

УДК 551.594.1, 551.558

## ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В АТМОСФЕРНОМ СЛОЕ ОБМЕНА

© 2010 г. С.В. Анисимов, Н.М. Шихова

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

По результатам натурных наземных наблюдений, выполненных в Геофизической обсерватории “Борок” [58° 04' с.ш., 38° 14' в.д.], определены скорости переноса неоднородностей электрического поля, которые отличны от горизонтальной скорости ветра в приземном слое и связаны с высотными профилями объемного заряда и компонент скорости ветра. Предполагается, что горизонтальный перенос неоднородностей аэроэлектрического поля в приземном слое определяется наличием и динамикой электрически активных областей пограничного слоя атмосферы.

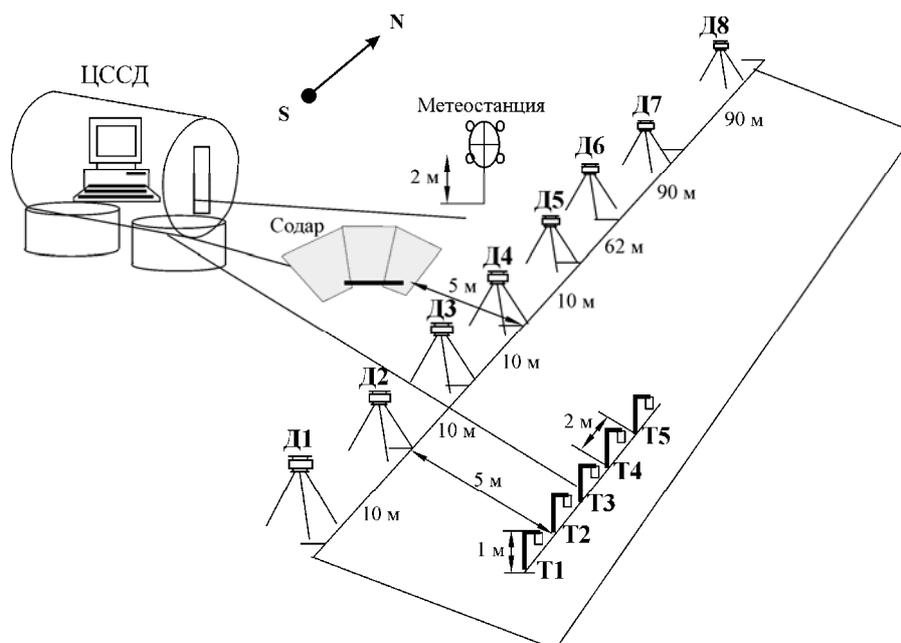
**Ключевые слова:** атмосферное электричество, аэроэлектрическое поле, объемный заряд, акустическое зондирование, высотный профиль.

### Введение

Электродинамическое состояние пограничного слоя характеризуется интенсивными пространственно-временными вариациями, одним из источников которых служит перенос атмосферными потоками объемного электрического заряда. Наиболее активно процесс переноса объемного заряда идет в условиях развитой конвекции и связан с турбулентным перемешиванием аэроионов и конвективной динамикой неоднородностей температуры [Анисимов и др., 2003; Копров, Анисимов, Копров, 2006]. При этом средняя плотность объемного заряда, его пространственно-временные масштабы и динамика определяют генерацию аэроэлектрических пульсаций приземного слоя атмосферы, действие механизмов формирования их степенного спектра и аэроэлектрических структур. Следует подчеркнуть, что напряженность электрического поля есть не локальная физическая величина, широкий спектр вариаций которой формируется совокупным действием неоднородностей объемного электрического заряда в окрестности точки наблюдений. Целью работы было экспериментальное изучение процессов переноса аэроэлектрических неоднородностей, наблюдаемых в приземном слое, и исследование связей приземных аэроэлектрических вариаций с вертикальными профилями скоростей ветра в пограничном слое.

### Методика и результаты наблюдений

Атмосферные электрические наблюдения проводились в Геофизической обсерватории “Борок” [58° 04' с.ш., 38° 14' в.д.] в условиях, характеризующихся отсутствием промышленных загрязнений и низким уровнем электромагнитных помех. Время проведения эксперимента – май–июнь 2006 г. Измерительный комплекс (рис. 1) состоял из восьми датчиков напряженности атмосферного электрического поля (Д1–Д8), пяти высокочувствительных датчиков температуры воздуха (Т1–Т5) и трехкомпонентного содара с осями диаграмм направленности излучателей, ориентированными в направлении север–юг и запад–восток с зенитными углами 30°, а также по вертикали. Цифровая метеостанция регистрировала полный набор метеопараметров в непрерывном режиме



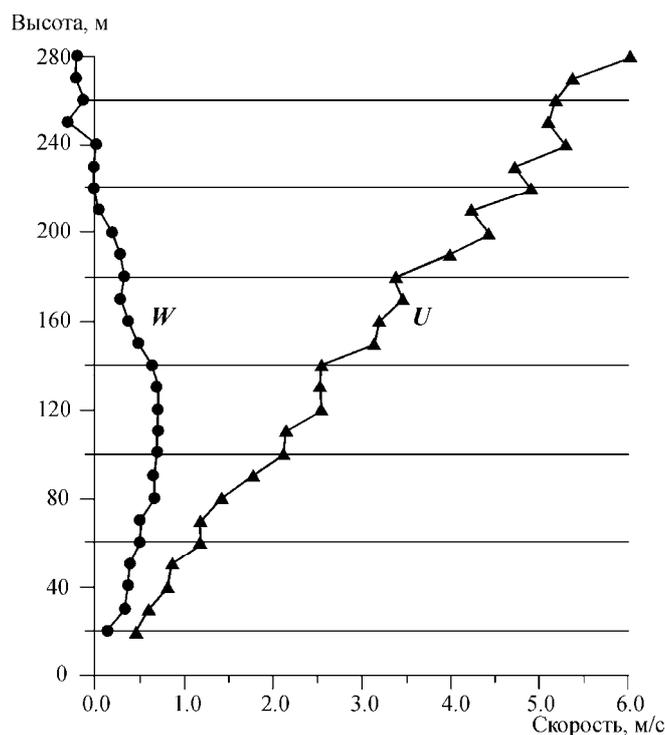
**Рис. 1.** Структурная схема летних сезонных наблюдений 2006 г. (описание см. в тексте)

с тактовой частотой 10 Гц. Цифровая система сбора данных (ЦССД) в реальном времени позволяла вести непрерывную запись измеряемых параметров при любых погодных условиях с тактовой частотой 10 Гц.

Синхронные измерения напряженности аэроэлектрического поля проводились в восьми точках, расположенных по линии, ориентированной в направлении север–юг; пять из них (Д1–Д5) были разделены равными промежутками в 10 м, последующие датчики располагались на расстояниях 102, 192 и 282 м от первого в линии датчика Д1. Общая длина линии – около 282 м (см. рис. 1). Высота установки датчиков составляла 1.5 м во всех опытах. В качестве датчика градиента потенциала использовался электростатический флюксметр типа “field mill”, специально разработанный для проведения длительных прецизионных измерений в полевых условиях. Пороговая чувствительность датчика составляла 0.1 В/м.

Измерения средних высотных профилей компонент скорости ветра в атмосферном пограничном слое проводились с использованием акустического лоатора (содаря). Методика измерений содаром в настоящее время хорошо отработана [Кузнецов, 2007; Kallistratova, Coulter, 2004] и позволяет определять средние за 10–60 мин профили скорости и направления ветра с точностью, соответствующей метеорологическим стандартам. Показано [Кузнецов, 2007; Kouznetsov, Kramar, Kallistratova, 2007], что акустический лоатор (содар) может быть использован для измерения параметров турбулентности в нижней части пограничного слоя атмосферы. Предложен метод оценки вертикальной структуры потока импульса до высот в несколько сотен метров с использованием профилей средней скорости ветра и дисперсии вертикальной компоненты ветра  $\sigma_w^2$ , вычисленных по данным содарных измерений [Kallistratova, Coulter, 2004].

В эксперименте использовался акустический лоатор (содар) ЛАТАН-3 с малогабаритными антеннами высотой 60 см, разработанный в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН [Кузнецов, 2007], который обеспечивал следующие основные параметры: рабочая частота – 3700 Гц, длительность импульса – 50 мс, высотный диапазон – 20–300 м, разрешение по высоте – 10 м, период цикла зондирования – 10 с,



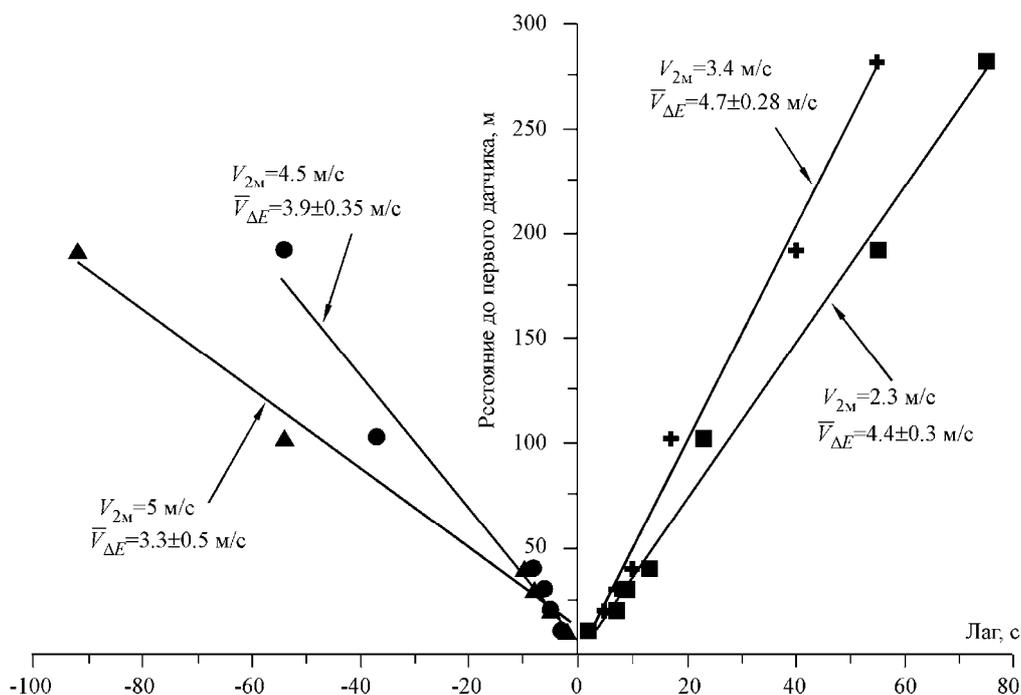
**Рис. 2.** Высотные профили вертикальной ( $W$ ) и горизонтальной (направление  $N-S$ ) ( $U$ ) скоростей ветра, усреднённых за интервал 08:30–09:00 UT, по данным измерений акустического содара 03.06.2006 г.

зенитные углы наклонных антенн –  $30^\circ$  для обеих антенн, азимуты наклонных антенн –  $0^\circ$  и  $90^\circ$ .

Типичный пример высотных профилей вертикальной ( $W$ ) и горизонтальной ( $U$ ) скоростей ветра по данным акустического зондирования 03.06.2006 г. приведен на рис. 2.

### Обсуждение результатов натуральных наблюдений

Предварительный отбор временных интервалов для экспериментального определения скорости переноса аэроэлектрических неоднородностей (скорости  $V_{\Delta E}$ ) вдоль линейки датчиков проводился на основе непрерывного сканирования минутных данных горизонтальной скорости ветра наземной цифровой метеостанции. Для массива суточных непрерывных данных выбирались временные интервалы, в которых в течение не менее одного часа преобладали направления скорости ветра  $S-N$  или  $N-S$ . Из отобранных по этому критерию временных промежутков для последующего анализа были выбраны 15 интервалов, удовлетворяющих условиям “хорошей погоды”. Внутри каждого интервала рассчитывались кросскорреляционные функции амплитудно-временных рядов секундных данных напряженности поля каждого из семи датчиков относительно первого в линейке. На рис. 3 приведены зависимости лагов максимумов кросскорреляционной функции от расстояния между датчиками в измерительной линейке для четырех различных временных промежутков. Полученные зависимости позволяют вычислить скорости переноса неоднородностей атмосферного электрического поля  $V_{\Delta E}$ , направление которого для анализируемых временных интервалов совпадало с направлением скорости ветра в приземном слое. При этом модуль скорости  $V_{\Delta E}$  ветра отличался от модуля горизонтальной скорости ветра  $U$  приземного слоя. Для исследованных временных интервалов величина модуля  $V_{\Delta E}$  изменялась от 3 до 10 м/с.

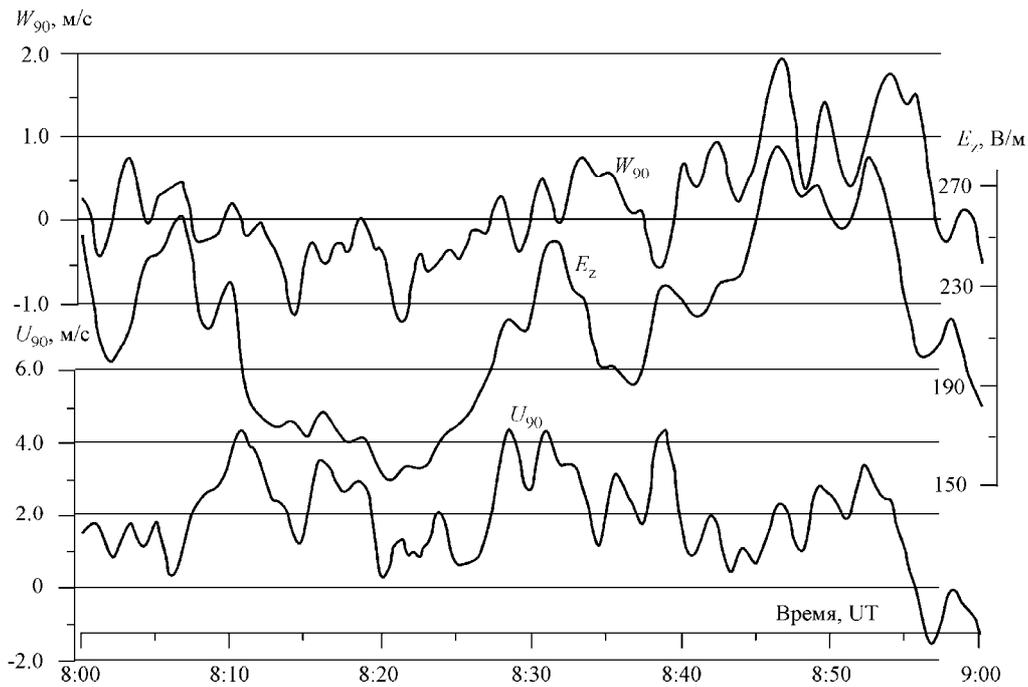


**Рис. 3.** Временные лаги кросскорреляционных функций аэроэлектрического поля, регистрируемого в 8 точках по данным летнего эксперимента 2006 г. Наблюдения 29.05 (06:00–07:00 UT) – крестики; 03.06 (08:00–09:00 UT) – квадраты; 11.06 (06:00–07:00 UT) – кружки; 12.06 (04:00–05:00 UT) – треугольники;  $\bar{V}_{\Delta E}$  – среднее значение скорости переноса за указанный временной интервал. Прямые линии – аппроксимация линейной зависимости между расстоянием и временем переноса неоднородности (временным лагом)

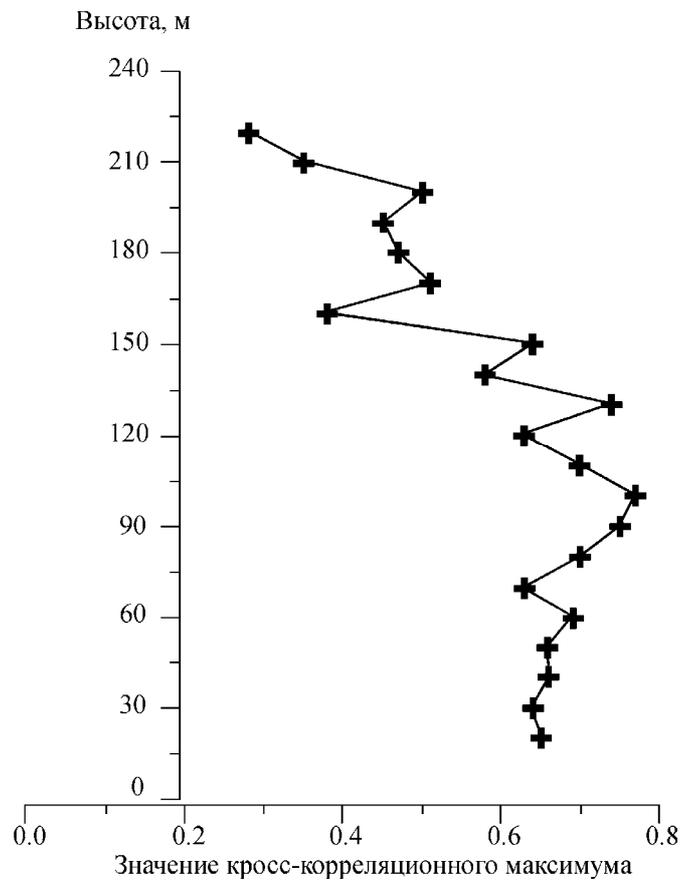
С целью локализации по высоте области, формирующей динамику аэроэлектрического поля в приземном слое, для каждого из 15 анализируемых интервалов вычислялись средние значения вертикальной и горизонтальной скоростей ветра на разных высотах; для высоты 2 м это делалось по данным наземной цифровой станции, для диапазона высот 20–300 м по данным содара. Затем рассчитывалась кросскорреляционная функция амплитудно-временных рядов 10-секундных средних значений напряженности электрического поля и вертикальных скоростей ветра. Для расчета этой функции данные содара сглаживались скользящим средним по 12 точкам (2 мин).

Характерный пример регистрограмм напряженности аэроэлектрического поля  $E_z$  по данным наземных наблюдений, а также вертикальной и горизонтальной (направление N–S) скоростей ветра на высоте 90 м по данным содара приведен на рис. 4. Высотный профиль кросскорреляционной функции напряженности поля  $E_z$  и вертикальной скорости ветра  $W$  с максимумом величины на высотах 80–120 м демонстрирует рис. 5. Коэффициент взаимной корреляции рассматриваемых величин достигает значения 0.8 и является значимым. Полученные корреляционные связи позволяют предположить существование в интервале высот 80–120 м электрически активного слоя, содержащего объемный заряд, скорость горизонтального переноса которого определяет динамику электрического поля приземного слоя.

Ранее высотный профиль распределения плотности объемного заряда в нижней части погранслоя восстанавливался в приближении одномерной аппроксимации по результатам зондирования вертикального профиля электрического поля с использованием привязных баллонов [Marshall et al., 1999, a, b]. В предположении плоской проводящей Земли и горизонтально стратифицированного заряда атмосферы было показано, что объемный заряд, изначально локализованный в приземном слое, переносится до высоты более 150 м в условиях развитой конвекции.



**Рис. 4.** Средние (10-секундные) значения аэроэлектрического поля на высоте 1.5 м ( $E_z$ ) и скорости ветра на высоте 90 м (вертикальная скорость –  $W_{90}$ , горизонтальная в направлении  $S-N$  –  $U_{90}$ ). Данные наблюдений 03.06.2006 г. (08:00–09:00 UT)



**Рис. 5.** Максимумы функции взаимной корреляции напряженности поля  $E_z$  и вертикальной скорости  $W$  на различных высотах. Данные наблюдений 03.06.2006 г. (08:00–09:00 UT)

При этом возрастают как среднее значение, так и амплитуда вариаций электрического поля в приземном слое. Известно, что пограничный слой атмосферы характеризуется наличием когерентных аэроэлектрических структур, обнаруженных в турбулентных короткопериодных пульсациях аэроэлектрического поля [Анисимов и др., 2003; Anisimov, Mareev, Bakastov, 1999]. Наиболее активно аэроэлектрические структуры формируются в условиях развитой конвекции, что происходит в результате коллективных аэрофизических процессов захвата и переноса конвективными ячейками аэроионов или заряженных аэрозолей.

Вэйвлет-спектры вариаций вертикальной скорости на высоте 80 м и напряженности аэроэлектрического поля в приземном слое, представленные на рис. 6, демонстрируют хорошее совпадение времени возникновения пространственно-временных структур и подобие их интенсивности, что экспериментально подтверждает механизм влияния электрически активных высотных слоев пограничного слоя на динамические характеристики аэроэлектрического состояния приземной атмосферы.

Проведенный анализ показал, что для интервалов устойчивой и безразличной стратификации (ночные, вечерние и утренние временные промежутки) степень линейной взаимосвязи  $E_z$  и  $U$  на высотах 50–90 м достигает величин 0.93; кросскорреляция  $E_z$  и  $W$  при этом незначима. Напротив, периоды сильной конвекции (12–14 ч  $LT$ ) характеризуются высокими значениями корреляции  $E_z$  и  $W$  и незначимой корреляцией  $E_z$  и  $U$ .

Ранее задача моделирования динамики электрического поля атмосферы методом пробных структур подробно рассматривалась с учетом вертикального распределения объемного заряда в погранслое [Шаталина и др., 2005]. Было показано, что совокупность ансамблей объемного заряда, распределенных в интервале высот 20–100 м и движущихся горизонтально со скоростью несколько метров в секунду, формирует динамические характеристики аэроэлектрического поля в приземном слое, подобные полученным в результате натуральных полевых аэроэлектрических наблюдений [Анисимов и др., 2003].

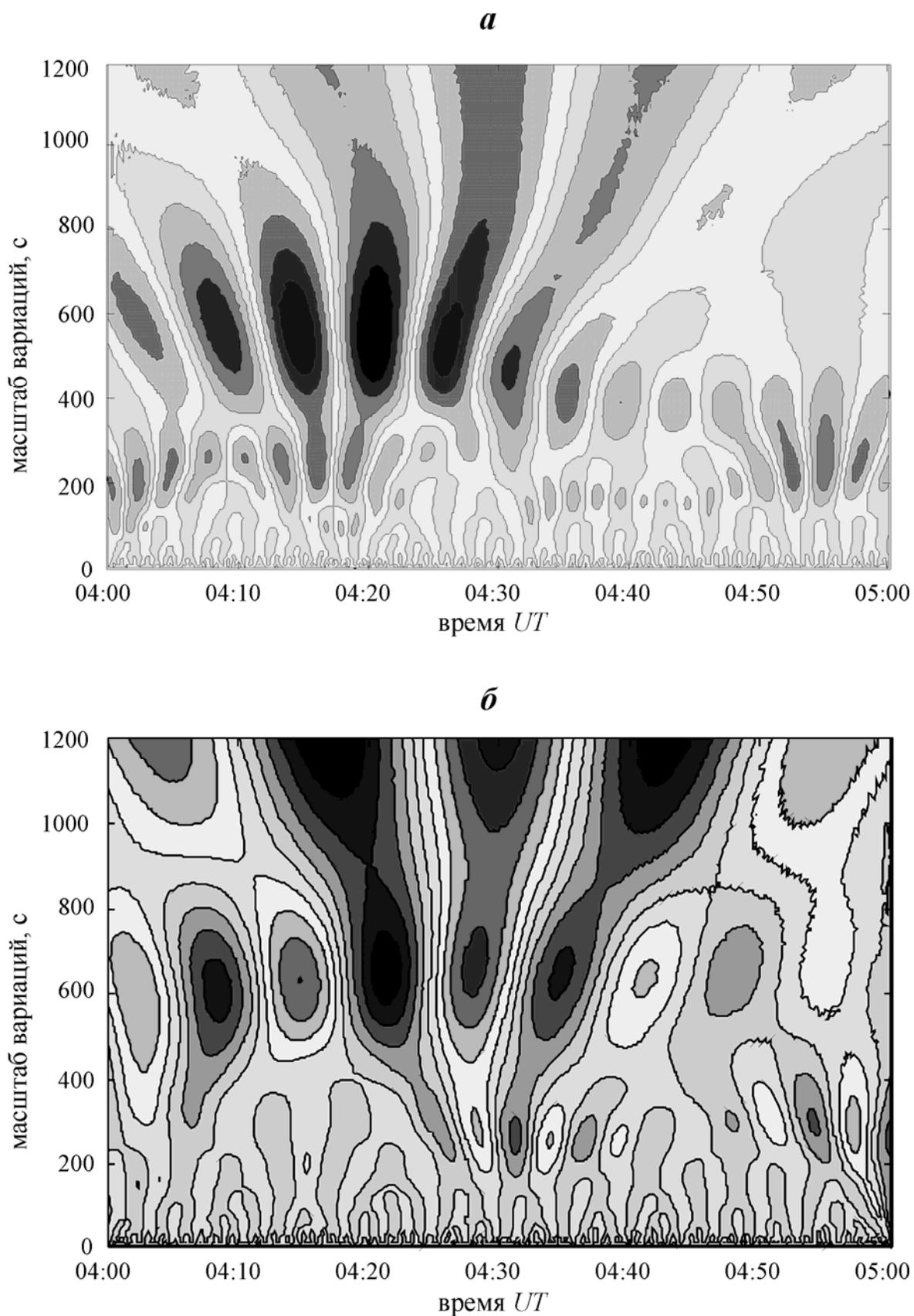
Таким образом, можно заключить, что горизонтальный перенос неоднородностей аэроэлектрического поля в приземном слое, по существу, представляет собой аэроэлектрический ветер [Anisimov, Shikhova, Kouznetsov, 2008]. Движение определяется наличием и стратификацией электрически активных областей погранслоя и скоростью перемещения аэроэлектрических структур.

### Заключение

По результатам комплексных натуральных аэрофизических наблюдений, проведенных в Геофизической обсерватории “Борок”, экспериментально определены скорости переноса неоднородностей электрического поля в приземном слое, которые отличны от горизонтальной скорости ветра в нем и связаны с высотными профилями объемного заряда и компонент скорости ветра.

Показано, что максимум кросскорреляционной функции вариаций напряженности аэроэлектрического поля в приземном слое  $\Delta E_z$  и вертикальной компоненты скорости ветра  $W$  в погранслое соответствует интервалу высот 80–140 м. Утверждается, что скорость переноса неоднородностей электрического поля в приземном слое определяется горизонтальной скоростью ветра на высоте максимума кросскорреляционной функции величин  $\Delta E_z$  и  $W$ .

Предполагается, что наличие слоя кросскорреляционного максимума  $\Delta E_z$  и  $W$  в условиях развитой конвекции обусловлено наличием аэроэлектрических структур и формированием слоев повышенной плотности объемного заряда.



**Рис. 6.** Вэйвлет-спектры вертикальной скорости ветра на высоте 80 м (*a*) и напряженности аэроэлектрического поля (*б*) по данным наблюдений 12.06.2006 г. (04:00–05:00 *UT*)

### Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН Р.В. Кузнецову и В.Ф. Крамору за проведение натурных содарных наблюдений высотных профилей компонент скорости ветра на полигоне Геофизической обсерватории “Борок”.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-05-00888).

### Литература

- Анисимов С.В., Шихова Н.М., Мареев Е.А., Шаталина М.В.* Структуры и спектры турбулентных пульсаций аэроэлектрического поля // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39, № 6. С.765–780.
- Копров Б.М., Анисимов С.В., Копров В.М.* Вариации аэроэлектрического поля и турбулентность приземного слоя // Докл. РАН. 2006. Т. 47, № 1. С.96–101.
- Кузнецов Р. Д.* Акустический локатор ЛАТАН-3 для исследований атмосферного пограничного слоя // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 8. С.749–753.
- Шаталина М.В., Мареев Е.А., Анисимов С.В., Шихова Н.М.* Моделирование динамики электрического поля в атмосфере методом пробных структур // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 8. С.648–660.
- Anisimov S.V., Mareev E.A., Bakastov S.S.* On the generation and evolution of aeroelectric structures in the surface layer // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, N 12. P.14359–14367.
- Anisimov S.V., Shikhova N.M., Kouznetsov R.D.* Transport of aeroelectricity in the lower atmosphere // 13th International Conference on Atmospheric Electricity, August 13-17, 2007, Beijing, China. 2007. P.100–103.
- Kallistratova M.A., Coulter R.L.* Application of sodars in the study and monitoring of the environment // Meteorology and Atmospheric Physics. 2004. V. 85. P.21–37.
- Kouznetsov R.D., Kramar V.F., Kallistratova M.A.* The vertical structure of turbulent momentum flux in the lower part of the atmospheric boundary layer // Meteorologische Zeitschrift. 2007. V. 16, N 4. P.367–373.
- Marshall, T.C., Rust W.D., Stolzenburg M., Roeder W., Krehbiel P.R.* Enhanced fair-weather electric fields soon after sunrise // Proc. 11-th Int. Conf. on Atmospheric Electricity. Guntersville, Alabama, 1999a. P.583–586.
- Marshall T.C., Rust W.D., Stolzenburg M., Roeder W., Krehbiel P.R.* A study of enhanced fair-weather electric fields occurring soon after sunrise // J. Geophys. Res. 1999b. V. 104, N D20. P.24455–24469.

#### Сведения об авторах

**АНИСИМОВ Сергей Васильевич** – доктор физико-математических наук, директор Геофизической обсерватории “Борок” – филиала Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок. Тел.: 8-(48547)-244-85, 8-(48547)-246-63. E-mail: svan@borok.yar.ru

**ШИХОВА Наталья Михайловна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Геофизическая обсерватория “Борок” – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок. E-mail: extern@borok.yar.ru

## TRANSPORT OF ELECTRICITY IN ATMOSPHERIC EXCHANGE LAYER

S.V. Anisimov, N.M. Shikhova

*Borok Geophysical Observatory of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Science, Borok (Yaroslavl region), Russia*

**Abstract.** According to results of surface observations, carried out in Borok Geophysical Observatory [58° 04' N and 38° 14' E], speed of transfer of electric field inhomogeneities is determined. This speed is different from horizontal speed of wind in the surface layer and related to the height profiles of space charge and of wind speed components. It is assumed that the horizontal transfer of aeroelectric field inhomogeneities in the surface layer is determined by presence and dynamics of electrical active regions of atmospheric exchange layer.

**Keywords:** atmospheric electricity, aeroelectric field, space charge, acoustic sounding, altitude profile.