

## Изменчивость метеорологических и атмосферно-электрических величин в приземном слое атмосферы в предгрозовых ситуациях

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 2.10.2008 г.

Приведены результаты многопараметрических измерений и анализа согласованных вариаций электрических и метеорологических параметров атмосферы с периодами от единиц до сотен минут для условий хорошей и нарушенной погоды. Выявлено, что переход к условиям нарушенной погоды приводит к направленным изменениям корреляционных связей между электрическими и метеорологическими параметрами атмосферы. Установлена связь между увеличением балльности облачности и ростом вариаций электрического поля, а также появлением дополнительных составляющих в спектре, проявляющихся в виде пиков скользящей функции когерентности между метеопараметрами и напряженностью электрического поля.

*Ключевые слова:* атмосферное электричество, предгрозовая ситуация, приземный слой, метеорологические величины.

### Введение

Атмосферное электричество является одним из важнейших элементов атмосферы и тесно связано с вариациями оптических, актинометрических и метеорологических параметров атмосферы, ее химическим и аэрозольным составом. Исследования этих зависимостей свидетельствуют о том, что получаемые закономерности во многом сложны и неоднозначны. Обусловлено это тем, что мы сталкиваемся с ансамблем неповторяющихся атмосферных ситуаций, каждая из которых является в некотором роде уникальной, а сам ансамбль не является всеобъемлющим.

Особую значимость исследования взаимозависимостей перечисленных параметров имеют при перестройке атмосферы в процессе ее перехода от «хорошей» погоды, когда скорость ветра не превышает 6 м/с, отсутствуют осадки, туман и облачность нижнего яруса, к нарушенной погоде, в том числе во время предгрозовой перестройки атмосферы. Последнее тесно связано с динамикой среды, изменениями ее аэрозольного и ионного состава и генерацией электрической энергии в зонах пониженного атмосферного давления и холодных фронтов. В предгрозовых ситуациях вытеснение теплого воздуха из нижних слоев атмосферы вследствие перемещения клина холодного воздуха приводит к вынужденной конвекции вытесняемого теплого воздуха в узком пространстве у передней части холодного фронта.

Это создает конвективные потоки с образованием мощной кучево-дождевой облачности, усиливающейся в дневное время. Развитие конвективных и турбулентных восходящих и нисходящих потоков на холодном фронте приводит к взаимодействию нейтральных и заряженных частиц в движущейся слабоионизированной плазме, к быстрой эволюции спектра размеров аэрозоля и эффективной трансформации тепловой и механической энергии в энергию электрическую [1–5].

К настоящему времени опубликован ряд работ [4, 6], основное внимание в которых уделено спектрам флуктуаций вертикальной компоненты электрического поля в диапазоне периодов от 1 до  $10^2$ . Установлено, что показатель спектра обычно подчиняется степенному закону. Для более низких частот (для периодов  $10^2$ – $10^4$  с) спектр, согласно [4], характеризуется наличием низкочастотных вариаций, приводящих к изменению показателя наклона спектра, отклонению от степенного закона и насыщению. Для этого диапазона периодов приведенные в публикациях результаты анализа согласованных флуктуаций электрических и метеорологических параметров основаны на эпизодических измерениях и носят пока фрагментарный характер. Но именно в этом диапазоне периодов мощная конвективная облачность приводит к генерации инфразвуковых и внутренних гравитационных волн, способных распространяться на значительные расстояния [7–10], а в пограничном слое атмосферы образуются когерентные конвективные и аэроэлектрические структуры [4, 11, 12], для которых следует ожидать закономерных связей параметров.

\* Иван Иванович Ипполитов; Михаил Всеволодович Кабанов; Петр Михайлович Нагорский; Сергей Васильевич Смирнов (ipm\_sta@mail.ru/smirnov@imces.ru).

В настоящей статье обсуждаются результаты многопараметрических измерений и анализа согласованных вариаций электрических и метеорологических параметров атмосферы с периодами от единиц до сотен минут, в том числе в условиях перехода от хорошей к нарушенной погоде и обратно. Измерения в мониторинговом режиме атмосферно-электрических (напряженность электрического поля атмосферы  $E$ , полярные электропроводности атмосферного воздуха  $L_-$  и  $L_+$ ), актинометрических (суммарная солнечная радиация  $P_s$ , УФ-освещенность) и метеорологических (температура  $T_a$ , относительная влажность  $h$  воздуха, атмосферное давление  $p$ , скорость  $w$  и направление  $\alpha$  ветра, температура почвы на поверхности  $T_p$  и разных глубинах  $T_g$ ) величин проводились в ИМКЭС СО РАН на специально

оборудованной площадке с помощью автоматизированной информационно-измерительной системы. В состав системы входили метеорологические датчики, измерители напряженности электрического поля атмосферы «Поле-2» и электропроводности атмосферного воздуха «Электропроводность-2», пиранометр Kipp & Zonen CM-11 и фотометр NILU-UV-6T. Кроме того, в рамках стандартного регламента проводились визуальные наблюдения за облачностью и атмосферными явлениями.

## 1. Взаимная корреляция электрических и метеорологических параметров

Визуальный анализ синхронных регистрограмм позволил выявить, что вариации с периодами от еди-

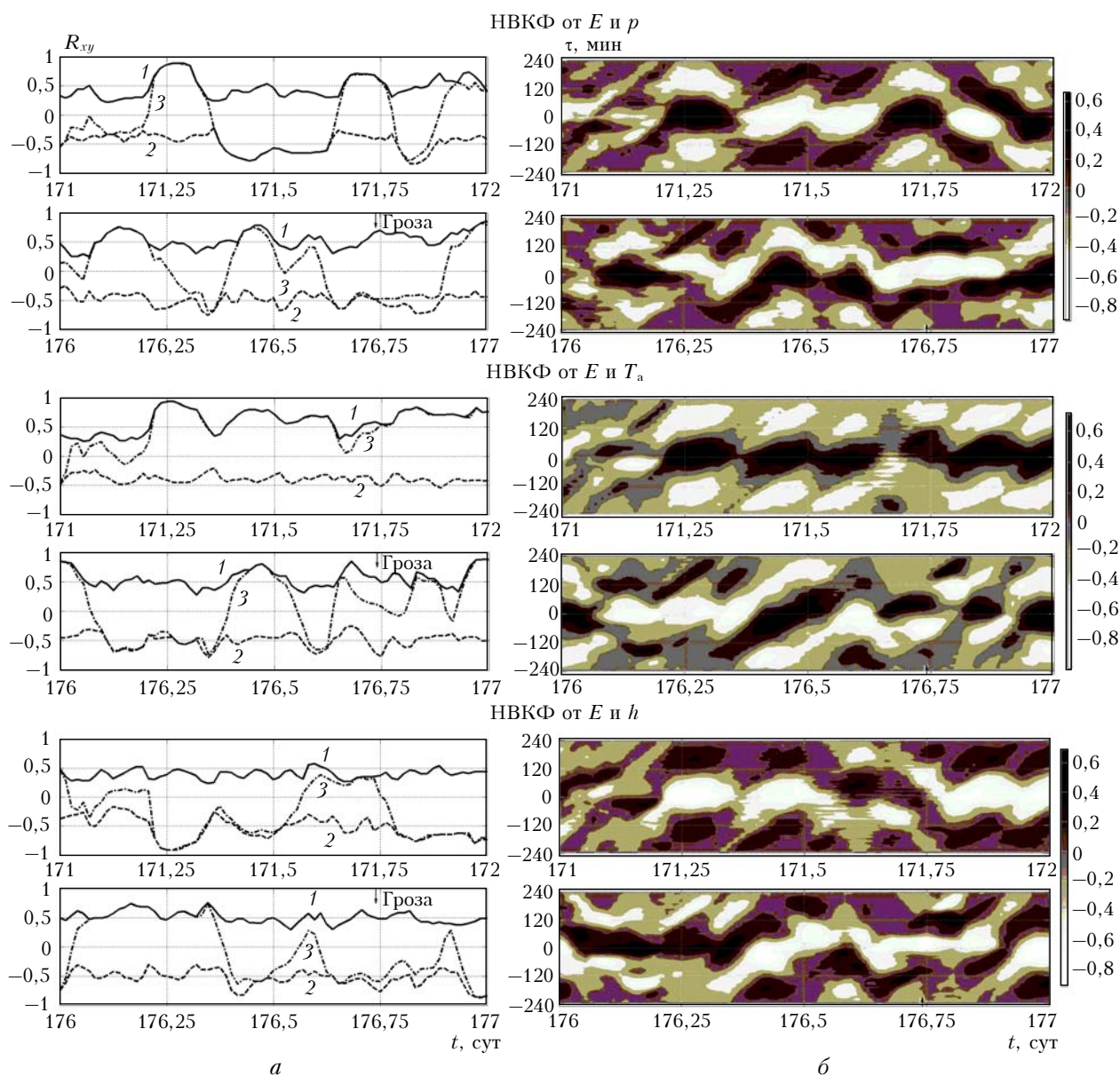


Рис. 1. Вариации НВКФ в условиях хорошей (171 сут, 20.06.06 г.) и нарушенной (176 сут, 25.06.06 г.) погоды: *a* – временной ход минимальных, максимальных значений НВКФ и  $R_{xy}(t, \tau = 0)$ ; *б* – карты значений  $R_{xy}(t, \tau)$ . По оси абсцисс отложено время  $t$  (номер суток от начала года), по оси ординат слева – значения  $R_{xy}(t, \tau)$ , справа – сдвиг  $\tau$ , мин. Стрелкой указана гроза (25.06.06 г., 17:20–17:38 LT)

ниц до нескольких десятков—сотен минут, как правило, проявляются практически одновременно в рядах электрических, актинометрических и метеорологических величин. Взаимокорреляционный анализ показал, что значения нормированной взаимокорреляционной функции (НВКФ)  $R_{xy}(t, \tau)$  между электрическими и метеорологическими величинами могут достигать 0,75–0,95. Здесь  $t$  — время, отнесенное к середине временного окна,  $\tau$  — сдвиг между анализируемыми рядами  $x$  и  $y$ . Положительные значения  $\tau$  соответствуют опережению вариаций в электрическом поле относительно вариаций второго анализируемого ряда, отрицательные — запаздыванию. Длина временного окна, синхронно скользящего по рядам данных, варьировалась от 2 ч до 5 сут. Сдвиг между соседними окнами также варьировался от 20 мин до 2 сут.

В качестве примера на рис. 1, *a* представлены результаты расчета максимальных ( $R_{xy}^{\max}(t, \tau)$ , кривая 1) и минимальных ( $R_{xy}^{\min}(t, \tau)$ , кривая 2) значений НВКФ и значений НВКФ при нулевом сдвиге между рядами ( $R_{xy}(t, \tau = 0)$ , кривая 3) между давлением, температурой воздуха, относительной влажностью и напряженностью электрического поля за 20 и 25 июня 2006 г.

Анализируемые фрагменты рядов последовательно сглажены вейвлет-фильтром и трехточечным треугольным фильтром. Длина скользящего окна составила 240 мин, сдвиг — 20 мин. Для этих же суток карты значений НВКФ в координатах  $t, \tau$  между перечисленными метеопараметрами и напряженностью поля представлены на рис. 1, *б*.

Характерной чертой поведения НВКФ при нулевом временном сдвиге ( $\tau = 0$ ) между рядами является циклическая смена знака  $R_{xy}(t, \tau = 0)$ . Смена

знака происходит на интервале, не превышающем долей—единиц часов, в то время как знак  $R_{xy}(t, \tau = 0)$  может сохраняться от долей суток до единиц суток. Более того, при высокой корреляции (безразлично, положительной или отрицательной) величина  $R_{xy}(t, \tau = 0)$  близка или совпадает либо с  $R_{xy}^{\max}(t, \tau)$ , либо с  $R_{xy}^{\min}(t, \tau)$ , а временной сдвиг не превышает 1 мин. Поскольку временные интервалы между последовательными падениями (сменой знака)  $R_{xy}(t, \tau = 0)$  составляют единицы часов, то они, по-видимому, обусловлены регулярным суточным ходом электрических и метеопараметров, как и при взаимной корреляции аэроэлектрического и температурного полей в приземном слое атмосферы, исследованной в [6].

## 2. Распределение экстремумов НВКФ и временных задержек

Гистограммы распределений экстремумов НВКФ,  $R_{xy}(t, \tau = 0)$  и временных задержек  $\tau_{\min}$  и  $\tau_{\max}$  для НВКФ между вариациями давления и напряженностью электрического поля иллюстрируются рис. 2.

При построении гистограмм использованы данные с марта по август 2006 г., длина текущего окна выбрана равной 240 мин, сдвиг между окнами — 120 мин. Общее число текущих окон составило 1726.

Основные черты приведенных на рис. 2 распределений характерны не только для анализируемой НВКФ, но и для других НВКФ. Обращают на себя внимание остроконечность и явная асимметрия распределений  $R_{xy}^{\min}(t, \tau)$  и  $R_{xy}^{\max}(t, \tau)$ . Распределение  $R_{xy}(t, \tau = 0)$  на интервале  $\pm 0,8$  является практически равномерным. Однако наибольший интерес

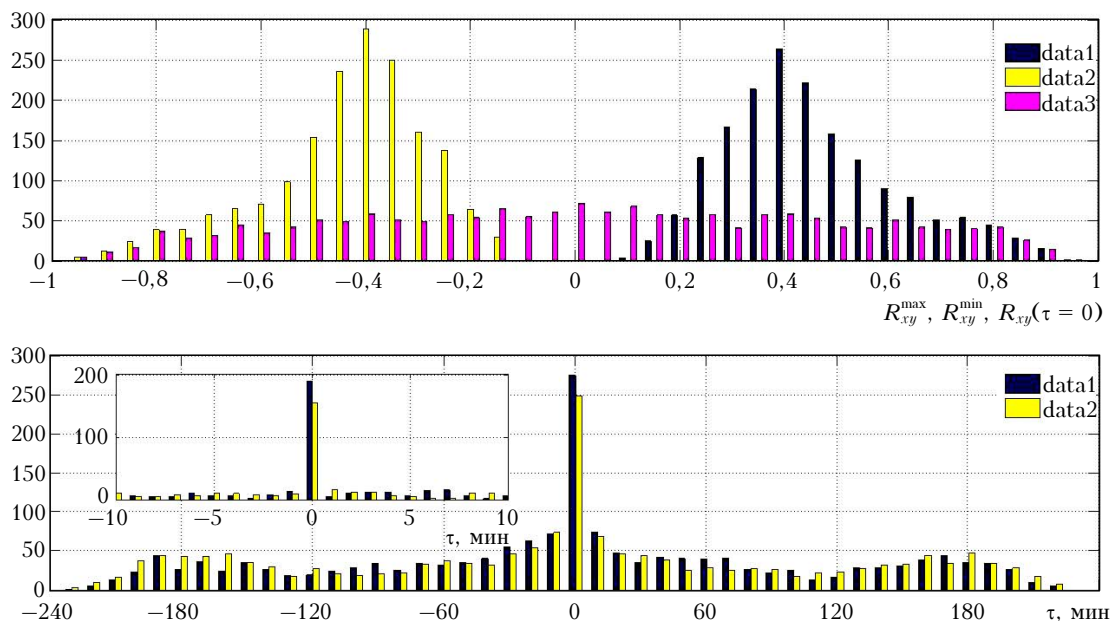


Рис. 2. Гистограммы распределений параметров НВКФ. Вверху: data1 — частота регистрации максимальных значений НВКФ, data2 — минимальных, data3 — значения НВКФ при нулевом сдвиге между реализациями. Внизу: data1 — временная задержка для положительного значения максимума НВКФ, data2 — для отрицательного. На фрагменте — распределение частот задержек экстремумов НВКФ в области малых значений сдвигов

представляет распределение сдвигов между реализациями, соответствующими экстремумам НВКФ. Фактически данное распределение можно представить как сумму двух распределений:  $\delta$ -образного и равномерного. Подтверждением этому является фрагмент на рис. 2, на котором представлено распределение частот задержек экстремумов НВКФ при минимально возможной ширине подынтервалов гистограммы, равной такту регистрации данных (1 мин). Отношение между случаями с нулевой задержкой к общему количеству составляет  $\sim 10\%$ . Возможно, что распределения величин  $R_{xy}^{\min}(t, \tau)$  и  $R_{xy}^{\max}(t, \tau)$  тоже представляют собой сумму двух различных распределений.

В отличие от остальных регистрируемых метеопараметров электрическое поле атмосферы не является локальным параметром [1, 3, 4]. В связи с этим можно предположить, что  $\delta$ -образная составляющая функции распределения задержек обусловлена взаимодействием поля и метеопроцессов непосредственно в точке расположения измерительной аппаратуры, а равномерная составляющая функции распределения задержек связана с процессами, воздействующими на уровень электрического поля атмосферы и его вариации посредством изменений электрофизических характеристик среды и концентрации объемных зарядов вдоль участка электрической цепи «земля–ионосфера» вне измерительного комплекса. В этом случае временная задержка объясняется конечной скоростью переноса различных возмущений (в том числе когерентных конвективных и аэроэлектрических структур [6, 11, 12]) в пограничном слое атмосферы.

### 3. Влияние облачности на корреляционные связи

Визуальные наблюдения за состоянием облачности позволили провести разбиение массива исходных данных на ряд групп в зависимости от баллов общей облачности, облачности нижнего яруса и от высоты нижней границы облачности. Для общей облачности и облачности нижнего яруса к первой группе были отнесены все случаи с облачностью 0–2 балла, ко второй группе – с облачностью 3–5, к третьей – 6–8 и к четвертой – 9–10 и 12 баллов соответственно. Для высоты нижней границы облачности  $z$  в первую группу попали данные с  $z > 100$  м, во вторую – с  $1000 > z > 700$  м, в третью – с  $700 > z > 400$  м, в четвертую – с  $z \leq 400$  м. К пятой группе отнесены все случаи, когда балл облачности либо высота ее нижней границы не были определены (в основном, это ночные условия и переходное время суток).

По состоянию облачности приведенные на рис. 1 данные представляют собой две совершенно различные ситуации в атмосфере. В первом случае (20.06.06 г.) имеют место условия хорошей погоды: общая облачность – 1 балл, облачность нижнего яруса – 0 баллов. Во втором случае (25.06.06 г.) выполняются условия нарушенной погоды, характерные для предгрозового состояния атмосферы:

общая облачность – 10 баллов, облачность нижнего яруса возрастает с 3 до 12 УТ от 0 до 4 баллов, нижняя граница облачности опускается до 400 м. С 11:20 до 11:38 УТ операторами зарегистрирована гроза. Сравнительный анализ карт НВКФ и вариаций ряда ее параметров за 20 и 25 июня 2006 г. показывает, что они носят принципиально различный характер. В предгрозовой атмосфере уменьшается суточный размах и изменяется период циклических вариаций НВКФ, а большую часть времени вариации  $R_{xy}(t, \tau = 0)$  фактически противофазны аналогичным вариациям в случае хорошей погоды. Выявленные отличия вариаций НВКФ в предгрозовой атмосфере от условий хорошей погоды могут служить индикаторами процессов, которые происходят или могут происходить в предгрозовой атмосфере.

Вместе с тем, указывая на существование корреляционных связей между электрическими и метеорологическими процессами, НВКФ дает очень грубую оценку диапазона периодов, в котором эти связи могут осуществляться. Известно, что переход от хорошей к нарушенной погоде сопровождается резким усилением флуктуаций напряженности поля [1, 3]. Поэтому, анализируя вариации напряженности поля при таком переходе, обратим внимание, в первую очередь, на эволюцию спектрального состава вариаций. Эволюция среднего спектра вариаций напряженности поля

$$\bar{S}_E(T_j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_E^2(t_i, T_j)}$$

представлена на рис. 3, где  $T_j$  – период  $j$ -й спектральной составляющей;  $S_E(t_i, T_j)$  – спектр в  $i$ -м окне. Здесь использованы данные с марта по август 2006 г., длина спектрального окна составила 240 мин, сдвиг между окнами – 120 мин.

Как видно из рис. 3, для общей облачности увеличение ее количества с 0–2 до 3–5 баллов приводит к подъему всего спектра вариаций. В области малых периодов этот подъем меньше ( $\sim 10$ –15 дБ), чем в области больших периодов ( $\sim 15$ –20 дБ). Наибольшее увеличение энергии в спектре происходит в диапазоне периодов 30–50 мин – более чем на 25 дБ, а спектр вариаций в области малых периодов (менее 10 мин) становится сильно флуктуирующим.

С увеличением балла облачности, помимо общего увеличения энергии, в спектре вариаций появляются составляющие, амплитуда которых превосходит средний уровень на 10–20 дБ. Так, при усилении общей облачности от 0–2 до 3–5 баллов в спектре появляются два максимума с периодами 14–17 и 30–40 мин. Для 3-й и 4-й групп первый максимум превращается в 2 максимума с периодами  $\sim 8,5$  и 11–14 мин, а для второго максимума диапазон периодов уменьшается до 27–30 мин. Для облачности 9–10 и 12 баллов в области коротких периодов 4–6 мин формируется дополнительный максимум, амплитуда которого более чем на 20 дБ превосходит фоновый уровень.

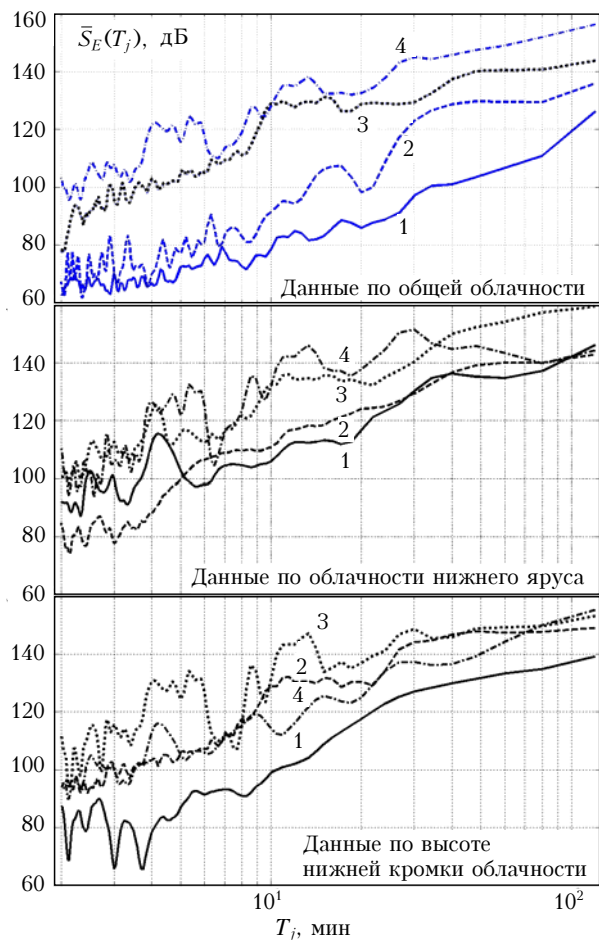


Рис. 3. Эволюция среднего спектра вариаций напряженности поля в зависимости: от балла общей облачности, балла облачности нижнего яруса и высоты нижней кромки облачности. По оси абсцисс – период, по оси ординат – амплитуда. Номера кривых соответствуют номерам групп, на которые были разбиты исходные данные

Рассмотрим на конкретном примере, как спектральные составляющие проявляются в согласованных изменениях метеорологических и электрических параметров. На рис. 4 приведены карты скользящей функции когерентности  $C_{xy}(t_i, T_j)$  между вариациями давления и напряженности поля (рис. 4, а) и вариациями температуры и напряженности поля (рис. 4, б) в условиях хорошей и нарушенной погоды. Здесь  $t_i, T_j$  – время, соответствующее середине  $i$ -го скользящего окна и  $j$ -го спектрального периода вариаций в минутах. Длина окна составила 240 мин, сдвиг между соседними окнами – 20 мин.

Сопоставление карт функций  $C_{xy}(t, T)$  между вариациями давления и напряженности поля за эти дни показывает, что в отличие от условий хорошей погоды в предгрозовой атмосфере регистрируются согласованные вариации. Вначале примерно в 7 LT регистрируются согласованные низкочастотные вариации (диапазон периодов ~ 50–100 мин, стрелка с цифрой 1), затем, за 5–6 ч до начала грозы, появляются совместные вариации, которые исчезают

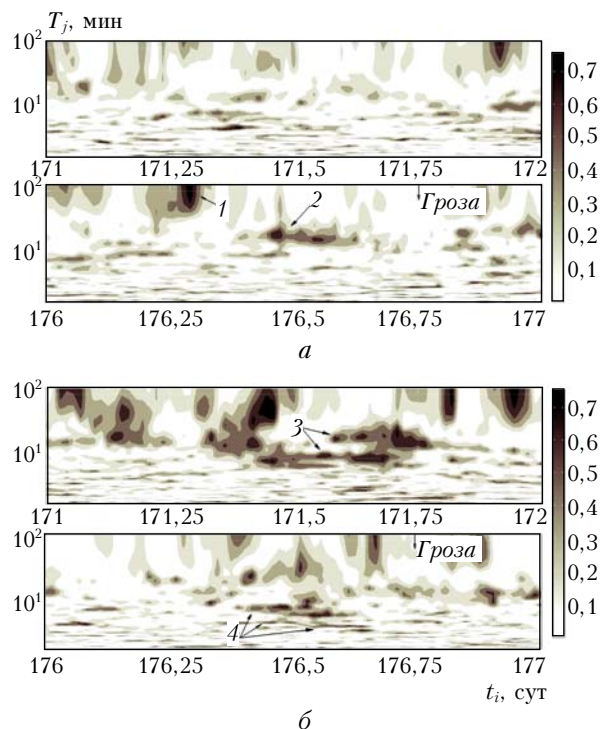


Рис. 4. Карты функции когерентности в условиях хорошей (20.06.06 г.) и нарушенной (25.06.06 г.) погоды: а – функция когерентности между давлением и напряженностью поля; б – функция когерентности между температурой и напряженностью поля. По оси абсцисс – время  $t$ , по оси ординат – период вариаций

к началу грозы и период которых плавно уменьшается от 22 до 17 мин (стрелка с цифрой 2). В целом полученные данные не противоречат ни данным об изменении спектрального состава вариаций электрического поля при увеличении балльности облачности, ни результатам исследования согласованных вариаций электрического поля и атмосферного давления в предгрозовой атмосфере, приведенным в [9].

Иная ситуация складывается для карт когерентности температурного и электрического полей (рис. 4, б). Развитие облачности в предгрозовой ситуации ведет к общему уменьшению когерентности между этими процессами, исчезновению пиков когерентности в диапазоне периодов 10 и 20 мин (стрелки с цифрой 3), которые регистрируются в условиях хорошей погоды и обусловлены интенсивным развитием когерентных конвективных структур [11, 12] и тесно связанных с ними аэроэлектрических структур [4, 6]. Вместо них за 5–6 ч до начала грозы появляются пики с периодами 8,5; 6 и 4 мин (стрелки с цифрой 4), которые к началу грозы исчезают. Приведенные данные характеризуют сложный и неоднозначный характер зависимостей между атмосферно-электрическими и метеорологическими параметрами.

## Заключение

Выявлены характерные черты изменения параметров НВКФ для атмосферы в условиях хорошей и нарушенной погоды и показано, что в предгрозовой

атмосфере уменьшается суточный размах и изменяется период циклических вариаций НВКФ, часть времени суток вариации  $R_{xy}(t, \tau = 0)$  противофазны аналогичным вариациям для условий хорошей погоды.

Увеличение балльности облачности приводит к росту мощности вариаций напряженности электрического поля во всем исследуемом диапазоне периодов и к появлению дополнительных спектральных составляющих, превышающих уровень фона. Для конкретных случаев эти составляющие проявляются в предгрозовой атмосфере как соответствующие пики функции когерентности между метеопараметрами и напряженностью поля.

Выявленные отличия вариаций НВКФ и спектральных характеристик в предгрозовой атмосфере от условий хорошей погоды могут служить индикаторами процессов, которые происходят или могут происходить в предгрозовой атмосфере.

Работа выполнена в рамках проекта фундаментальных исследований СО РАН на 2007–2009 гг. № 7.10.1.1 «Исследование климатообразующих атмосферных процессов с учетом воздействия глобальных и региональных факторов».

1. *Атмосфера*: Справочник. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 511 с.
2. *Stolzenburg M., Marshall T.C., Rust W.D., Bartels D.L.* Two simultaneous charge structures in thunderstorm convection // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 18. 4352. doi: 10.1029/2001JD000904.
3. *Чалмерс Дж.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеониздат, 1974. 316 с.
4. *Анисимов С.В., Мареев Е.А.* Спектры пульсаций электрического поля приземной атмосферы // *Докл. РАН.* 2001. Т. 381. № 1. С. 107–112.

5. *Трахтенгерц В.Ю., Иудин И.Д.* Актуальные проблемы электродинамики грозового облака // *Изв. вузов. Радиофиз.* 2005. Т. 48. № 9. С. 810–821.
6. *Анисимов С.В., Мареев Е.А., Шихова Н.М.* Механизмы связи аэроэлектрического и температурного полей в нижней атмосфере // *Изв. вузов. Радиофиз.* 2006. Т. 49. № 1. С. 35–52.
7. *Данилов С.Д., Свертилов А.И.* Внутренние гравитационные волны, генерируемые при прохождении гроз // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1991. Т. 27. № 3. С. 235–242.
8. *Ипполитов И.И., Кулаков Ю.И., Нагорский П.М., Смирнов С.В.* Локальные наблюдения с высоким временным разрешением изменений основных атмосферно-электрических, актинометрических и метеорологических величин // *Сб. тр. VI Всерос. конф. по атмосфер. электрич.* Н.-Новгород: ИПФ РАН, 2007. С. 221–222.
9. *Рыбин Ю.С., Соловьев С.П.* Исследование возмущений электрического и акустико-гравитационного полей при прохождении атмосферного фронта // *Сб. тр. VI Всерос. конф. по атмосфер. электрич.* Н.-Новгород: ИПФ РАН, 2007. С. 233–234.
10. *Нагорский П.М., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Кулаков Ю.И., Смирнов С.В.* Анализ взаимосвязей атмосферно-электрических и метеорологических величин по данным измерений с высоким временным разрешением // *Сб. тр. VII Сибирского совещ. по климатологическому мониторингу.* Томск: ИМКЭС СО РАН, 2007. С. 64–67.
11. *Иванов В.Н., Бызова Н.Л.* Когерентные структуры в приземном слое атмосферы // *Метеорол. и гидрол.* 2001. № 1. С. 5–25.
12. *Копров Б.М., Копров В.М., Кадыгров Е.Н., Макарова Т.И.* Экспериментальное исследование конвекции в пограничном слое атмосферы: когерентные структуры при ясном небе и при кучевой облачности // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2004. Т. 40. № 4. С. 470–484.

*I.I. Ippolitov, M.V. Kabanov, P.M. Nagorsky, S.V. Smirnov. Variability of meteorological and electrical values in the atmospheric surface layer for prestorm situations.*

Results of complex measurements of atmospheric electrical and meteorological values and analysis of their variations for both good weather and prestorm situations are presented. It was found that prestorm changes distort directional correlations between atmospheric electrical and meteorological values. Also it was determined the connection between the increase of the cloud amount attended by increasing variability of the atmospheric electrical field and the occurrence of the additional components in coherence spectra of electrical and meteorological values.