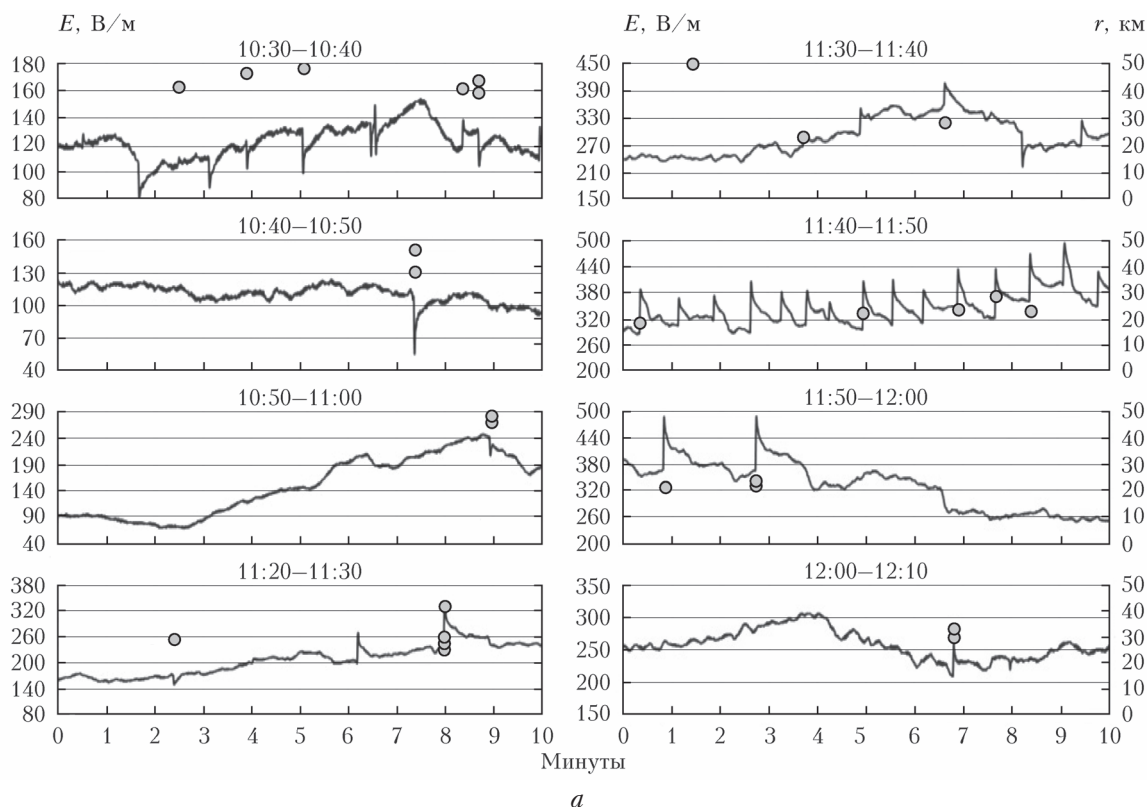


Рис. 1. Молниевые разряды, зафиксированные в облаке № 1 (1.10.2016 г.): а – флюксметром («скачок» E), ГПС Blitzortung (круглый маркер) во время 10-минутного р/л обзора; б – нанесенные на проекцию р/л отражаемости (11:40–11:50)

на обзорах 4 и 8 – 20 км, на обзорах 2, 3, 9, и 10 – 30 км, на обзорах 1, 11 и 12 – 40 км, обзорах 13 и 14 – 50 км.

Всего в облаке № 3 было зафиксировано 25 зарядов флюксметром и 9 ГПС Blitzortung. Из 25 зарядов флюксметра один скачок был положительным (совпал с ГПС), а 24 – отрицательными (4 совпали с ГПС). В 16:40 $R_{Z_{max}} = 36,5$ км. По р/л критерию грозоопасности Y [3, 18] облако классифицировалось как грозоопасное на 4 и 6–12 обзорах. В отли-

чие от результатов, полученных для облака № 2, при дальнейшем удалении начиная с расстояния 40 км флюксметры перестают регистрировать разряды, хотя, по данным ГПС, молнии в облаке продолжают до 17:00. Значения электрического поля в это время находились на уровне поля хорошей погоды (~ 100 В/м).

Отдельный интерес представляет регистрация молний флюксметром в 15:40–15:50 (3 разряда), не отмеченная ГПС. В 15:50 облако находилось

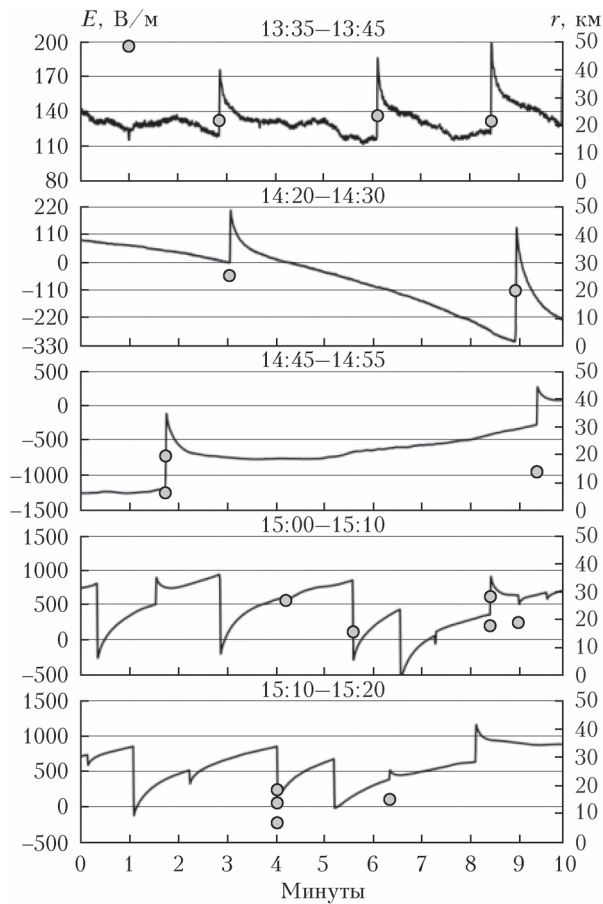


Рис. 2. Молниевые разряды, зафиксированные в облаке № 2 (26.05.2016 г.) флюксметром («скачок» E) и ГПС Blitzortung (круглый маркер)

на стадии развития, высота верхней границы составляла 6,6 км, $Z_{\max} = 59$ дБZ, интенсивность I_{\max} и поток осадков f равнялись, соответственно, 20,5 мм/ч и 28,5 кг/м², $Y = 27,9$, объем переохлажденной части с отражаемостью > 35 дБZ $dV_{35} = 15,8$ км³. Для объяснения молниевой активности мы обратили внимание на факт фиксации радиолокатором в облаке в 15:40 объемов облака с градом и с отражаемостью более 55 дБZ в переохлажденной части облака.

С 15:50 до 16:10 молнии в облаке не регистрировались ни флюксметром, ни ГПС. Во время р/л обзора 16:10–16:20 было зафиксировано 8 молний флюксметром и 4 – ГПС. Эта максимальная частота молний, по данным ГПС, наблюдалась на стадии роста облака. В дальнейшем практически все контролируемые параметры продолжали значительно увеличиваться. В частности, объем облака с градом вырос с 0,1 до 35,9 км³ к 17:10, объем с крупной высокой плотности (dV_{HDG}) – с 32,8 до 85,3 км³ к 16:50, dV_{35} – с 92 до 152,6 км³ к 17:00 и т.д. Максимальные значения наблюдались также для высоты максимальной отражаемости $H_{Z_{\max}}$ (2,9 км, на 0,5 км выше нулевой изотермы) и объема облака с крупной низкой плотности (dV_{LDG}) (39,3 км³). Тесную связь $H_{Z_{\max}}$ и dV_{LDG} с молниевой активностью мы отмечали и ранее [5, 18, 19]. При следующем р/л обзоре (с 16:20 до 16:30) флюксметры зафиксировали 11 молний, ГПС – 2, с 16:30 до 16:40 флюксметры зарегистрировали 5 молний, ГПС – 0. Удаление облака от р/л составляло ~40 км. С 16:40 до 16:50 ГПС зафиксировала 3 молнии в исследуемом облаке на удалении порядка 50 км. Флюксметр ни эти молнии, ни последующие не фиксировал.

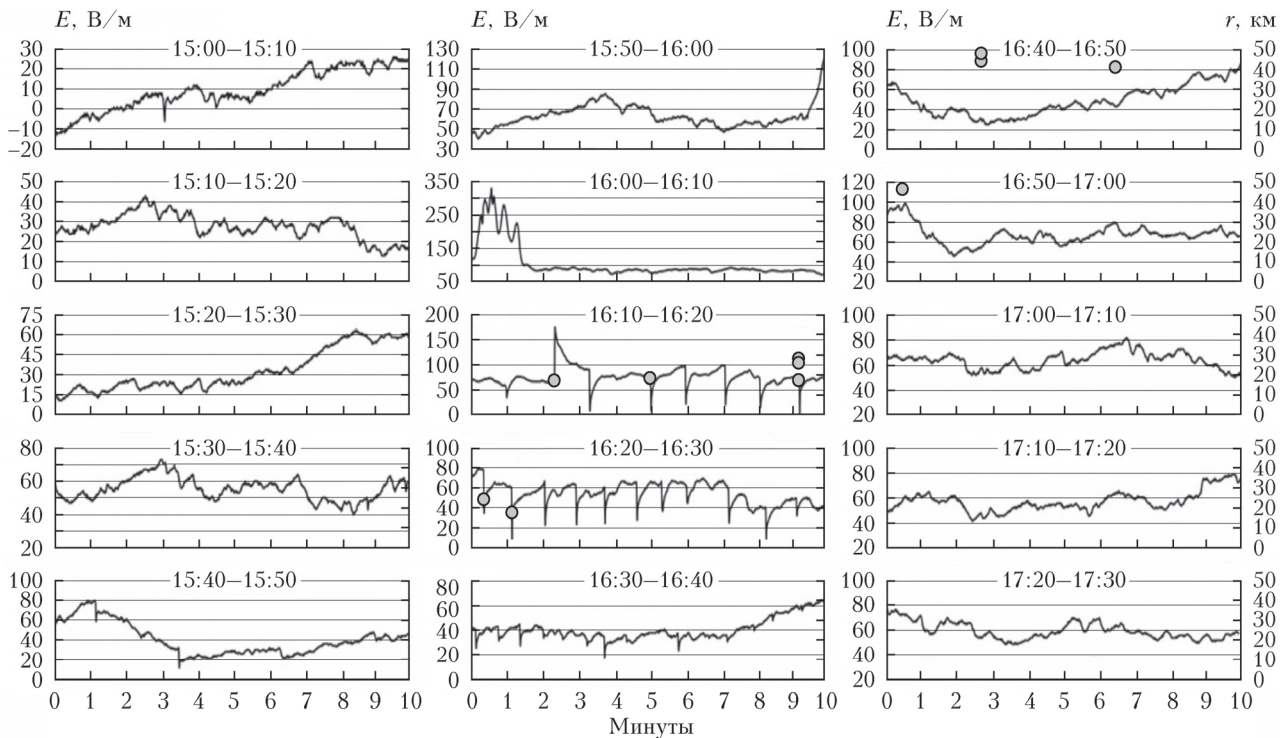


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, для облака № 3 (6.08.2018 г.)

Особенности результатов, полученных в Индии

Похожие исследования с использованием ГПС MLDN и флюксметра проводились в Индии [9, 11, 21–24]. 9 мая 2016 г. в окрестностях г. Пуна наблюдалось два случая грозы. В первом случае разряды фиксировались на протяжении чуть более чем 3 ч, с 09:40 по 13:05 (BCB), во втором с 20:40 по 21:45 (BCB). Для утренней грозы рассмотрены два получасовых события: 09:40–10:10 и 11:20–11:50. Это периоды с наибольшей грозовой активностью, значения E в месте установки флюксметра меняются в диапазоне $-2000...7000$ В/м и амплитуды скачков E достигают 4000 В/м. Случай с вечерней грозой рассмотрен в полном объеме. В таблице приведено количество разрядов по данным наземного флюксметра и зафиксированных ГПС на дистанциях $r < 10, 20, 30, 40$ и 50 км.

Видно, что при $20 < r < 50$ км для утренней грозы ГПС регистрирует значительно больше молний, чем флюксметр. Это отличается от результатов в пос. Воейково, представленных выше. Но ситуация меняется, если рассматривать отдельно молнии О–З, как показано на рис. 4.

Регистрируемые значения E (> 2000 В/м) и «скачков» E (> 4000 В/м) указывают на близость грозы. Регистрация в этих условиях $E < 100$ В/м, характерных для молний на удалении более 20 км,

затруднительна. В то же время на рис. 4 видно, что близкие и мощные молнии О–З, вызывающие скачок $E \sim 4000$ В/м, не фиксируются используемой ГПС MLDN (например, в 11:27 или в 20:45). Характер записи с 09:40 до 9:50 указывает на наличие интенсивных осадков над флюксметром.

Анализ результатов и дискуссия

При анализе полученных данных было установлено, что во всех рассмотренных случаях вблизи пос. Воейково количество молний, фиксируемых системой флюксметров, существенно превышает количество молний, регистрируемых ГПС Blitzortung.

Был проведен анализ полученных данных с целью выяснения особенностей молний, фиксируемых одновременно флюксметром и ГПС, в отличие от фиксируемых только ГПС или только флюксметром. Интерпретация случаев с фиксацией молний только ГПС не вызывает особых затруднений. В случае удара положительной или отрицательной молнии в землю величина «скачка» E определяется по закону Кулона с учетом проводимости земли. При погрешности измерений E порядка 10 В/м возможная дальность обнаружения молний по скачку поля оценивается в ~ 50 км [3, 21]. В случае внутри- или межоблачных молний это расстояние может существенно уменьшиться. Второй важный фактор эффективности флюксметра – значения E в месте измерения, которые могут достигать десятков кВ/м.

Количество разрядов, полученное в Индии флюксметром и ГПС для различных r

Временной интервал	Количество скачков E	Количество разрядов				
		$r < 10$ км	$r < 20$ км	$r < 30$ км	$r < 40$ км	$r < 50$ км
09:40–10:10	18	0	9	70	73	73
11:20–11:50	31	19	110	296	300	300
20:40–21:45	27	7	14	17	19	19

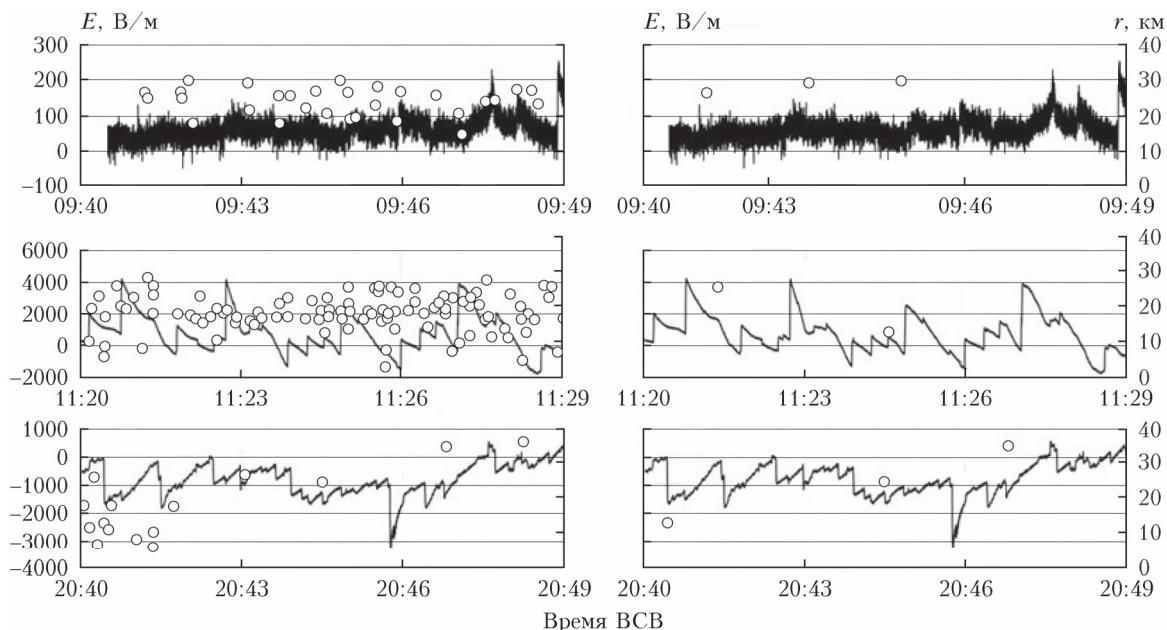


Рис. 4. Молниевые разряды, зафиксированные в Индии флюксметром («скачок» E) и ГПС MLDN (круглый маркер): слева представлены все молнии, справа – только О–З за те же периоды

Если E в месте измерения составляет несколько кВ/м, как на рис. 4, эффективный радиус флюксметра может уменьшиться. В наших экспериментах вблизи Воейково молнии, регистрируемые ГПС на удалении 40–50 км, приводили к характерным скачкам амплитудой 10–40 В/м (рис. 1 – 10:34, 10:36, 10:59) или эти скачки могли быть неразличимы (рис. 1 – 10:33, 11:31; рис. 3 – 16:43, 16:46, 16:51).

Значительно более сложны для анализа ситуации, когда молнии фиксируются только флюксметром. При этом не обнаруживаются существенные различия ни в знаках скачков E , ни в амплитудах, ни во временах релаксации по сравнению со случаями, когда разряды фиксируются и ГПС. Только часть молний, фиксируемых флюксметром, регистрируется и ГПС (рис. 1 – 11:40–11:50; рис. 2 – 15:00–15:20; рис. 3 – 16:10–16:30). Представленные результаты экспериментов свидетельствуют, что существенная часть молний из одного облака со сходными характеристиками в течение одного р/л обзора не фиксируется ГПС.

Исследования связи р/л параметров облаков с частотой молний, контролируемой флюксметром и ГПС, подтвердили основные связи электризации облака с количеством и размерами ледяных частиц, полученные в наших предыдущих исследованиях [3, 9, 11, 18, 19]. Первые молнии в облаке № 1 были зафиксированы при объеме переохлажденной части облака $dV_{35} = 128 \text{ км}^3$, критерий грозоопасности $Y = 16$. Для облака № 3 $dV_{35} = 15,8 \text{ км}^3$, $Y = 27$ и $dV_{55} \neq 0$ в переохлажденной зоне облака. При исследовании облака № 3 использовались данные поляризационного канала ДМРЛ-С, позволяющие получить оценки объемов областей с градом и крупой низкой (dV_{LDG}) и высокой (dV_{LDG}) плотности [5, 18, 19]. Отмечено совпадение максимумов этих величин и частоты молний по флюксметру во времени.

Заключение

Анализ данных флюксметров, радиолокатора и грозопеленгационных систем, полученных в различных регионах (северо-запад Европейской территории России и штат Махараштра, Индия), показал, что количество молний, фиксируемых системой флюксметров, существенно (в 5–6 раз) превышает количество молний «облако – земля», регистрируемых ГПС Blitzortung (Россия) и MLDN (Индия).

По данным экспериментов в Индии отмечено, что значительная часть молний «облако – облако» и «внутриоблачных» не фиксируется флюксметром, что соответствует особенностям фиксации таких молний флюксметром.

Проведенные исследования связей р/л параметров облаков с электрическими показали перспективность использования данных флюксметров для исследования облаков, развивающихся в ближней зоне, и подтвердили основные закономерности связей, полученных ранее по данным на основании анализа развития облаков Северного Кавказа и северо-запада европейской территории России.

Работа подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ БРИКС_т 18-55-80020.

1. Клименко В.В., Мареев Е.А., Шаталина М.В., Шлюгаев Ю.В., Соколов В.В., Булатов А.А., Денисов В.П. О статистических характеристиках электрических полей грозовых облаков в атмосфере // Изв. вузов. Радиофиз. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 864–874.
2. Кононов И.И., Юсупов И.Е., Кандарацков Н.В. Анализ однопунктовых методов пассивной локации грозового разряда // Изв. вузов. Радиофиз. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 875–888.
3. Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Павар С.Д., Гопалакришнан В., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Богданов Е.В., Куров А.Б., Аджиев А.Х., Малкарова А.М., Абшаев А.М. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков // Метеорол. и гидрол. 2017. № 6. С. 31–45.
4. Пустовалов К.Н., Нагорский П.М. Основные типы вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 8. С. 647–653. DOI: 10.15372/AOO20160805.
5. Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Матросов С.Ю., Попов В.Б., Снегуров В.С., Снегуров А.В., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е. Связь структуры конвективных облаков с частотой молний по результатам радиофизических измерений // Метеорол. и гидрол. 2019. № 6. С. 37–51.
6. Futyan J.M., Del Genio A.D. Relationships between lightning and properties of convective cloud clusters // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34, N L15705. P. 1–5. DOI: 10.1029/2007GL030227.
7. Pessi A.T., Businger S. Relationships among lightning, precipitation, and hydrometeor characteristics over the North Pacific Ocean // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2009. V. 48, N 4. P. 833–848. DOI: 10.1175/2008JAMC1817.1.
8. Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. Response in the surface atmospheric electric field to the passage of isolated air mass cumulonimbus clouds // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2018. V. 172. P. 33–39. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.03.008.
9. Синькевич А.А., Попов В.Б., Абшаев А.М., Вое В.А., Pawar S., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л. Радиолокационные характеристики конвективных облаков разных регионов при переходе в грозовую стадию // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 12. С. 932–936; Sin'kevich A.A., Popov V.B., Abshaev A.M., Voe B.A., Pawar S.D., Mikhailovskii Yu.P., Toropova M.L., Gopalakrishnan V., Gekkieva Zh.M. Radar characteristics of convective clouds during transition to the cumulonimbus stage in different regions of the world // Atmos. Ocean. Opt. 2021 V. 34, N 2. P. 134–139. DOI: 10.15372/AOO20201205.
10. Mikhailovsky Y.P., Sinkevich A.A., Zainetdinov B.G., Popov V.B. The features of thunderstorm activity control by different radiophysical measuring instruments (radar, lightning detection systems, ground-based fluxmeters) // IEEE. 2019. P. 576–579. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810351.
11. Sin'kevich A., Voe B., Pawar S., Yang J., Abshaev A., Dovgaluk Yu., Gekkieva J., Gopalakrishnan V., Kurrov A., Mikhailovskii Yu., Toropova M., Veremei N. Investigation of thundercloud features in different regions // Remote Sens. 2021. V. 16, N. 13. P. 3216. DOI: 10.3390/rs13163216.

12. Smith D.A., Eack K.B., Harlin J., Heavner M.J., Jacobson A.R., Massey R.S., Shao X.M., Wiens K.C. The Los Alamos Sferic Array: A research tool for lightning investigations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N D13. P. ACL 5-1–ACL 5-14. DOI: 10.1029/2001JD000502.
13. Степаненко В.Д., Гальперин С.М. Радиотехнические методы исследования гроз. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 204 с.
14. Jacobson A.R., Holzworth R., Harlin J., Dowden R., Lay E. Performance assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN), using the Los Alamos Sferic Array (LASA) as ground truth // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2006. V. 23, N 8. P. 1082–1092. DOI: 10.1175/JTECH1902.1.
15. Mazur V. Lightning initiation on aircraft in thunderstorm // *Proc. of the 26th Aerospace Sci. Meeting.* 1988. P. 388–391.
16. Pawar S.D., Murugavel P., Gopalakrishnan V. Anomalous electric field changes and high flash rate beneath a thunderstorm in northeast India // *J. Earth Syst. Sci.* 2010. V. 119. P. 617–625. DOI: 10.1007/s12040-010-0040-7.
17. Stolzenburg M., Marshall T.C. Charge structure and dynamics in thunderstorms // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137. P. 355–372. DOI: 10.1007/978-0-387-87664-1_23.
18. Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Попов В.Б., Старых Д.С., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е. Строение грозового облака со смерчем и зависимость частоты молний от его характеристик // *Оптика атмосфер. и океана.* 2020. Т. 33, № 9. С. 705–709; Sin'kevich A.A., Mikhailovskiy Yu.P., Toropova M.L., Popov V.B., Starykh D.S., Dovgalyuk Yu.A., Veremei N.E. Thunderstorm with waterspout structure and the dependence lightning frequency on its characteristics // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 6. P. 645–649.
19. Синькевич А.А., Попов В.Б., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Старых Д.С. Характеристики кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Ладожским озером по данным дистанционных измерений // *Оптика атмосфер. и океана.* 2020. Т. 33, № 2. С. 153–158; Sin'kevich A.A., Popov V.B., Mikhailovskiy Yu.P., Toropova M.L., Dovgalyuk Yu.A., Veremei N.E., Starykh D.S. Characteristics of cumulonimbus with waterspout over Ladoga Lake from remote measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 4. P. 387–392.
20. Annual report 2013-14 [Electronic resource] // Indian Institute of Tropical Meteorology (ИИТМ). URL: <https://www.tropmet.res.in/~lip/annual-reports/AR-English-2013-14.pdf> (last access: 23.10.2021).
21. Синькевич А.А., Бой Б., Михайловский Ю.П., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Гопалакришнан В., Мургуавел П., Павар С.Д. Исследования эффекта воздействия на мощные кучевые облака в Индии с целью увеличения осадков // *Метеорол. и гидрол.* 2018. № 4. С. 5–16.
22. Синькевич А.А., Торопова М.Л., Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Павар С., Гопалакришнан В. Особенности взаимосвязей электрических и радиолокационных параметров грозовых облаков в Индии (натурные исследования) // *Метеорол. и гидрол.* 2021. № 6. С. 99–106.
23. Gopalakrishnan V., Pawar S.D., Domkawale M. Charging processes during the dissipation stage of thunderstorms // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2021. V. 133. P. 467–478. DOI: 10.1007/s00703-020-00755-0.
24. Pawar S.V., Domkawale M.A., Pawar S.D., Salvekar P.S., Kumar P.P. Inter annual variability of tropospheric NO₂ and tropospheric ozone over Maharashtra (India): The role of lightning // *Rem. Sens. Lett.* 2017. V. 8, N 11. P. 1015–1024. DOI: 10.1080/2150704X.2017.1346398.

Yu.P. Mikhailovskii, B.G. Zainetdinov, A.A. Sin'kevich, S. D. Pawar, M.L. Toropova, A.B. Kurov, V. Gopalakrishnan. Effectiveness of monitoring the electrical state of clouds in the near zone by remote radiophysical instruments.

The results of field experiments with thunderclouds are analyzed for north-west of the Russian Federation and India. The state of the clouds was monitored by the C-band Doppler radar (Russia), the Blitzortung (Russia) and MLDN (India) lightning location network, and the ground fluxmeter system. It is shown that fluxmeters record a significantly greater number of “cloud – ground” lightning in the near zone than Blitzortung and MLDN.