

УДК. 551.594.11.

ВЛИЯНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА НА СУТОЧНЫЙ ХОД НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ НА КАМЧАТКЕ

© 2013 г. С. Э. Смирнов

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
п. Паратунка (Камчатский край)
e-mail: sergey@ikir.ru.*

Поступила в редакцию 06.07.2011 г.
После доработки 26.06.2012 г.

Рассмотрены суточные вариации напряженности электрического поля, электропроводности и температуры в приземной атмосфере в условиях “хорошей погоды” в обл. “Паратунка” (Камчатка). Показано, что утренний максимум суточного хода электрического поля обусловлен конвекцией воздуха в приземном слое. В качестве меры конвективного потока воздуха выбрана разность температур атмосферы у поверхности земли и на высоте 25 м. Получена высокая корреляция значений разности температур на этих высотах с суточным ходом напряженности электрического поля.

DOI: 10.7868/S0016794013040159

1. ВВЕДЕНИЕ

Над океанами и на открытых пространствах в полярных областях в условиях “хорошей погоды” одновременно наблюдаются подобные суточные вариации напряженности электрического поля (НЭП) в приземной атмосфере в зависимости от мирового времени. Это так называемая “унитарная вариация” (УТ-вариация) с минимумом напряженности поля в 03–05 UT и максимумами в 18–19 UT (зимой) и 20–21 UT (летом), обусловленная суточными вариациями глобальной грозовой активности. Однако в измерениях электрических полей в приземной атмосфере на материковых станциях существенное влияние на суточные вариации оказывают местные метеорологические процессы, которые подавляют “унитарную вариацию”. Для выделения различных эффектов в суточных вариациях элементов атмосферного электричества наблюдения, как правило, проводят в условиях так называемой “хорошей погоды”. Эти условия включают в себя отсутствие гроз, осадков, мглы, туманов, низкой облачности при общей облачности не более 3 баллов, при скорости ветра до 6 м/с. [Руковод., 2002]. Но даже в таких условиях наиболее ярким локальным эффектом в суточных вариациях НЭП является так называемый “эффект восхода” Солнца, который проявляется в усилении напряженности поля, увеличении токов проводимости и величины пространственного заряда. Первое сообщение об этом эффекте появилось в работе [Nichols, 1916], в которой записи НЭП были получены лишь в интервале времени ± 15 мин относительно местного восхода Солнца. Более поздние измерения НЭП в

различных пунктах земного шара позволили выделить характерные особенности этого эффекта. Уже в ранних исследованиях авторы пытались объяснить его физическую природу. Так, Браун [Brown, 1936], исключив “унитарную вариацию” из измеренных суточных вариаций НЭП, отчетливо выделил этот аномальный эффект. Автор высказал идею о наличии в обменном слое атмосферы положительно заряженных ядер конденсации и переносе их вверх в результате процессов турбулентности и конвекции в атмосфере с ростом температуры воздуха. Интенсивность конвекции, как известно, зависит от разности температур между слоями, теплопроводности и вязкости среды. В другой работе [Izrael, 1953] исследована связь напряженности электрического поля с концентрацией водяного пара и сделан вывод о том, что суточные вариации вертикального распределения концентрации водяного пара зависят от конвективных процессов в атмосфере и, следовательно, влияют на суточные вариации НЭП. Измерения НЭП и плотности вертикального электрического тока, выполненные в безоблачные дни [Kasemir, 1956], показали их одновременное возрастание в два–три раза после восхода Солнца. При этом электропроводность атмосферы возросла всего лишь на 20% по сравнению с соответствующими величинами перед восходом. Этот результат противоречил теории грозового генератора, объясняющего поведение электрического поля атмосферы только совокупным действием грозовых генераторов, образующих глобальную электрическую цепь атмосферы (ГЭЦ). Каземир предложил дополнительно ввести в ГЭЦ так называемый кон-

вективный генератор, который действует локально в обменном слое атмосферы. Его действие сводится к механическому переносу вверх конвективным потоком воздуха положительного объемного заряда, накопленного ночью вблизи поверхности земли. Это, в свою очередь, приводит к усилению электрического тока проводимости и увеличению НЭП, что и наблюдается в экспериментах. Этой точки зрения придерживаются и авторы работы [Анисимов и др., 2006] для объяснения положительной корреляции между НЭП и температурой воздуха у поверхности земли в утренние часы.

Предложенная физическая модель конвективного генератора получила экспериментальное подтверждение в последующих работах многих авторов по исследованию эффекта восхода Солнца в вариациях НЭП в приземной атмосфере, в том числе и автора настоящей работы [Смирнов и др., 2012]. Численные оценки параметров модели конвективного генератора даны в докладе [Mareva et al., 2011].

Настоящая работа является продолжением исследования электрических процессов в приземной атмосфере на восходе Солнца. При этом, кроме наблюдений НЭП, дополнительно использованы одновременные записи электропроводности атмосферы, а также ее температуры около земной поверхности и на высоте 25 м. Такой эксперимент с целью прямого подтверждения наличия конвективного генератора в ГЭЦ выполнен впервые.

2. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения напряженности электрического поля в обл. “Паратунка” ИКИР ДВО РАН ($\lambda = 158, 25^\circ \text{ E}$; $\varphi = 52.9^\circ \text{ N}$) на Камчатке проводились прибором “Поле-2”, разработанным в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова [Имянитов, 1957]. Он установлен на полигоне в 200 м от административного здания на высоте 3 м. Площадка вокруг него расчищена от деревьев в радиусе 12 м. Сигнал с его выхода после оцифровки 14-битным АЦП с частотой дискретизации 1 Гц записывается на жесткий диск персонального компьютера. С периодичностью один раз в три месяца устанавливается второй прибор на уровне земли/снега и рассчитывается коэффициент пересчета данных основного прибора к уровню земли согласно руководству [Руковод., 2002]. В дальнейшем данные измерений основного прибора используются с учетом коэффициента редукции.

Контроль за метеорологическими параметрами проводится цифровыми метеостанциями WS-2000 и WS-2300. Выходные данные с них поступают в обсерваторию по радиоканалу на частоте 433 МГц. В наблюдениях используются два дат-

чика температуры воздуха. Один из них установлен на высоте 3 м на теневой стороне административного здания. Особенность установки другого датчика состоит в следующем. С северной стороны водонапорной башни на высоте 25 м прикреплена балка, одним концом отстоящая от кромки башни на 5 м, на котором за белым непрозрачным экраном прикреплен датчик температуры с радиоинтерфейсом. Такая конструкция позволяет избежать влияния нагрева башни солнечными лучами на датчик температуры. Датчик ветра установлен на этой же башне на высоте 25 м. Дискретность по времени метеорологических данных составляет 10 мин. Таким образом, мы имеем следующие контролируемые метеорологические данные: сила и направление ветра, а также температура на высоте 25 м; атмосферное давление, температура и влажность воздуха на высоте 3 м; облачность и осадки по информации местной метеостанции. Эти данные позволяют выбирать дни с условиями «хорошей погоды», которые реализуются в районе обсерватории крайне редко.

Одновременно проводятся измерения электропроводности воздуха прибором “Электропроводность-2”, разработанным также в Главной геофизической обсерватории. Он имеет два воздухозаборника, расположенных на высоте 3 м, для измерений электропроводности, вызванной отдельно положительными (λ_+) и отрицательными (λ_-) ионами воздуха. Далее в формулах используется суммарная электропроводность $\lambda = \lambda_+ + \lambda_-$. Все измерительные приборы разнесены друг от друга на расстояние не более 200 м.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Типичные суточные вариации НЭП (Ez) в условиях “хорошей погоды” и близких к ним в обл. “Паратунка” показаны на рис. 1. Для удобства сравнения с УТ-вариацией и другими геофизическими параметрами кривые приведены в зависимости от универсального времени. Стрелками указаны времена восхода (вверх) и захода (вниз) Солнца. С учетом географического положения обсерватории эти времена для каждой даты определялись по временам восхода и захода, приведенным в Астрономических ежегодниках для нулевого меридиана, и затем рассчитывались по соотношению $LT = UT + 10.55$, где $t = 10.55$ ч – часовой угол для долготы обсерватории $\lambda = 158.25^\circ \text{ E}$. Как видно на рисунке, максимум суточного хода наблюдается в утренние часы солнечного местного времени. В некоторые дни появляется вечерний максимум более слабой интенсивности по сравнению с утренним. В период активного таяния снега (апрель–май) подобный характер суточного хода, как правило, нарушается. Для анализа выбирались сутки не только с условиями “хорошей погоды”, но и при устойчивой работе

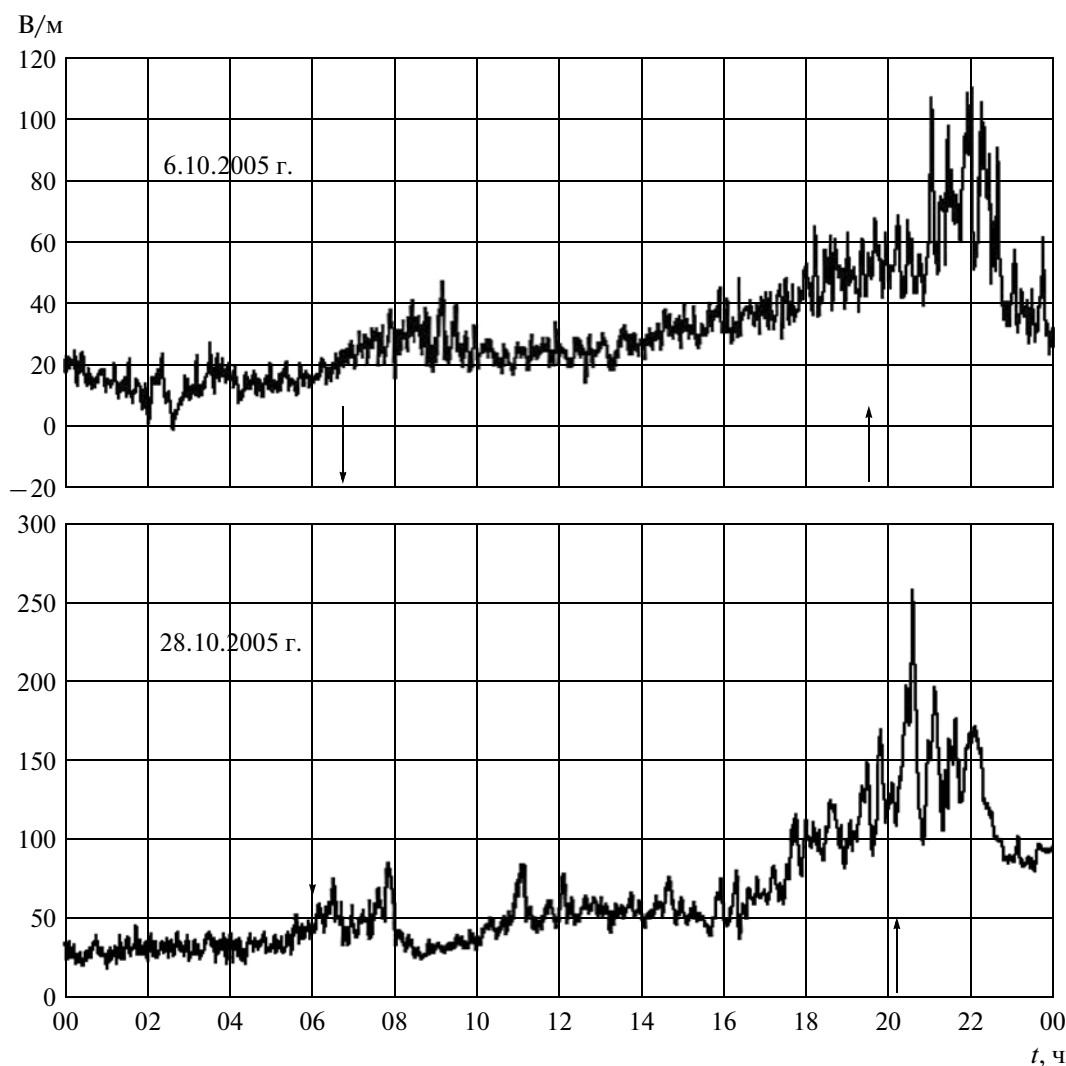


Рис. 1. Типичные суточные вариации напряженности электрического поля в условиях “хорошей погоды”. Стрелки вверх – время восхода, вниз – время захода Солнца.

всего комплекса измерительной аппаратуры. Таких дней в период 2005–2009 гг. оказалось 16 со среднесуточным значением НЭП ~ 60 В/м и со среднеквадратическим отклонением ~ 15 В/м. Столь низкие значения НЭП объясняются региональными особенностями и низким расположением станции относительно уровня моря (50 м). При этом утреннее возрастание напряженности поля, обусловленное конвективными процессами, чаще всего повышает средний уровень в два–три раза.

В качестве иллюстрации на рис. 2 (10 сентября 2007 г.) приведен набор одновременных суточных вариаций НЭП (*a*); электропроводности ($1b$, λ_+) и ($2b$, λ_-); температуры на высотах 25 м (*e*) и 3 м (*e*); влажности воздуха (*d*). Видно, что суточные кривые температуры на различных высотах подобны между собой и изменяются в противофазе с суточной кривой влажности, повторяя характерные

особенности этих параметров в условиях “хорошей погоды” [Матвеев, 1965].

Для оценки действия конвективного генератора, наиболее ярко проявляющегося на восходе Солнца, в качестве меры интенсивности конвективного потока воздуха нами выбрана разность температур на фиксированных высотах 3 и 25 м. Пример сопоставления суточных кривых НЭП с разностью температур показан на рис. 3. Наиболее близко связь вариаций НЭП с разностью температур проявляется на восходе Солнца с коэффициентом корреляции $\sim 0.6 \pm 0.1$. В некоторых случаях, как видно 12.11.2007 г., кривые близко совпадают между собой, в то время как в других случаях, показанных на рисунке, суточная вариация НЭП заметно отклоняется от кривой разности температур, позволяя предполагать о наличии в приземной атмосфере объемных зарядов другой природы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Качественно действие конвективного генератора в приземной атмосфере можно проследить по суточным кривым рис. 2. Как видно на кривых (з) и (д), с резким ростом температуры после восхода Солнца в результате увеличения скорости испарения влаги также резко падает влажность воздуха. При этом положительно заряженные ядра конденсации увлекаются вверх. Этот процесс отражается в уменьшении суммарной электропроводности воздуха (кривые 1 и 2 на фрагменте (б)) и в одновременном возрастании НЭП (фрагмент (а)) и продолжается несколько часов (2–7 ч), достигая максимума НЭП через 1–4,5 ч после восхода Солнца (см. также таблицу, [Смирнов и др., 2012]). Как правило, эффект исчезает в местный полдень в максимуме температуры (фрагмент (в)) в результате максимального усиления конвективного процесса и переноса положительно заряженных ядер конденсации в более высокие слои атмосферы. В этот период времени как следствие значения суммарной электропроводности и НЭП слабо изменяются. После полудня с ослаблением солнечной радиации температура воздуха плавно уменьшается до минимального значения перед восходом Солнца, также плавно в противофазе начинает возрастать влажность воздуха, приводя к накоплению объемных зарядов у поверхности земли. Суммарная электропроводность и НЭП слабо изменяются в ночные часы.

Для объяснения наблюдаемой связи разности температур атмосферы с суточными вариациями напряженности электрического поля в приземной атмосфере рассмотрим среднесуточную вариацию напряженности поля $\Delta E = \Delta E_{unit} + \Delta E_{\lambda} + \Delta E_{\rho}$ [Тверской, 1949], где унитарная вариация

$$\Delta E_{unit} = \frac{\Delta \varphi}{R \lambda}, \quad (1)$$

$\Delta \varphi$ – разность потенциалов земля – ионосфера; R – сопротивление столба воздуха земля-ионосфера; λ – электропроводность воздуха; вариация, связанная с проводимостью воздуха,

$$\Delta E_{\lambda} = -\frac{E}{\lambda} \Delta \lambda; \quad (2)$$

вариация, связанная с конвекцией воздуха,

$$\Delta E_{\rho} = \frac{1}{\lambda} \Delta(k\rho), \quad (3)$$

k – численный коэффициент турбулентности; λ – электропроводность воздуха; ρ – плотность объемного заряда.

В утренний максимум НЭП в обл. “Паратунка” наибольший вклад вносит утренняя конвекция воздуха, формула (3), затем иногда вариация электропроводности, формула (2), и унитарная вариация, поскольку местное время восхода

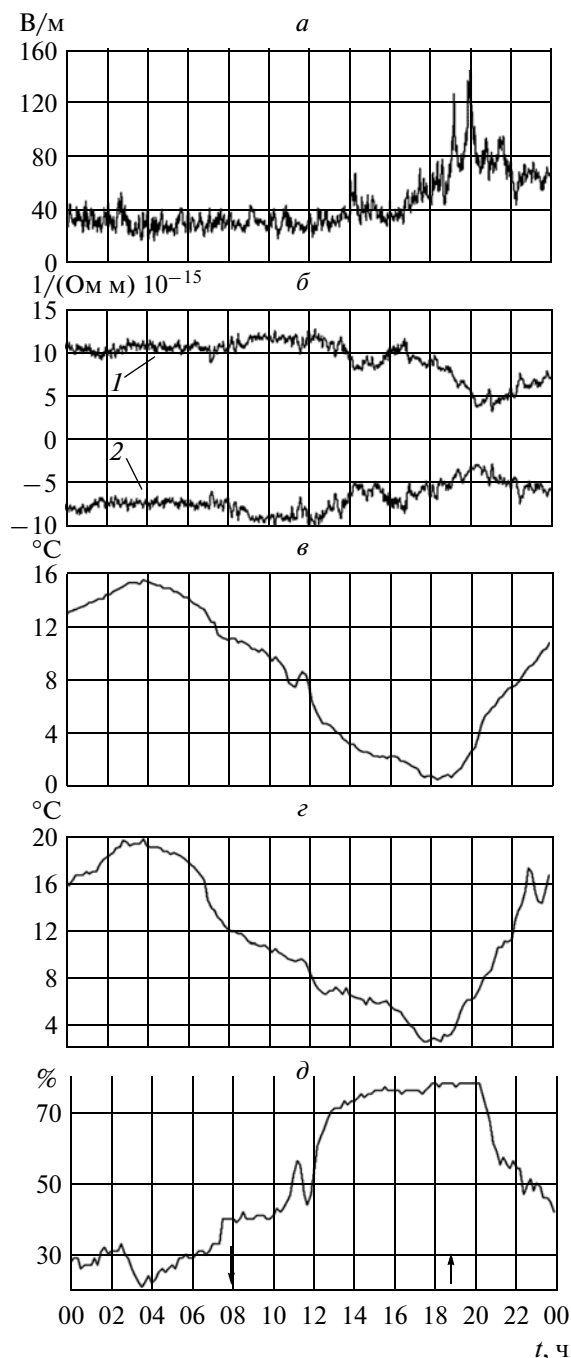


Рис. 2. Суточные вариации напряженности электрического поля (а); электропроводности воздуха, вызванная отрицательными (1) ионами и положительными (2) ионами с множителем -1 (б); температуры воздуха на высотах 25 м (в) и 3 м (з), а также влажности (д) 10 сентября 2007 г.

Солнца совпадает с ее максимумом, формула (1). Конвективный механизм утреннего максимума можно объяснить следующим образом. После восхода положительно заряженные объемные заряды, скопившиеся за ночь вблизи земной поверхности, начинают подниматься вверх. При большой величине разности температуры, до

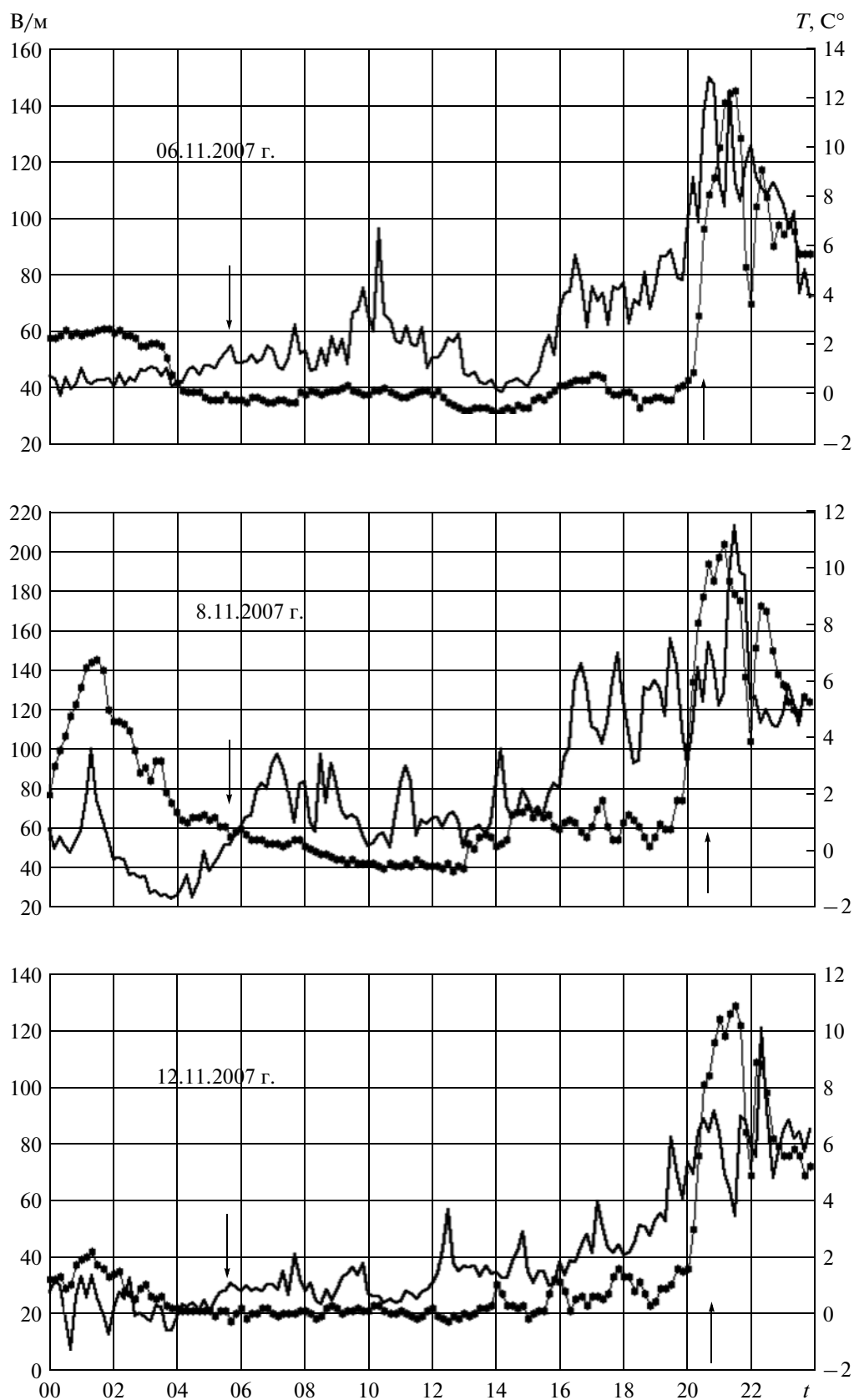


Рис. 3. Суточные вариации напряженности электрического поля (сплошная линия, левая шкала,) и разности температур на высотах 25 и 3 м (точки, правая шкала).

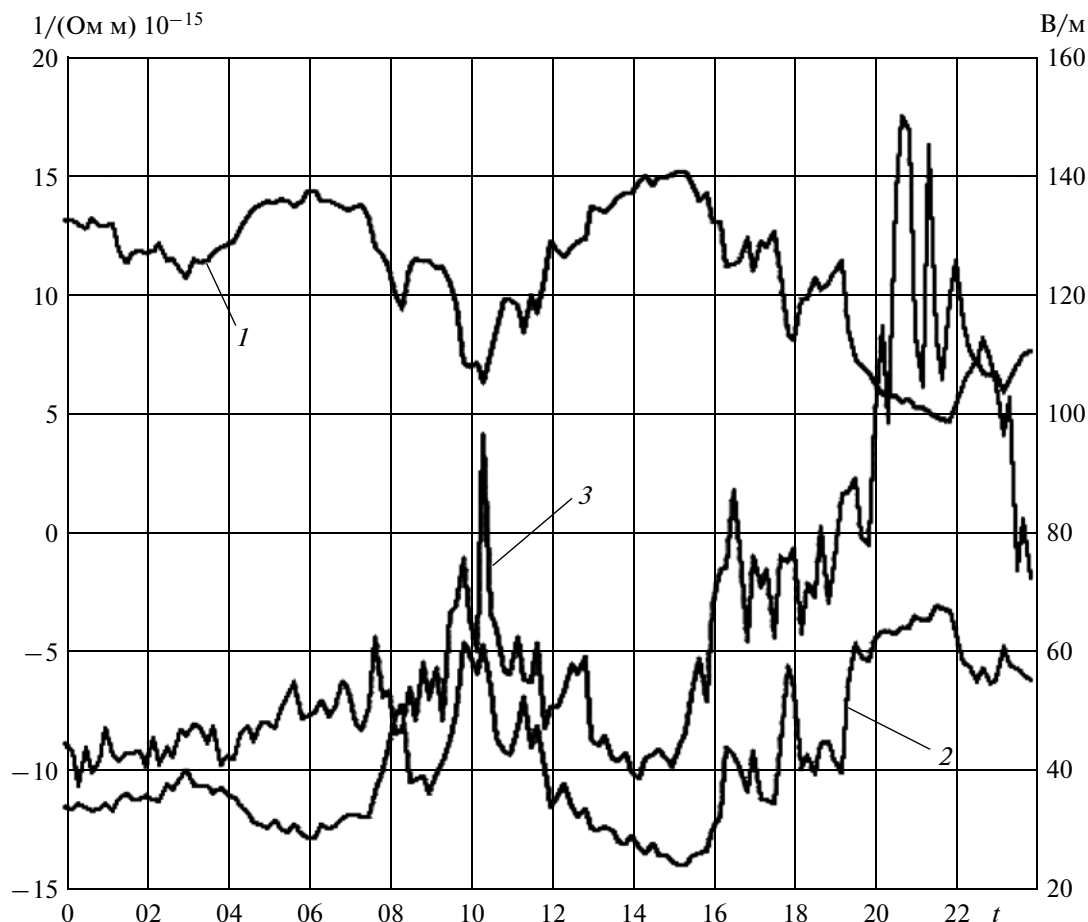


Рис.4. Суточные вариации положительной (1) и отрицательной (2) электропроводностей (левая шкала); напряженности электрического поля (3) 6 ноября 2007 г.

12°C (рис. 3), часто в максимуме эффекта восхода наблюдаются сильные колебания НЭП и разности температур. По-видимому, эти колебания вызваны зарождением конвективных ячеек с турбулентным движением положительно заряженных ядер конденсации. Вечерний максимум НЭП, на наш взгляд, обусловлен вариацией электропроводности, формула (2). В качестве иллюстрации этого эффекта, в дополнение к рис. 3, на рис. 4 приведены суточные вариации НЭП (кривая 3, правая шкала) с главным максимумом в утренние и вторичным максимумом в вечерние часы. Кривые 1 и 2 — электропроводности воздуха, левая шкала. В вечернее время суммарная электропроводность падает и, соответственно, растет НЭП. Этот вторичный максимум в вечернее и даже ночное время, по-видимому, можно объяснить наличием слабого тумана, который конденсируется в месте установки датчика.

Ультрафиолетовые лучи Солнца, являющиеся основным ионизатором атмосферы на больших высотах, в нижних слоях атмосферы существенной роли не играют, так как все лучи с малой дли-

ной волны, обладающие энергией, достаточной для ионизации газов, входящих в состав атмосферы, поглощаются уже на больших высотах, и до пределов тропосферы доходят лишь лучи, которые могут произвести только фотоэлектрический эффект. Но вследствие малой фотоэлектрической эффективности пород, встречающихся на поверхности земли, воды и взвешенных в атмосфере частиц ионизация настолько мала, что практически ею можно пренебречь [Тверской, 1949]. Этот вывод получил прямое экспериментальное подтверждение в работе [Пак и др., 2003].

Оценку связи между градиентом потенциала электрического поля и разностью температур по семи наиболее характерным суточным кривым можно представить в виде пропорции:

$$\nabla\varphi \approx (6.0 \pm 0.2)\Delta T, \quad (4)$$

где $\nabla\varphi$ — градиент потенциала электрического поля; ΔT — разность температур воздуха на высотах 3 и 25 м.

Отсутствие устойчивого суточного хода в весенние месяцы можно объяснить следующими

факторами. Уровень снега в районе обсерватории достигает 2.7 м, и этот максимум высоты снежного покрова приходится на конец марта. Такая масса снега увеличивает период таяния до конца мая и приводит к сложному характеру суточных вариаций влажности в точке наблюдения, влияние которой на электрические свойства воздуха можно проследить на рис. 2.

Конвективный характер максимума НЭП на восходе Солнца, экспериментально подтвержденный в данной работе, согласуется с результатами работы [Петров и др., 2007], в которой проводились измерения вертикального движения воздуха двумя крыльчатыми анемометрами на высотах 0.5 и 1.0 м. Их чувствительность позволяла отследить даже самые слабые движения воздуха вверх и вниз. Было получено хорошее согласие между вертикальным движением воздуха и плотностью вертикального тока проводимости. Увеличение плотности тока при слабо изменяющейся электропроводности приводит к увеличению напряженности электрического поля в приземной атмосфере.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ суточных вариаций напряженности электрического поля, электропроводности и температуры в приземной атмосфере в условиях “хорошей погоды” в obs. “Паратунка” в 2005–2009 гг. показал следующее:

1. Утренний максимум суточного хода электрического поля обусловлен конвективными процессами в атмосфере при резком возрастании температуры на восходе Солнца. Интенсивность этого максимума с коэффициентом корреляции порядка 0.6 ± 0.1 связана с разностью температур на высотах 3 и 25 м.

2. Вечерний максимум суточного хода электрического поля оказался слабо или совсем не связанным с разностью температур, что позволило предположить влияние тумана у поверхности земли на электропроводность и соответственно напряженность электрического поля.

3. Предложенный экспериментальный метод измерения разности температур на различных высотах атмосферы в качестве меры конвективных процессов оказался очень эффективным в изучении суточных вариаций параметров атмосферного электричества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов С.В., Мареев Е.А., Шихова Н.М. Механизмы связи аэроэлектрического и температурного полей нижней атмосферы // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 49. № 1. С. 35–52. 2006.
- Имянитов И.М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М.: Гостехиздат. 483 с. 1957.
- Пак В.В., Теодорович З.С., Кулаков Ю.И., Булдаков А.В., Ипполитов И.И., Смирнов С.В. К вопросу о взаимосвязи между напряженностью электрического поля атмосферы и УФ-освещенностью // Пятая Российская конф. по атмосферному электричеству. Сб. науч. труд. Т.1. Владимир: ВГУ. С. 90–92. 2003.
- Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Петров Н.А., Кривошеев А.П. Влияние процессов переноса в приземном слое на обмен зарядом между атмосферой и землей. // Сб. труд. VI Российской конф. по атмосферному электричеству. Н.Новгород: ИПФ РАН. С. 85–87. 2007.
- Руководящий документ РД 52.04.168-2001 Методические указания. Наблюдения за электрическим полем. С.-Петербург: Гидрометеоздат. 58 с. 2002.
- Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. К вопросу о природе эффекта восхода Солнца в суточных вариациях электрического поля атмосферы на Камчатке. 1. Временные вариации электрического поля // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 4. С. 535–540. 2012.
- Тверской П.Н. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоздат. 252 с. 1949.
- 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.
- Israel H. The atmospheric electric field and its meteorological causes // Thunderstorm Electricity / Ed. H.R. Byers. Chicago: University of Chicago. P. 4–23. 1953.
- Kasemir H.W. Zur stromungstheorie des luftelektrischen felds III: der austauschgenerator. Archives for meteorology // Geophys. Bioclimat. Ser. A. V. 9. № 3. P. 357–370. 1956.
- Mareeva O.V., Mareev E.A., Kalinin A.V., Zhidkov A.A. Convective generator in the global electric circuit: analytical approach and numerical consideration // XIV Intern. Confer. on Atmospheric Electricity, August 08–12, 2011, Rio de Janeiro, Brazil. P. 248. 2011.
- Nichols E.H. Investigation of atmospheric electrical variations at sunrise and sunset // Proc. R. Soc. A 92. P. 401–408. 1916.