

Динамика спектра вариаций атмосферно-электрического поля в предгрозовой атмосфере

И.И. Ипполитов, М.В. Кабанов, П.М. Нагорский, С.В. Смирнов*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 7.10.2011 г.

Выполнен спектрально-временной анализ вариаций электрических параметров предгрозовой атмосферы в диапазоне периодов от единиц до сотен минут, и выявлены волновые процессы, которые характерны для рассматриваемого явления в целом.

Ключевые слова: атмосферное электричество, мезомасштабные конвективные системы, предгрозовые явления, волновые процессы; atmospheric electricity, mesoscale convective systems, prestorm environment, wave disturbances.

Введение

Предгрозовой ситуации свойственна конвекция вытесняемого теплого воздуха в узком пространстве у передней части холодного фронта. Это приводит к конвективным потокам с образованием мощной кучево-дождевой облачности. Развитие конвективных и турбулентных восходящих и нисходящих потоков приводит к эффективному взаимодействию нейтральных и заряженных частиц в движущейся слабо ионизированной плазме, образованию областей объемного заряда различных знаков, быстрой эволюции спектра размеров аэрозоля и эффективной трансформации тепловой и механической энергии в энергию электрическую [1–5] и энергию акустических и внутренних гравитационных волн (АГВ) [6, 7]. Экспериментальные данные позволили установить, что глубокая конвекция приводит к возбуждению АГВ, поскольку в каждой конвективной грозовой ячейке можно выделить область восходящего конвективного движения, связанную с выделением тепла за счет конденсации влаги в теплом и влажном воздухе, и область нисходящего движения, охлаждаемую испарением влаги из капель [6, 7].

Вариации атмосферного давления с периодами более 5–7 мин обусловлены АГВ. Эффективность их возбуждения определяется видом источника и стратификацией атмосферы. Спектр этих волн может простирается до очень больших периодов, а вследствие малого затухания они способны распространяться на значительные расстояния [8].

К настоящему времени опубликован ряд работ [2, 3], основное внимание в которых уделено спектрам флуктуаций вертикальной компоненты элек-

трического поля в диапазоне периодов 1–100 с и установлено, что показатель спектра обычно подчиняется степенному закону. Для более низких частот (периоды 10^2 – 10^4 с) спектр характеризуется наличием низкочастотных вариаций, приводящих к изменению показателя наклона спектра, отклонению от степенного закона и насыщению [2–4].

В предгрозовой атмосфере, согласно [4], увеличение общей облачности с 0–2 до 3–5 баллов приводит к подъему всего спектра вариаций атмосферного электрического поля, причем наибольшее увеличение энергии в спектре происходит в диапазоне периодов 30–50 мин. С увеличением балла облачности, помимо общего увеличения энергии, в спектре появляются составляющие, амплитуда которых превосходит средний уровень на 10–20 дБ. Например, при усилении общей облачности от 0–2 до 3–5 баллов в спектре появляются максимумы с периодами 14–17 и 30–40 мин. Предгрозовой атмосфере свойственны согласованные вариации между вариациями давления и напряженностью поля, причем вначале регистрируются низкочастотные вариации (периоды ~50–100 мин), затем, за несколько часов до начала грозы, появляются колебания, период которых изменяется от 22 до 17 мин.

По данным сети микробарографов [7, 8], амплитуды колебаний давления перед и после прохождения грозовой ячейки над сетью пунктов регистрации составляют 30–50 Па и не превосходят 100 Па. Результаты спектральной обработки вариаций давления позволили выявить появление при прохождении грозовой ячейки квазипериодических колебаний с периодами от 10 мин до 3 ч и показать, что для периодов возмущений от 40 до 50 мин фазовая скорость распространения возмущений изменяется от 20 до 30 м/с. Последнее указывает на волновой характер зарегистрированных возмущений. На существование связи вариаций атмосферного электрического поля с колебаниями атмо-

* Иван Иванович Ипполитов (seo@imces.ru); Михаил Всеволодович Кабанов (post@imces.ru); Петр Михайлович Нагорский (npm_sta@mail.ru); Сергей Васильевич Смирнов (smirnov@imces.ru).

сферного давления в диапазоне периодов АГВ указано также в работе [9].

Однако в целом исследования динамики спектра возмущений атмосферного электрического поля перед прохождением грозовых конвективных ячеек пока носят фрагментарный характер. Настоящая статья является частичным восполнением указанного пробела.

1. Исходные данные

Экспериментальной основой настоящей работы являются данные мониторинга вариаций атмосферно-электрических и метеорологических параметров. Мониторинг метеорологических, актинометрических и атмосферно-электрических величин проводится в ИМКЭС СО РАН (восточная окраина г. Томска) непрерывно с тактом 0,5–1 мин с 2006 г. Детально состав автоматизированной информационно-измерительной системы, цели, задачи и методика проведения мониторинговых исследований представлены в [4, 10, 11].

На первом этапе был проведен анализ данных мониторинга для случаев предгрозовой атмосферы, позволивший отобрать из массива данных мониторинга за 2006–2008 гг. 75 сеансов, длительно-

стью от 12 ч и более, в течение которых в предгрозовой атмосфере в пункте наблюдения отсутствовали другие грозы и ливневые осадки. Интервал, равный или превосходящий 12 ч между грозами, был выбран, исходя из следующих соображений. Согласно [12] многообразие форм мезомасштабных конвективных систем (МКС) в умеренных широтах определяется, в конечном итоге, конвективными грозовыми ячейками, которые находятся на разных стадиях развития. Представим отдельную конвективную ячейку в виде термика с характерным горизонтальным масштабом до 10 км и временным масштабом ~20–30 мин. В целом МКС ограничены горизонтальным масштабом ~300 км и длительностью конвективной фазы 7–9 ч. Так как интенсивность конвекции подвержена колебаниям, которые обусловлены рождением новых ячеек (20–30 мин), грозовых штормов (1 ч) и их скоплений (3 ч), то при дальнейшей обработке из 12-часового интервала анализировался временной интервал, равный 8 ч, непосредственно примыкающий к началу прохождения мощной конвективной ячейки над пунктом регистрации.

Типичный пример интервала обработки представлен на рис. 1.

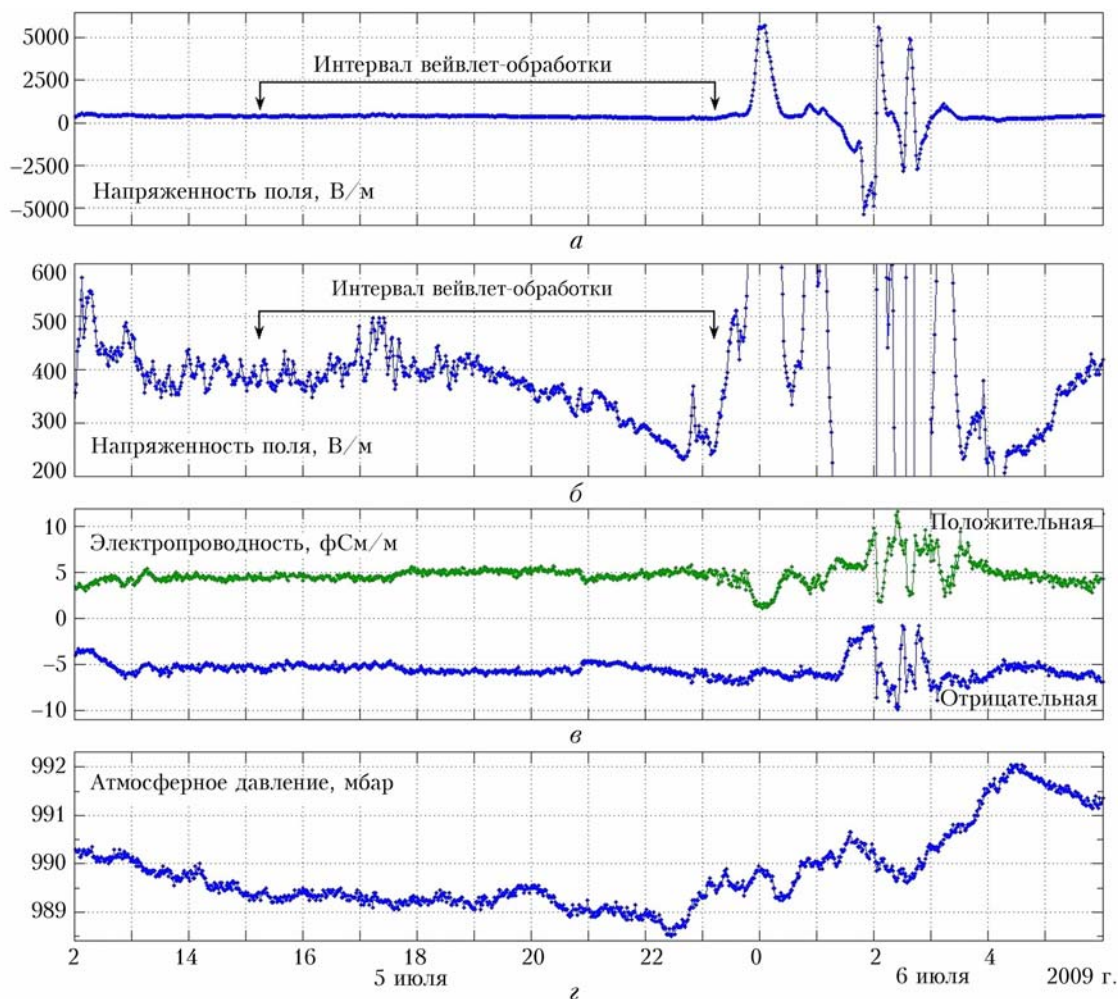


Рис. 1. Вариации атмосферных величин в предгрозовой и грозовой атмосфере. Выбранный интервал для спектрального анализа указан скобкой со стрелками

Вариации атмосферного электрического поля приведены в двух масштабах (рис. 1, а, б), электропроводности атмосферы (рис. 1, в) и давления (рис. 1, г). Представление вариаций напряженности поля в двух масштабах обусловлено тем, что предшествующие прохождению конвективной ячейки над пунктом регистрации вариации поля во много раз меньше вариаций поля, обусловленных грозовой ячейкой. На рис. 1, б, г видны квазипериодические вариации электрического поля и давления до прохождения конвективной ячейки над пунктом регистрации. Временной интервал, связанный с прохождением конвективной ячейки непосредственно над пунктом мониторинга, из дальнейшего анализа был исключен. Кроме того, при выборе интервалов обработки необходимо, во-первых, наличие облачности C_b , S_c , а во-вторых, чтобы вариации электрического поля при прохождении ячейки превышали ± 4 кВ.

На рис. 1 обращают на себя внимание вариации электропроводности под воздействием электрического поля. Фактически электрическое поле напряженностью более 1–2 кВ/м приводит к практически полному исчезновению легких ионов соответствующей полярности из приземного слоя атмосферы. Однако исследование этого явления выходит за рамки настоящей статьи.

Для отобранных 75 сеансов на рис. 2 представлено на внутрисуточном интервале распределение начал вариаций электрического поля, связанных с прохождением мощной конвективной ячейки над пунктом наблюдения. В этом распределении можно выделить основной дневной и слабые вечерний и ночной максимумы.

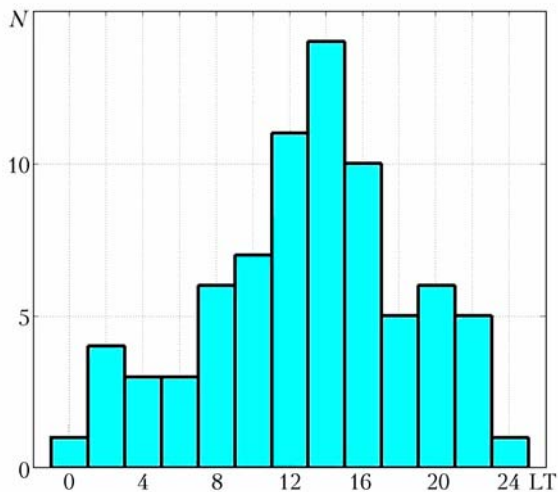


Рис. 2. Гистограмма начал вариаций электрического поля, связанных с прохождением мощной конвективной ячейки над пунктом наблюдения. По оси абсцисс – местное время суток LT, по оси ординат – число случаев N

Спектрально-временная обработка данных для этих отобранных сеансов в отличие от ранее проведенного анализа средних спектров по различным ситуациям, включая слоисто-дождевую облачность, позволяет более четко проследить динамику изме-

нений спектрального состава в процессе развития только грозовых явлений.

2. Результаты обработки данных мониторинга

Для исключения указанных недостатков была проведена спектрально-временная обработка отобранных сеансов методом вейвлет-анализа (применялся комплексный вейвлет Морле). Перед обработкой из атмосферно-электрических и метеорологических рядов данных были удалены линейные тренды. Длина интервала обработки составила 8 ч при такте съема данных 1 мин. Полученные матрицы вейвлет-коэффициентов $M_k(i, j)$ усреднялись методом наложения эпох, который применялся в двух вариантах:

а) коэффициенты усреднялись без предварительной обработки

$$\bar{M}(i, j) = \frac{1}{k} \sum_k M_k(i, j);$$

б) коэффициенты нормировались на максимальный размах значений вейвлет-коэффициентов $M_{кр}$ в каждом конкретном случае

$$\bar{M}(i, j) = \frac{1}{k} \sum_k M_k(i, j) / M_{кр}.$$

Поскольку в суточном ходе вариаций электрического поля, связанных с конвективными ячейками, выделяются основной дневной и слабый ночной максимумы, а также учитывая, что в [6] установлено принципиальное различие в спектральном составе вариаций давления в дневных (до 23 ч) и ночных (после 23 ч) условиях, весь ансамбль сеансов (75 случаев) был разбит на 2 класса: дневной и ночной. В первый из них попали данные с началом интенсивных вариаций электрического поля в интервале 10–22 LT, а во второй – с 22 до 10 LT. Дневной и вечерний максимумы распределения были объединены в один класс. Соотношение числа случаев в классах составляет ~4:1.

Модули средних вейвлет-спектрограмм атмосферного электрического поля до прохождения грозы представлены на рис. 3 для дневных (а) и ночных условий (г) соответственно. На рис. 3, а и г время (ось абсцисс, часы) отсчитывается от начала грозы. По оси ординат отложен масштаб колебаний в минутах.

На рис. 3 представлены также вейвлет-спектры, усредненные на двухчасовых интервалах в дневных (б) и ночных условиях (д). Здесь по оси абсцисс – масштаб колебаний, по оси ординат – амплитуда. Справа представлен нормированный спектральный состав вариаций атмосферного давления в дневных (в) и ночных (е) условиях, заимствованный из [6]. Для исключения влияния отдельных случаев на средний вейвлет-спектр все спектрограммы были нормированы на максимальный размах соответствующих вейвлет-коэффициентов.

3. Динамика спектра волновых процессов в предгрозовой атмосфере

Обработка отобранных сеансов позволила установить, что в электрическом поле за несколько часов до прохождения мощной конвективной ячейки над пунктом наблюдения возникают квазипериодические колебания с периодами от 15 мин до 2 ч и более.

В дневных условиях обращает на себя внимание следующее. Усредненный спектр колебаний электрического поля содержит несколько максимумов в диапазонах периодов: 95–130; 50–75 и 15–25 мин. Вначале в вейвлет-спектре наблюдаются наиболее низкочастотные колебания с периодом ~130–135 мин, затем — с периодом ~70–75 мин и последними появляются вариации с наиболее короткими периодами (~22–28 мин). Приблизительно за 2 ч до прохождения конвективной ячейки значения периодов колебаний во всех трех диапазонах периодов уменьшаются примерно со 130–135 до 95–100 мин, с 70–75 до 50 мин и с 22–28 до 16 мин, а рост средней амплитуды стабилизируется (см. рис. 3, а, б). Отметим, что средние амплитуды в полосах этих максимумов за 3–0,5 ч до прохождения ячейки значительно (в 2–5 раз) превосходят соответствующие амплитуды, зарегистрированные за 8–7 ч до появления интенсивных вариаций, связанных с прохождением мощной конвективной ячейки.

Для ночных сеансов средняя спектрально-временная картина отличается от аналогичной для дневных условий. Во-первых, возмущения в вейвлет-спектре появляются позже, чем в дневных условиях (не ранее чем за 6–5 ч), а, во-вторых, на временном интервале -3 ± 0 ч в спектре доминирует основной максимум с характерным периодом ~45–50 мин. Отметим, что в полосах периодов 80–120 и 10–20 мин также видны максимумы, однако их амплитуда существенно меньше, нежели амплитуда основного максимума. Аналогичная картина зарегистрирована и в [6] (см. рис. 3, в). Кроме того, местоположения в спектре основного (47 мин) и высокочастотного (12–13 мин) максимумов смещены в сторону меньших периодов относительно соответствующего местоположения в дневных условиях.

В целом спектр вариаций напряженности электрического поля атмосферы согласуется как с результатами спектрального анализа напряженности поля в зависимости от балла облачности [4], так и со спектральным составом вариаций атмосферного давления при прохождении грозовой ячейки [6]. Такое совпадение возможно, если источники зарегистрированных возмущений одни и те же.

Поскольку интенсивность конвекции подвержена вариациям, которые связаны с появлением и исчезновением конвективных ячеек (20–30 мин), грозовых штормов (1 ч) и их скоплений (3 ч) [12], представляется разумным предположить, что выявленные 3 полосы периодов обусловлены генерацией АГВ перечисленными выше нестационарными явлениями. На это указывает практическое совпадение

интервалов интенсивности конвекции (20–30 мин, 1 и 3 ч) и положения соответствующих максимумов в спектре периодов (15–25, 50–75 и 95–135 мин), а также близость пространственных размеров МКС и соответствующих масштабов возмущений. По данным [12], МКС ограничены горизонтальным масштабом ~300 км и в течение жизненного цикла (7–9 ч) кучево-дождевые облака группируются в иерархически соподчиненных скоплениях с горизонтальными масштабами областей развития примерно 30 и 100 км.

Воспользуемся данными [6] по оценке скорости перемещения АГВ (~20–30 м/с) и проведем оценку горизонтальных масштабов возмущений для выявленных максимумов в спектре периодов вариаций поля, равных 16, 50 и 120 мин. В итоге получим масштабы волн возмущений, равные 24, 75 и 180 км, или 0,8; 0,75; 0,6 от горизонтальных масштабов областей развития (~30 и 100 км) и масштаба МКС в целом (~300 км). Пространственные размеры для всех трех максимумов в спектре масштабов оказались несколько меньше, чем средние масштабы областей развития и всей МКС. Это, по-видимому, связано с тем, что источниками АГВ являются наиболее активные части областей развития и МКС в целом.

Таким образом, близость средних пространственных и временных масштабов позволяет выдвинуть предположение о том, что волновые возмущения в средних спектрах периодов вариаций напряженности поля вызваны АГВ, источниками которых являются иерархически соподчиненные скопления областей развития и МКС в целом. А квазипериодические вариации напряженности электрического поля обусловлены изменением проводимости приземной атмосферы под воздействием АГВ.

Заключение

Появление максимумов в среднем спектре вариаций атмосферного электрического поля указывает на то, что развитие метеорологических процессов при подготовке грозы происходит по вполне закономерному сценарию, определяемому развитием мезомасштабных конвективных систем. Важную роль в этих процессах играет возбуждение АГВ отдельными грозовыми ячейками, штормами и их скоплениями, поскольку вариации полей давления, связанные с АГВ, могут приводить к изменениям электрофизических свойств атмосферы и, как следствие, к вариациям напряженности атмосферного электрического поля. Последнее представляет наибольший интерес, поскольку АГВ могут являться той вынуждающей внешней силой, которая ответственна за процессы самоорганизации МКС.

Выявленные особенности частотно-временной организации вариаций электрических полей в предгрозовой атмосфере могут служить индикаторами (предвестниками) процессов, которые происходят или будут происходить в атмосфере.

Работа выполнена в рамках программ СО РАН № VII.63.1 и ФЦП № 02.740.11.0738.

1. Чалмерс Дж. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 316 с.
2. Мареев Е.А., Стасенко В.Н. Российские исследования в области атмосферного электричества // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2009. Т. 45, № 5. С. 709–720.
3. Анисимов С.В., Мареев Е.А. Спектры пульсаций электрического поля приземной атмосферы // Докл. РАН. 2001. Т. 381, № 1. С. 107–112.
4. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Смирнов С.В. Изменчивость метеорологических и атмосферно-электрических величин в приземном слое атмосферы в предгрозовых ситуациях // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 11–16.
5. Трахтенгерц В.Ю., Иудин И.Д. Актуальные проблемы электродинамики грозового облака // Изв. вузов. Радиофиз. 2005. Т. 48, № 9. С. 810–821.
6. Грачев А.Н., Куличков С.Н., Матвеев А.К. Квазипериодические флуктуации атмосферного давления с периодами 20–180 мин // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1988. Т. 24, № 2. С. 152–157.
7. Данилов С.Д., Свертилов А.И. Внутренние гравитационные волны, генерируемые при прохождении гроз // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1991. Т. 27, № 3. С. 235–242.
8. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
9. Рыбин Ю.С., Соловьев С.П. Исследование возмущенный электрического и акустико-гравитационного полей при прохождении атмосферного фронта // VI Российск. конф. по атмосферному электричеству: Сб. трудов. Н.-Новгород: ИПФ РАН, 2007. С. 233–234.
10. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Смирнов С.В. Концепция сетевого мониторинга природно-климатических процессов в Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 7–14.
11. Kabanov M.V., Ippolitov I.I., Nagorsky P.M., Karataev V.D., Phalagov Y.A., Smirnov S.V., Uzhegov V.N., Vukolov A.N., Yakovleva V.E. Multivariate Monitoring of Atmospheric Electrical and Meteorological, Optical and Radiative Parameters of the Atmospheric Boundary Layer. Preliminary Results // XIV Int. Conf. on Atmos. Electricity: Proc. Rio de Janeiro. Brazil. 2011. P. 1–4.
12. Абдуллаев С.М., Желнин А.А., Ланская О.Ю. Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем // Метеорол. и гидрол. 2009. № 5. С. 34–45.

I.I. Ippolitov, M.V. Kabanov, P.M. Nagorskiy, S.V. Smirnov. Dynamics of variability of the electric field in the prestrom atmosphere.

Spectral analysis of dynamics of variability of the electric field in the prestrom atmosphere has determined the availability of wave oscillation from several to hundreds minutes.

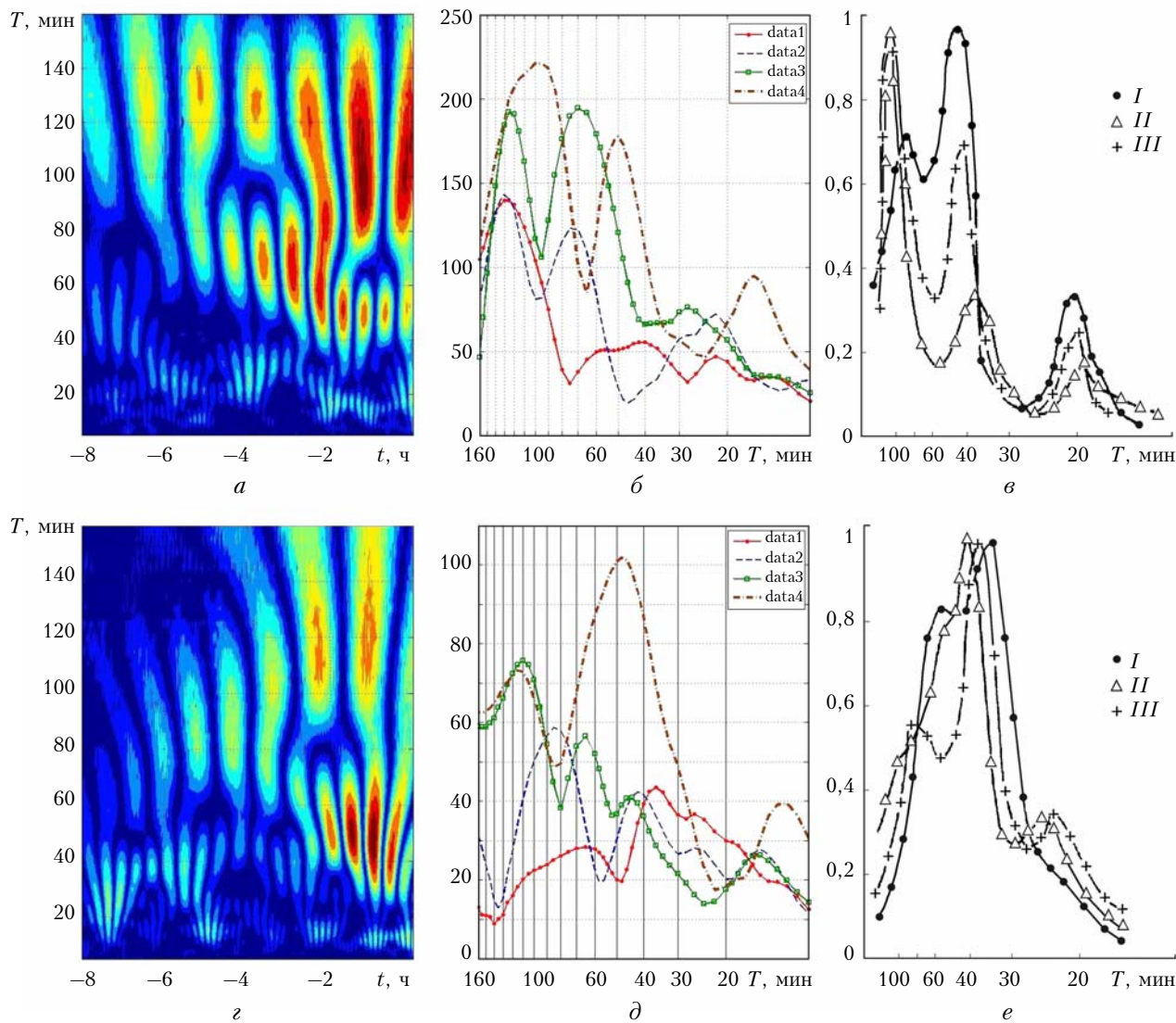


Рис. 3. Спектральный состав вариаций электрического поля (*a, б, г, д*) и атмосферного давления (*в, е*) в дневных (*a, б, в*) и ночных (*г, д, е*) условиях; *data1*–*data4* соответствуют интервалам усреднения $-8\div-6$ ч, $-6\div-4$ ч, $-4\div-2$ ч и $-2\div 0$ ч до прохождения мощных конвективных ячеек. Реализации *I, II, III* (*в, е*) получены 12–13.07.1979 г. в ИФА РАН [6] на сети пунктов в районе г. Звенигорода, расстояния между которыми ~ 5 км