

УДК 551.594

О СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ В АТМОСФЕРЕ

*В. В. Клименко*¹, *Е. А. Мареев*^{1,3}, *М. В. Шаталина*^{1,3}, *Ю. В. Шлюгаев*^{1,3}, *В. В. Соколов*²,
А. А. Булатов^{1,3}, *В. П. Денисов*¹

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Департамент Росгидромета по Приволжскому федеральному округу;

³ Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

На основе длительных наземных измерений электрического поля в разнесённых пунктах выявлен ряд особенностей спектральных характеристик возмущений поля грозовых облаков. Обнаружено значительное усиление спектральной плотности вариаций электрического поля во время грозы. Максимальное усиление, обусловленное импульсной компонентой поля, связанной с молниевыми разрядами, наблюдается в области периодов флуктуаций от десятков секунд до нескольких минут. Существенное усиление имеет место и в диапазоне $0,5 \div 1,5$ мГц (периоды $10 \div 30$ мин), где спектральная плотность увеличивается более чем в 10^4 раз, тогда как на ещё более низких частотах фактор усиления равен 100 (около 10 раз для поля). Обнаружены квазимонохроматические составляющие (с периодами $10 \div 20$ мин) в частотных спектрах флуктуаций электрического поля мощных грозовых облаков, дрейфующие по частоте на стадиях зарождения, зрелости и распада облака. Показано, что представление последовательности импульсных возмущений поля, связанных с разрядами, в виде потока импульсов с независимыми интервалами (пуассоновский поток) согласуется с формой спектра флуктуаций наблюдаемого поля и приводит к оценке 10 с для среднего времени релаксации (регенерации) поля в окрестности грозового облака после разряда.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время существенно возрос интерес к проблемам грозового электричества. Наблюдается быстрый прогресс в применении новых средств наблюдения и накоплении больших объёмов экспериментальных данных [1, 2]. Широко используются новые средства локации грозовых разрядов СДВ и УКВ диапазонов, оптические средства наблюдений с высоким пространственно-временным разрешением. Однако при этом остаётся мало исследованным ряд фундаментальных вопросов, касающихся механизмов генерации и пространственно-временных характеристик электрического поля и заряда в конвективных облаках и мезомасштабных конвективных системах с высоким уровнем молниевой активности. Некоторые из этих проблем сформулированы уже давно (см., например, [3–5]), в частности проблема инициации молниевых разрядов в поле грозового облака, существенно меньшем порога электрического пробоя в воздухе (в связи с этим широко обсуждается гипотеза о возможности кратковременных флуктуаций поля, превышающих пробойные значения) и проблема происхождения и роли так называемой стадии ENSO (ENd of Storm Oscillation) — изменения полярности наземного поля под грозовым облаком (в течение $30 \div 60$ мин) на стадии его распада. Некоторые другие проблемы были выявлены и стали предметом специальных исследований сравнительно недавно: многослойная и многоячейковая структура крупномасштабного электрического поля мощных грозовых облаков; быстрый (в течение $5 \div 10$ мин) рост электрического поля на начальной стадии электризации облака [5]; появление квазимонохроматических компонент в спектрах флуктуаций поля на низких частотах и их возможная связь с многоячейковой структурой и коллективными процессами в облаке [6–9].

Вне облака наблюдаемыми проявлениями его электрической активности являются всплески электрического поля, обусловленные молниевыми разрядами, и вариации электрического поля,

обусловленные сравнительно медленной динамикой электрического заряда в облаке. Поскольку возмущения электрического поля имеют случайный характер (поток случайных импульсов и вариации регулярной части поля), для их обработки и получения некоторых общих закономерностей применимы методы статистической радиофизики [10, 11]. Важным источником данных для такого анализа являются классические средства измерения электрического поля, в первую очередь электростатические флюксометры (см., например, [12, 13]), с учётом заметного улучшения их возможностей по частоте дискретизации и чувствительности. Следует отметить, что наряду с низкочастотными флуктуациями, обусловленными эволюцией электрифицированного облака, они дают возможность проанализировать статистические характеристики молниевых разрядов в грозовых облаках.

1. ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

В настоящей работе анализируются временные и спектральные характеристики возмущений электрического поля в окрестности грозовых облаков, в том числе с точки зрения их связи с пространственной структурой облака. Для анализа использованы данные длительных (в течение

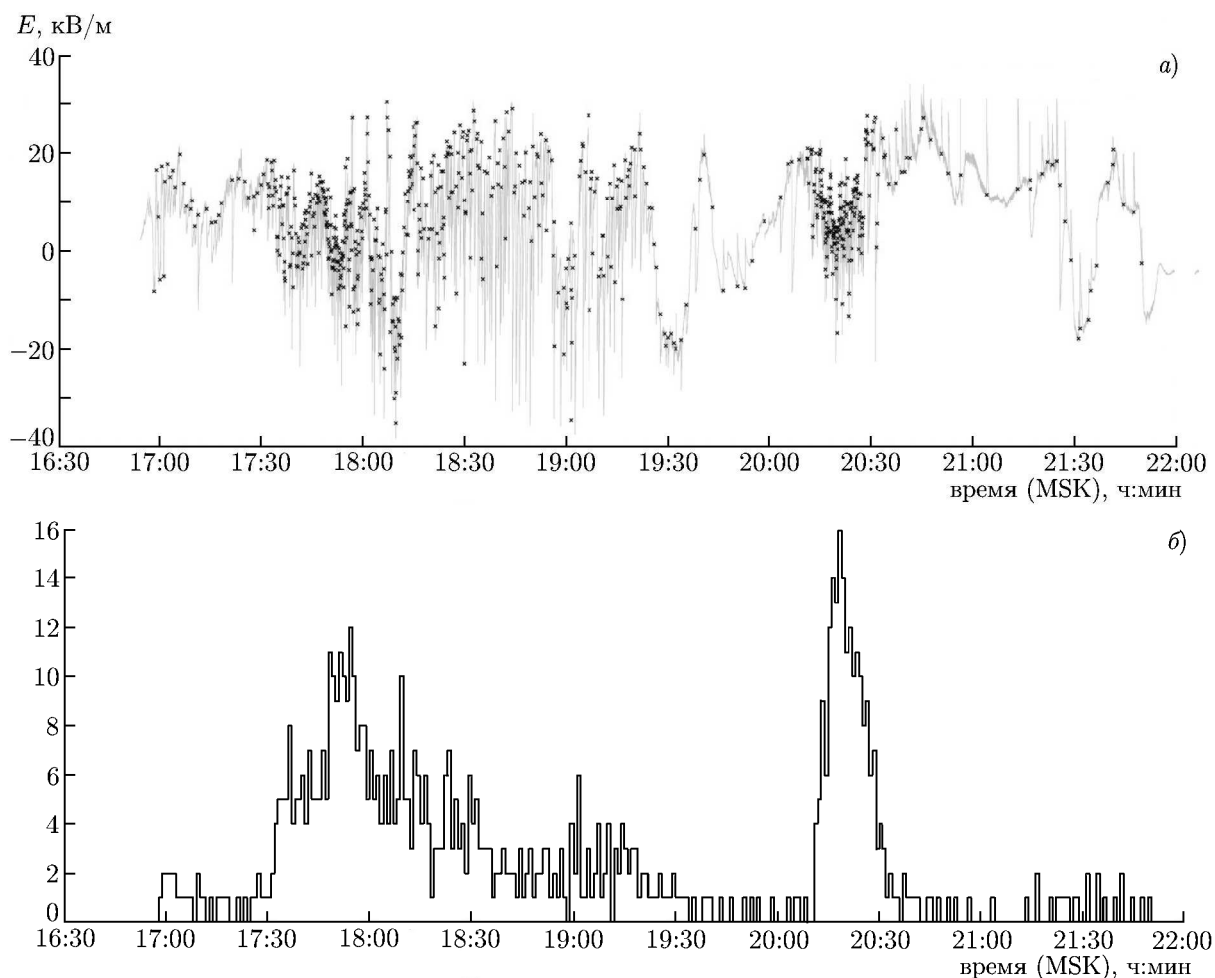


Рис. 1. Электрическое поле E во время грозового события 22 августа 2009 года (*а*; точками отмечены моменты грозовых разрядов) и количество грозовых разрядов в минуту (*б*) по данным флюксометра, установленного на крыше ИПФ РАН

конвективных сезонов 2005–2012 годов) натурных измерений электрического поля в разнесённых пунктах. Аппаратура была размещёна на территории Волжской гидрометеорологической обсерватории (г. Городец Нижегородской области), в трёх пунктах в г. Нижний Новгород — на крыше Института прикладной физики РАН, на крыше Института физики микроструктур РАН и на территории аэрологической станции «Нижний Новгород» — позволяла вести наблюдения электрического поля и тока как в невозмущённой атмосфере, так и в грозовых условиях. Электростатические флюксометры регистрировали напряжённость электрического поля в полосе частот $0 \div 10$ Гц и в диапазоне ± 50 кВ/м.

С точки зрения климатологии гроз, а также сравнительного анализа результатов наблюдений грозового электричества с метеорологическими данными большой интерес представляют непрерывные записи электрического поля. На рис. 1 приведён пример непрерывной записи вертикальной компоненты электрического поля и количества грозовых разрядов в минуту для грозового события 22 августа 2009 года. Чтобы определить моменты грозового разряда, был применён двухэтапный алгоритм в процессе цифровой обработки временной зависимости электрического поля. На первом этапе сигнал фильтровался для выделения импульсной компоненты, на втором — выделялся непосредственно разряд. Критерием разряда принималась следующая совокупность условий: 1) с момента последнего продетектированного разряда прошло более 0,8 с; 2) в течение 0,1 с до момента предполагаемого разряда крутизна временной зависимости напряжённости поля не превышала 5 кВ/(м · с); 3) в течение 0,25 с с момента предполагаемого разряда напря-

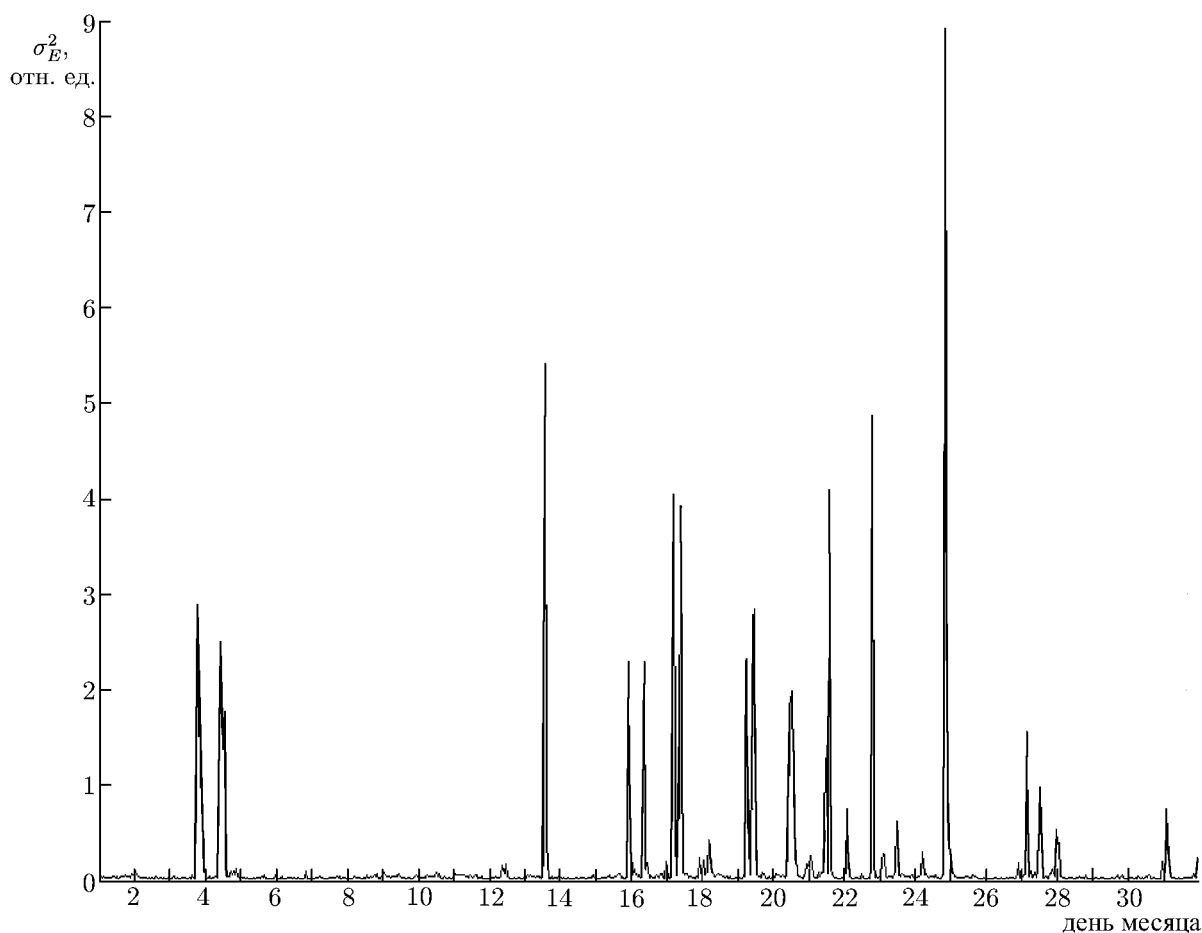


Рис. 2. Дисперсия электрического поля в июле 2012 года с часовым усреднением

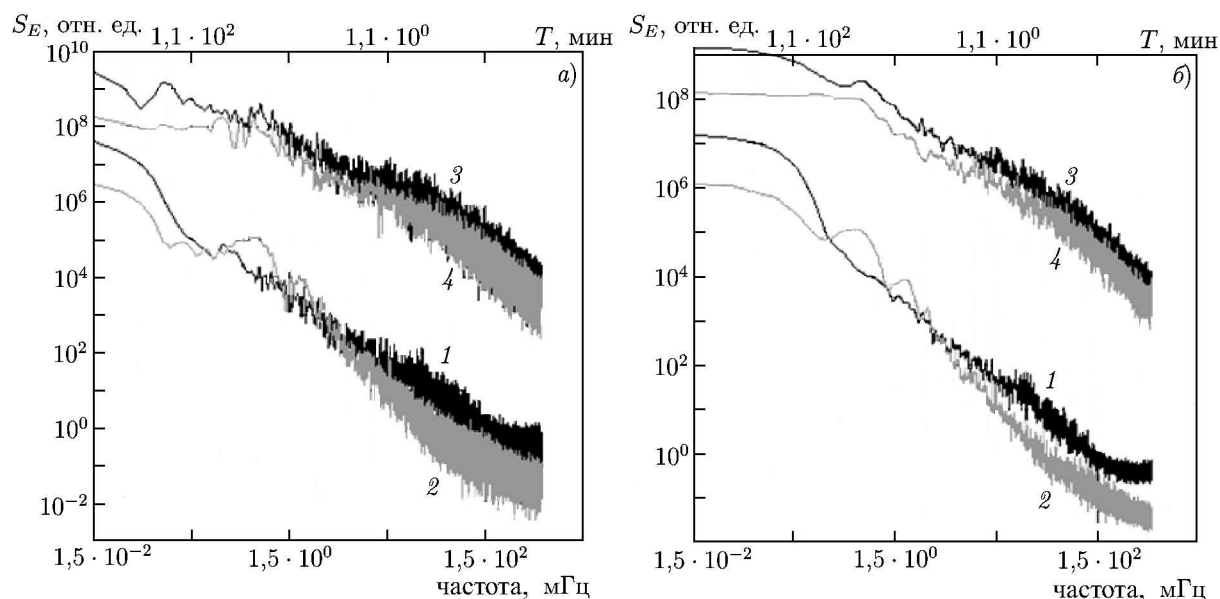


Рис. 3. (а) Усреднённые по 7 событиям лета 2009 года спектральные плотности флуктуаций электрического поля (в единицах кода аналого-цифрового преобразователя): кривые 1 соответствуют данным флюксметра на крыше ИПФ РАН; 2 и 4 — данным флюксметра на здании аэрологической станции «Нижний Новгород»; кривые 3 и 4 — спектры во время гроз, 1 и 2 — спектры в невозмущённые периоды в течение нескольких часов, предшествовавших грозам. (б) Те же спектральные плотности, сглаженные по 16 гармоникам. На верхней горизонтальной оси указан период флуктуаций

жённость поля изменялась более чем на 1,5 кВ/м. Указанные критерии варьировались в ходе экспериментов и, в частности, были верифицированы с использованием радиолокационных и грозопеленгационных данных.

В период грозовой активности усреднённое поле достигает напряжённости порядка 10 кВ/м, причём знак вертикальной компоненты поля часто меняется. Поэтому для наглядного представления статистики грозовых событий можно использовать ряды дисперсии вертикальной компоненты электрического поля с часовым усреднением. Пример такого ряда приведён на рис. 2 для непрерывной записи вертикальной компоненты электрического поля в июле 2012 года с помощью флюксметра, установленного на крыше ИПФ РАН. Интенсивные грозовые события хорошо видны в виде пиков дисперсии поля для соответствующих дат. Ряды дисперсии поля удобны для изучения региональной климатологии грозовой активности и хорошо коррелируют с наблюдательными данными по грозам.

Данные экспериментов 2005–2012 годов, позволили детально исследовать спектральные характеристики электрического поля во время грозовых событий и сравнить эти характеристики со спектрами электрического поля невозмущённой атмосферы. Приведём результаты для семи грозовых событий лета 2009 года: 11, 13 и 16 июня, 11–12 июля, 21–22 июля, 13 и 22 августа. На рис. 3 показаны усреднённые по указанным событиям спектральные плотности S_E флуктуаций электрического поля в двух пунктах. Из рисунка видно значительное усиление спектральной плотности флуктуаций поля во время грозы.

На рис. 4 показано, в какой мере усиливаются флуктуации в различных частотных диапазонах во время ближних гроз. Максимальное усиление в области от 15 мГц и выше (периоды флуктуаций $T < 1$ мин) обусловлено импульсной компонентой поля, связанной с молниевыми разрядами. Из рисунка видно, что весьма существенное усиление происходит и в диапазоне 0,5÷1,5 мГц

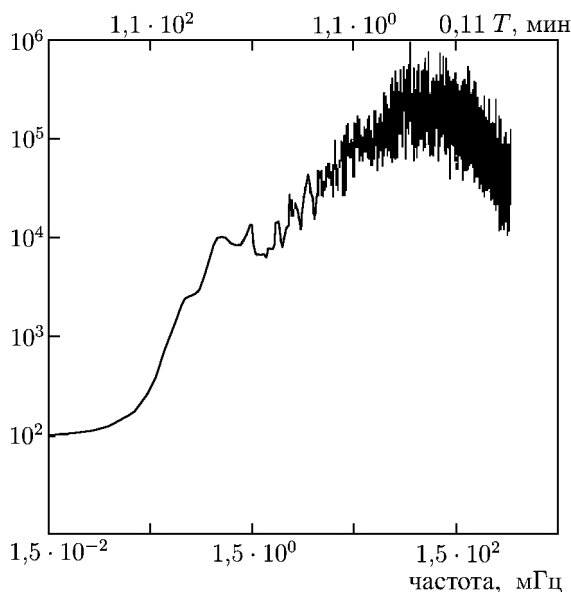


Рис. 4. Фактор усиления спектральной плотности флуктуаций электрического поля во время ближних гроз по отношению к невозмущённым периодам в течение нескольких часов, предшествовавших грозам при наличии не грозовой облачности (среднее по 7 грозам 2009 года)

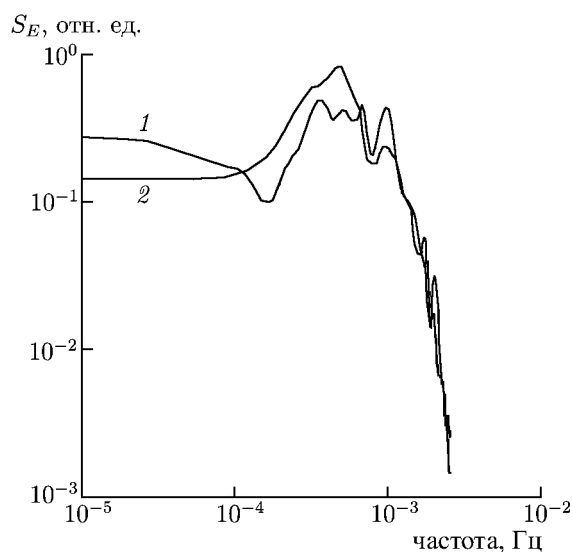


Рис. 5. Усреднённая спектральная плотность флуктуаций электрического поля в окрестности грозового облака: кривая 1 получена для 5 гроз 2005; 2 — для 10 гроз 2006 года

($T = 10 \div 30$ мин), где спектральная плотность увеличивается более чем в 10^4 раз, тогда как на самых низких частотах фактор усиления равен 100 (всего около 10 раз для поля). Этот факт подчёркивает важную роль внутриоблачных неоднородностей зарядов и их динамики в эволюции грозового облака.

Поскольку компонента электрического поля, связанная с разрядами, часто маскирует регулярную компоненту возмущения поля, целесообразно разделить их и анализировать отдельно. На рис. 5 приведены типичные усреднённые спектры регулярной компоненты электрического поля в окрестности грозовых облаков. При анализе данных использованы данные регистрации электрического поля, полученные на площадке Волжской гидрометеорологической обсерватории (г. Городец) во время летних наблюдений 2005–2006 годов. Для отделения сравнительно медленных возмущений электрического поля от импульсной компоненты, связанной с короткими ($3 \div 5$ с) скачками поля во время разрядов, исходные реализации поля усреднялись на интервалах с длительностью 100 с (12 800 отсчётов при частоте оцифровки 128 Гц). В результате такой низкочастотной фильтрации получены средние напряжённости поля со скважностью 1 значение на 100 с, т. е. максимальная частота в дальнейших спектральных оценках равна $(200 \text{ с})^{-1} = 0,005 \text{ Гц}$. Спектральная плотность возмущений для каждой грозы вычислялась методом быстрого преобразования Фурье с применением спектрального окна Блэкмана—Хэрриса (уровень боковых лепестков -74 дБ). Перед усреднением по нескольким грозам каждый спектр был нормирован на свой максимум, а результирующий средний спектр — на единичную площадь под спектральной кривой. Полученные для 15 гроз спектры приведены на рис. 5.

Можно выделить две существенные особенности полученных спектров: 1) основная доля мощности флуктуаций содержится в полосе частот с периодами менее 1 часа; 2) спектральная плотность довольно резко падает для флуктуаций с периодами короче 15 мин. Первая особенность означает, что возмущения вертикального электрического поля в окрестности грозового облака

имеют, как правило, знакопеременный характер. В результате среднее по времени (или по площади облака, если флуктуации связаны с движением облака относительно пункта измерений) поле существенно меньше, чем его амплитудные значения, а постоянная составляющая напряжённости поля под облаком оказывается всего лишь на порядок больше поля хорошей погоды (см. рис. 3 и 4). Это означает, в частности, что при усреднении на временах порядка времени жизни грозовой системы регулярный ток (обусловленный регулярным квазистационарным электрическим полем) может оказаться малым по сравнению со средним током молниевых разрядов. Данное обстоятельство необходимо учитывать при изучении проблемы баланса токов в глобальной электрической цепи, рассматривая замыкание токовой цепи в пространстве между облаком и землёй.

Вторая особенность — обрезание спектра на высоких частотах, скорее всего, связана с фильтрацией вклада мелких пространственных масштабов в результирующее поле у земной поверхности. Как показано в [14], корреляционную функцию электрического поля у земной поверхности можно записать в виде

$$\psi_E(\tau) = 4 \iint \frac{z_1 z_2 \psi_\rho(\tau, \Delta \mathbf{r})}{|\mathbf{R} + \Delta \mathbf{r}/2|^3 |\mathbf{R} - \Delta \mathbf{r}/2|^3} d\Delta \mathbf{r} d\mathbf{R},$$

где $\psi_\rho(\tau, \Delta \mathbf{r})$ — корреляционная функция плотности зарядов в облаке, $\mathbf{R}$ — расстояние до облака, $\Delta \mathbf{r}$ — взаимное относительное положение зарядов внутри облака, z_1 и z_2 — высоты зарядов над земной поверхностью, коэффициент 4 учитывает влияние проводящей земли. Если представить функцию $\psi_\rho(\tau, \Delta \mathbf{r})$ через спектральную плотность флуктуаций заряда $\Phi_\rho(\tau, \mathbf{k})$ в виде разложения по пространственным масштабам:

$$\psi_\rho(\tau, \Delta \mathbf{r}) = \int \Phi_\rho(\tau, \mathbf{k}) \exp(i\mathbf{k} \Delta \mathbf{r}) d\mathbf{k},$$

то корреляционная функция для электрического поля примет вид

$$\psi_E(\tau) = 4 \int \Phi_\rho(\tau, \mathbf{k}) G(\mathbf{k}) d\mathbf{k},$$

где

$$G(\mathbf{k}) = \iint \frac{z_1 z_2 \exp(i\mathbf{k} \Delta \mathbf{r})}{|\mathbf{R} + \Delta \mathbf{r}/2|^3 |\mathbf{R} - \Delta \mathbf{r}/2|^3} d\Delta \mathbf{r} d\mathbf{R}.$$

Здесь функция $G(\mathbf{k})$ играет роль низкочастотного фильтра пространственных частот. Частотная характеристика этого фильтра зависит от геометрии облака и расстояния от него до точки наблюдения и может быть вычислена для некоторых простых или предельных случаев. В частности, для достаточно больших расстояний $R \gg L \geq |\Delta \mathbf{r}|$, где L — линейный размер облака, частотная характеристика пространственного фильтра имеет «полосу пропускания» $k \leq 2\pi/L$, т. е. вклад в электрическое поле на большом расстоянии дают неоднородности заряда, соизмеримые с размером самого облака. Экспериментально это проявляется в более низкочастотном спектре полей удалённых гроз. Для ближних гроз также происходит место низкочастотная фильтрация вклада мелкомасштабных структур, которая обрезает спектр на высоких частотах.

В отличие от средней картины, каждой грозе присущи свои индивидуальные особенности, в частности наличие в частотных спектрах одной или нескольких квазипериодических компонент. На рис. 6 и 7 приведены примеры динамических спектров флуктуаций поля двух таких гроз. Динамические спектры получены с помощью скользящего временного окна. На рис. 6 отчётливо видно развитие квазипериодического колебания поля в диапазоне периодов от 7 до 30 мин. На

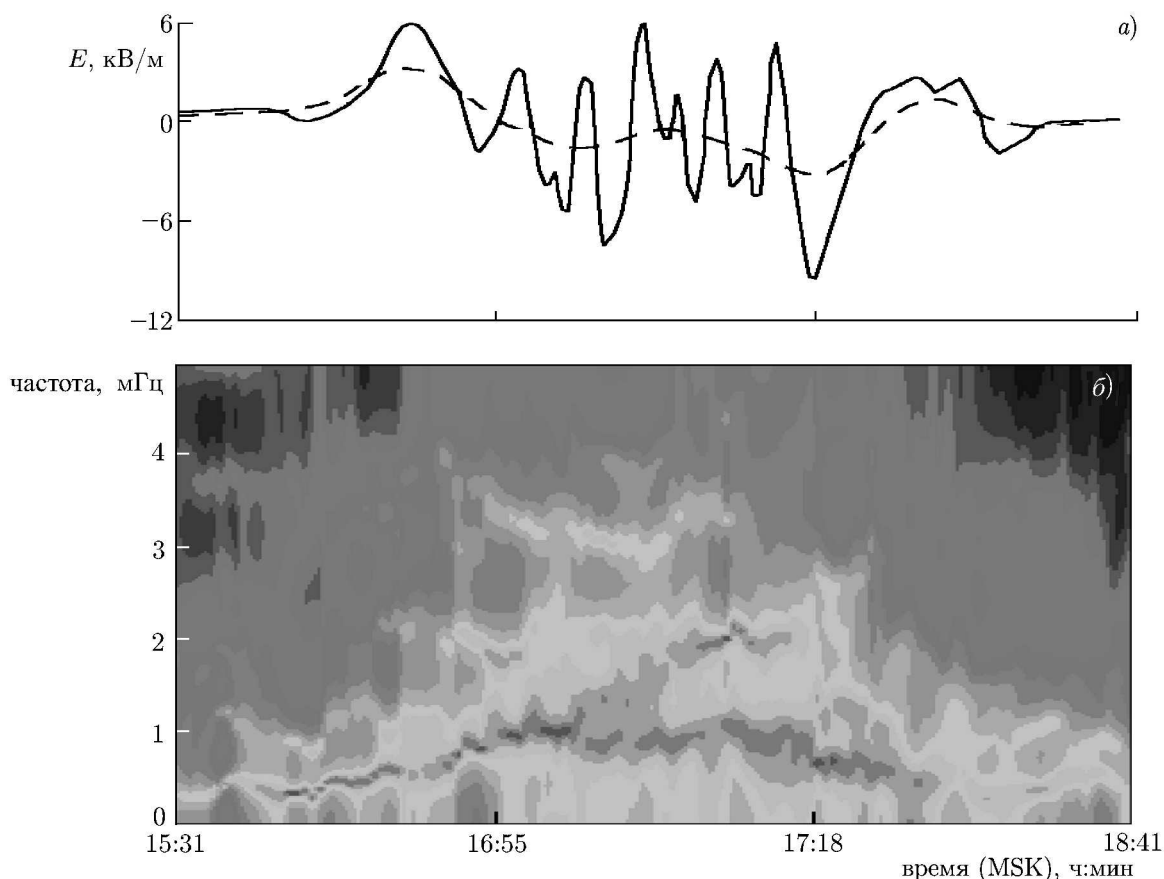


Рис. 6. Временные вариации электрического поля (а) и динамика их спектральной плотности (в относительных единицах) (б) во время грозы 17 июля 2005 года

стадиях зарождения, зрелости и распада грозы 17 июля 2005 года колебания дрейфовали по частоте вверх от $(4 \div 5) \cdot 10^{-4}$ Гц до приблизительно 10^{-3} Гц и затем снова вниз (соответствующий период менялся приблизительно от 35 до 17 мин и обратно). Кроме того, во время максимальной молниевой активности появилась дополнительная квазимонохроматическая компонента, дрейфующая вверх по частоте до 0,002 Гц ($T \sim 8$ мин). Относительная ширина полосы колебаний составила примерно $\Delta\omega/\omega \sim 0,3 \div 0,5$, а среднеквадратичное значение флуктуаций поля в этой полосе $\delta E = [\langle E^2 \rangle_\omega \Delta\omega]^{1/2} \sim 6$ кВ/м в низкочастотной компоненте и приблизительно 3 кВ/м в высокочастотной компоненте.

Если наблюдаемая периодичность связана с ветровым сносом пространственного распределения зарядов в облаке, то при характерных скоростях сноса порядка 5 м/с пространственный период неоднородностей должен лежать в пределах от 2 до 9 км. В то же время с привлечением данных метеорологического радара удалось обнаружить в некоторых грозовых ячейках и временную периодичность с периодом $T \sim 40$ мин, связанную с периодическим усилением вертикальных движений в облаке.

На рис. 7 приведён пример динамического спектра возмущений поля более длительной грозы 27 июля 2005 года, в течение которой вначале сформировалось несколько очагов интенсивных радиолокационных отражений, после чего они трансформировались в один очаг, а затем — в два. Соответственно, на рис. 7 видны сначала несколько спектральных компонент вертикального электрического поля, затем одна компонента, а затем — две. Напрашивается весьма правдоподобный

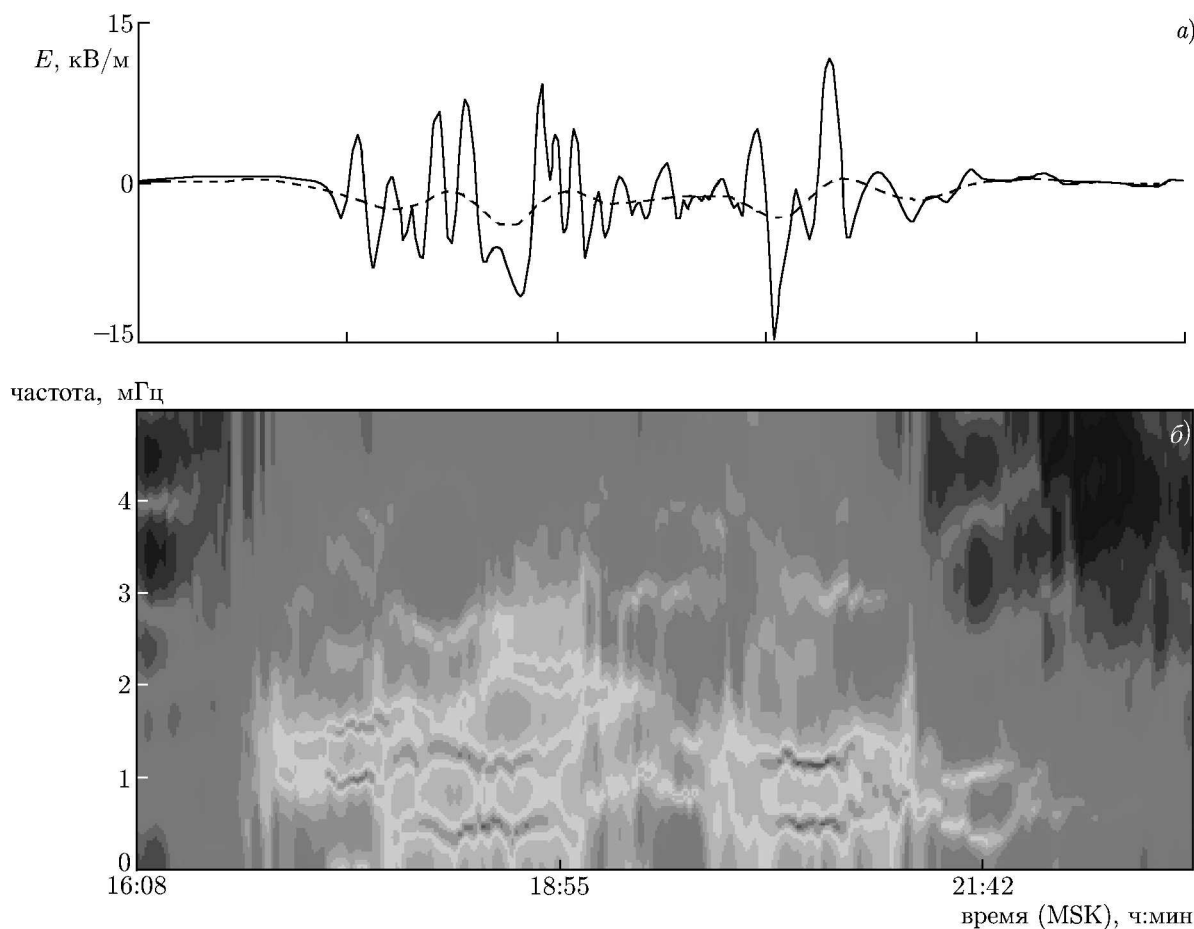


Рис. 7. Временные вариации электрического поля (а) и динамика их спектральной плотности (в относительных единицах) (б) для грозы 27 июля 2005 года

вывод о том, что отдельные спектральные компоненты связаны с отдельными конвективными образованиями.

Интересную и важную для некоторых приложений информацию можно извлекать из импульсной компоненты возмущений поля, связанной с разрядами. На рис. 8 показана усреднённая спектральная плотность флуктуаций поля во время гроз, вычисленная без предварительного разделения на регулярную и импульсную части. По сравнению с рис. 5 здесь появляется характерная компонента на высоких частотах, спадающая обратно пропорционально квадрату частоты. Последовательность импульсных возмущений поля можно представить как случайный процесс $\xi(t)$, состоящий из потока импульсов с независимыми моментами появления t_ν (пуассоновский поток):

$$\xi(t) = \sum_{\nu} a_{\nu} F(t - t_{\nu}),$$

и экспоненциально затухающей формой импульса:

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ \exp(-t/\vartheta), & t \geq 0, \end{cases}$$

для которой спектральная плотность вычисляется по формуле [11]

$$g_{\xi}(\omega) = \frac{n_1 \langle a^2 \rangle}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\vartheta^2}{1 + \omega^2 \vartheta^2} w(\vartheta) d\vartheta.$$

Здесь n_1 — число импульсов в единицу времени, $\langle a^2 \rangle$ — средний квадрат амплитуды импульсов, $w(\vartheta)$ — закон распределения времён затухания. Если принять для времени затухания некоторую постоянную эквивалентную величину ϑ_0 , т. е. $w(\vartheta) = \delta(\vartheta - \theta_0)$, то

$$g_{\xi}(\omega) = \frac{n_1 \langle a^2 \rangle}{2\pi} \frac{1}{\omega^2 + 1/\theta_0^2}.$$

На рис. 8 показано, что наилучшим образом такая аппроксимация совпадает с экспериментальным спектром при $\theta_0 \approx 12$ с. Из рис. 8 также определяется величина $n_1 \langle a^2 \rangle \theta_0^2$, характеризующая среднюю мощность разрядов во время грозы.

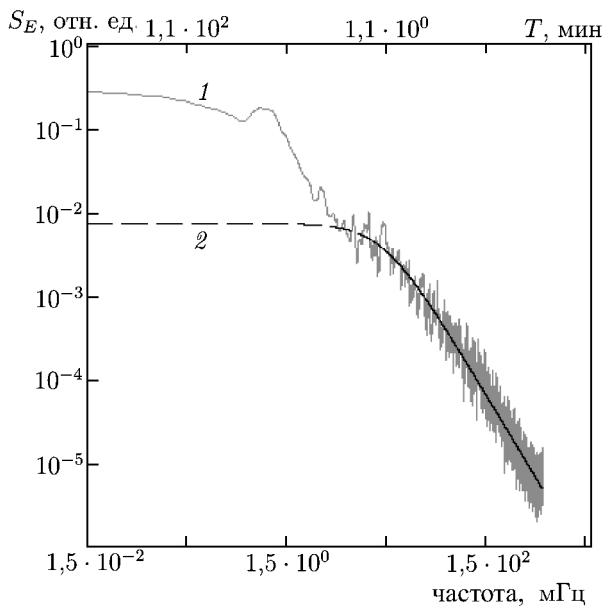


Рис. 8. Средняя по 7 грозам 2009 года спектральная плотность флуктуаций электрического поля (кривая 1) и расчётная спектральная плотность пуассоновского потока импульсов с экспоненциальным затуханием при $\theta_0 = 12$ с (кривая 2)

поля (по сравнению с временем регенерации поля после тех же разрядов на высотах более или порядка сотни метров над землёй или над водной поверхностью, где коронирование обычно не играет большой роли).

Предварительный анализ показал, что интервалы между разрядами имеют экспоненциальное статистическое распределение, что указывает на отсутствие зависимости момента появления каждого следующего разряда от предыдущего (пуассоновский процесс) за исключением области $\tau < 10$ с. Исследование статистических характеристик последовательностей импульсных возмущений поля во время гроз представляет собой отдельную важную задачу, которой предполагается посвятить специальную работу.

В соответствии с моделью величина θ_0 — среднее время восстановления электрического поля после разряда, которое зависит от распределения электрической проводимости σ внутри облака и в окрестности точки наблюдения. Если принять $\theta_0 \sim \varepsilon_0/\sigma$, где ε_0 — электрическая постоянная, то получим $\sigma \sim 10^{-12}$ Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$, т. е. более высокое значение, чем в свободной атмосфере на этих высотах. Одной из причин повышения проводимости в облаке на стадии интенсивной грозовой активности могут быть многочисленные разряды. Следует отметить, однако, что другой причиной уменьшения времени регенерации поля, наблюдаемого на земле в окрестности грозового облака, может быть повышение проводимости и образование слоёв заряда под облаком вследствие коронного разряда. Соответствующие результаты измерений и расчётов можно найти в серии работ [15–17], где продемонстрировано снижение поля вблизи земли до уровня порядка порогового поля коронного разряда и влияние накопления дополнительных ионов во время молниевых вспышек — ускоренная релаксация приземного

ВЫВОДЫ

В данной работе на основе длительных наземных измерений электрического поля в разнесённых пунктах исследованы спектральные характеристики возмущений электрического поля во время грозовых событий и проведено сравнение этих характеристик со спектрами поля невозмущённой атмосферы. Используются экспериментальные данные электростатических флюксометров, установленных в нескольких пунктах г. Нижний Новгород и Нижегородской области. Выделены две основные спектральные компоненты возмущений электрического поля: а) «регулярная» компонента с характерными временами возмущений от нескольких минут до часа и более; б) импульсная компонента поля, обусловленная разрядами внутри облака и из облака на землю, для которой характерными временами можно считать средний интервал между импульсами (разрядами) и длительность самого импульсного возмущения. Обнаружено значительное усиление спектральной плотности вариаций электрического поля во время грозы. Максимальное усиление, обусловленное импульсной компонентой из-за молниевых разрядов, наблюдается в области периодов порядка минуты (от нескольких минут до десятков секунд). Результаты проведённых измерений позволяют утверждать, что по спектрам возмущений поля грозового облака можно судить о среднем времени релаксации (регенерации) поля, типичное значение которого составило десять секунд.

Обнаружены квазимонохроматические составляющие (с периодами $10 \div 20$ мин) в частотных спектрах флуктуаций электрического поля мощных грозовых облаков, дрейфующие по частоте на стадиях зарождения, зрелости и распада облака. Данный эффект служит проявлением коллективных процессов при формировании электрической структуры облака и открывает возможность дистанционной диагностики электроактивных зон грозовых облаков.

Полученные результаты важны для моделирования электрической активности грозовых облаков, а также для выявления роли квазистационарных и импульсных процессов в глобальной атмосферной электрической цепи.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований ОФН РАН «Электродинамика атмосферы, радиофизические методы исследований атмосферных процессов», Министерства образования и науки РФ (госконтракт 14.B25.31.0023) и РФФИ (гранты 13-05-01139-а, 13-05-12103-офи-м, 13-05-97063).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lightning: principles, instruments and applications / Ed. by H.-D. Betz, U. Schumann, P. Laroche. Dordrecht: Springer, 2009. 641 p.
2. Rakov V. A. // *Surveys Geophys.* 2013. V. 34, No. 6. P. 731.
3. MacGorman D. R., Rust W. D. The electrical nature of storms. Oxford University Press, 1998. 422 p.
4. Rakov V. A., Uman M. A. Lightning: physics and effects. Cambridge University Press, 2003. 687 p.
5. Stolzenburg M., Marshall T. // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137, No. 1–4. P. 355.
6. Клименко В. В. // Тез. докл. конф. «Высокоширотные гелиогеофизические явления» памяти Е. А. Пономарёва. Иркутск, 2009. С. 23.
7. Klimenko V. V., Mareev E. A., Shlyugaev Yu. V., et al. // *Proc. XIV Int. Conf. Atmos. Electr. ICAE2011, Rio de Janeiro, Brazil, 2011.* 4 p.
8. Клименко В. В., Денисов В. П., Широков Е. А. // Сб. трудов. VII Всеросс. конф. по атмосферному электричеству, 24–28 сентября 2012 г., Санкт-Петербург. С. 121.

9. Клименко В.В. // Сб. трудов. VII Всеросс. конф. по атмосферному электричеству, 24–28 сентября 2012 г., Санкт-Петербург. С. 119.
10. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. Случайные процессы. М.: Наука, 1976. 495 с.
11. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.
12. Murphy M. J., Krider E. P., Maier M. W. // J. Geophys. Res. D. 1996. V. 101, No. 23. P. 29 615.
13. Koshak W. J., Krider E. P. // J. Atmos. Sci. 1989. V. 94. P. 1 165.
14. Анисимов С.В., Мареев Е.А., Шихова Н.М., Дмитриев Э.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 64, № 7. С. 562.
15. Chauzy S., Raizonville P. // J. Geophys. Res. C. 1982. V. 87, No. 4. P. 3 143.
16. Chauzy S., Soula S., Despiau S. // J. Geophys. Res. D. 1989. V. 94, No. 11. P. 13 115.
17. Soula S. // J. Geophys. Res. D. 1994. V. 99, No. 5. P. 10 759.

Поступила в редакцию 2 октября 2013 г.; принята в печать 27 декабря 2013 г.

ON STATISTICAL CHARACTERISTICS OF ELECTRIC FIELDS OF THE THUNDERSTORM CLOUDS IN THE ATMOSPHERE

*V. V. Klimenko, E. A. Mareev, M. V. Shatalina, Yu. V. Shlyugaev, V. V. Sokolov,
A. A. Bulatov, and V. P. Denisov*

A series of the features of the spectral characteristics of perturbations of the thunderstorm-cloud field is specified on the basis of the long-term ground-based measurements of an electric field at spaced locations. A significant increase in the spectral density of the electric-field variations during the thunderstorm has been observed. Maximum increase due to the pulsed field component, which is related to the lightning discharges, is observed in the fluctuation-period range from tens of seconds to several minutes. A significant increase is also observed in the range 0.5–1.5 mHz (the periods 10–30 min) in which the spectral density is increased by more than a factor of 10^4 , whereas the amplification factor at the lower frequencies is equal to 100 (about 10 times for the field). Quasimonochromatic components (with the periods 10–20 min) in the frequency fluctuation spectra of an electric field of the powerful thunderstorm clouds, which drift by frequency at the cloud initiation, maturity, and disintegration stages are found. It is shown that presentation of the sequence of the pulsed field perturbations related to the discharges in the form of a pulse flow with independent intervals (Poisson flow) agrees with the form of the fluctuation spectrum of the observed field and leads to an estimate of 10 s for the average relaxation (regeneration) time of the field in the thunderstorm-cloud vicinity after the discharge.