

УДК: 551.594

## К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ЭФФЕКТА ВОСХОДА СОЛНЦА В СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ НА КАМЧАТКЕ.

### 1. ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

© 2012 г. С. Э. Смирнов<sup>1</sup>, Г. А. Михайлова<sup>2</sup>, О. В. Капустина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ науки Институт космических исследований и распространения радиоволн  
ДВО РАН, с. Паратунка (Камчатский край)

<sup>2</sup>ФГБУ науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова, РАН, г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: sergey@ikir.kamchatka.ru

e-mail: yumikh@izmiran.ru

Поступила в редакцию 23.03.2011 г.

После доработки 03.08.2011 г.

Исследован эффект восхода Солнца во временных вариациях электрического поля в приземной атмосфере в obs. “Паратунка” на Камчатке. Использовано выборочно 29 записей в условиях “хорошей погоды”. Показано, что оцененные параметры эффекта: времена его начала и достижения максимума величины напряженности поля относительно времени восхода, а также отношение максимума к величине до восхода и длительность эффекта, близко совпадают с ранее опубликованными в литературе данными. Тем самым подтвержден вывод о том, что эффект восхода в суточных вариациях электрического поля в приземной атмосфере обусловлен процессами турбулентности и конвекции в пограничном слое атмосферы при изменении ее температуры.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Первое сообщение об эффекте восхода Солнца (sunrise effect) в суточных вариациях электрических параметров в приземной атмосфере появилось в работе Nichols [1916]. Было обнаружено, что такие электрические параметры как напряженность электрического поля, электропроводность воздуха, токи проводимости и пространственный заряд проявляют тенденцию уменьшаться в течение ночи и затем возрастать при восходе Солнца. Но эти записи были получены всего лишь в интервале времени  $\pm 15$  мин относительно момента восхода. Более поздние многочисленные измерения суточных вариаций электрического поля в условиях “хорошей погоды” в различных пунктах земного шара позволили выделить характерные особенности эффекта, а именно: одновременное возрастание величины напряженности поля и плотности вертикального электрического тока в момент восхода Солнца. При этом наиболее ярко эффект проявляется в поведении электрического поля. Величина его напряженности, возрастая после восхода, с некоторым запаздыванием достигает максимума и затем к полудню уменьшается до уровня перед восходом. Начало эффекта, величина максимума напряженности и запаздывание их относительно момента восхода зависят от состояния приземной атмосферы, от времени года и географических координат пункта наблюдений. На заходе Солнца

эффект возрастания напряженности поля либо выражен слабо, либо совсем отсутствует.

Основные характеристики эффекта восхода Солнца во временных вариациях электрического поля детально исследовались многими авторами. Оказалось, что эффект начинается либо в момент восхода [Kasemir, 1956], либо спустя 20–30 мин [Marshall et al., 1999]. Длительность эффекта составляет ~4–7 ч [Muhleisen, 1958], ~4 ч [Kamra, 1969], ~3–4 ч [Selvam et al., 1980], ~3 ч [Marshall et al., 1999]. Запаздывание максимума напряженности поля относительно момента восхода составляет ~2.5 ч [Kasemir, 1956]; ~2–4 ч [Moore et al., 1962]; ~1–1.5 ч [Marshall et al., 1999]. Величина напряженности в максимуме эффекта возрастает относительно уровня до восхода ~ в 2.5–3 раза [Kasemir, 1956], ~ в 3 раза [Muhleisen, 1958] ~ в 4 раза [Marshall et al., 1999].

Одновременные измерения напряженности поля и плотности пространственного заряда [Muhleisen, 1958; Moore, 1962; Selvam et al., 1980; Marshall et al., 1999] показали, что с ростом величины напряженности возрастает плотность положительного заряда, а также величина вертикального тока [Kasemir, 1956; Muhleisen, 1958]. Одновременно измеренная концентрация ядер конденсации составила очень высокий уровень ночью, который уменьшался с восходом Солнца вплоть до нуля в местный полдень [Moore, 1962]. Этот экспериментальный результат показал постепенное

развитие процесса конвекции в атмосфере с ростом температуры на восходе.

Усиление ветра приводит к ослаблению эффекта восхода [Brown, 1936; Kamra, 1969; Selvam et al., 1980; Marshall et al., 1999]. При сильном тумане и плотной облачности без осадков пространственный заряд становится отрицательным, что приводит практически к ослаблению и даже исчезновению эффекта восхода. Этот эффект практически не проявляется в горах [Muhleisen, 1958].

Приведенные в литературе результаты исследований эффекта восхода Солнца в электрических параметрах в приземной атмосфере получены преимущественно на континентальных станциях наблюдений. Представляло интерес исследовать этот эффект во временных вариациях напряженности электрического поля на Камчатке с ее особым географическим положением и со свойственной ей высокой сейсмической активностью. Для этой цели использованы записи напряженности электрического поля, полученные в обс. “Паратунка” ( $\varphi = 52.9^\circ \text{ N}$ ,  $\lambda = 158.25^\circ \text{ E}$ ) в сентябре 1999 г., октябре 2002 г. и выборочно в 2004, 2005 и 2007 гг. Работа разделяется на две части: в первой из них проанализированы временные вариации напряженности (их результаты приведены ниже), а во второй — спектры мощности этих вариаций, результаты анализа которых будут даны в следующей публикации.

## 2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

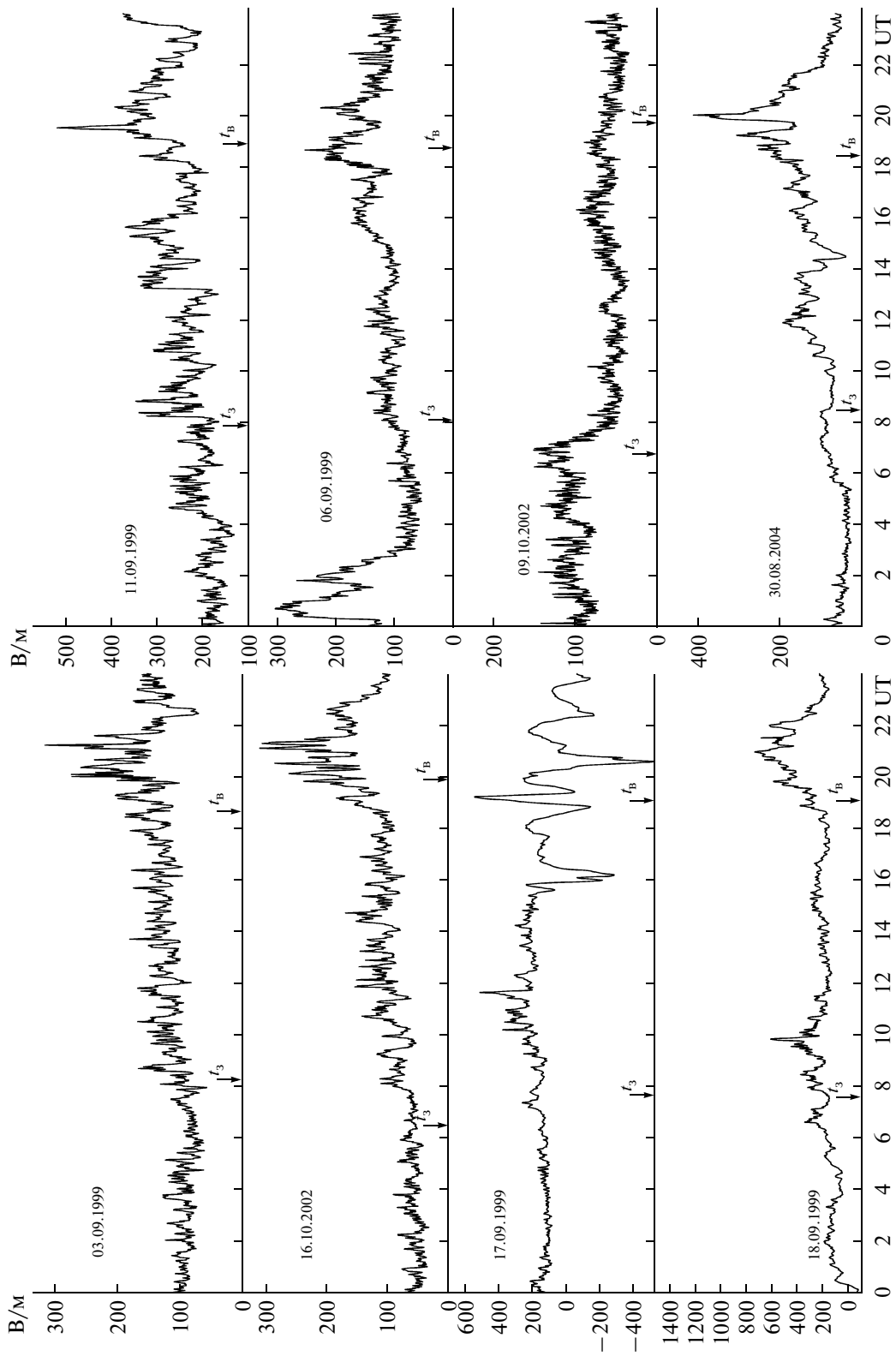
**2.1. Метод измерений.** Измерения напряженности электрического поля проводились в обс. “Паратунка” ИКИР ДВО РАН с использованием прибора “Поле-2”, разработанного в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Он установлен на расстоянии 200 м от административного здания на высоте 3 м. Площадка вокруг него расчищена от деревьев в радиусе 12 м. Сигнал с выхода этого прибора после оцифровки 14-битным АЦП с интервалом дискретизации 1 мин записывается на жесткий диск персонального компьютера. Одновременно ведутся записи метеорологических параметров. В отличие от континентальных условий, в которых выполнены ранее проведенные исследования, условия наблюдений на Камчатке обладают специфическими геофизическими особенностями. Во-первых, здесь в результате повышенной сейсмической активности постоянно “дышит” Земля, нагревая ее поверхность и выделяя газы, насыщенные радоном, главным агентом ионизации в приземном слое атмосферы. Во-вторых, здесь постоянно “дышат” вулканы, обогащая атмосферу аэрозолями. В-третьих, на полуострове активно действуют циклоны и антициклоны [Кузнецов и др., 2007]. Поэтому условия так называемой “хорошей пого-

ды”, сформулированные в работах [Reiter, 1992, p. 103; РД., 2002, с. 23]), на Камчатке реализуются крайне редко. В связи с этим в обработку включены данные, полученные в дни без осадков, гроз, туманов, землетрясений, при скорости ветра менее 6 м/с и при наличии нижнего яруса слоисто-кучевых облаков менее двух баллов, при  $Kp \leq 4$ . Для исследования эффектов восхода выборочно были использованы суточные кривые напряженности электрического поля в сентябре 1999 г. (13 дней), в октябре 2002 г. (5 дней), августе 2004 г. (6 дней), октябре 2005 г. (2 дня) и ноябре 2007 г. (3 дня). На рисунке 1 показаны типичные записи суточных вариаций напряженности поля, наблюдаемых в различных геофизических условиях, включая также условия “хорошей погоды”.

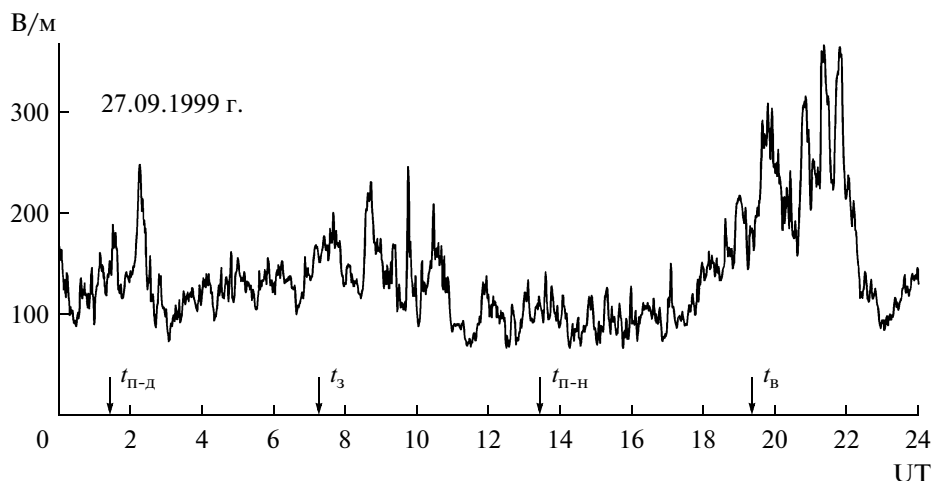
**2.2. Метод обработки.** Прежде всего, для каждого дня были определены моменты восхода и захода как моменты появления верхнего края диска Солнца над горизонтом и погружения его под горизонт для географических координат обс. “Паратунка” [Астроном. ежегод., 1998 и др.] В качестве иллюстрации на рис. 2 показан метод обработки суточной кривой электрического поля, на которой нанесены моменты времени восхода и захода, а также моменты времени полуночи и полудня. Далее на каждой кривой отмечалось время начала эффекта восхода, его запаздывание относительно времени восхода, длительность эффекта, время достижения максимума напряженности поля и отношение максимума к величине до восхода. Эти параметры, определенные по всем проанализированным данным с точностью до получаса, приведены в таблице. Знак минус в столбце ( $t_H - t_B$ ) указывает, что начало эффекта в поведении поля наступает до момента восхода Солнца. В столбце “Примечания” указаны условия “хорошей погоды” (УХП), а также наличие слабой облачности (менее 2 баллов). Видно, что начало эффекта в большинстве случаев совпадает по времени с моментом восхода, за исключением нескольких случаев, когда эффект наступал до восхода. Величина напряженности поля в максимуме эффекта превышает уровень до восхода в 2–4 раза; сдвиг максимума эффекта относительно момента восхода составляет величину от 0 до 4.5 ч, а длительность эффекта — от 2 до 7 ч. Практически во всех случаях эффект исчезает в местный полдень. Эффект усиления напряженности поля при заходе выделен существенно слабее по сравнению с эффектом восхода, и в таблице указана только ее величина.

## 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из таблицы, результаты анализа эффекта восхода Солнца во временных вариациях напряженности электрического поля в обс. “Паратунка” по всем выделенным параметрам



**Рис. 1.** Суточные вариации напряженности электрического поля в различных геофизических условиях: 03.09.1999 г. — условия “хорошей погоды”; 17.09.1999 г. — аномалия накануне землетрясения; 18.09.1999 г. — землетрясение 21:28:33 UT;  $\varphi = 51.21^\circ$  N;  $\lambda = 157.56^\circ$  E;  $h = 60$  км;  $M = 6.0$ ; 11.09.1999 г. — облачность со слабыми осадками; 06.09.1999 г. — землетрясение 15:04:52.81 UT;  $\varphi = 52.10^\circ$  N;  $\lambda = 159.15^\circ$  E;  $h = 33$  км;  $M = 5.0$ ; 09.10.2002 г. — сильный порывистый ветер, нижний ярус слоисто-кучевой облачности (~10 баллов), но без осадков; 30.08.2004 г. — землетрясение 12:23:21.60 UT;  $\varphi = 49.38^\circ$  N;  $\lambda = 157.42^\circ$  E;  $h = 40$  км;  $M = 6.0$ .



**Рис. 2.** Типичная суточная вариация напряженности электрического поля в условиях “хорошей погоды”:  $t_B$  и  $t_3$  — времена восхода и захода Солнца.

рам близко совпадают с ранее опубликованными в литературе данными, приведенными во Введении. Этот факт наводит на мысль, что независимо от геофизических особенностей пункта регистрации электрического поля в приземной атмосфере в условиях “хорошей погоды” действует общий физический механизм, порождающий этот эффект. Уже в ранних исследованиях авторы пытались объяснить природу этого эффекта. Так, Brown [Brown, 1936], исключив унитарную вариацию из измеренных суточных кривых поля, отчетливо выделил аномальный эффект в период восхода Солнца. Автор высказал идею о наличии в этот период в обменном слое атмосферы положительно заряженных ядер конденсации и переносе их вверх в результате процессов турбулентности и конвекции с ростом температуры воздуха.

Измерения величины напряженности поля и плотности вертикального электрического тока, выполненные в ясные и безоблачные дни [Kasemir, 1956], показали их одновременное возрастание в два-три раза после восхода Солнца. При этом электропроводность атмосферы увеличилась всего лишь на 20% по сравнению с соответствующими величинами перед восходом. Этот результат противоречил теории грозового генератора, объясняющего происхождение электрического поля атмосферы только совокупным действием грозовых генераторов, создающих глобальную электрическую цепь атмосферы (ГЭЦ). Используя результаты этих наблюдений в совокупности с имеющимися в литературе экспериментальными данными до 1956 г. Kasemir [1956] предложил дополнительно ввести в ГЭЦ так называемый обменный (конвективный [Атмосфера, 1991, с. 395]) генератор, который действует локально в пограничном слое атмосферы. Тогда плотность электрического тока при отсутствии

локальных грозовых источников записывается следующим образом [Атмосфера, 1991, с. 395]:

$$j = \lambda E + \rho V + D_i \nabla \rho,$$

где  $\lambda$  — электропроводность атмосферы, основной вклад в нее вносят легкие ионы;  $\rho$  — плотность электрических зарядов;  $V$  — гидродинамическая скорость движения среды;  $D_i$  — коэффициент турбулентной диффузии. В квазистационарном случае плотность тока определяется первым слагаемым и приписывается действию грозовых генераторов. После восхода Солнца в результате турбулентного теплообмена вступают в действие турбулентные процессы перемешивания ( $D_i \nabla \rho$ ) и механический перенос вверх ( $\rho V$ ) конвективным потоком воздуха положительного объемного заряда, накопленного ночью вблизи поверхности земли. Это, в свою очередь, приводит к увеличению напряженности электрического поля вблизи поверхности земли и усилению электрического тока проводимости, что и наблюдается в экспериментах. Предложенная модель конвективного генератора получила экспериментальное подтверждение в последующих работах многих авторов по исследованию эффекта восхода Солнца во временных вариациях электрических параметров в приземной атмосфере.

В работе [Muir, 1975] дополнительно предложен возможный альтернативный механизм, связанный с увеличением электрического потенциала верхней стенки классического конденсатора под действием солнечной радиации. Это, в свою очередь, приводит к увеличению напряженности в момент восхода Солнца. Более подробное обоснование этого механизма выходит за рамки данной статьи.

Особое место в серии работ, посвященных исследованию эффекта восхода Солнца в суточных

Параметры эффекта восхода и захода Солнца в суточных вариациях напряженности электрического поля (НЭП)

| Дата          | НЭП<br>$V_{\max}$ , В/м | НЭП<br>$V_{\max}/\text{фон}$ | $T_{\text{эф.В}}$ ч | $t_{\max}-t_B$ ч | НЭП <sub>3</sub><br>В/м | $t_H-t_B$ ч | Примечания                  |
|---------------|-------------------------|------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------|
| IX, 1999 г.   |                         |                              |                     |                  |                         |             |                             |
| 01            | 300                     | 3                            | 4                   | 1.5              | 100                     | 0           | УХП                         |
| 02            | 400                     | 2                            | 2                   | 2.0              | 200                     | 0.5         | УХП                         |
| 07            | 300                     | 3                            | 7                   | 3                | 100                     | 0           | Слаб. облачн.               |
| 14            | 500                     | 2                            | 4                   | 2                | 250                     | 0           | Слаб. облачн.               |
| 16            | 200                     | 2                            | 3                   | 1.5              | 100                     | 0           | Слаб. облачн.               |
| 18            | 600                     | 3                            | 4                   | 2                | 200                     | 0           | maxВ совпал с ЗТ            |
| 20            | 400                     | 4                            | 6                   | 2                | 100                     | 0           | УХП                         |
| 21            | 200                     | 2                            | 4                   | 2                | 100                     | 0           | УХП                         |
| 24            | 200                     | 2                            | 5                   | 2                | 100                     | 0           | Слаб. облачн.               |
| 27            | 300                     | 3                            | 3                   | 2                | 100                     | 0           | Слаб. облачн.               |
| 28            | 200                     | 2                            | 5                   | 2.5              | 100                     | -5          | УХП+серия ЗТ с $M \sim 4.5$ |
| 29            | 300                     | 3                            | 5                   | 1.5              | 100                     | 0           | УХП                         |
| X, 2002 г.    |                         |                              |                     |                  |                         |             |                             |
| 16            | 200                     | 2                            | 4.5                 | 2                | 100                     | 0           | УХП                         |
| 17            | 200                     | 2                            | —                   | 3                | 100                     | 0           | Слаб. облачн.               |
| 20            | 250                     | 2.5                          | 5                   | 1                | 100                     | -2          | Слаб. облачн.               |
| 25            | 200                     | 2                            | 3.5                 | 2                | 100                     | 0           | УХП + слаб. облач.          |
| 26            | 250                     | 2.5                          | 5.5                 | 1                | 100                     | -2          | УХП + слаб. облач.          |
| VIII, 2004 г. |                         |                              |                     |                  |                         |             |                             |
| 15            | 200                     | 2                            | 5                   | 3.5              | 100                     | 0           | УХП                         |
| 16            | 150                     | 2                            | 6                   | 3.5              | 50                      | 0           | УХП                         |
| 27            | 350                     | 7                            | 5                   | 3.5              | 50                      | 0           | УХП                         |
| 28            | 200                     | 2                            | 4                   | 2.0              | 80                      | 0.5         | УХП + слаб. облач.          |
| 29            | 300                     | 3                            | 4                   | 1.5              | 70                      | -3          | УХП + слаб. облач.          |
| 30            | 400                     | 4                            | 5                   | 1.5              | 100                     | -2          | УХП + ЗТ в 12 UT            |
| X, 2005 г.    |                         |                              |                     |                  |                         |             |                             |
| 06            | 100                     | 5                            | 4                   | 2                | 20                      | 0           |                             |
| 28            | 200                     | 4                            | 6                   | 0                | 25                      | -2.5        |                             |
| XI, 2007 г.   |                         |                              |                     |                  |                         |             |                             |
| 06            | 140                     | 2.5                          | 4                   | 1.5              | 50                      | 0           |                             |
| 08            | 200                     | 3                            | 4                   | 1.5              | 60                      | 0           |                             |
| 12            | 100                     | 3                            | 5                   | 2.5              | 30                      | 0           |                             |

Примечание:  $t_B$  – время восхода Солнца;  $t_H$  – начало эффекта;  $t_{\max}$  – время наступления максимума НЭП;  $V_{\max}$  – величина максимума НЭП; фон – величина НЭП перед восходом.

вариациях напряженности электрического поля, занимает работа [Чернева и Кузнецов, 2005]. В ней приводятся результаты одновременных измерений напряженности поля, электропроводности легких положительных ( $\lambda_+$ ) и отрицательных ( $\lambda_-$ ) ионов и соответственно коэффициента униполярности ( $\lambda_+/\lambda_-$ ) в приземной атмосфере в обл. “Паратунка”. Сравнение этих данных в период восхода Солнца показало, что “эффект возраста-

ния величины  $E_z$  во время утреннего солнечного терминатора не проявляется в относительной проводимости легких ионов, выраженной через коэффициент униполярной вариации. Увеличение  $E_z$  в утренние часы имеет хорошо выраженный колебательный характер с периодом колебаний порядка 0.5–1 ч. {...}. Предположительно именно внутренние гравитационные волны приводят к увеличению  $E_z$  в утренние часы” [Чернева и Кузнецов, 2005]. Этот результат противоречит как теории грозово-

го генератора, объясняющей происхождение электрического поля атмосферы только совокупным действием грозных генераторов и создающих глобальную электрическую цепь в атмосфере, так и модели конвективного генератора. Выводы этой работы и стимулировали проведение более детальных исследований эффекта восхода Солнца во временных вариациях электрического поля, результаты которых приведены в настоящей статье.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа эффекта восхода Солнца во временных вариациях напряженности электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке в условиях “хорошей погоды” показали следующее:

1. Оцененные параметры эффекта: времена его начала и достижения максимума величины напряженности поля относительно времени восхода, а также отношение максимума к величине до восхода и длительность эффекта, близко совпадают с ранее опубликованными в литературе данными.

2. Полученные результаты подтверждают физический механизм развития эффекта восхода Солнца, предложенный Kasemir [1956]. Согласно этому механизму, аномальные вариации напряженности электрического поля вблизи восхода обусловлены процессами турбулентности и конвекции в пограничном слое атмосферы при изменении ее температуры.

Что касается гипотезы о природе эффекта восхода, предложенной в работе [Чернева и Кузнецов, 2005], то для ее проверки необходимо выполнить детальный спектральный анализ временных вариаций поля.

Авторы признательны В.К. Михайловой за помощь в оформлении рукописи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Астрономический ежегодник*. С.-Петербург: ИПА РАН. 1998, 2001, 2002, 2003 гг.
- *Атмосфера*. Справочник. Л.: Гидрометеоздат. С. 395. 1991.
- *Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Дружин Г.И.* О влиянии циклонов на атмосферное электрическое поле на Камчатке // ДАН. Т. 412. № 4. С. 547–551. 2007.
- РД 52.04.168–2001. Методические указания. Наблюдения за электрическим полем. С.-Петербург: Гидрометеоздат. С. 23. 2002.
- *Чернева Н.В., Кузнецов В.В.* Форбуш-понижения и эффекты терминатора в атмосферном электричестве Камчатки // Астрофизика и физика околоземного космического пространства. Тр. 8-ой конференции молодых ученых. С. 37–40. 2005.
- *Brown J.G.* The effect of wind upon the Earth's electric field at the surface // *Terr. Magn. Atmos. Elect.* V. 41. № 3. P. 279–285. 1936.
- *Kamra A.K.* Effect of wind on diurnal and seasonal variations of atmospheric electric field // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 31. № 10. P. 1281–1286. 1969.
- *Kasemir H.W.* Zur stromungstheorie des lufterlektirshen felds III: der austauschgenerator. Archives for meteorology // *Geophys. Bioclimat. Ser. A.* V. 9. № 3. P. 357–370. 1956.
- *Marshall T.C., Rust W.D., Stolzenburg M., Roedes W.P., Krehbiel P.R.* A study of enhanced fair-weather electric fields occurring soon after sunrise // *J. Geophys. Res.* V. 104. № D20. P. 24455–24469. 1999.
- *Moore C.B., Vennegut B., Semonin R.G., Bullock J.W., Bradley W.* Fair-weather atmospheric electric potential gradient and space charge over central Illinois, Summer 1960 // *J. Geophys. Res.* V. 67. № 3. P. 1061–1071. 1962.
- *Muhleisen R.* The influence of water on the atmospheric electrical field // *Recent Advances in Atmospheric Electricity* / Ed. L.G. Smith. London: Pergamon press. P. 213–222. 1958.
- *Muir M.S.* The ionosphere as the source of the atmospheric electric sunrise effect // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 37. № 3. P. 553–559. 1975.
- *Nichols E.H.* Investigation of atmospheric electrical variations at sunrise and sunset // *Proc. R. Soc. A* 92. P. 401–408. 1916.
- *Reiter R.* Phenomena in atmospheric and environmental electricity. Amsterdam–London–New York–Tokyo: Elsevier. 541 p. 1992.
- *Selvam A.M., Manohar G.K., Khandalgaonkar S.S., Ramachandra Murty A.S., Ramana Murty B.H.V.* Diurnal and seasonal variations of space charge, electric field and cloud condensation nuclei in the lowest layer of the atmosphere // *Tellus.* V. 32. № 3. P. 232–244. 1980.