

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
Итоги Электронного Геофизического Года
3–6 июня 2009 • Переславль-Залесский, Россия

Исследование электрической составляющей климата среднеширотного региона

С. В. Анисимов¹ и Н. М. Шихова¹

Получено 2 ноября 2009; принято 13 ноября 2009; опубликовано 2 декабря 2009.

С использованием метода главных компонент выполнен анализ синхронных временных рядов вертикальной компоненты электрического поля атмосферы E_z и базисных метеопараметров, регистрируемых на среднеширотной геофизической обсерватории “Борок”. Обнаружены значимые корреляционные связи вариаций E_z с изменениями влажности, температуры, скорости ветра. Аэроэлектрическое поле в приземной атмосфере имеет выраженную суточную и сезонную вариации, отражающие климатические особенности среднеширотного региона. Показано, что вклад E_z в общую дисперсию динамики приземной атмосферы значим, а для отдельных временных интервалов сравним с вкладом в общую изменчивость таких метеопараметров, как влажность, температура и скорость ветра, регистрируемых в приземном слое атмосферы. Полученные оценки позволяют заключить, что атмосферное электрическое поле является существенной климатической составляющей среднеширотного региона. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** атмосферное электричество, временные ряды, факторный анализ, дисперсия, главные компоненты, суточная вариация.

Ссылка: Анисимов, С. В. и Н. М. Шихова (2009), Исследование электрической составляющей климата среднеширотного региона, *Росс. ж. наук о Земле*, 11, RE2005, doi:10.2205/2009ES000363.

Введение

Оценки возможных изменений климата могут быть получены на основе исследования динамики атмосферных процессов с использованием глобальных гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы. Заметим, что в описание климата входят не только средние значения гидродинамических полей, но и статистические характеристики их короткопериодных колебаний с периодами меньшими принятого интервала климатического осреднения в несколько десятилетий [Монин и Шихов, 1979]. Такие модели, как правило, в качестве граничных условий, а также при верификации используют многолетние банки данных непрерывных метеорологических наблюдений. При этом метеорологические характеристики атмосферных процессов рассматриваются обычно в качестве климатообразующих факторов, к важнейшим

из которых относятся масса и химический состав атмосферы, включая водяной пар.

Механизм действия глобальной электрической цепи (ГЭЦ) предполагает, что атмосферное электрическое поле формируется планетарным грозовым генератором, эффективность которого, в свою очередь, зависит от кучевой конвекции, температуры, влажности [Anisimov, 2003; Roble and Tzur, 1986]. В последние десятилетия рассмотрению климатических аспектов атмосферного электричества посвящено ряд известных публикаций [Мак-Горман и Селеги, 1982; Reiter, 1985; Rycroft et al., 2000]. Исследования вариаций атмосферного электрического поля показали достоверные взаимосвязи динамических характеристик E_z , температуры, относительной влажности и освещенности [Anderson, 1977; Анисимов и др., 2006]. При этом вариабельность аэроэлектрического поля характеризуется широким спектром колебаний от микрометеорологических (турбулентность) до суточных, сезонных, межгодовых и глобальных (унитарная вариация) [Анисимов и Шихова, 2008].

Цель данной работы – исследовать динамические особенности региональных, среднеширотных изменений аэроэлектрического поля и определить их взаимосвязь с

¹Геофизическая обсерватория “Борок” – филиал ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН, пос. Борок, Ярославская обл., Россия

вариациями важнейших метеорологических климатообразующих величин.

Данные наблюдений и методика анализа

Для исследования динамической структуры пограничного слоя использовались данные непрерывных наблюдений аэроэлектрического поля (E_z) и метеорологических характеристик (температура, скорость и направление ветра, влажность, атмосферное давление, освещённость), выполненных на среднеширотной обсерватории “Борок” [58°04’N, 38°14’E] в июне–декабре 2008 года. Отметим, что были синхронизированы данные трех систем сбора: ультразвуковой метеостанции “Метео-2Н”, размещенной на высоте 10 м (тактовая частота – 10 Гц) [Гладких и Макиенко, 2009]; цифровой метеостанции WS-2500, размещенной на высоте 2 м (время усреднения – 15 мин); стационарной обсерваторской системы сбора (тактовая частота – 10 Гц) [Анисимов и Дмитриев, 2003]. В качестве датчика аэроэлектрического поля использовался электростатический флюксметр, расположенный в эквипотенциальной поверхности на плоской крыше здания.

На первом этапе исследовались 30 суточных интервалов летне-осеннего сезона 2008 г, соответствующих условиям невозмущенной атмосферы (“хорошей погоды”). Каждый суточный многомерный массив содержал 14 рядов получасовых средних. Всего было проанализировано 8 сформированных массивов июля, 9 – августа, 4 – октября, 9 – ноября 2008 года. В качестве инструмента изучения статистической структуры вариаций метеопараметров и E_z применялись корреляционный и спектральный анализ. Для анализа факторов, влияющих на региональные масштабы динамики пограничного слоя, были сформированы месячные ряды получасовых данных указанных параметров, каждый длиной 1440–1480 членов, а также один ряд 3-часовых средних за временной интервал июль–ноябрь 2008 г. Исследование динамики вариаций преобладающих мод проводилось с помощью вэйвлет-анализа на основе непрерывного вэйвлет-преобразования с базисным вэйвлетом Морлета.

Наряду со спектрально-корреляционным и вэйвлет-анализом использовался факторный анализ [Лоули и Максвелл, 1967], позволяющий исследовать динамические свойства большого количества взаимосвязанных параметров. Метод основан на представлении о комплексном характере изучаемого явления, выражающемся во взаимосвязях и взаимообусловленности отдельных признаков. Факторный анализ не требует априорного разделения признаков на зависимые и независимые, так как все признаки в нем рассматриваются как равноправные [Налимов, 1971]. Цель факторного анализа – сконцентрировать исходную информацию, выражая большое число рассматриваемых признаков через меньшее число более емких внутренних характеристик явления, которые, практически, не поддаются непосредственному измерению. В результате применения данного метода создается несколько новых переменных, каждая из которых является линейной комбинацией первоначальных. Выделе-

ние иерархии факторов выполнялась с учетом величины коэффициентов корреляции между исходной и новой переменной. Для анализа использовался модуль Factor Analysis программы STATISTICA [Боровиков, 2001].

В развитие метода многомерного анализа имеющиеся данные организовывались в виде матрицы X следующего вида:

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1M} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} & x_{N2} & x_{N3} & x_{NM} \end{pmatrix}$$

Первая строка матрицы X – это “мгновенный снимок” всех данных в момент времени t_1 , а первая колонка – это временной ряд наблюдений параметра номер 1 и т.д. Матрица X исходных признаков нормировалась и преобразовывалась в матрицу Z с элементами $z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$, где \bar{x} – среднее i -го столбца, σ – среднеквадратическое отклонение. Для нормированной матрицы Z выполняются следующие условия:

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_{ij} = 0; \quad \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N z_{ij}^2 = 1.$$

В результате выполнения факторного анализа формировалось представление параметра z_i (каждого столбца матрицы Z) в виде линейной комбинации нескольких факторов

$$z_{ij} = a_{i1}p_{1j} + a_{i2}p_{2j} + \dots + a_{iq}p_{qj},$$

где p_{ij} – значения факторов, a_{ij} – постоянные коэффициенты, значения которых вычисляются [Лоули и Максвелл, 1967]. Элементы a_{ij} матрицы A являются факторными нагрузками, т.е. значениями коэффициентов корреляции каждого из исходных признаков с каждым из выявленных факторов. Чем теснее связь данного признака с рассматриваемым фактором, тем выше значение факторной нагрузки. Положительный знак факторной нагрузки указывает на прямую (а отрицательный знак – на обратную) связь данного признака с фактором. Таблица факторных нагрузок содержит M строк (по числу признаков) и k столбцов (по числу факторов).

При проведении факторного анализа использовался метод главных компонент [Айвазян и др., 1974]. Для этого корреляционная матрица R преобразовывалась в диагональную матрицу Λ собственных значений λ_i . На первом этапе формировался характеристический многочлен

$$|R - \lambda E| = \begin{vmatrix} 1 - \lambda & r_{12} & \dots & r_{1M} \\ r_{21} & 1 - \lambda & \dots & r_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{M1} & r_{M2} & \dots & 1 - \lambda \end{vmatrix},$$

и определялись его корни (собственные значения матрицы R). При этом $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$, а сумма собственных значений $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p = 1$. Из уравнений $(R - \lambda_i E)p_i = 0$ находились собственные вектора p_i , составляющие нормированную матрицу преобразований P .

Матрица факторных нагрузок вычислялась по формуле $A = PA^{\frac{1}{2}}$, где

$$\Lambda^{\frac{1}{2}} = \begin{vmatrix} \sqrt{\lambda} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sqrt{\lambda} \end{vmatrix},$$

то есть λ_j представляют собой дисперсии найденных главных компонент, $\sqrt{\lambda_j}$ – их среднеквадратическое отклонение.

Число значимых факторов (главных компонент) определялось по величинам собственных значений корреляционной матрицы и долей объясненной дисперсии для каждого фактора. Учитывая, что относительный вклад компоненты p_j в общую дисперсию процесса равен $\frac{\sigma_{p_j}^2}{\sum_{j=1}^r \sigma_{p_j}^2} = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^r \lambda_j}$, в соответствии с критерием Кайзера [Kaiser, 1960], отбирались только факторы с собственными значениями, большими единицы. Данный критерий предполагает, что если фактор не выделяет дисперсию, эквивалентную, по крайней мере, дисперсии одной переменной, то он опускается. Результаты проведенного статистического анализа представлялись в виде факторной матрицы, из которой определяли, какие пере-

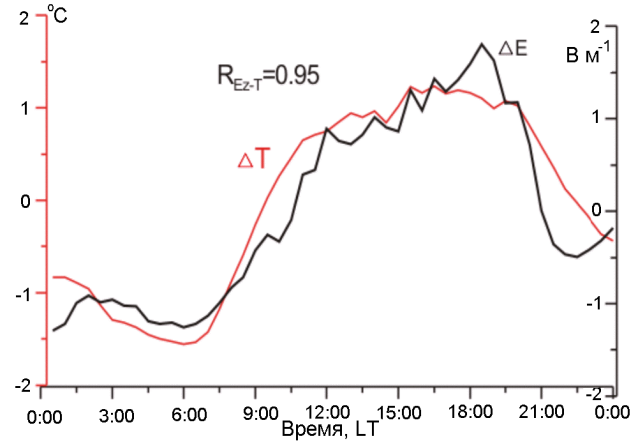


Рис. 2. Стандартизованные получасовые средние значения температуры воздуха (ΔT) и напряженности электрического поля (ΔE) по данным 01 августа 2008 г.

менные образуют каждый фактор, а также абсолютные значения факторных нагрузок по каждой переменной. В программе STATISTICA по умолчанию учитываются факторные нагрузки равные 0,7 и более, т.е. допускается только сильная связь между переменной и фактором. Однако в соответствии с особенностями проводимых многопараметрических исследований и характером исходных данных в работе анализировалась и количественно более слабая связь между переменной и фактором. При анализе факторных нагрузок принимались во внимание величины большие или равные 0,4, т.е. учитывалась сильная и умеренная связь между исследуемыми показателями, что позволило определить эффективный объем переменных, необходимых для проведения исследований.

Результаты и обсуждение

Динамика напряженности аэроэлектрического поля формируется неоднородным распределением зарядов в окрестности точки наблюдения, которое, в свою очередь, зависит от нескольких факторов, действующих на различных пространственно-временных масштабах. На Рис. 1 представлен пример синхронных регистрограмм получасовых средних некоторых рядов данных анализируемых многомерных массивов. Очевидно, что изменения исследуемых параметров даже в пределах суток содержат значимую длиннопериодную составляющую.

Для изучения степени линейной взаимосвязи измеряемых величин проводился анализ корреляционной матрицы получасовых средних. В результате показано, что для точных рядов данных июля и августа 2008 г. коэффициенты взаимной корреляции получасовых средних E_z и T принадлежат диапазону 0,7–0,9. Для отдельных дней (например, 01 августа 2008 г. для временного интервала солнечного затмения) коэффициенты достигают 0,95 (Рис. 2). Высокие показатели связи E_z и горизонтальных составляющих скоростей ветра обнаружены для

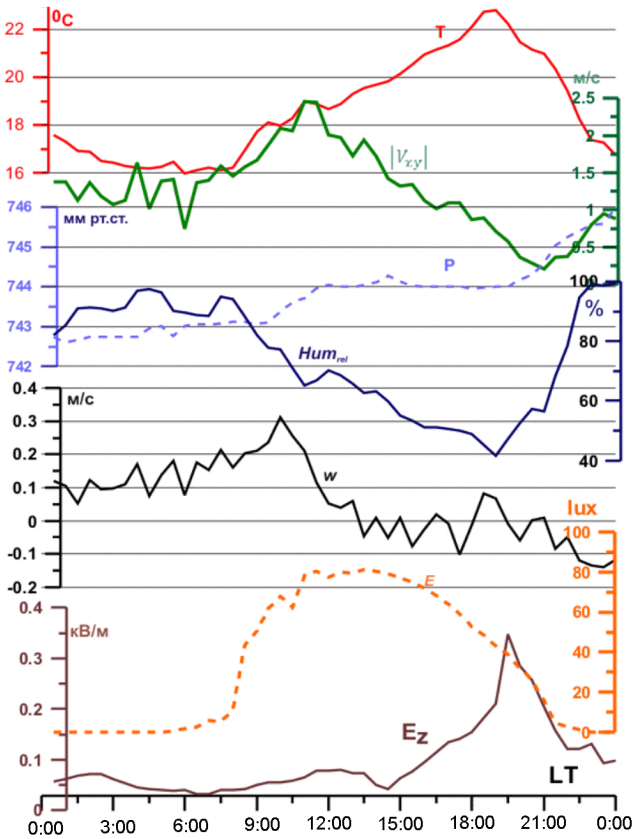


Рис. 1. Регистрограммы метеорологических параметров (обозначения в Табл. 1) и E_z по данным обсерватории “Борок” 12 июля 2008 г

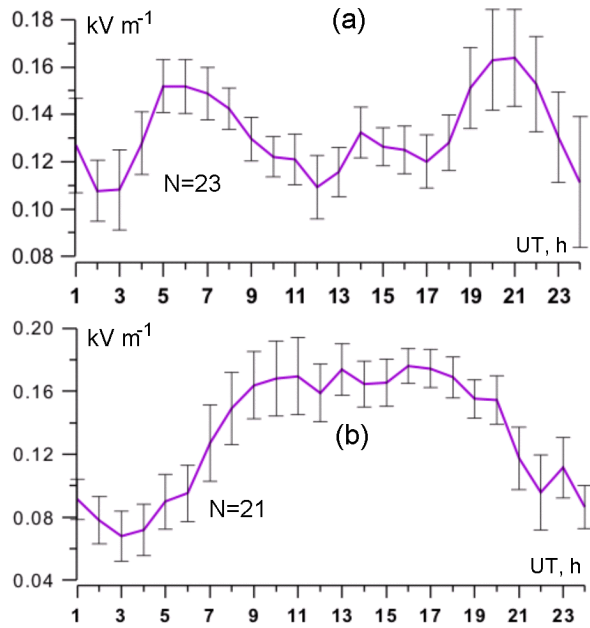


Рис. 3. Суточные вариации напряженности аэроэлектрического поля по данным наблюдений июля–августа 2006 г. (а) и октября 2008 г. (б). N – количество суток.

отдельных дней как летнего, так и осеннего сезона. Обнаруженная тесная линейная взаимосвязь трендов E_z и метеорологических параметров показывает, что формирование электрического состояния приземной атмосферы в регионе наблюдения зависит от совокупности микроклиматических факторов, среди которых можно количественно определить доминирующие.

Анализ суточной динамики электрического поля среднеширотной атмосферы над сушей представляет особый интерес. Известно, что над океаном унитарная вариация атмосферного электрического поля и тока считается важнейшим признаком действия ГЭЦ и служит непосредственным прямым доказательством существования единого генератора атмосферного электрического поля. В пограничном слое над сушей обнаружение унитарной вариации затруднено действием локальных источников, интенсивно меняющих проводимость и пространственно-временное распределение объемных зарядов. Однако в условиях невозмущенной атмосферы даже в средних широтах при наличии данных непрерывных обсерваторских измерений можно выявить сходство суточного тренда поля и унитарной вариации [Anisimov, 2003]. В качестве примера (Рис. 3) приведена суточная вариация среднечасовых значений напряженности аэроэлектрического поля по данным наблюдений в условиях “хорошей погоды”. В результате статистического анализа обнаружен суточный ход E_z с двумя максимумами около 06 и 19 часов UT для летних месяцев 2006 г. (Рис. 3а), а также наибольшими значениями в интервале 12–20 UT (Рис. 3б) для осенних месяцев 2008 г. Достоверно форма унитарной вариации с минимумом в утренние часы и максимумом в вечер-

ние по UT воспроизводится над сушей в зимние месяцы [Анисимов и Шихова, 2008].

Факторный анализ показал, что от 80% до 96% внутрисуточной изменчивости состояния приземной атмосферы в пространстве регистрируемых величин обусловлено первыми тремя модами главных компонент. Первая главная компонента в летний сезон отражает суточный ход основных метеопараметров (прежде всего – температуры), ее динамика относительно повторяема (устойчива) для всего летне-осеннего сезона и обеспечивает от 48% до 67% региональной изменчивости приземной атмосферы. Вторая мода аккумулирует вариации горизонтальной ветровой компоненты метеорологического блока и демонстрирует хорошо выраженную сезонность. На ее долю приходится от 15% до 35% изменчивости. В осеннем сезоне основным фактором, вносящим наибольший вклад (от 40% до 60%) в общую изменчивость приземной атмосферы, становится компонента, аккумулирующая вариации ветровых параметров (Табл. 1), в то время как внутрисуточная динамика обеспечивает лишь от 17% до 35% общей изменчивости. Третья мода в большинстве случаев обусловлена вариациями вертикальной составляющей ветра или изменениями освещенности и давления. Для примера, представленного на Рис. 4, доля дисперсии, описываемой первой компонентой, равна 61,3%, второй – 21,2%, третьей – 8% от общей дисперсии измеряемых параметров. При этом особо подчеркнем, что выявленный факторным анализом вклад E_z в общую дисперсию динамики регистрируемых параметров приземной атмосферы значим. Модули факторных нагрузок временного ряда E_z в одном из факторов принимают значения от 0,7 до 0,9, а для отдельных суток сравнимы с вкладом в общую изменчивость влажности и температуры.

Для исследования факторов формирования климатической изменчивости среднеширотного региона использовались многомерные временные ряды длиной в несколько десятков суток, факторный анализ которых позволил выявить некоторые вариации масштаба климатической

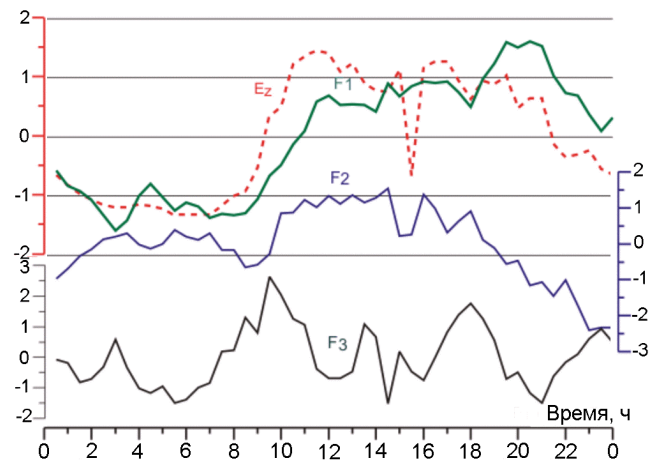


Рис. 4. Стандартизованные вариации E_z и первых трех главных компонент (F_1 , F_2 , F_3) многомерного ряда наблюдений по данным 16 июля 2008 г.

Табл. 1. Факторные нагрузки при первых 4-х главных компонентах многомерного ряда наблюдений по данным 7 ноября 2008 г.

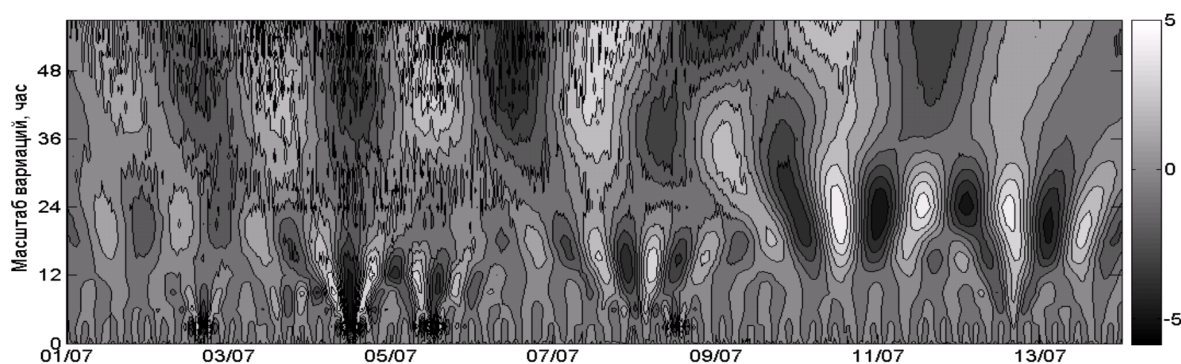
| Измеряемые параметры | 1 фактор (F_1) | 2 фактор (F_2) | 3 фактор (F_3) | 4 фактор (F_4) |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Температура (T) | 0,27 | 0,89 | 0,19 | -0,27 |
| Скорость горизонтального ветра ($ V_{x,y} $) | 0,91 | 0,18 | 0,24 | 0,17 |
| Направление ветра (φ) | 0,96 | -0,04 | 0,01 | 0,13 |
| Давление (P) | 0,11 | -0,13 | 0,95 | 0,01 |
| Относительная влажность (Hum_{rel}) | -0,38 | -0,85 | -0,24 | -0,23 |
| Вертикальная скорость ветра (w) | 0,8 | 0,05 | -0,18 | 0,08 |
| Абсолютная скорость ветра $ V $ | 0,9 | 0,19 | 0,24 | 0,15 |
| Скорость ветра в направлении СЮ (u) | -0,95 | -0,1 | 0,14 | -0,11 |
| Скорость ветра в направлении ЗВ (v) | -0,84 | 0,09 | -0,45 | -0,13 |
| Флуктуации скорости ветра в направлении ЗВ (Δv) | 0,93 | 0,14 | 0,21 | 0,17 |
| Абсолютная влажность (Q) | -0,22 | 0,05 | -0,07 | -0,97 |
| Точка росы (τ) | -0,2 | 0,11 | -0,06 | -0,97 |
| Освещенность (E) | 0,02 | 0,42 | 0,82 | 0,12 |
| Напряженность электрического поля (E_z) | -0,28 | 0,8 | -0,41 | -0,23 |
| Доля фактора в общей дисперсии, % | 49,57 | 18,64 | 14,08 | 10,53 |

изменчивости [Груза и Ранькова, 2003]. На примере анализа тридцати суточных рядов многомерных массивов июля–декабря 2008 г. показано, что долю суммарной дисперсии приземной атмосферы в пределах 63%–75% могут характеризовать только четыре главные компоненты пространства регистрируемых параметров. Так по данным наблюдений июля 2008 г. обнаружено, что первой главной компонентой, описывающей 24% общей дисперсии, служит совокупность характеристик горизонтального ветра. Метеопараметры, демонстрирующие отчетливо выраженный суточный ход (температура, относительная влажность), имеют высокие значения факторных нагрузок при второй главной компоненте, объясняющей 17% общей дисперсии. Третья компонента преимущественно формируется параметрами влажности (абсо-

лютная влажность, осадки) и описывает 14% дисперсии. На долю четвертой компоненты отвечающей за изменчивость ветровых компонент (флуктуации скорости и направления) и вариаций E_z , приходится 10% общей дисперсии.

Отметим, что именно для июля суточная вариация E_z не является преобладающей в общей статистической структуре этой величины. Это подтверждается как анализом спектра Фурье, так и вэйвлет-спектра (Рис. 5) длительных интервалов месячного ряда получасовых средних E_z .

Усиленная конвекция (конвективный генератор) обуславливает дополнительный максимум напряженности аэроэлектрического поля в районе локального полдня, то есть наличие полусуточной вариации. При этом от-

**Рис. 5.** Вэйвлет – спектр E_z по данным наблюдений 1-14 июля 2008 г.

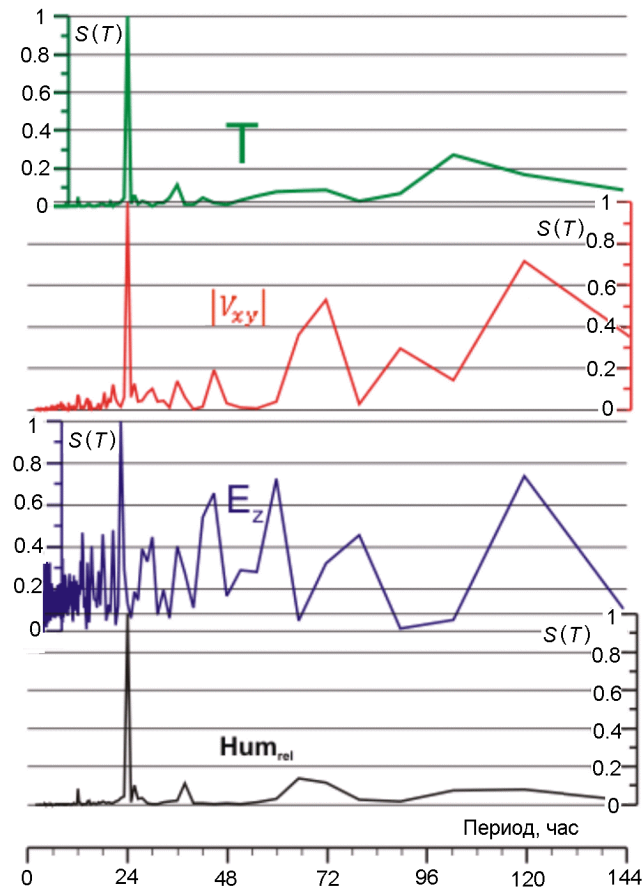


Рис. 6. Нормированные спектральные плотности рядов получасовых средних значений некоторых параметров (обозначения в Табл. 1) по данным 1–30 сентября 2008 г.

носительная периодичность гроз в июле 2008 года (одно событие в 3–4 дня) сообщает ряду напряженности поля устойчивую вариацию, амплитуда которой превышает суточную в несколько раз.

В августе первая главная компонента, аккумулирующая вариации скоростей горизонтального ветра и их флуктуации в направлении север-юг, описывает 28% общей дисперсии всех параметров. Вторая компонента отвечает за вариации относительной влажности, освещенности, E_z и описывает 19% дисперсии, третья компонента обусловлена изменчивостью направления ветра и его флуктуациями в направлении запад-восток – 11%, на долю вариаций температуры и влажности (четвертая компонента) приходится 9.5% дисперсии. Спектральный анализ показал, что энергетика суточной вариации в структуре всех этих параметров в августе существенна. В динамике E_z , кроме того, выявлены значимые вариации с периодами 3–4 суток, отмеченные и в рядах T , $|V_{xy}|$.

В сентябре в качестве первой главной компоненты выступает изменчивость горизонтальной составляющей скорости ветра и вариации E_z (27% дисперсии). Анализ ста-

тистической структуры колебаний ряда E_z выявил присутствие суточной и кратной суточной вариаций, при этом значимость 5-суточной вариации в динамике как E_z , так и $|V_{xy}|$, очень высокая (Рис. 6). При этом результаты спектрального анализа показывают, что разнообразие значимых мод колебаний в динамике E_z шире, чем в рядах метеорологических данных. Вторая главная компонента – суточный тренд температуры и абсолютной влажности, обеспечивающий 22% изменчивости приземного слоя по данным регистрируемых полей. В качестве третьей можно назвать освещенность и относительную влажность (11% дисперсии); изменчивость ветровых параметров – четвертый фактор, объясняющий 8% дисперсии пространства анализируемых параметров.

Аналогичное распределение долей дисперсии и состав главных компонент наблюдается для октября, но E_z более связана с параметрами влажности и входит в группу переменных 3-ей главной компоненты. В ноябре первая компонента (23%) по составу повторяет сентябрьскую, изменчивость параметров ветра (19%) – вторая по значимости, третья компонента (14%) – суточный ход температуры и абсолютной влажности, а четвертая (10%) – относительная влажность. В декабре основным фактором, обеспечивающим изменчивость общей дисперсии, остаются параметры скорости ветра (38%). Вариации давления и осадков обеспечивают 17% дисперсии, вариации направления и величины продольной составляющей скорости ветра 11%, а вот суточный тренд температуры, абсолютной влажности и E_z (4-ая главная компонента) становится наименее значим – 9% дисперсии.

Анализ многомерного 153-суточного ряда 3-часовых средних показал, что первая главная компонента, объясняющая 18% дисперсии длиннопериодной (региональной) изменчивости состояния приземной атмосферы, определяется вариациями горизонтальной скорости ветра, вторая (16%) – суточным ходом метеопараметров (температуры и влажности), третья (15%) – вариациями относительной влажности и освещенности, четвертая – изменчивостью горизонтального направления ветра (11%). Отметим, что величина факторной нагрузки при E_z в первой компоненте достигает 0,31, а в третьей – 0,47, что свидетельствует о тесной взаимосвязи аэроэлектрического поля с метеопараметрами [Анисимов и др., 2006] и немаловажной роли E_z в общей динамике состояния приземной атмосферы.

Таким образом, к динамическим особенностям аэроэлектрического поля следует отнести наличие суточной и сезонной вариаций, формирование которых связано с климатообразующими метеорологическими факторами. Степень тесноты линейной взаимосвязи динамики E_z , температуры и влажности в пределах суток достаточно высока, причем характер связи не зависит от времени года, а коэффициенты корреляции получасовых средних значений временных рядов E_z и T принадлежат диапазону 0,6–0,95. Определенные методом факторного анализа первые четыре главных компоненты, характеризующие состояние региона наблюдений, описывают от 63 до 75% дисперсии в пространстве измеряемых параметров. Для летнего сезона (июнь, июль, август) наибольший вес имеют: 1) компоненты горизонтальной скорости вет-

ра (24–28% общей дисперсии); 2) суточный ход температуры, относительной влажности, освещенности, облачности, напряженности электрического поля (17–20% общей дисперсии); 3) изменчивость ветровой компоненты (11–14% общей дисперсии); 4) влажность и осадки (9–12%), причём третий и четвертый факторы в зависимости от длины интервала анализа могут меняться местами. Для холодного сезона совокупности факторов остаются теми же, они лишь перераспределяются по долям общей дисперсии, приходящихся на них.

Выводы

В работе исследованы динамические особенности региональных, среднеширотных изменений аэроэлектрического поля и определена их взаимосвязь с вариациями важнейших метеорологических климатообразующих величин. Метод главных компонент использован для анализа суточных, месячных и полугодовых метеорологических и аэроэлектрических рядов данных, полученных на среднеширотной геофизической обсерватории “Борок”. Обнаружены значимые корреляционные связи вариаций E_z с изменениями влажности, температуры, скорости ветра, наблюдаемыми в приземном слое атмосферы. Аэроэлектрическое поле имеет выраженную суточную и сезонную вариации, отражающие климатические особенности среднеширотного региона. Показано, что вклад E_z в общую дисперсию значим, а для отдельных временных интервалов сравним с вкладом в общую изменчивость таких метеопараметров, как влажность, температура и скорость ветра. Полученные оценки позволяют считать, что атмосферное электрическое поле является существенной климатической составляющей среднеширотного региона.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 09-05-00888-а, грант N 09-05-13600-офи_ц). Авторы благодарны сотрудникам лаборатории геоэлектромагнитного мониторинга обсерватории “Борок” за проведение натурных геофизических наблюдений.

Литература

- Айвазян, С. А., З. И. Бежаева, О. В. Староверов (1974), *Классификация многомерных наблюдений*, Статистика, Москва.
- Анисимов, С. В., Э. М. Дмитриев (2003), *Информационно-измерительный комплекс и база данных Геофизической обсерватории “Борок” РАН, ОИФЗ РАН*, Москва.
- Анисимов, С. В., Е. А. Мареев, Н. М. Шихова (2006), Механизмы связи аэроэлектрического и температурного полей нижней атмосферы, *Радиофизика*, 49(1), 35–52.
- Анисимов, С. В., Н. М. Шихова (2008), Вариабельность электрического поля невозмущенной атмосферы средних широт, *Геофизические исследования*, 9(3), 25–38.
- Боровиков, В. П. (2001), *STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов*, Питер, СПб.
- Гладких, В. А., А. Э. Макиенко (2009), Цифровая ультразвуковая метеостанция, *Приборы*, 21–25.
- Груза, Г. В., Э. Я. Ранькова (2003), Колебания и изменения климата на территории России, *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, 39(2), 166–185.
- Лоули, Д., А. Максвелл (1967), *Факторный анализ как статистический метод*, Мир, Москва.
- Налимов, В. В. (1971), *Теория эксперимента*, Наука, Москва.
- Монин, А. С., Ю. А. Шишков (1979), *История климата*, Гидрометеиздат, Ленинград.
- Мак-Горман, Б., Т. Селеги, (Ред.), (1982), *Солнечно-земные связи, погода и климат*, МИР, Москва.
- Anderson, R. V. (1977), Atmospheric electricity in the real world, *Electrical process in atmospheres*, edited by H. Dolezalek and R. Reiter, 87–99, Darmstadt, Germany.
- Anisimov, S. V. (2003), The global electric circuit and lower atmospheric electricity, *Proc. 12-th Int. Conf. on Atmospheric Electricity*, Versailles, France.
- Kaiser, H. F. (1960), The application of electronic computers to factor analysis, *Educational and Psychological Measurement*, 141–151. doi:10.1177/001316446002000116
- Reiter, R. (1985), *Fields, currents and aerosols in the lower troposphere*, Amerind Publ. Co., New Dehli.
- Roble, R. G., I. Tzur (1986), The Global Atmospheric-Electrical Circuit, *The Earth’s Electrical Environment*, edited by E. P. Krider, and R. G. Roble, pp. 206–231, Natl. Acad. Press, Washington.
- Rycroft, V. J., S. Israelson, C. Price (2000), The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 62, 1563–1576. doi:10.1016/S1364-6826(00)00112-7

С. В. Анисимов и Н. М. Шихова, Геофизическая обсерватория “Борок”, пос. Борок, Ярославская обл, Россия (svan@borok.yar.ru; extern@borok.yar.ru)