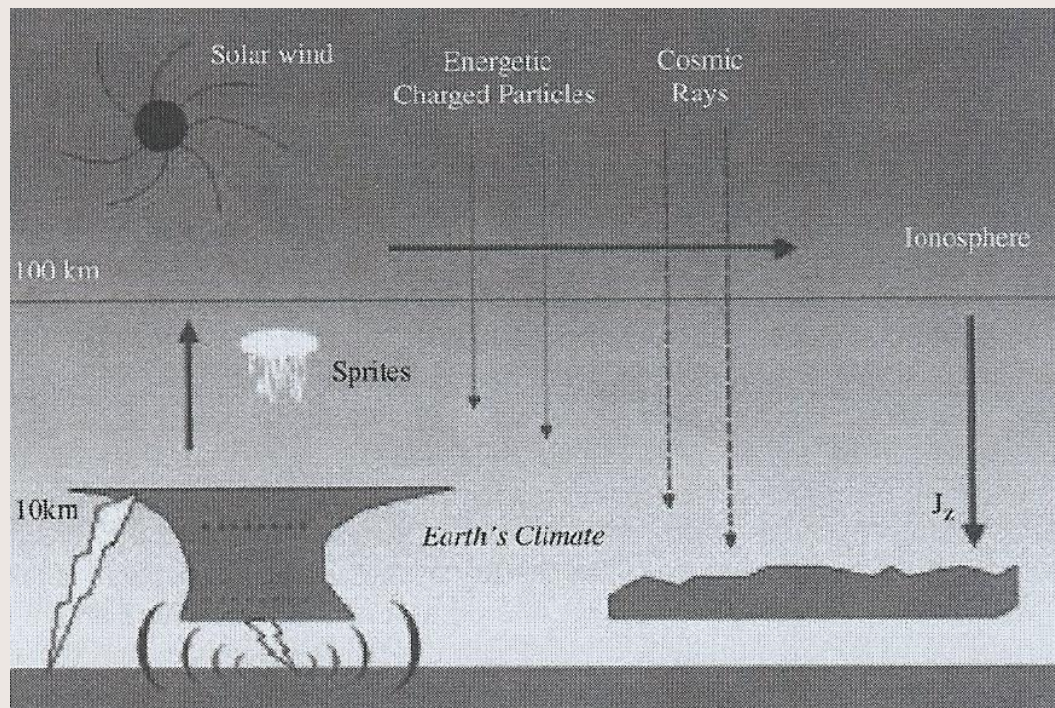


СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЛУКТУАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ОКРЕСТНОСТИ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ.

Клименко В.В.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

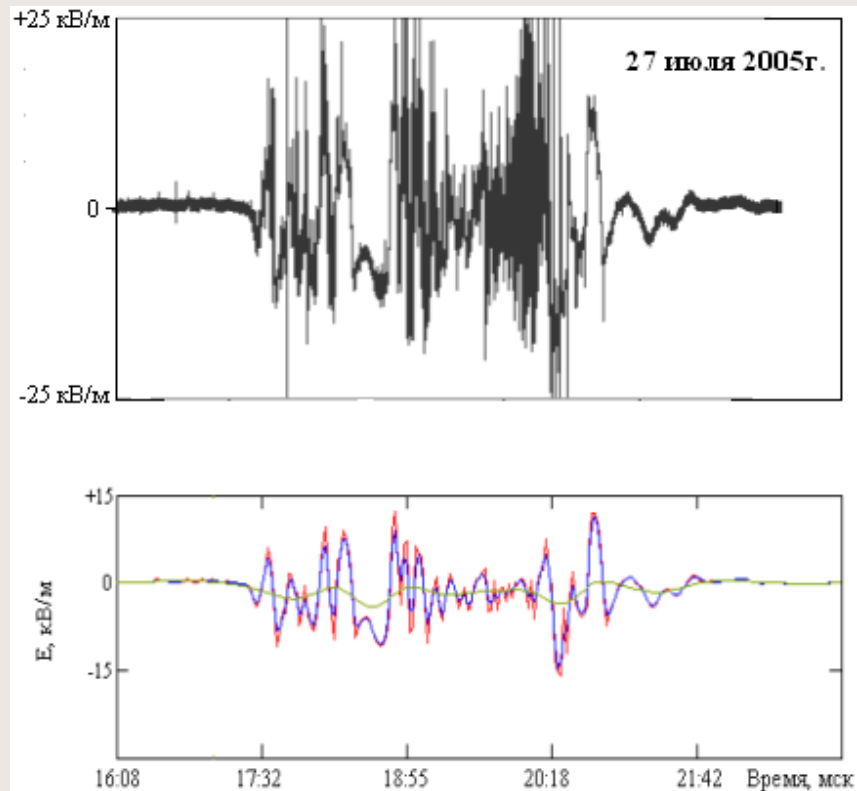
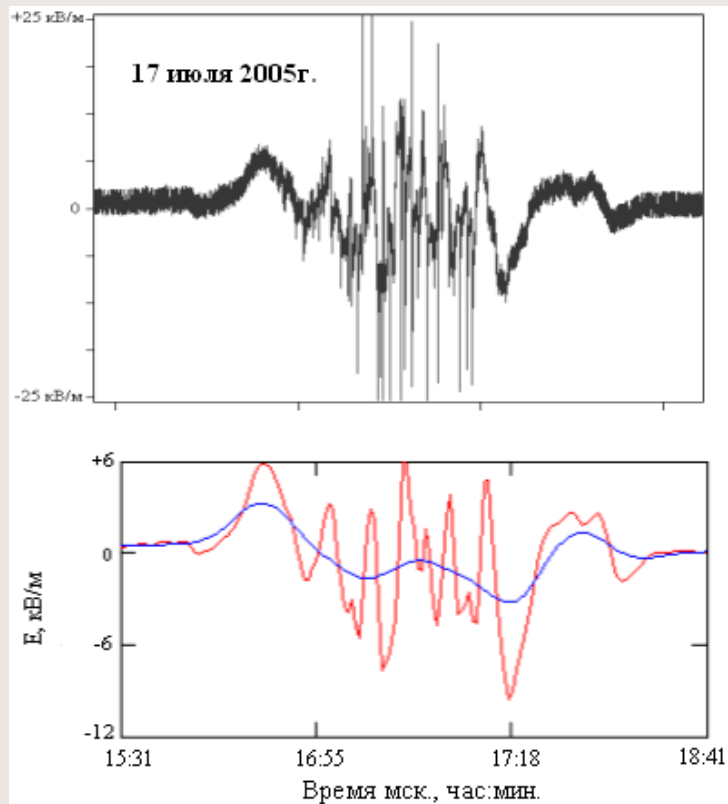


Вместе с очевидным прикладным интересом к исследованию гроз, имеется ряд важных фундаментальных вопросов о механизмах и режимах функционирования грозового электрического генератора, требующих дальнейших исследований. Электрические характеристики облака определяются пространственно-временной динамикой зарядов и токов, которая однозначно связана с электрическим полем вне облака. Однако, добиться однозначного решения обратной задачи практически невозможно.

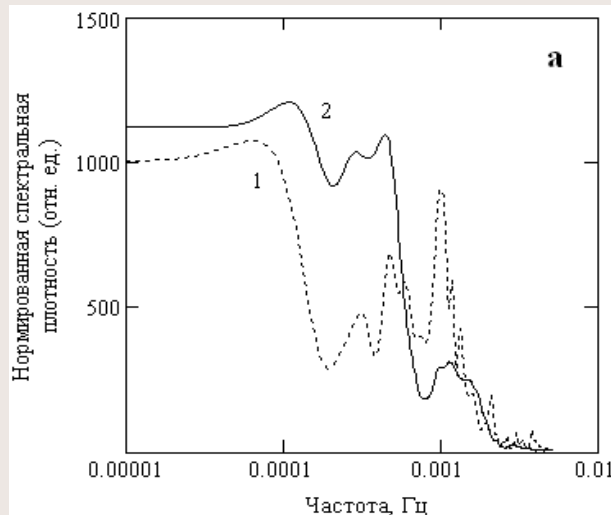


Регистрация электрического поля проводилась на территории Гидрометеорологической обсерватории (ГМО) в районе Городца (60 км к северо-западу от Нижнего Новгорода) с помощью электростатических флюксометров. Электростатические флюксометры имели три канала с разными шкалами чувствительности: первый канал имел полную шкалу ± 1.25 кВ/м; второй канал - шкалу ± 10 кВ/м; третий канал - шкалу ± 25 кВ/м. Все флюксометры имели полосу частот усилителя 40 Гц.

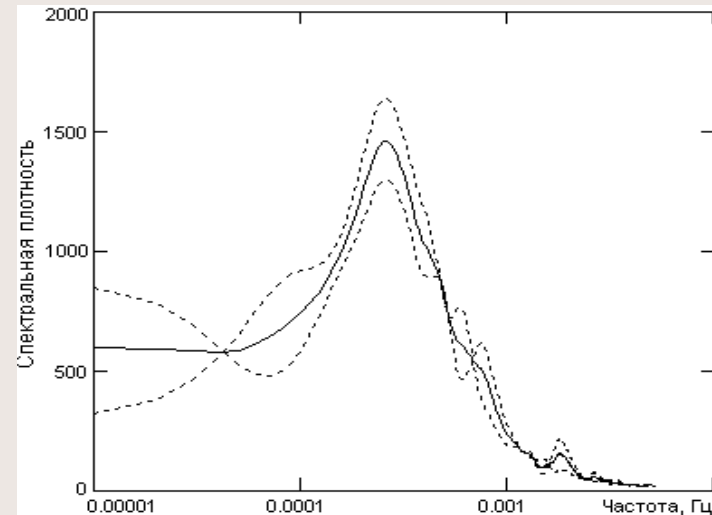
Для отделения «гладкой» части возмущений электрического поля от импульсной компоненты, связанной с короткими (3-5с) скачками поля во время молниевых разрядов, исходные значения поля (частота оцифровки 128 Гц) усреднялись на интервалах 100с (12800 отсчетов). В результате такой НЧ фильтрации получены средние значения поля со «скважностью» 1 значение за 100с, т.е. максимальная частота в дальнейших спектральных оценках равна $(200с)^{-1} = 0.005$ Гц.



Спектральная плотность возмущений для каждой грозы вычислялась непосредственно методом БПФ с применением спектрального окна Блэкмана-Хэрриса (уровень боковых лепестков -74 дБ). Перед усреднением по нескольким грозам каждый спектр был нормирован на максимум, а результирующий средний спектр – на единичную площадь под спектральной кривой. Полученные для 23-х гроз спектры приведены на рисунках.

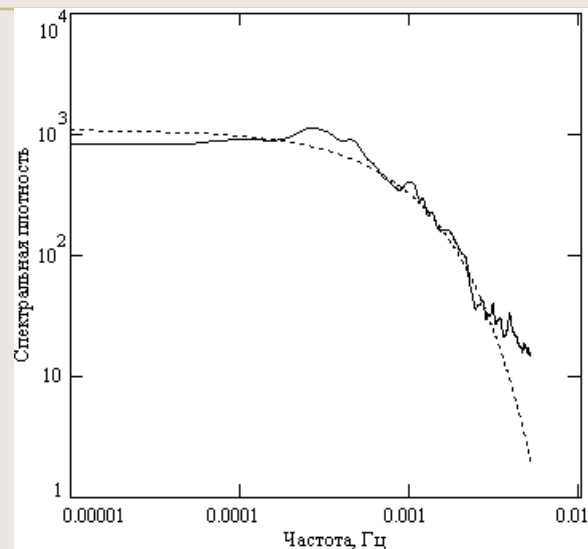
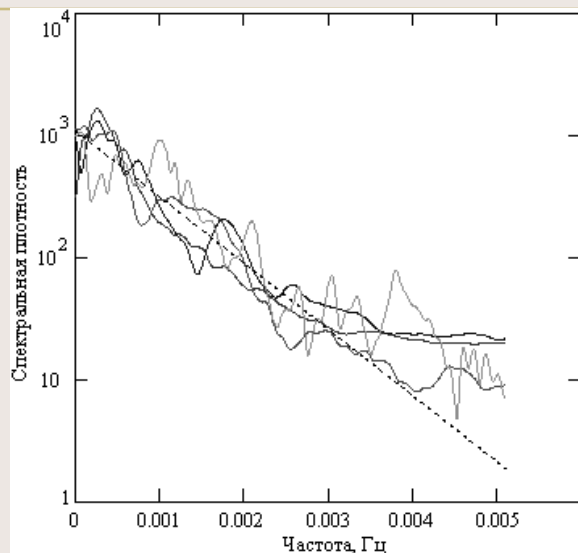


Нормированная спектральная плотность флуктуаций напряженности электрического поля в окрестности грозового облака: 1 – средняя для 5-ти гроз 2005г.; 2 – средняя для 10-ти гроз 2006г.



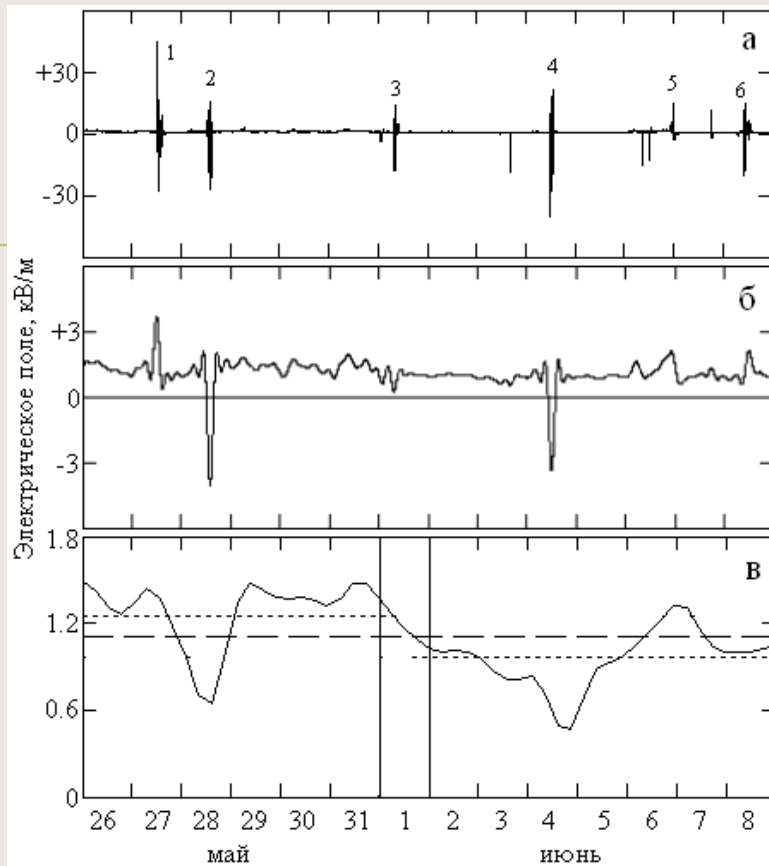
Усредненные по 8-ми грозам июля-августа 2008г. спектральные плотности флуктуаций E_z в двух пунктах: ИПФ и Мыза (пунктир) и среднее по обоим пунктам (сплошная линия). Графики нормированы на единичную площадь под кривыми.

Нормированная спектральная плотность флуктуаций напряженности электрического поля в окрестности грозового облака: слева – средняя для 5-ти гроз 2005г., 10-ти гроз 2006г. и 8-ми гроз 2008г. по измерениям в двух пунктах; справа - то же в двойном логарифмическом масштабе; сплошная линия – среднее по всем грозам; пунктир – аппроксимация функцией $\sim \exp(-T_0 \cdot f)$, где $T_0 \approx 1280$ сек.=21.3 мин.

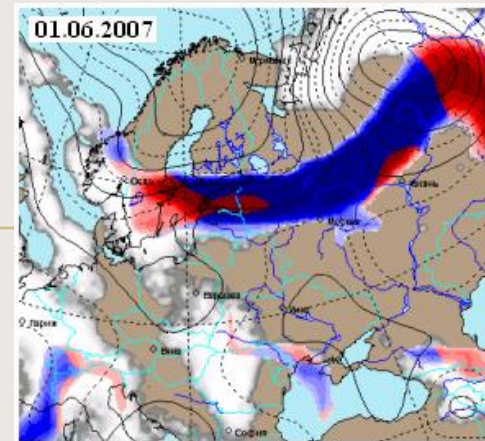


1. Значительная доля мощности распределена в диапазоне периодов $T < 1$ часа, на основании чего можно говорить о большом вкладе в возмущения поля знакопеременной компоненты.
2. Характер падения спектральной плотности на ВЧ практически экспоненциальный с постоянной затухания $T_0 \approx 20$ мин.
3. В диапазоне $T < 1$ часа в спектре явно присутствуют квазипериодические компоненты.

Знакопеременность поля означает, что среднее по времени (или по площади облака, если флуктуации связаны с движением облака относительно флюксметра) поле существенно меньше, чем его амплитудные значения.



Если принять значение проводимости атмосферы под грозовым облаком $\sim 10^{-14} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, площадь облака $\sim 100 \text{ км}^2$ и среднее поле $\sim 3 \text{ кВ/м}$ (см. рис.), то оценка среднего тока, текущего между облаком и земной поверхностью, дает значение $\sim 3 \text{ мА}$. Это всего на порядок больше тока хорошей погоды через такую же площадь поверхности и на 2 порядка меньше токов измеренных над грозовыми облаками ($\sim 0.5 \text{ А}$).

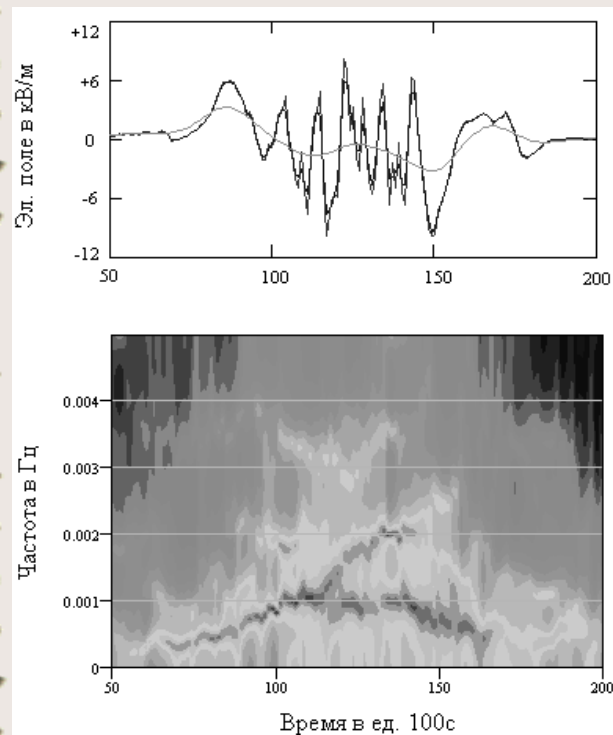


<http://dyn.gismeteo.ru/animop/animat.gif>

Вариации электрического поля по данным флюксметра (Волжская ГМО, г.Городец) в период с 26 мая по 8 июня 2007г: а) исходные данные флюксметра, где цифрами обозначены возмущения поля от ближних гроз; б) данные флюксметра после цифровой НЧ фильтрации с частотой среза $(4.5 \text{ час})^{-1}$; в) данные флюксметра после цифровой НЧ фильтрации с частотой среза $(18 \text{ час})^{-1}$. Вертикальная полоса – время прохождения холодного фронта. Горизонтальная штриховая линия – среднее значение поля на данном интервале, пунктир – среднее значение поля за неделю до и неделю после прохождения атмосферного фронта.

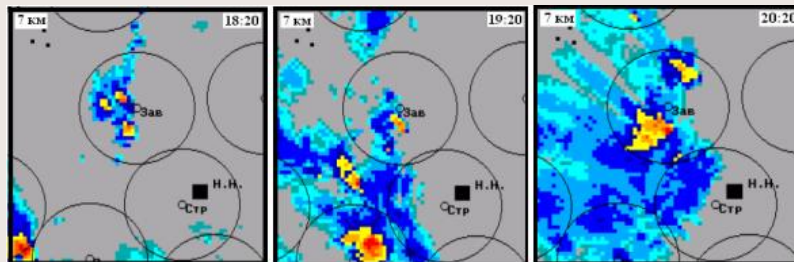
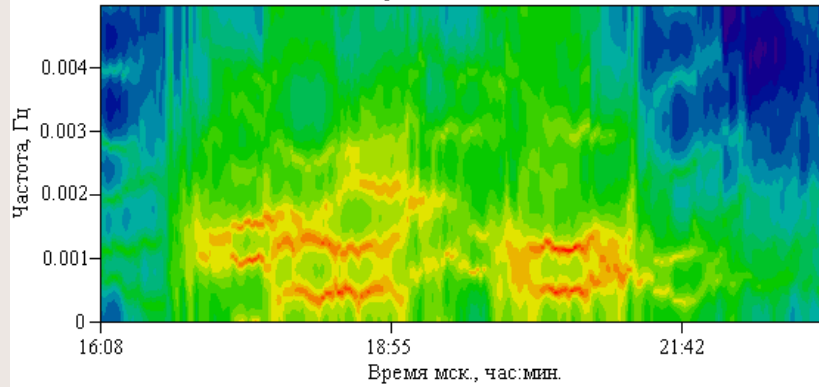
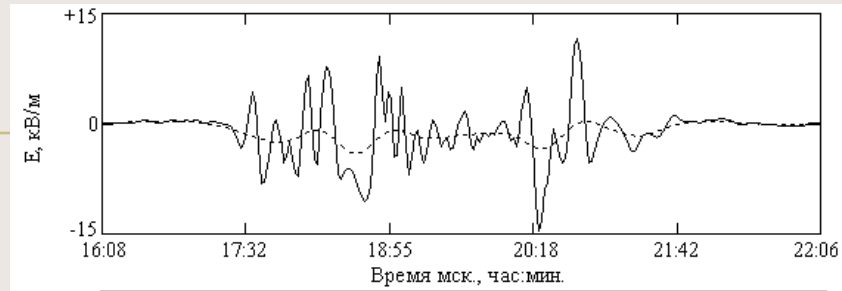
В отличие от средней картины, каждой грозе присущи свои индивидуальные особенности, в том числе присутствие в спектрах квазипериодических компонент во всем частотном диапазоне. Для более подробного исследования характеристик флуктуаций на временных масштабах менее ~ 30 мин. применены методы обработки данных, включающие следующие основные процедуры:

1. Выделение главной НЧ вариации поля с временным масштабом порядка времени жизни грозовой ячейки ($T \geq 30$ мин.) методом скользящего среднего по 18 точкам ($\Delta T \sim 1800$ с).
2. Выделение флуктуационной части поля, как разности между исходными вариациями и главной НЧ частью.
3. Применение к полученной флуктуационной части методов адаптивного спектрального анализа, как наиболее чувствительного к присутствию моно- и квазимонохроматических компонент в частотном спектре.

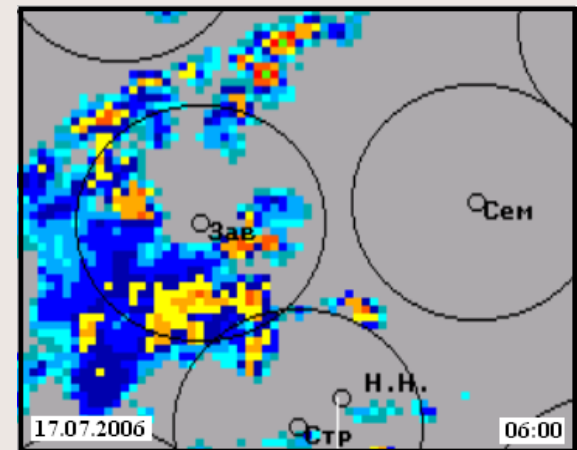
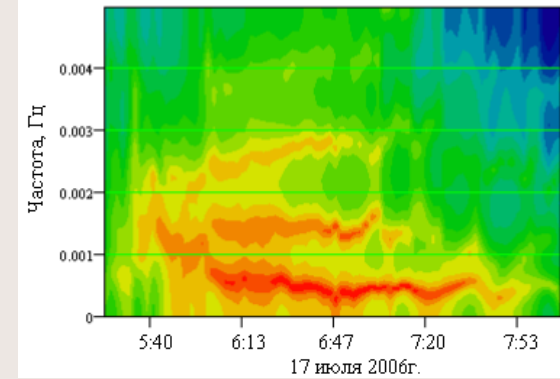
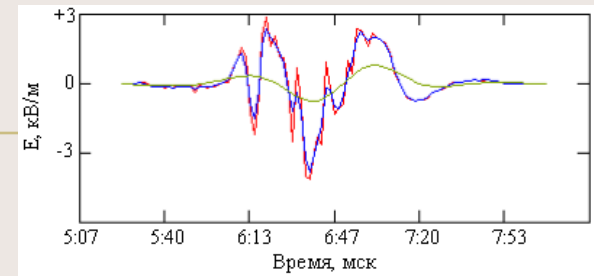


Динамический спектр колебаний (сонограмма) получен с помощью скользящего временного окна. В спектре отчетливо видны квазимонохроматические компоненты с вполне детерминированным поведением. А именно, в процессе зарождения, активизации и распада имеет место частотный дрейф колебаний от $(4 \div 5) \cdot 10^{-4}$ Гц вверх по частоте до ~ 0.001 Гц и затем снова вниз (в терминах периодов - от ~ 35 мин. до ~ 17 мин. и обратно). Кроме того, во время максимальной активности появляется дополнительная квазимонохроматическая компонента, дрейфующая вверх по частоте до 0.002 Гц (~ 8 мин.). Относительная ширина полосы колебаний примерно $\Delta\omega/\omega \sim 0.3 \div 0.5$, а средне-квадратичное значение флуктуаций поля в этой полосе $\delta E = [\langle E^2 \rangle_\omega \cdot \Delta\omega]^{1/2} \sim 6$ кВ/м в НЧ и ~ 3 кВ/м в ВЧ компонентах.

27 июля 2005г.



17 июля 2006г.

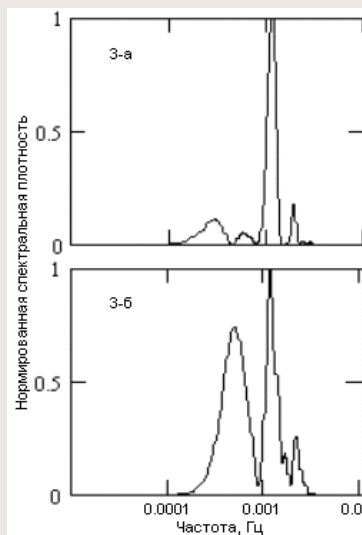
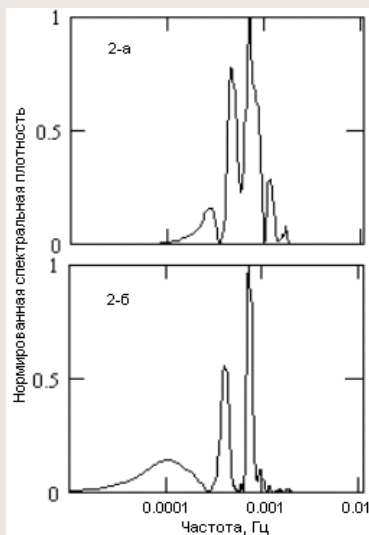
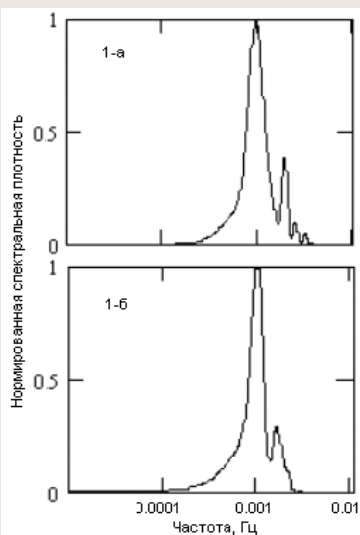
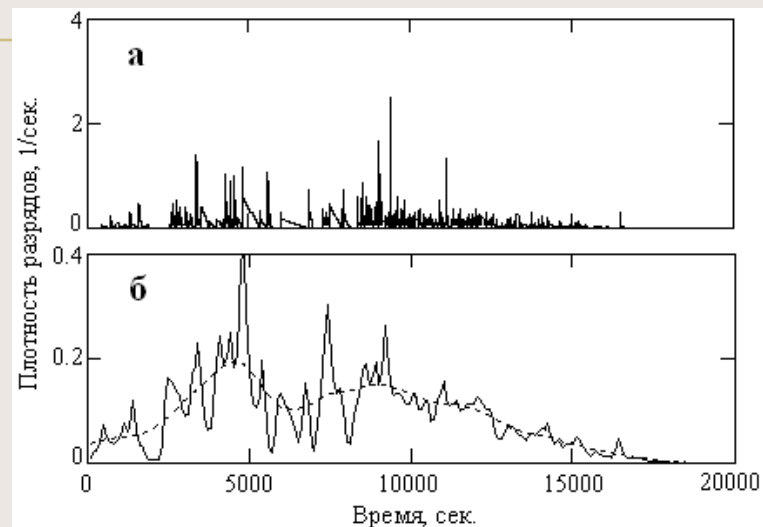
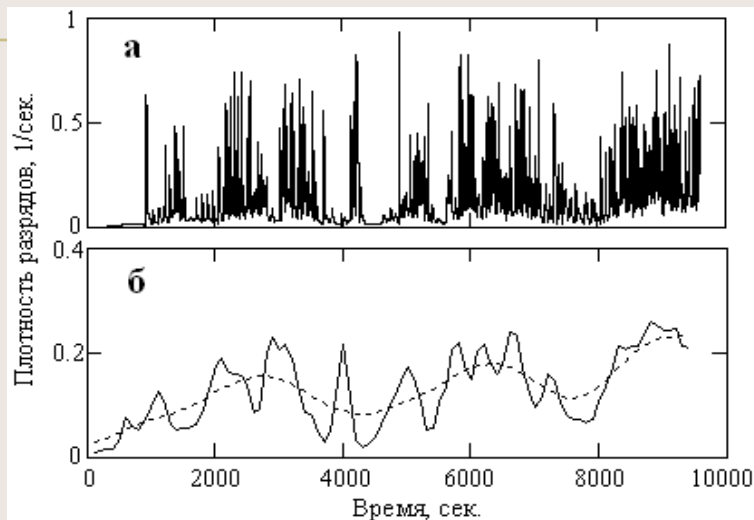


Располагая измерениями поля только в одном пункте, нельзя отделить возмущения E , обусловленные чисто временными изменениями в источнике, от возмущений, связанных с движением «замороженной» неоднородной структуры зарядов относительно флюксметра. В данной ситуации, если квазипериодические компоненты возмущений поля относятся к временным характеристикам облака, можно попытаться искать признаки аналогичной модуляции в других характеристиках электрической активности облака. В частности, проанализировать временные характеристики плотности разрядов (число разрядов в ед. времени), которые не зависят от того, как перемещается облако относительно пункта регистрации.

Для анализа плотности разрядов использованы следующие процедуры:

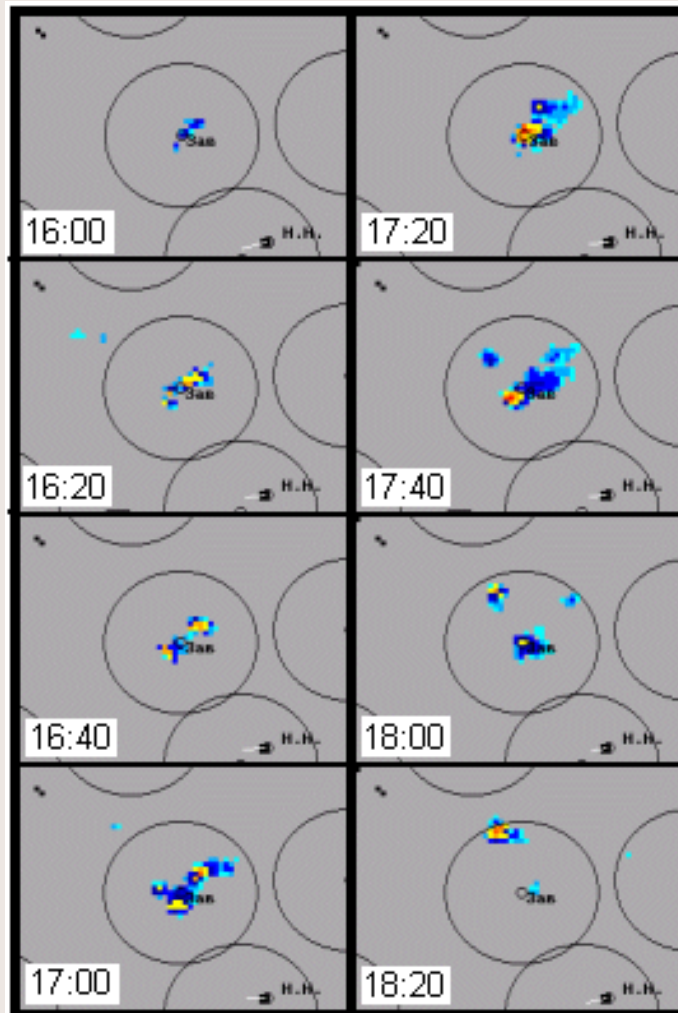
- 1) определение времени возникновения каждого разряда, зарегистрированного флюксметром во время грозы в виде импульсного изменения поля, и соответствующих временных интервалов Δt_i между последовательными разрядами;
- 2) в качестве текущего значения плотности разрядов на интервале между i -м и $(i+1)$ -м разрядами принимается значение $(\Delta t_i)^{-1}$;
- 3) формирование равномерной выборки значений с использованием линейной интерполяции между неравномерно расположенными значениями $(\Delta t_i)^{-1}$;
- 4) вычисление средних значений на интервалах 100 секунд, в результате чего получена вариация плотности разрядов с 100-секундным разрешением;
- 5) выделение главной НЧ вариации с временным масштабом порядка времени жизни грозовой ячейки ($T \geq 30$ мин.) методом скользящего среднего по 18 точкам ($\Delta T \sim 1800$ с);
- 6) выделение флуктуационной части, как разности между исходными вариациями и главной НЧ частью;
- 7) применение к флуктуационной части методов спектрального анализа.

Иллюстрация обработки флуктуаций плотности разрядов во время грозы 27.07.2005г. с 17:32мск. по 20:18мск. (всего 855 разрядов) и грозы 21.07.05г. (всего 737 разрядов; а) исходная картина изменений плотности разрядов во времени; б) сглаженные вариации плотности разрядов; пунктир- НЧ-вариация (сглаживание по 18 точкам = 30 мин.)



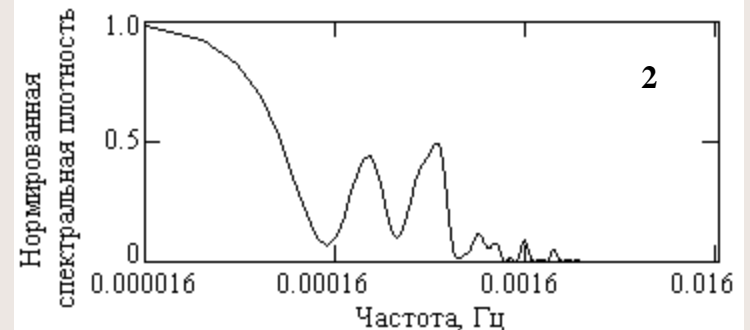
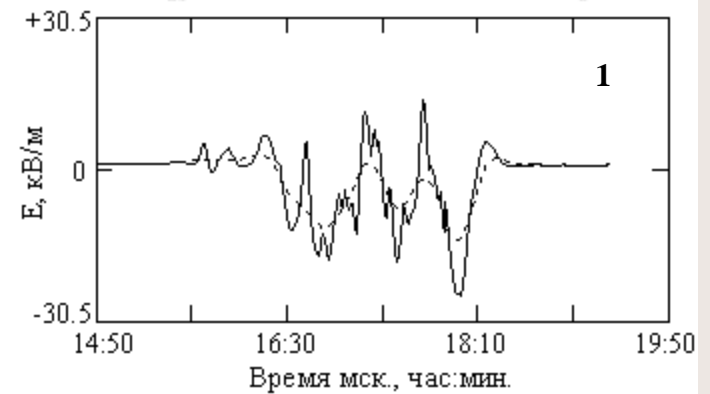
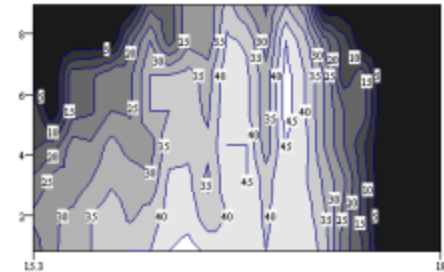
Спектральные плотности флуктуаций электрического поля (а) и флуктуаций числа разрядов в единицу времени (б) для гроз в 2005г.: 17 июля (145 разрядов) - 1, 21 июля (737 разрядов) - 2 и 27 июля (855 разрядов) - 3.

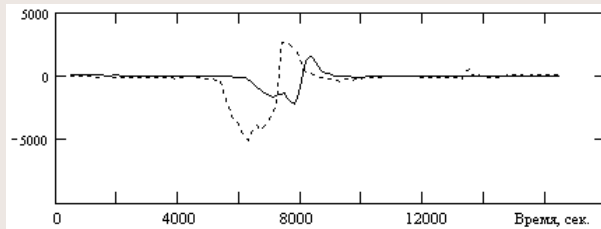
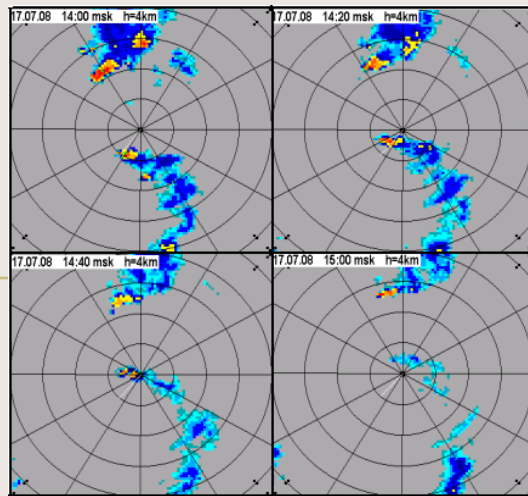
Радиолокационное сечение грозных облаков по высоте 4 км во время грозы 28 мая 2007г. над пунктом регистрации E_z (п. Заволжье). Радиус окружностей равен 25 км.



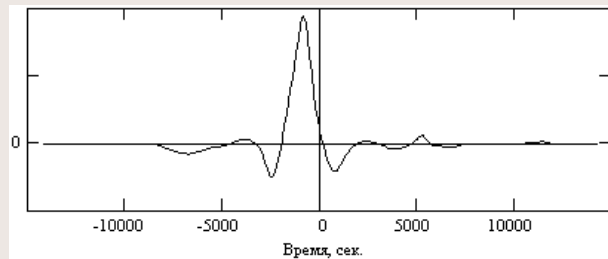
Временные и спектральные характеристики возмущений E_z во время грозы 28 мая 2007г.: 1 - запись флюксметра; 2 – спектральная плотность возмущений поля (видны спектральные максимумы в области периодов 69 и 33 мин.).

Высота отражений в км по данным МРЛС

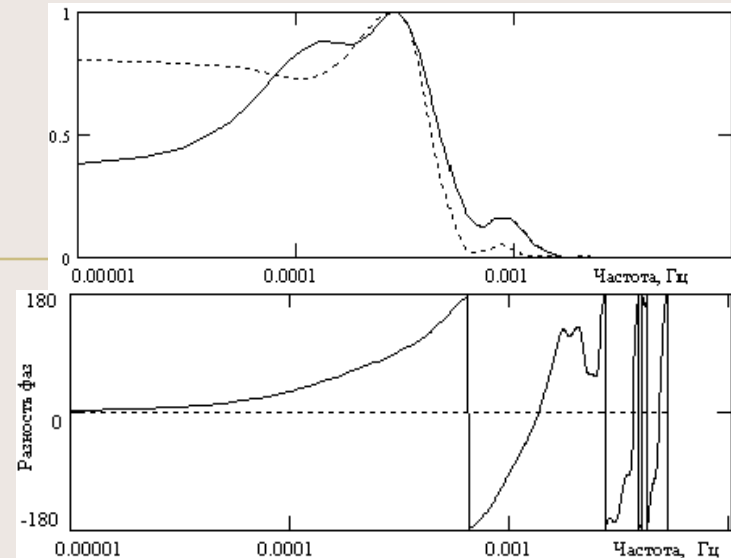




Вариация электрического поля во время грозы 17.07.08 в интервале 12:20-15:00 мск. Сплошная линия – ИПФ РАН, пунктир – ст. Мыза.

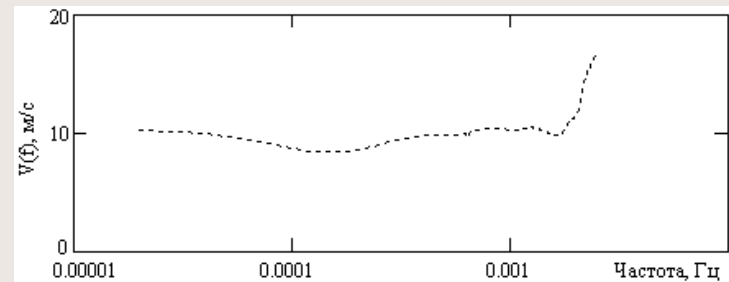


Взаимная корреляционная функция флуктуаций электрического поля в двух наблюдательных пунктах. В данном случае отрицательный временной сдвиг означает, что возмущение на ст. Мыза опережает коррелированное возмущение на ст. ИПФ на 800 сек.

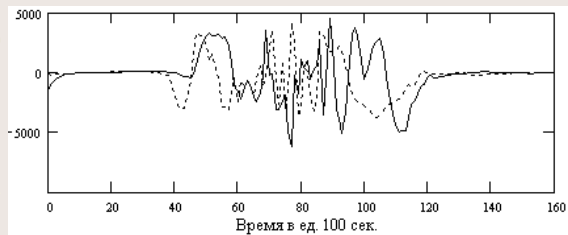
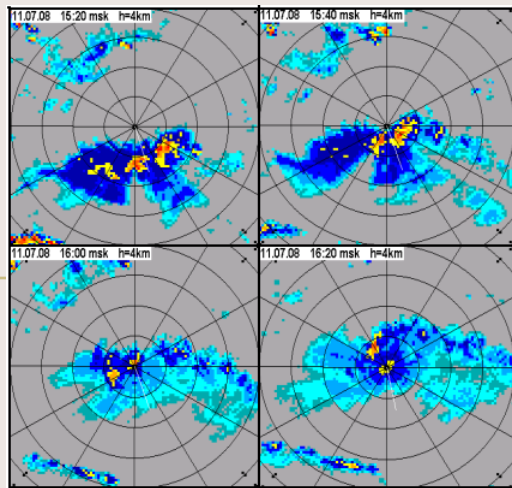


Нормированные спектральные плотности флуктуаций E_z на ст. ИПФ (сплошная линия) и ст. Мыза (пунктир). Взаимная спектральная плотность по измерениям в двух пунктах (вверху) и фазовый сдвиг соответствующих гармоник в спектре.

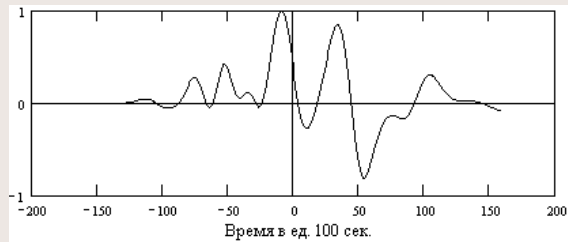
$$V(f) = \frac{2\pi f}{\Delta\phi(f)} \cdot L$$



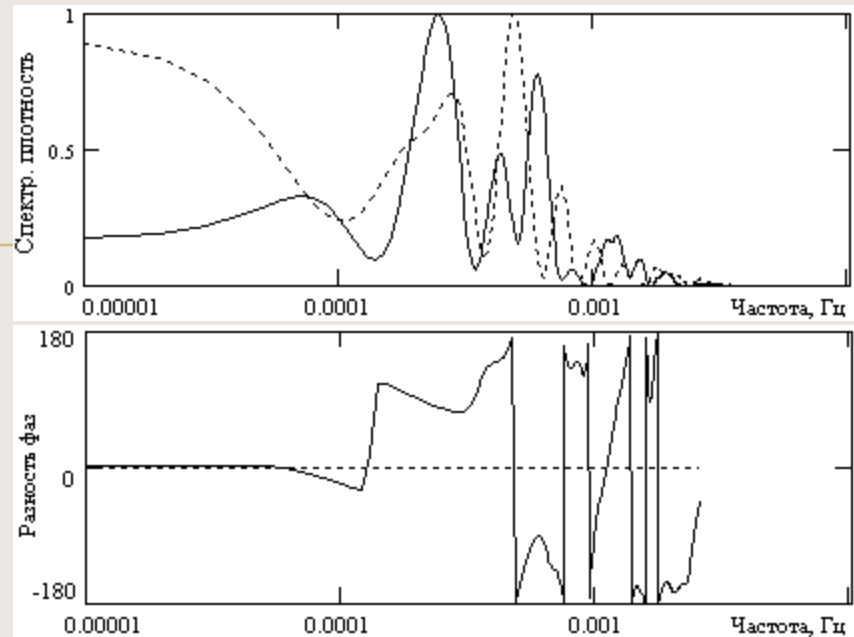
Дисперсионная зависимость для скоростей неоднородностей в грозовом облаке 17.07.2008г.



Вариации электрического поля во время грозы 11.07.08 в интервалах 13:27 ÷ 16:47 мск.; Сплошная линия – ИПФ РАН, пунктир – ст. Мыза.



Взаимная корреляционная функция для грозы 11.07.2008г. Временной сдвиг ≈ -800 с.



Нормированные спектральные плотности флуктуаций E_z на ст. ИПФ (сплошная линия) и ст. Мыза (пунктир) во время грозы 11.07.08г. и фазовый сдвиг соответствующих гармоник.

Основные выводы

1. Возмущения электрического поля, регистрируемые во время гроз, как правило, имеют знакопеременный характер. Основная доля спектральной мощности возмущений поля во время грозы сосредоточена в частотном интервале выше 0.0002 Гц ($T < 80$ мин.). На временные масштабы порядка длительности грозы ($T > 1$ часа) приходится лишь малая часть мощности. Среднее поле под облаком на порядок слабее амплитудных значений.
2. Усредненная по многим грозам спектральная плотность спадает в области высоких частот вплоть до $f \approx 0.003$ Гц ($T \approx 5$ мин.) по экспоненциальному закону $\sim \exp(-T_0 \cdot f)$, где $T_0 \approx 20$ мин. соизмеримо с временем жизни отдельной конвективной ячейки.
3. В области частот, где сосредоточена основная доля спектральной мощности возмущений, в большинстве случаев присутствуют одна или несколько квазипериодических компонент флуктуаций поля, которые, скорее всего, связаны с временными характеристиками основных генераторов разделения зарядов в облаке – конвективных ячеек. Аргументом в пользу временного характера квазипериодических колебаний поля также является подобие спектров флуктуаций поля и флуктуаций плотности разрядов в единицу времени, т.к. последние не зависят от системы отсчета, где производятся измерения.