Результаты анализа вариабельности приземного атмосферного электрического поля и плотности тока на основе разнесенных наблюдений

Климанова Е. В., Галиченко С. В., Анисимов С. В.

Геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Введение

Формирование пространственно неоднородных распределений электрического заряда в приземном слое атмосферы определяется совокупностью процессов, связывающих радиоактивность земной поверхности, ионизацию воздуха и атмосферную электродинамику [1]. Ионизацию обеспечивают несколько источников: естественные радионуклиды земной коры (долгоживущие изотопы урана, тория и калия и продукты их распада), летучий радона, проникающий из почвы в атмосферу, и космическое излучение. Появляющиеся в результате лёгкие ионы существуют несколько десятков секунд, однако присоединение к аэрозолям приводит к образованию долгоживущих кластеров. Стоит отметить, что в условиях биполярной зарядки различия в подвижности и сечении взаимодействия ионов с различными аэрозольными частицами могут приводить к асимметрии зарядового распределения [2]. Турбулентный перенос, конвекция и электрический дрейф формируют пространственно-временные структуры заряда, которые легко фиксируются наземной аппаратурой.

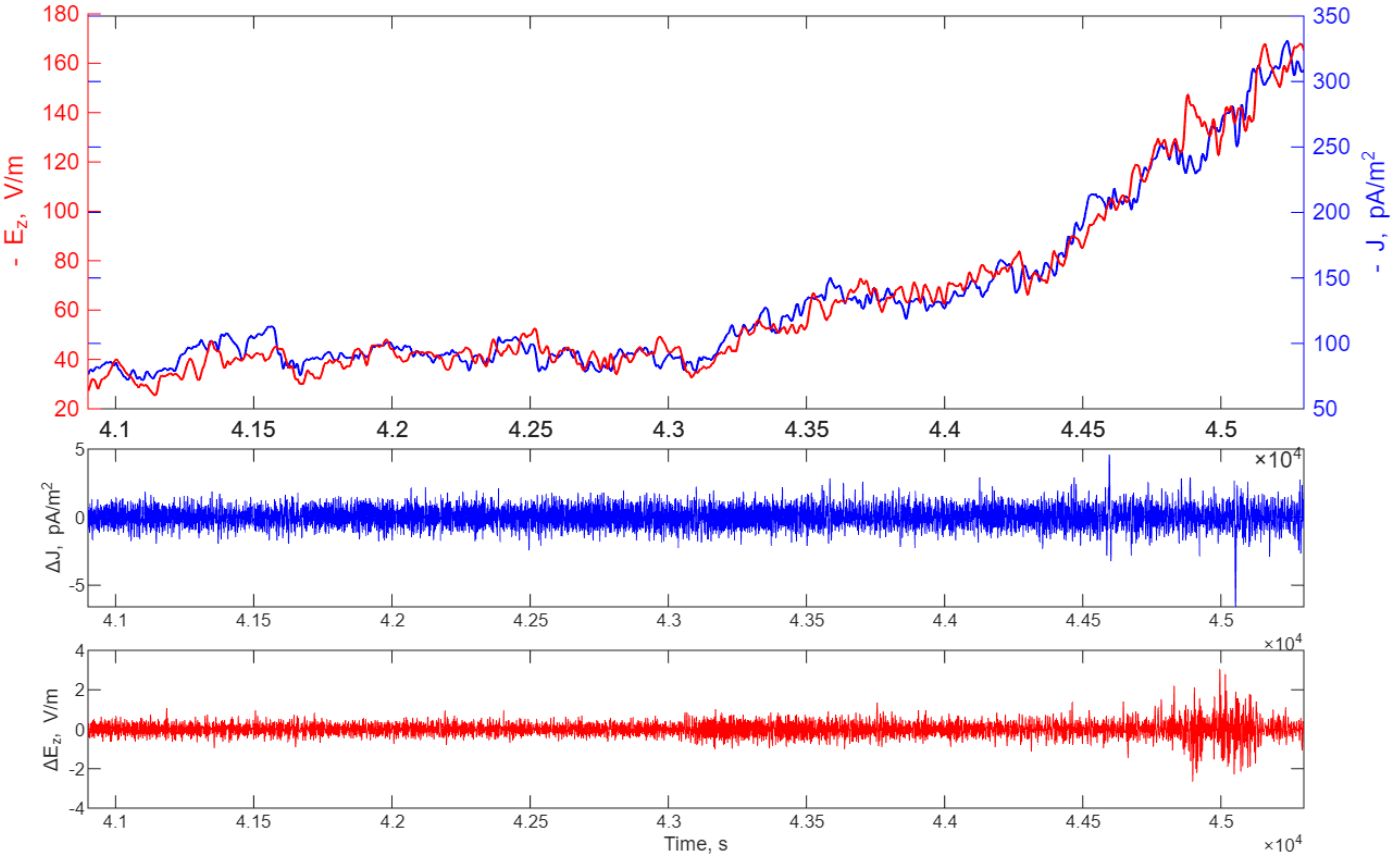
Цели и задачи

В работе синхронные измерения вертикальной составляющей электрического поля, полученные системой пространственно разнесённых электростатических флюксметров, сопоставлялись с измерениями плотности тока, выполненными токовым коллектором.

Цель данного исследования — выявить и количественно охарактеризовать статистические различия между спокойными и возмущёнными режимами атмосферного электрического поля. Решаются задачи выделения синфазной составляющей напряжённости электрического поля, оценки ее связи с плотностью атмосферного электрического тока, анализа характерных масштабов корреляции и когерентности сигналов различных датчиков в нескольких частотных диапазонах, а также исследования морфологических особенностей данных, очищенных от тренда..

Предмет анализа

Наблюдения за напряжённостью электрического поля и плотностью электрического тока проводились на территории геофизической обсерватории «Борок» (58°04′ с. ш., 38°14′ в. д.). Система измерений состояла из четырех электростатических флюксметров и горизонтальной кольцевой антенны. Пространственное расположение флюксметров формировалось геометрией разреженной решётки Голомба, расположенной вдоль направления север-юг.



Пример измеряемых характеристик

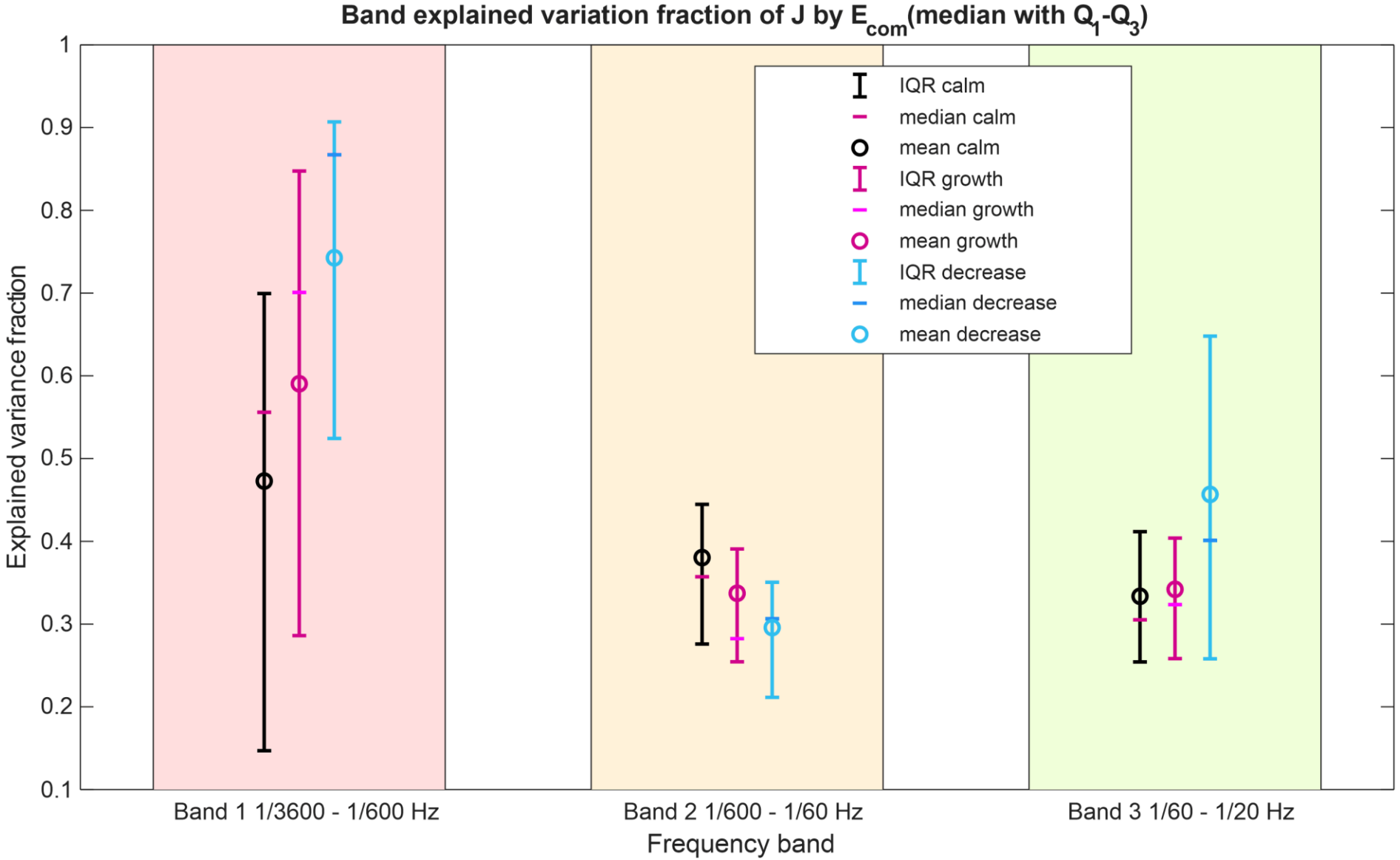
Метод главных компонент

Данный метод позволяет перевести многомерные коррелированные данные в новую систему координат, где оси (так называемые, главные компоненты) некоррелированы и максимизируют дисперсию, позволяя выделить тренды и отфильтровать шум. В приведённой ниже таблице представлены зависящие от режима статистические показатели: доля дисперсии, объясняемая первой компонентой (EVR), спектральный разрыв между собственными числами, а также соотношения дисперсий общего модального компонента для различных режимов. Рост медианного значения EVR с 0,61 (в режиме спокойного поля) до 0,98 (в режиме убывающего поля) свидетельствует о том, что в данных условиях изменчивость сети практически полностью определялась первой главной компонентой.

Таблица 1. Статистические характеристики доли объясненной дисперсии для первой главной компоненты и спектрального зазора между собственными числами.

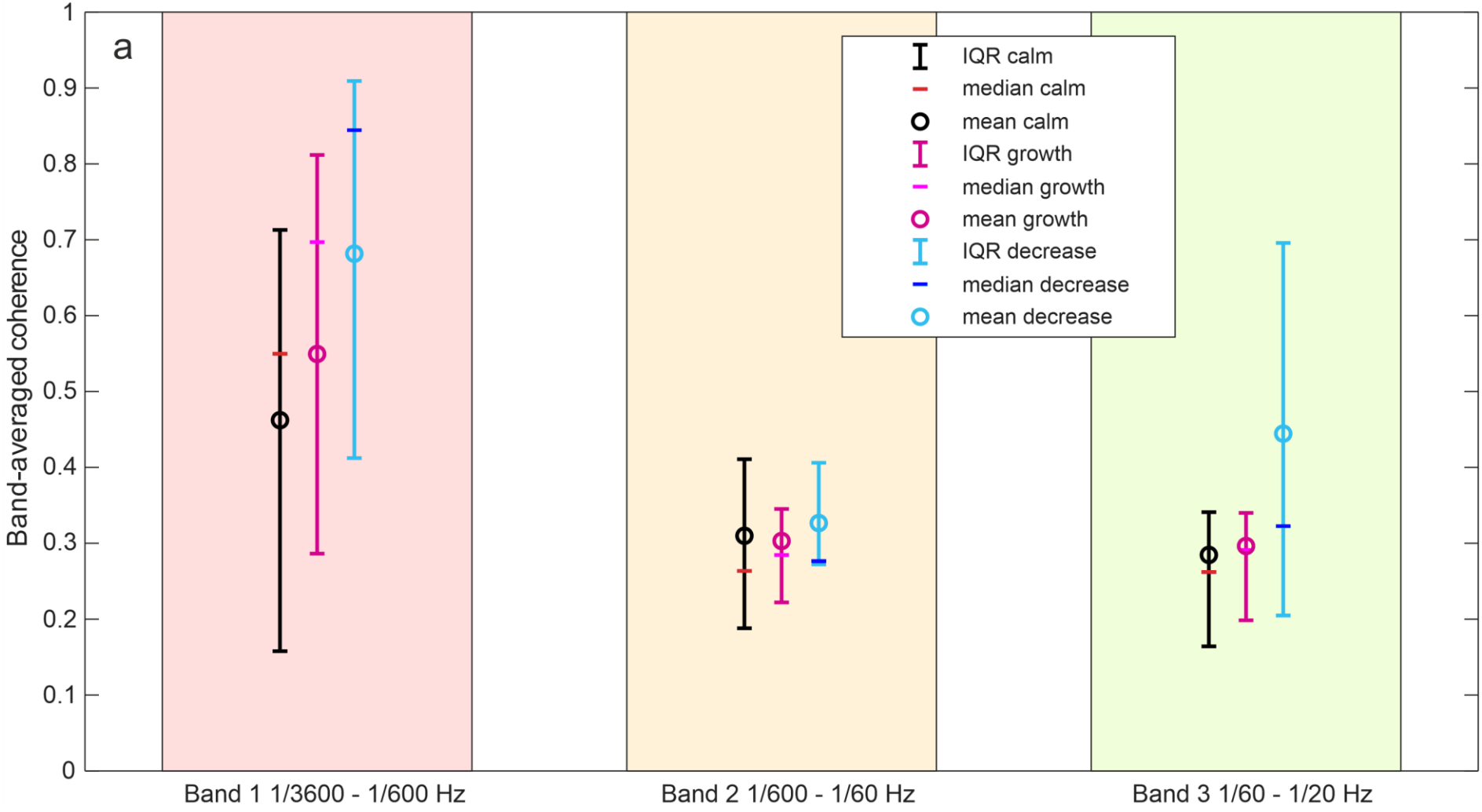
	Спокойн. эл.п.		Возрастающ. эл.п.		Убывающ. эл.п.		Отношение дисперсий	
	EVR_1	λ_1/λ_2	EVR_1	λ_1/λ_2	EVR_1	λ_1/λ_2	σ_c^2/σ_g^2	σ_c^2/σ_d^2
Среднее	0.65	3.75	0.84	4.44	0.94	5.96	0.21	0.09
Медиана	0.61	2.09	0.88	2.99	0.98	5.76	0.10	0.06
Q_1	0.53	1.72	0.72	2.38	0.88	3.58	0.06	0.02
Q_3	0.80	6.11	0.96	5.92	0.99	7.98	0.31	0.16

Доля объясненной дисперсии



Доля объясненной дисперсии (усредненная по частотным полосам) для плотности тока J, связанная с синфазной компонентой напряженности поля E_{com}

Когерентность между напряженностью поля E_{com} и измеренной плотностью тока J



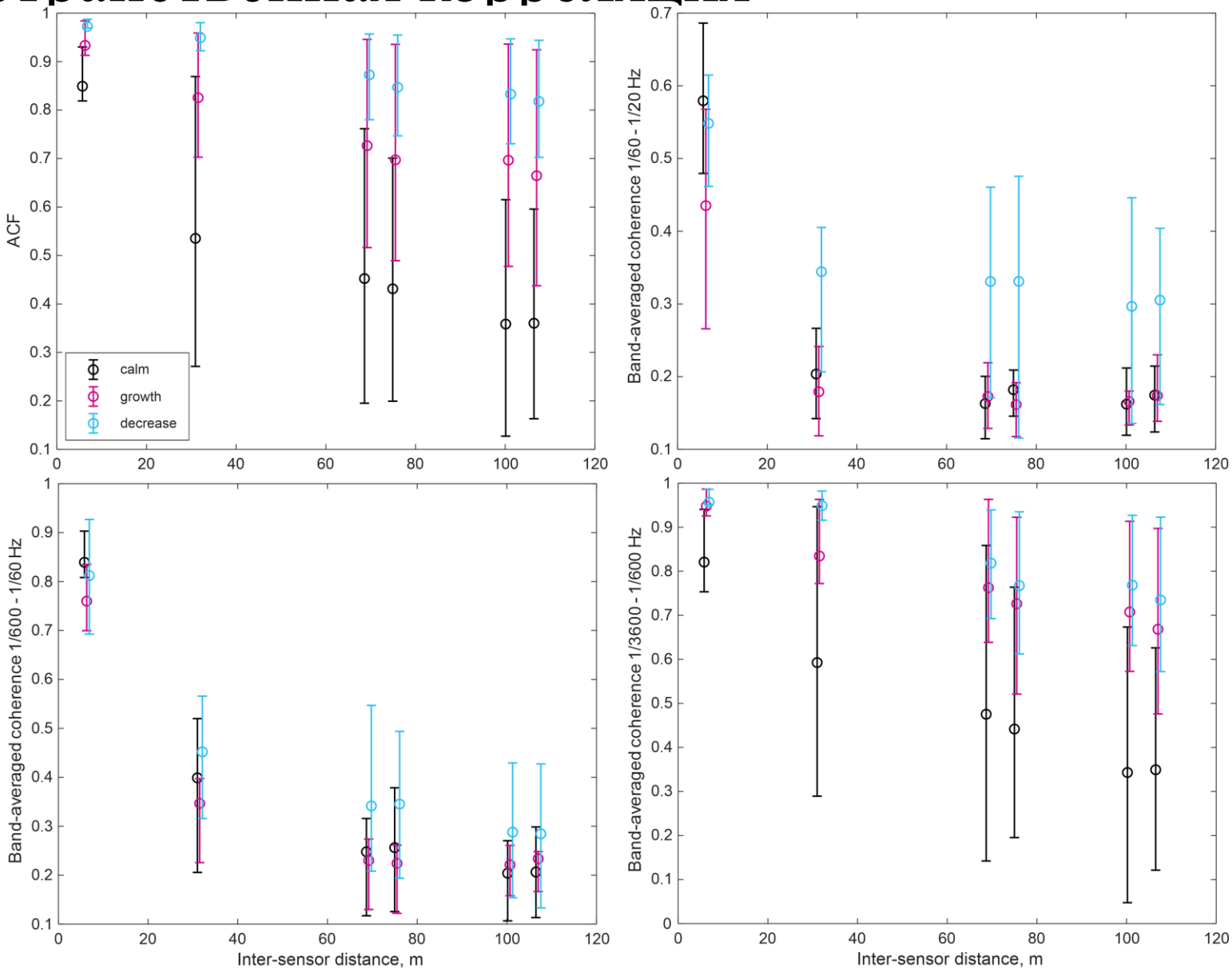
Усредненная по частотным полосам и режимам когерентность для синфазной компоненты напряженности поля E_{com} и измеренной плотности тока J

Интерпретация доли объясненной дисперсии и когерентности

Доля объясненной дисперсии отражает вклад когерентной составляющей в общую дисперсию плотности тока в пределах рассматриваемой полосы частот. Для всех режимов изменчивости напряжённости электрического поля медианные и средние значения доли объясненной дисперсии оказались максимальными в диапазоне самых низких частот. Также показатель имел тенденцию к росту при переходе от режима «спокойного поля» к «нарастающему» и далее к «убывающему полю». Такая закономерность указывает на то, что в условиях возмущенного поля медленные вариации плотности электрического тока все сильнее коррелируют с общемодовой компонентой напряжённости поля, причем наиболее выраженный эффект наблюдается в режиме убывания этого поля.

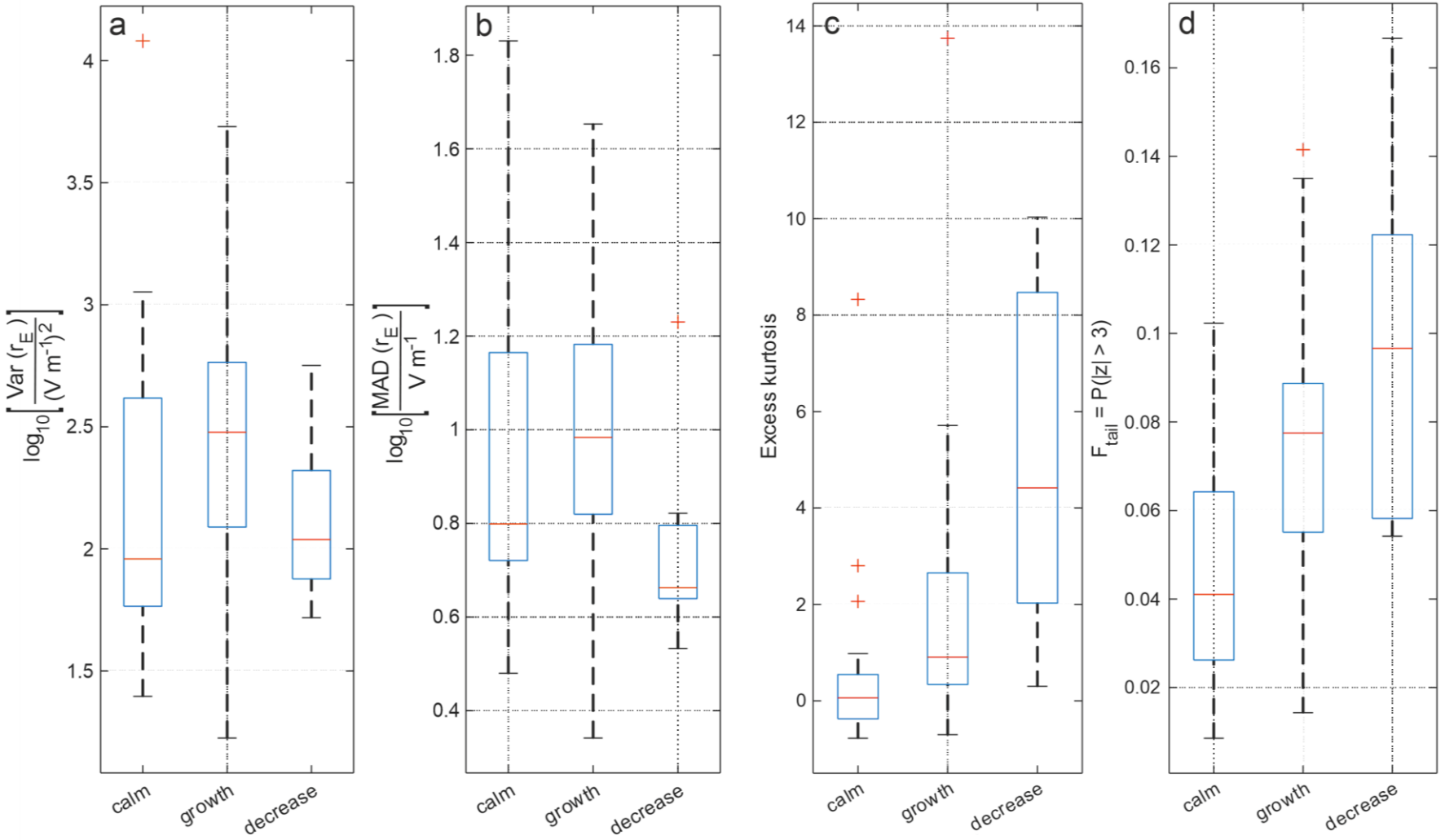
Когерентность применялась для определения того, ограничена ли связь между общей модой напряжённости поля и измеренной плотностью тока определенными временными масштабами. Для каждого режима изменчивости атмосферного электрического поля наиболее высокие медианные и средние значения когерентности между E_{com} и J наблюдались в низкочастотном диапазоне: от 1/3600 до 1/600 Гц. Медианные и средние значения когерентности демонстрировали постепенный рост при переходе от режима спокойного поля к режиму усиления, а затем к режиму ослабления. Однако в частотном диапазоне 1/600–1/60 Гц такой закономерный рост отсутствовал, а в диапазоне 1/60–1/20 Гц он проявлялся лишь слабо.

Пространственная корреляция



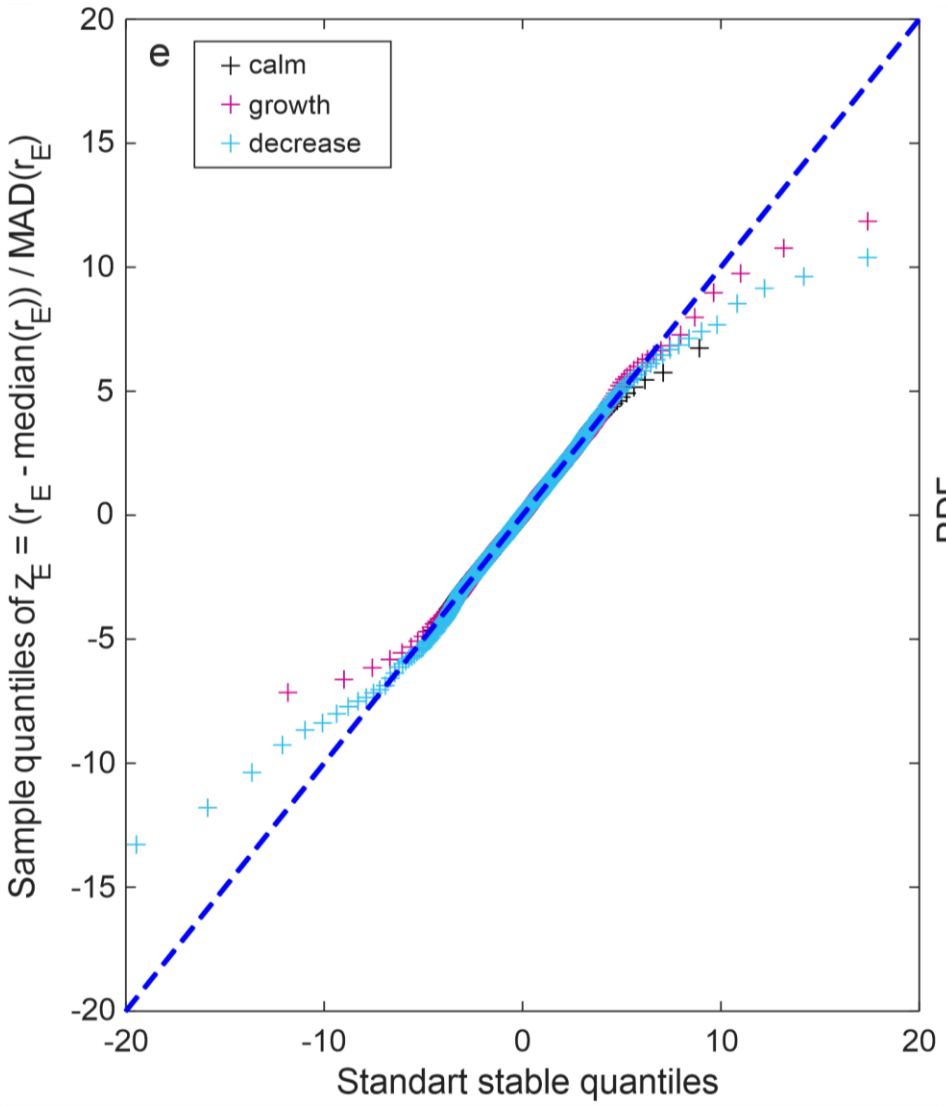
Функции пространственной корреляции напряжённости поля (a) и когерентности между датчиками, усредненной по частотным полосам (b–d)

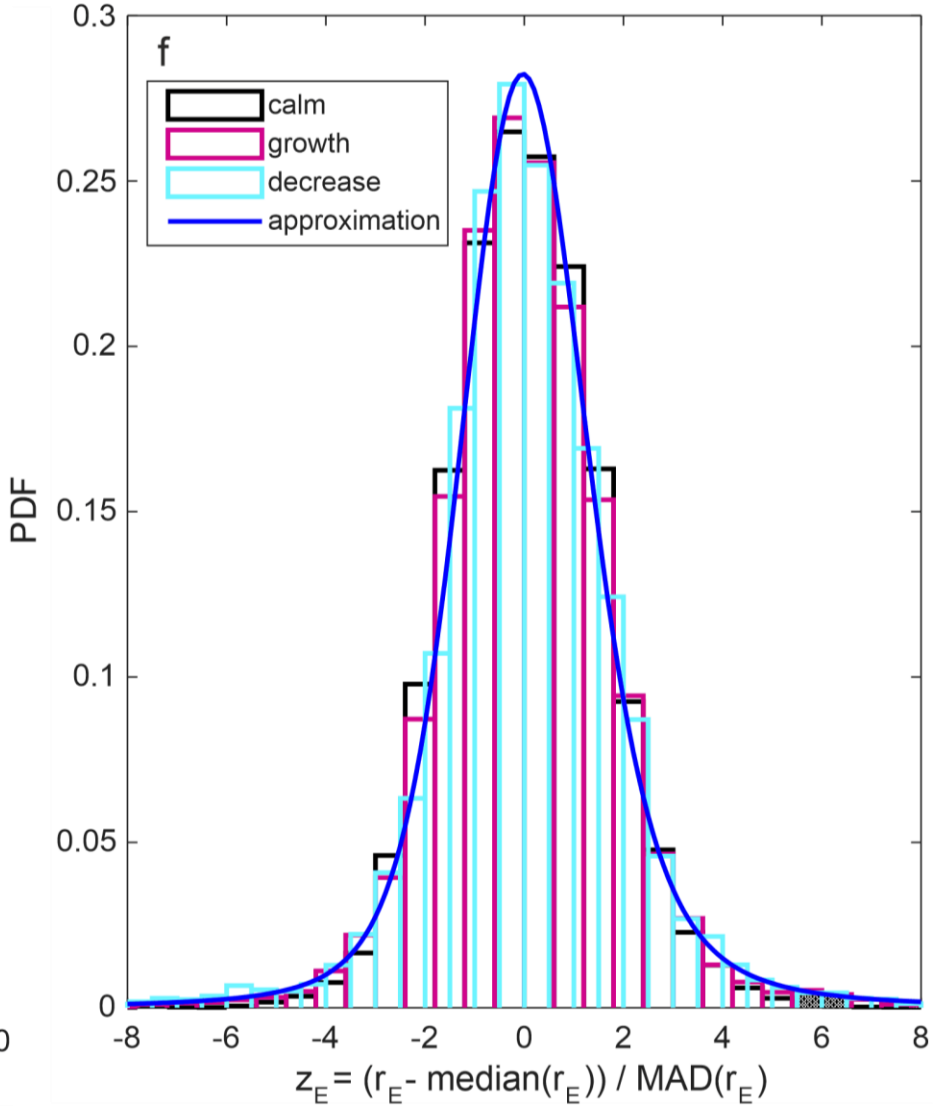
Статистика детрендированных остатков E_{com}



Диаграммы размаха для дисперсии (a) и MAD (b) детрендированных остатков E_{com}, распределения избыточного эксцесса (c) и доли симметричных «хвостов» (d), усредненные по режимам

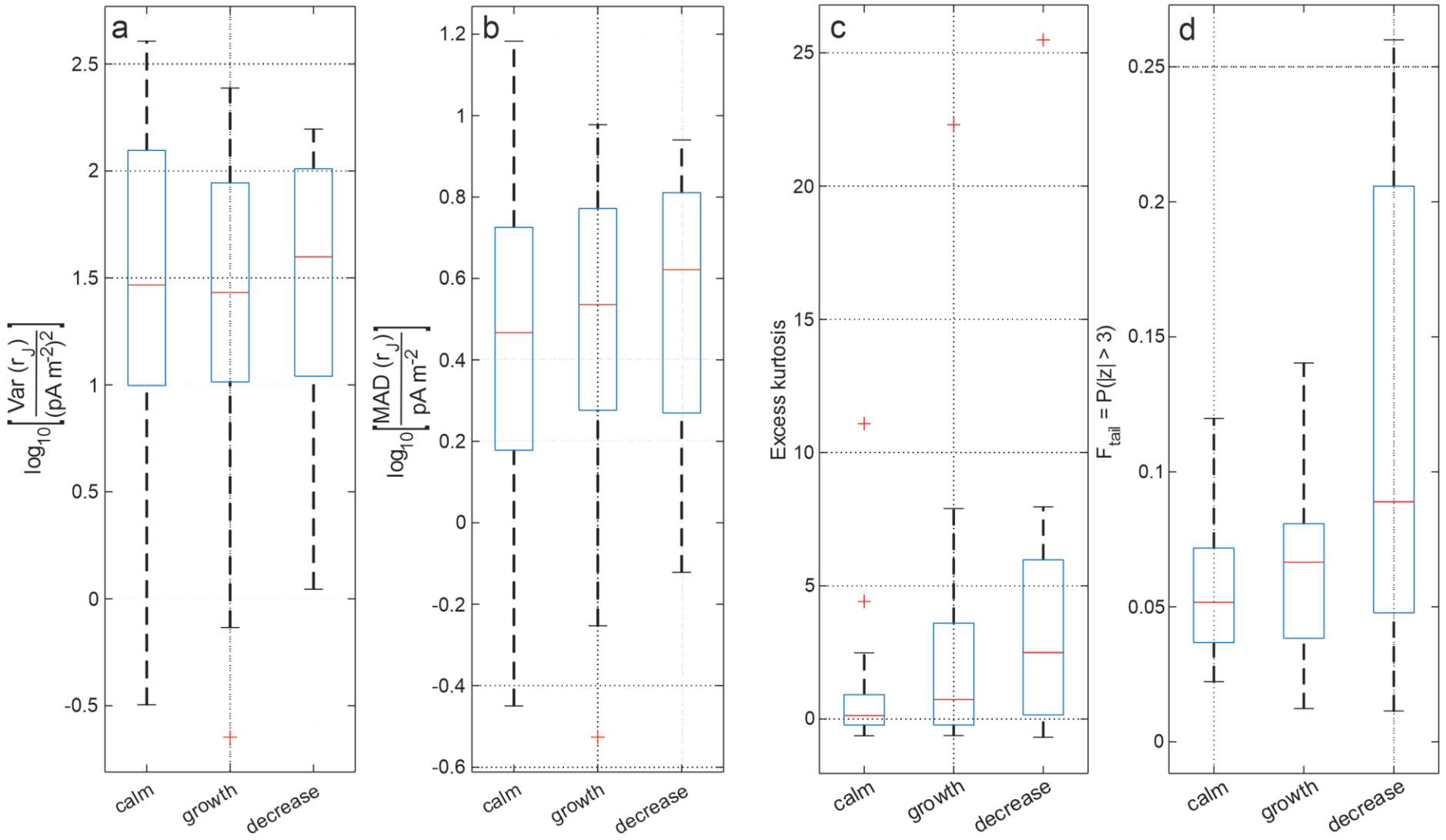
Статистика детрендированных остатков E_{com}





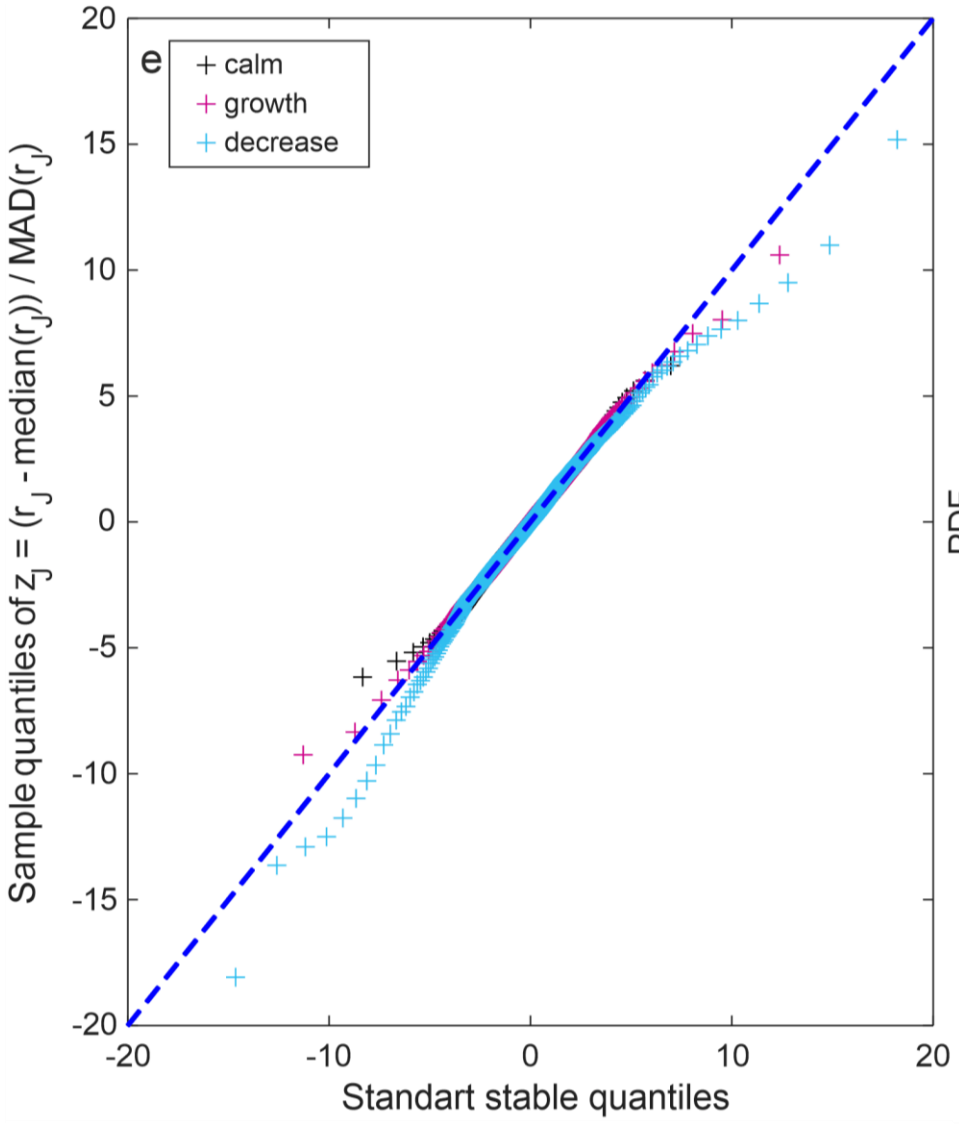
Q-Q график для устойчивого распределения флуктуаций электрического поля и распределения остатков.

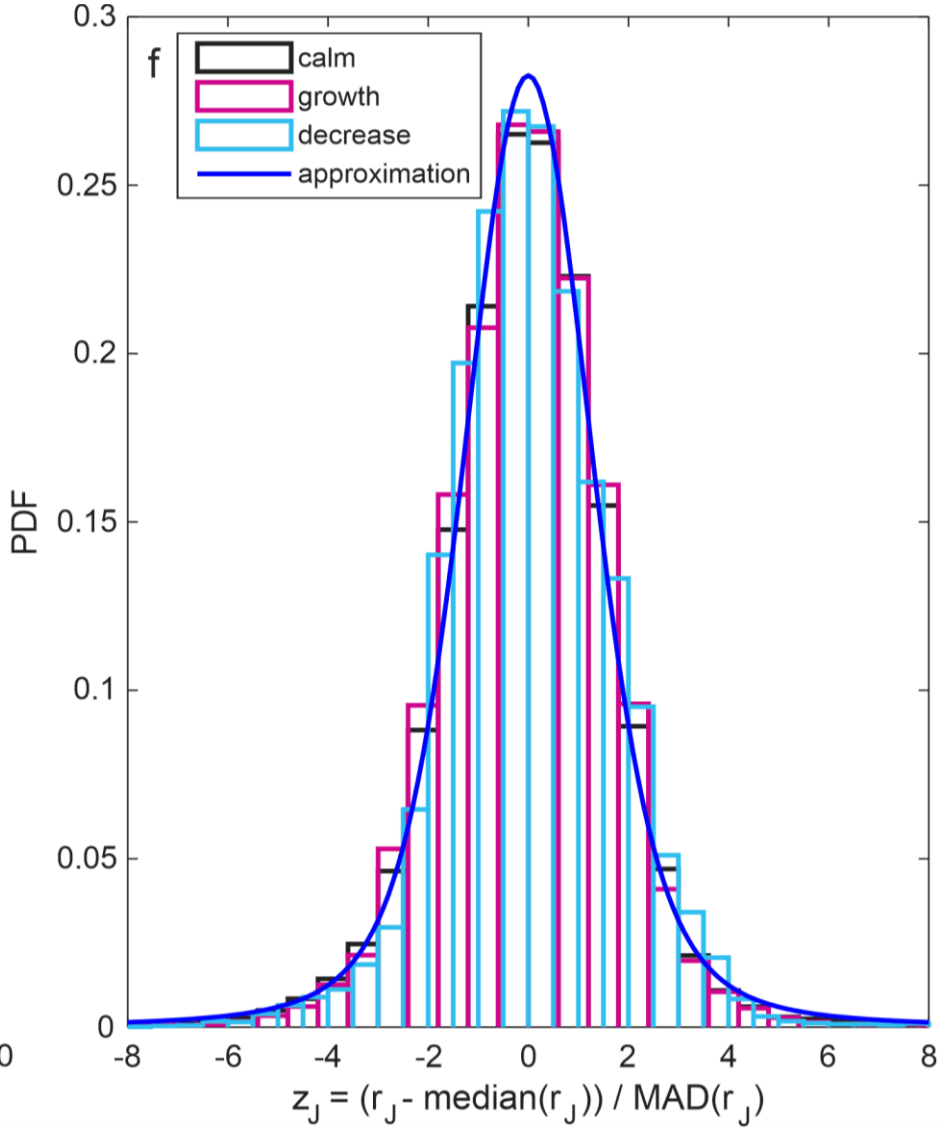
Статистика детрендированных остатков J



Диаграммы размаха для дисперсии (a) и MAD (b) детрендированных остатков J, распределения избыточного эксцесса (c) и доли симметричных «хвостов» (d), усредненные по режимам

Статистика детрендированных остатков J





Q-Q график для устойчивого распределения флуктуаций электрического тока и распределения остатков.

Интерпретация статистики детрендированных остатков

Статистические показатели масштаба не продемонстрировали устойчивой зависимости от режима изменчивости атмосферного электрического поля. Хотя для режима «нарастающего поля» были характерны наиболее высокие медианные значения дисперсии (a) и MAD (b), значительное перекрытие межквартильных размахов и «усов» диаграмм указывает на существенную изменчивость внутри каждого режима, что не позволяет разграничить режимы на основе данных показателей. Распределения эксцесса (c) и доли симметричных «хвостов» (d), агрегированные по режимам, последовательно смещаются вверх при переходе от режима «спокойного поля» к режиму «нарастающего поля» и далее к режиму «убывающего поля». Увеличение межквартильных размахов для эксцесса и медианных значений F свидетельствует о возрастающей изменчивости формы распределения с повышением флуктуаций поля.

Для остатков от плотности тока выявлены сопоставимые амплитуды флуктуаций в разных режимах и тот же порядок следования режимов для параметров формы распределения.

Выводы

1. Были проанализированы результаты синхронных мультисенсорных измерений напряжённости электрического поля и плотности тока.
2. Анализ главных компонент показал, что в режимах изменчивости с заметным трендом (классифицируемых как возмущенные условия) в вариациях приземного электрического поля доминировала выраженная общесетевая компонента.
3. Анализ в частотной области показал, что как когерентность между напряжённостью электрического поля и плотностью тока, так и доля дисперсии J, связанная с E_{com}, достигали максимума в низкочастотном диапазоне (от 10 мин до 1 ч) и, как правило, возрастали при переходе от спокойных условий к периодам нарастания и спада напряженности поля.
4. Измерения указывают на постепенную утрату пространственной взаимосвязи между показаниями электростатических флюксметров, отражавшуюся в уменьшении коэффициента корреляции и когерентности с расстоянием.
5. В совокупности результаты исследования выявляют два взаимодополняющих проявления возмущенной изменчивости приземного электрического поля. Первое — это пространственно-когерентная низкочастотная динамика, которая усиливается при росте поля и становится особенно высокой при его убывании. Второе — это остаточная компонента, которая не демонстрирует столь же устойчивого разделения режимов после удаления тренда, однако распределение ее амплитуд становится все более перемежающимся и характеризуется «тяжелыми» хвостами.

Литература

1. 1. Elster J., Geitel H. Über die radioaktive Emanation in der atmosphärischen Luft // Physikalische Zeitschrift. 1901. V 2. P. 590–593.
2. 2. Golubenko K., Rozanov E., Mironova I., Karagodin A., Usoskin I. Natural Sources of Ionization and Their Impact on Atmospheric Electricity // Geoph. Res. Lett. 2020. V 47. P. e2020GL088619.
3. 3. Hoppel, W.A., Frick, G.M. Ion-Aerosol Attachment Coefficients and the Steady-State Charge Distribution on Aerosols in a Bipolar Ion Environment // Aerosol Science and Technology. 1986. V 5, №1. P. 1–21.
4. 4. Nishida, R.T., Johnson, T.J., Olfert, J.S. On the three charge regimes of bipolar charge conditioners // Aerosol Sc. and Tech. 2025. V. 59(5). P. 499–520.
5. 5. Lee H.M., Kim C.S., Shimada M., Okuyama K. Effects of Mobility Changes and Distribution of Bipolar Ions on Aerosol Nanoparticle Diffusion Charging // Journ. of Chem. Engin. of Japan. 2005. V. 38. P. 486-496.
6. 6. Зайнетдинов Б. Г., Морозов В. Н., Занюков В. В. Влияние аэрозольных частиц в приземном слое воздуха на элементы глобальной электрической цепи в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37, № 5. с. 409–414.