

УДК 551.594

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУТОЧНЫХ И СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

М. В. Шаталкина^{1*}, *Е. А. Мареев*¹, *В. В. Клименко*¹, *Ф. А. Кутерин*¹, *К. А. Николл*^{2,3}

¹ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

² Метеорологический факультет, Университет Рединга, Рединг;

³ Кафедра электроники и электротехники, Университет Бата, Бат, Великобритания

С целью разделения глобальных и локальных эффектов атмосферного электричества проведены измерения напряжённости электрического поля хорошей погоды в Нижнем Новгороде в 2013–2018 годах. В результате обработки 139 суточных записей с четырёх пунктов наблюдения, разнесённых на 6÷8 км друг от друга, была исследована суточная вариация напряжённости атмосферного электрического поля хорошей погоды для различных сезонов и дней недели (рабочих и выходных). Показано, что кривая локальной суточной вариации всегда имеет два максимума. Вечерний максимум суточной вариации (19:00–20:00 UT) совпадает по времени с максимумом кривой Карнеги, которая является характеристикой глобальной электрической цепи. Наибольшие значения амплитуды поля достигаются в зимний период. Максимум напряжённости поля в первой половине дня (09:00–11:00 LT) является характерным для городской среды и показывает, что локальные эффекты, связанные с наличием в воздухе аэрозольных частиц, вносят существенный вклад в формирование суточной вариации, особенно в летний период. По данным измерений 2013–2018 годов выявлена сезонная вариация среднемесячных значений атмосферного электрического поля и проведён её сравнительный анализ с результатами измерений сезонной вариации в других районах земного шара. Полученные результаты позволяют выявить роль локальных эффектов в формировании суточной вариации в районах средних широт с умеренно континентальным климатом и дают основу для построения теории, которая способна объяснить физические механизмы влияния локальных эффектов и предложить соответствующие параметризации для нахождения приземного электрического поля в погодноклиматических моделях.

ВВЕДЕНИЕ

Суточная вариация напряжённости атмосферного электрического поля (далее — суточная вариация электрического поля) является одним из наиболее фундаментальных явлений атмосферного электричества. Оно было впервые описано почти сто лет назад [1–3] и заключается в том, что в отсутствие существенных локальных возмущений, как метеорологических (дождь, гроза, сильный ветер), так и антропогенных (обусловленных локальными источниками радиоактивности и аэрозольных частиц) изменения электрического поля вблизи земной поверхности следуют за изменениями единого для всей Земли параметра, так называемого ионосферного потенциала. Эти изменения связаны, в первую очередь, с долготным распределением на Земле электрических генераторов: грозовых облаков и других облаков с развитой электрической структурой. Таким образом, данные изменения имеют глобальный характер и происходят одновременно на всей планете, т. е. суточная вариация напряжённости электрического поля, измеряемая в некоторой точке, зависит от единого времени суток (UT). Поэтому её часто называют унитарной вариацией поля хорошей погоды (о критериях хорошей погоды в атмосферных электрических измерениях см. далее). Измерения ионосферного потенциала весьма сложны и до сих пор были скорее фрагментарными [4]. Измерения электрического поля вблизи земной поверхности проводить гораздо проще, поэтому за прошедшие сто лет были выполнены многочисленные эксперименты в разных частях планеты и накоплено значительное количество данных [5–9]. Суточная вариация атмосферного

* aries@ipfran.ru

электрического поля (Diurnal Variation в англоязычной литературе), изначально обнаруженная над океаном (см. детальную библиографию в работе [10]), наблюдалась также и на континентальных станциях как в городских условиях, так и в сельской местности [11–15]. Было показано, что для неё характерно наличие одного (в вечерние часы всемирного времени) или двух (в вечерние часы всемирного времени и локальный полдень) максимумов [16]. Обнаружение суточной вариации по данным наземного мониторинга электрического поля требует анализа долгосрочных временных рядов с учётом условий хорошей погоды [17–19].

В последнее время интерес к изучению глобальных и локальных эффектов атмосферного электричества резко возрос в связи с проблемами изменений климата и возможного влияния антропогенных факторов и космической погоды на климатическую систему Земли. Так, в рамках международного проекта GloCAEM (Global Coordination of Atmospheric Electricity Measurements) были сделаны первые шаги к созданию эффективной глобальной сети мониторинга атмосферного электричества, которая должна предоставлять результаты измерений практически в режиме реального времени [20]. Данные со всех сайтов доступны в одинаково отформатированных файлах с временным разрешением 1 с и 1 мин вместе с метеорологическими данными (где это возможно) для простоты интерпретации электрических измерений. Анализ суточной вариации электрического поля в течение 2016 года показывает, что на большинстве пунктов GloCAEM наблюдаются два суточных максимума, характерных для локальных влияний на градиент потенциала, таких как «эффект восхода солнца» («sunrise effect») [20].

При этом большой интерес вызывают наблюдения не только в районах, наиболее благоприятных с точки зрения выделения глобальной компоненты (районы, удалённые от источников антропогенных загрязнений и находящиеся выше слоя обмена), но и в обычных обсерваториях над сушей в средних широтах, в том числе в урбанизированной зоне (см., например, [20, 21]). Такие измерения помогают выяснить разнообразные факторы, влияющие на электрическое поле в атмосфере, и механизмы такого влияния.

Определение условий хорошей погоды может несколько отличаться в работах разных авторов. Под условиями хорошей погоды при проведении атмосферных электрических наблюдений в работах Анисимова с соавторами (см., например, [22]) подразумевается отсутствие осадков, в том числе тумана и дымки, скорость ветра не более 4 м/с, облачность не более 5 баллов. В последней работе на эту тему [19] предложено использовать в качестве основных три критерия хорошей погоды: отсутствие гидрометеоров, аэрозолей и дымки, так что дальность прямой видимости составляет не менее 2 км; незначительное количество кучевообразных облаков и отсутствие слоистых облаков с нижней границей менее 1 500 м; скорость ветра у поверхности Земли от 1 до 8 м/с.

Уже ранние исследования в различных географических районах показали, что вид суточной вариации электрического поля существенно зависит от времени года, т. е. имеет место сезонная вариация. Ранние работы (см. [5], а также изложение истории вопроса и обширную библиографию в статье [23]) указывали на возрастание поля в зимний период северного полушария, наблюдаемое на многочисленных станциях на суше и согласованное с результатами измерений в ходе морских экспедиций «Карнеги» и «Мод». Однако учёт локальных эффектов при измерениях на суше, а также анализ данных станции «Мауна Лоа» на Гавайях (находящейся на высоте около 3 400 м над уровнем моря, т. е. над слоем обмена атмосферы) и реанализ данных экспедиций «Карнеги» и «Мод» показал, что глобальная годовая вариация должна иметь максимум в июле, т. е. в период лета в северном полушарии [23]. При этом вопрос о наличии и значимости полугодовой сезонной вариации остаётся до конца не выясненным.

Следует подчеркнуть, что исследования суточной и сезонной вариации электрического поля необходимы для адекватного учёта механизмов функционирования глобальной электрической

цепи в современных погодно-климатических моделях. Параметризация ионосферного потенциала, предложенная в работе [24], была использована для расчётов суточной и сезонной вариаций ионосферного потенциала с помощью климатической модели ИВМ РАН INMCM4.0. Результаты вычислений оказались в удовлетворительном согласии с имеющимися экспериментальными данными и, в частности, подтвердили, что сезонная вариация имеет максимум в летние месяцы северного полушария, когда конвекция над сушей более ярко выражена.

Данная статья посвящена экспериментальному исследованию суточной и сезонной вариации атмосферного электрического поля в районах средних широт с умеренно континентальным климатом. Используются данные непрерывных измерений электрического поля в четырёх пунктах, разнесённых на расстояния от 6 до 8 км, в течение пяти лет с 2013 года по 2018 год.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

На рис. 1 приведена схема размещения пунктов приёма и регистрации электромагнитных полей на территории города. Датчики электрического поля — электростатические флюксометры — были размещены в четырёх пунктах Нижнего Новгорода: на крыше ИПФ РАН, на крыше ИФМ РАН, на крыше одного из корпусов Нижегородского государственного университета им. Лобачевского (ННГУ) и на территории аэрологической станции «Нижний Новгород» (АС НН). Пункты наблюдения в Нижнем Новгороде располагаются на расстоянии от 6 до 8 км друг от друга.

Данные комплексы позволяют вести наблюдения электрического поля как в невозмущённой атмосфере, так и в грозовых условиях. В качестве прибора для регистрации квазистатического электрического поля использовались флюксометры Voltek EFM-100. Паспортная частота дискретизации электрического сигнала для них составляет 20 Гц, чувствительность ± 20 кВ/м. Для расширения амплитудного диапазона принимаемого поля были установлены делители 1:4 для пунктов ИПФ РАН, ИФМ РАН и АС НН и 1:3 для пункта ННГУ, что позволило регистрировать электрические поля в диапазоне от -80 до 80 кВ/м.

В результате обработки результатов измерений было обнаружено, что таймер микроконтроллеров всех используемых флюксометров Voltek EFM-100 работает примерно на 1,7 % быстрее, поэтому количество отсчётов за сутки в среднем на 280435,37 больше паспортного. При статистической обработке усреднённых данных была проведена соответствующая нормировка по времени. На пункте наблюдения ИПФ РАН осуществляется синхронизация по GPS-сигналу. На остальных пунктах наблюдения компьютеры, предназначенные для записи и хранения данных, синхронизируются через Интернет. Обработка данных включала в себя необходимый для учёта месторасположения флюксометров расчёт коэффициента редукции [25] для каждого пункта наблюдения. Он проводился по 19 суткам, в течение которых по данным метеорологических

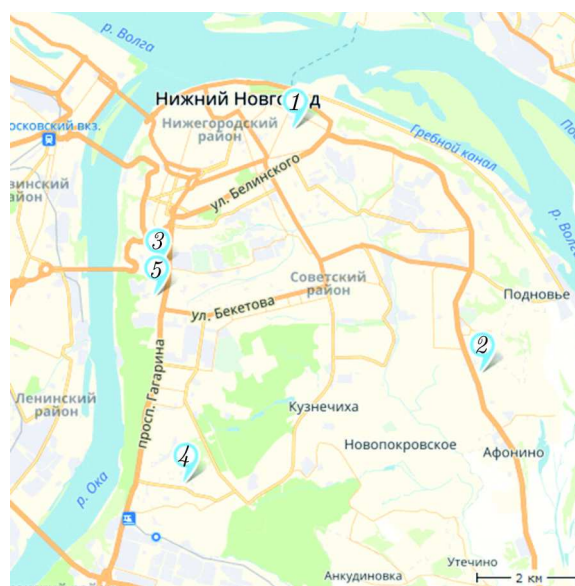


Рис. 1. Схема расположения пунктов измерений в Нижнем Новгороде: 1 — флюксометр на крыше ИПФ РАН, 2 — флюксометр на крыше ИФМ РАН, 3 — флюксометр на крыше ННГУ, 4 — флюксометр на территории АС НН, 5 — метеорадар на крыше гостиницы «Ока»

Таблица 1

| Пункт наблюдения | Координаты | Высота над землей, м | Коэффициент редукиции | Стандартное отклонение, В/м | Коэффициент асимметрии |
|------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|
| ИПФ РАН | 56°19'25" с. ш. 44°01'21" в. д. | 33 | 3,47 | 139,17 | -3,29 |
| ИФМ РАН | 56°16'51" с. ш. 44°04'58" в. д. | 11 | 2,76 | 145,47 | -1,84 |
| ННГУ | 56°17'56" с. ш. 43°58'48" в. д. | 17 | 3,55 | 139,17 | -2,74 |
| АС НН | 56°15'40" с. ш. 43°59'20" в. д. | 6 | 3,56 | 147,61 | -2,57 |

наблюдений облачность полностью отсутствовала и скорость ветра не превышала 2 м/с. Предполагалось, что в указанные периоды среднее за сутки поле должно соответствовать стандартному значению поля хорошей погоды $E = 130$ В/м.

В течение всего периода измерений коэффициенты редукиции датчиков практически не изменялись. Сведения о пунктах наблюдений (местоположение, полученные коэффициенты редукиции, стандартное отклонение и коэффициент асимметрии) приведены в табл. 1.

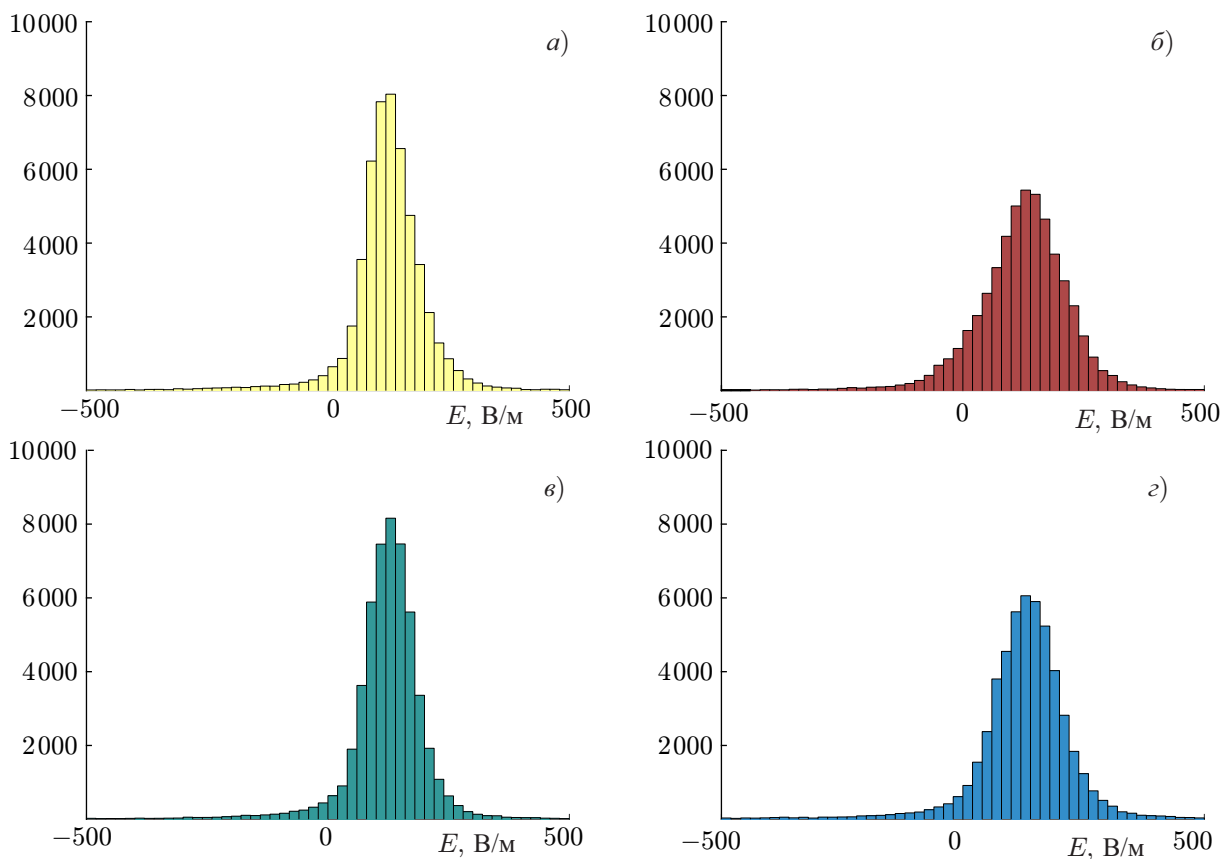


Рис. 2. Гистограммы десятиминутных средних значений напряжённости электрического поля, измеренных в 2013–2018 годах, построенные в диапазоне ± 500 В/м: по данным флюксметра ИПФ РАН (а), по данным флюксметра ИФМ РАН (б), по данным флюксметра ННГУ (в) и по данным флюксметра АС НН (г)

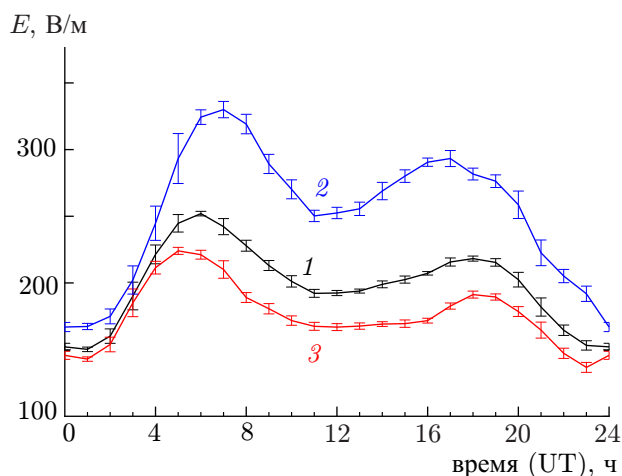


Рис. 3. Суточная вариация напряжённости атмосферного электрического поля E в Нижнем Новгороде в 2013–2018 годах, усреднённая по всем четырём пунктам наблюдения (часовое усреднение): годовая средняя (1), холодный период (2), тёплый период (3). Вертикальные линии — стандартная ошибка измерений среднего значения

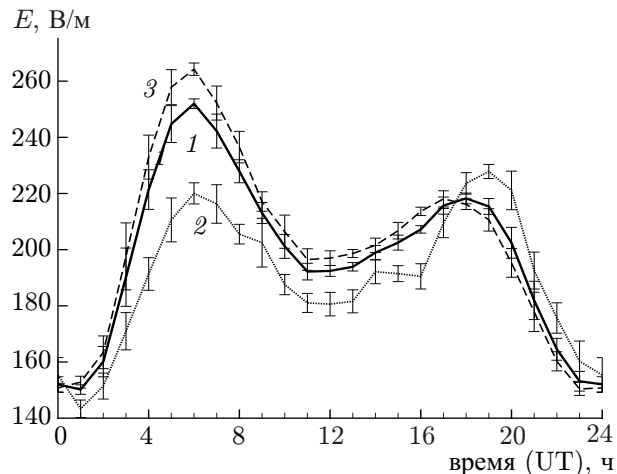


Рис. 4. Суточная вариация напряжённости атмосферного электрического поля в Нижнем Новгороде в 2013–2018 годах, усреднённая по всем четырём пунктам наблюдения (часовое усреднение): годовая средняя (1), выходные дни (2), рабочие дни (3). Вертикальные линии — стандартная ошибка измерений среднего значения

Гистограммы десятиминутных средних значений электрического поля, измеренных на всех четырёх пунктах в 2013–2018 годах, показаны на рис. 2 (ср. с результатами анализа в работе [20]). Средние (медианные) значения поля, найденные по этим гистограммам, для всех пунктов наблюдения равны 130 В/м. Для дальнейшего анализа суточной вариации, в отличие от работы [20], были использованы только эпизоды с хорошей погодой (отсутствие осадков, в том числе тумана и дымки, скорость ветра не более 4 м/с, облачность не более 5 баллов).

2. СУТОЧНАЯ ВАРИАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ХОРОШЕЙ ПОГОДЫ

Были проанализированы результаты регистрации вертикальной компоненты атмосферного электрического поля хорошей погоды за 2013–2018 годы. В результате обработки 139 суточных записей с четырёх пунктов наблюдения была исследована суточная (унитарная) вариация атмосферного электрического поля в Нижнем Новгороде в зависимости от сезона и дней недели. В указанной выборке записей 40 относились к холодному сезону, 99 — к тёплому; 38 записей были сделаны в выходные дни, 101 — в рабочие. Основные результаты данного исследования представлены на рис. 3 и 4. Видно, что суточная вариация, наблюдаемая на всех четырёх пунктах в Нижнем Новгороде, относится к типу «вариации с двумя максимумами» [20]. Вечерний максимум суточной вариации совпадает по времени с максимумом кривой Карнеги, которая является характеристикой глобальной электрической цепи. Наибольших значений поле достигает в зимний период (что согласуется с наблюдениями на континентальных станциях [5, 6, 11, 22, 26, 27]). Максимум поля в первой половине дня (09:00–11:00 LT) является характерным для городской среды и показывает, что локальные эффекты (прежде всего загрязнение городского воздуха аэрозолями) вносит существенный вклад в возмущения поля. Сравнение с результатами других авторов [5, 6, 11, 22, 26, 27] показывает, что локальный максимум наблюдается несколько позже, чем обычно проявляется «эффект восхода» в местности с низким содержанием аэрозолей, и что амплитуда утреннего максимума больше амплитуды вечернего.

Интересным результатом является существенное отличие кривых суточной вариации для хо-

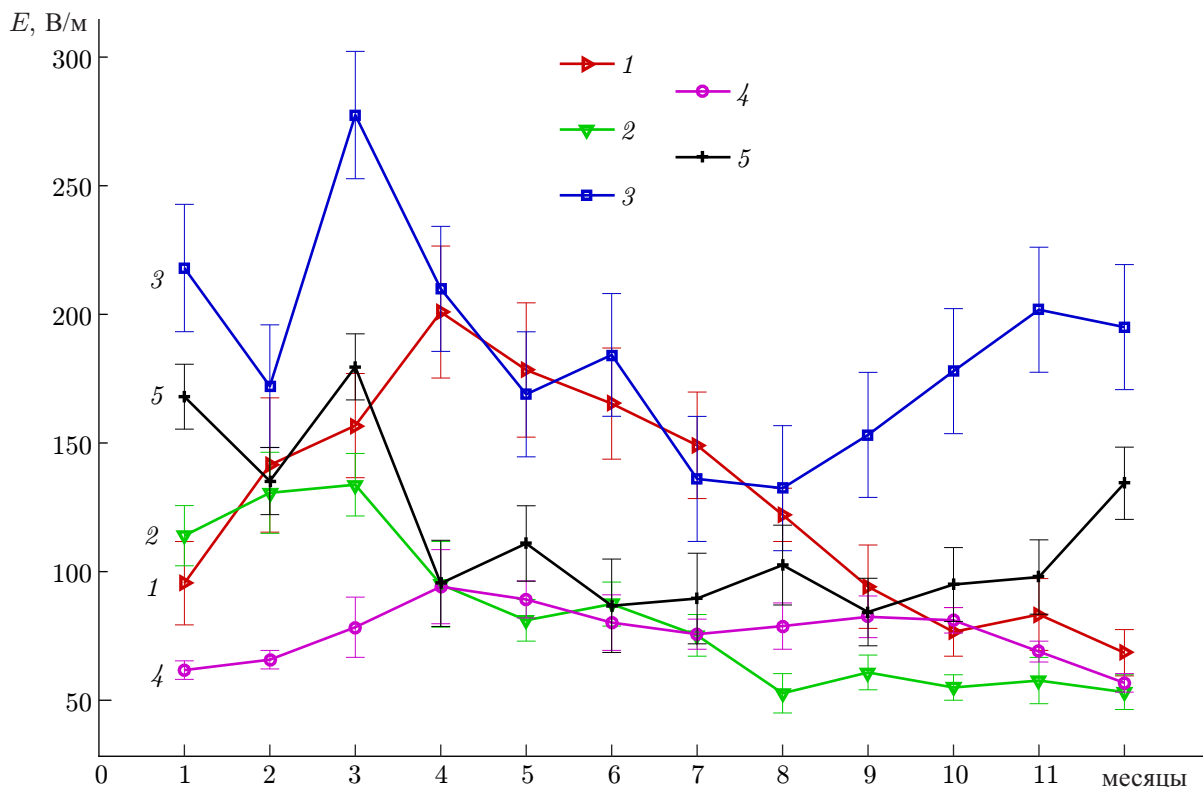


Рис. 5. Сезонная вариация напряжённости электрического поля E_z : 1 — по данным ГО «Борок» ИФЗ РАН за 1998–2009 годы [22]; 2 — по данным ГО «Паратунка» за 1997–2008 годы [30]; 3 — по наблюдениям в Исламабаде в 2013–2015 годах [14]; 4 — по наблюдениям в г. Якутске в 2011 году [31]; 5 — по наблюдениям в г. Нижнем Новгороде в 2013–2018 годах. Вертикальные линии — стандартная ошибка измерений среднего значения

лодного и тёплого периодов (рис. 3). Под «холодным периодом» подразумевается период года с октября по апрель. Из рис. 3 видно, что в зимний период, когда в дни хорошей погоды температура воздуха наиболее низка, глобальные эффекты превалируют над локальными, особенно в выходные дни. В летний период вклад глобальных эффектов сравним с вкладом локальных или меньше. Отдельно было исследовано поведение суточной вариации в выходные и рабочие дни недели (рис. 4). Схожие унитарные вариации наблюдались в других городах [13, 15, 20, 26, 28–30].

Полученные результаты позволяют выявить роль локальных эффектов в формировании суточной вариации в районах средних широт с умеренно континентальным климатом и дают основу для построения теории, которая способна объяснить физические механизмы влияния локальных эффектов, и построить соответствующие параметризации для нахождения приземного электрического поля в погодно-климатических моделях.

3. СЕЗОННАЯ ВАРИАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Результаты анализа среднемесячных значений поля приведены на рис. 5. Наблюдения в Нижнем Новгороде ($56^{\circ}19'37''$ с. ш., $44^{\circ}00'27''$ в. д.) в 2013–2018 годах показывают, что максимальные значения напряжённости поля наблюдаются в холодный период года — с ноября по март. Максимум поля приходится на март. Заметим, что климат в Нижнем Новгороде умеренно континен-

тальный, осадков средним выпадает 653 мм в год, наибольшее количество — в июле, наименьшее — в марте.

Для сравнения на том же рисунке приведены графики сезонной вариации поля в трёх разнесённых на большие расстояния пунктах России с разными климатическими условиями: г. Борок Ярославской обл. ($58^{\circ}03'45''$ с. ш., $38^{\circ}14'23''$ в. д.), г. Якутск ($62^{\circ}01'38''$ с. ш., $129^{\circ}43'55''$ в. д.), с. Паратунка (Камчатка, $52^{\circ}57'38''$ с. ш., $158^{\circ}14'55''$ в. д.) Также приведены данные измерений в пункте с субтропическим климатом (г. Исламабад, $33^{\circ}40'$ с. ш., $73^{\circ}10'$ в. д.).

Наиболее длительный (четырнадцатилетний) период наблюдений отражает кривая годового хода среднемесячной напряжённости поля за 1998–2009 годы на среднеширотной геофизической обсерватории в Борке [22]. Наблюдения осуществляются в экологически чистом регионе на берегу Рыбинского водохранилища. Борок, как и Нижний Новгород, расположен в Верхнем Поволжье, в центре Европейской равнины (расстояние между Борком и Нижним Новгородом составляет около 405 км), поэтому климатические условия в этих пунктах сходные. Локальной особенностью Борка, таким образом, является меньший уровень антропогенной нагрузки и более длительный период таяния снежного покрова. Возможно, с этими особенностями связано наличие значимого апрельского максимума среднего значения напряжённости электрического поля, наблюдаемого в Борке.

Годовой максимум среднемесячных значений в Паратунке (Камчатка), как и в Нижнем Новгороде, приходится на март [31]. Период наблюдений, отражённый на графике, охватывает 1997–2008 годы. Климат в Паратунке переходный от морского к континентальному. Средняя температура в июле и августе $13\div 14^{\circ}\text{C}$, средняя температура января -9°C . Среднее число осадков — до 1120 мм в год. Благодаря тому, что пункт окружен со всех сторон сопками, среднегодовая скорость ветра здесь невелика.

Сезонный ход напряжённости поля в Якутске [32] имеет максимумы в весенние и осенние месяцы и минимумы, приходящиеся на летние и зимние месяцы. Непрерывные наблюдения напряжённости атмосферного электрического поля в Якутске были организованы в 2009 году и продолжаются по настоящее время. На графике отражены данные за 2009–2013 годы. Измерение напряжённости поля осуществляется с помощью электростатического флюксметра производства НИРФИ (г. Нижний Новгород), установленного на крыше главного здания ИКФИА СО РАН. Наблюдения электрического поля в Якутске представляет интерес, в частности, тем, что климат здесь резко континентальный: в январе средняя температура $-38,6^{\circ}\text{C}$, в июле $19,5^{\circ}\text{C}$. Среднегодовая сумма осадков в Якутске составляет около 238 мм. Воздух в городе, как правило, сухой, особенно летом (средняя влажность воздуха за год составляет около 68 %). Наблюдаемый зимний минимум авторы связывают с уменьшением напряжённости поля во время наступающих зимой морозных (ледяных) туманов в пункте наблюдения.

Кривые сезонной вариации поля в Исламабаде [14] построены по данным 2015–2017 годов, т. е. за сравнительно небольшой период времени. Исламабад находится на северной окраине плато Потохар, на высоте 618 м над уровнем моря. Датчик установлен на крыше здания (на высоте около 8 м от земли) в Университете Куэйд-и-Азам ($33^{\circ}45'$ с. ш., $73^{\circ}08'$ в. д.) Это одноэтажное здание высотой около 7 м. Территория покрыта низкорослыми деревьями и растениями. Климат Исламабада является субтропическим, на него сильно влияют сезонные ветры — муссоны, а также предгорное местоположение. Исламабад находится в зоне умеренной влажности, что для Пакистана является редкостью, т. к. многие зоны этой страны страдают от засушливого климата. За год в районе столицы выпадает до 900 мм осадков. Наиболее тёплым месяцем в Исламабаде является июнь (а не июль или август). Причиной этого является приход в июле–августе муссонов, когда обильно выпадают осадки (более половины годовой нормы) и средняя температура снижается. Средняя температура июня $31,3^{\circ}\text{C}$. Наиболее холодным месяцем является январь, средняя

температура которого составляет $10,2^{\circ}\text{C}$. Характерны тёплые дни и холодные ночи, время от времени в зимние месяцы случаются заморозки, хотя и достаточно редко; иногда выпадает снег. Несмотря на существенные отличия в амплитуде (связанные, вероятно, с большей высотой над уровнем моря), форма кривой сезонной вариации в Исламабаде сходна с кривой, наблюдаемой в Нижнем Новгороде, и имеет максимум в марте.

Суммируя результаты проведённого сравнительного анализа, можно заключить, что в Нижнем Новгороде, как и в других пунктах наблюдений на суше в средних широтах, летний максимум, обусловленный ростом ионосферного потенциала, маскируется локальными эффектами, которые приводят к возрастанию среднего поля в зимние месяцы и весеннему максимуму приземного поля.

Заметим при этом, что, например, результаты статистического анализа материала, полученного в Борке, показывают, что унитарная вариация (с минимумом в утренние и максимумом в вечерние часы всемирного времени) значимо воспроизводится в условиях невозмущённой атмосферы средних широт северного полушария в зимние месяцы (декабрь, январь, февраль). Этот вывод согласуется с результатами, полученными на среднеширотной обсерватории Марста, находящейся в Швеции ($59^{\circ}56'$ с. ш., $17^{\circ}35'$ в. д.), и среднеширотной обсерватории Нагиценк, расположенной в Венгрии ($47^{\circ}38'$ с. ш., $16^{\circ}43'$ в. д.) Анализ суточной вариации поля в Нижнем Новгороде в зимние месяцы с целью выявления глобальных эффектов будет проведён в отдельной работе.

Теория, которая объяснила бы локальные особенности поведения сезонной вариации поля, пока не построена. Для её создания необходимо выявление механизмов возмущений приземного электрического поля с учётом влияния метеорологических факторов и антропогенных воздействий на динамику проводимости пограничного слоя атмосферы.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований, представленные в данной работе, показывают, что долговременные измерения приземного электрического поля в разнесённых точках даже в городских условиях дают богатую информацию о сравнительном вкладе глобальных и локальных эффектов. В результате обработки 139 суточных записей с четырёх пунктов наблюдения, разнесённых на $6\div 8$ км друг от друга, в Нижнем Новгороде в 2013–2018 годах была исследована суточная вариация атмосферного электрического поля хорошей погоды для различных сезонов и дней недели. Показано, что кривая локальной суточной вариации всегда имеет два максимума. Вечерний максимум суточной вариации (19:00–20:00 UT) совпадает по времени с максимумом кривой Карнеги, характеризующей глобальную электрическую цепь. Наибольшие значения амплитуды поля достигаются в зимний период. Максимум поля в первой половине дня (09:00–11:00 LT) является характерным для городской среды и показывает, что локальные эффекты, связанные с наличием в воздухе аэрозольных частиц, вносят существенный вклад в формирование суточной вариации, особенно в летний период. По данным измерений 2013–2018 годов выявлена сезонная вариация среднемесячных значений атмосферного электрического поля хорошей погоды (с максимальными значениями в зимний и весенний периоды) и проведено её сравнение с результатами измерений сезонной вариации в других районах земного шара. Отметим, что возможные эффекты геомагнитной и солнечной активности, наиболее сильно проявляющиеся в высоких широтах и также влияющие на суточную и сезонную вариации электрического поля, остались за рамками данного исследования (подробнее об этом см. работы [31, 33, 34]).

Полученные результаты полезны для выявления роли глобальных и локальных эффектов в формировании суточной вариации в районах средних широт с умеренно континентальным климатом. Они могут послужить основой для развития теории, которая сможет объяснить физиче-

ские механизмы этих эффектов и построить достаточно простые параметризации для нахождения приземного электрического поля в погодно-климатических моделях.

Авторы выражают благодарность Ю. В. Шлюгаеву за помощь в проведении экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, Проект международного обмена Лондонского Королевского Общества (IEC R2 170075) между Россией и Великобританией (грант 17–55–10014 КО-а). К. А. Николь выражает благодарность за финансовую поддержку NERC через независимое исследовательское сообщество (NE/L011514/1 и NE/L011514/2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mauchly S. J. // *Phys. Rev.* 1921. V. 18. P. 161.
2. Mauchly S. J. // *J. Geophys. Res.* 1923 V. 28, No. 3. P. 61.
3. Whipple F. J. W. // *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.* 1929. V. 55, No. 232. P. 351.
4. Markson R. // *Bulletin of the American Meteorological Soc.* 2007. V. 88, No. 2. P. 223.
5. Парамонов Н. А. // *Докл. АН СССР.* 1950. Т. 70, № 1. С. 37.
6. Okawati A. // *J. Geomagn. Geoelectr.* 1961. V. 12, No. 3, P. 129.
7. Tacza J., Raulin J.-P., Macotela E., et al. // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 2014. V. 120. P. 70.
8. Kubicki M., Odzimek A., Neska M. // *Atmos. Res.* 2016. V. 178–179. P. 329.
9. Whitlock W. S., Chalmers J. A. // *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.* 1956. V. 82, No. 353. P. 325.
10. Harrison R. G. // *Surveys in Geophysics.* 2013. V. 34, No. 2. P. 209.
11. Kubicki M., Michnowski S., Myslek-Laurikainen B. // *Proc. 13th Intern. Conf. Atmospheric Electricity, 13–17 August 2007. Beijing, China.* P. 50.
12. Golkowski M., Kubicki M., Cohen M., et al. // *Acta Geophys.* 2011. V. 59, No. 1. P. 183.
13. Bennett A. J., Harrison R. G. // *Weather.* 2007. V. 62, No. 10, P. 277.
14. Gurmani S. F., Ahmad N., Tacza J., Iqbal T. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 179. P. 441.
15. Имянитов И. М., Чубарина Е. В. // *Тр. Главной геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова.* 1960. № 110. С. 7.
16. Чалмерс Д. *Атмосферное электричество.* Л.: Гидрометеиздат, 1974. 420 с.
17. Israelsson S., Knudsen E., Anisimov S. V. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1994. V. 56, No. 12. P. 1545.
18. Anisimov S. V., Mareev E. A., Shikhova N. M., et al. // *Nonlinear Process. Geophys.* 2013. V. 20, No. 5. P. 819.
19. Harrison R. G., Nicoll K. A. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 179. P. 239.
20. Nicoll K. A., Harrison R. G., Barta V., et al. // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 2019. V. 184. P. 18.
21. Matthews J. C., Wright M. D., Clarke D., et al. // *J. Electrostat.* 2019. V. 97. P. 42.
22. Анисимов С. В., Шихова Н. М., Афиногенов К. В. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2013. Т. 56, № 11–12. С. 787.
23. Adlerman E. J., Williams E. R. // *J. Geophys. Res. Atmos.* 1996. V. 101, No. D23. P. 29679.
24. Mareev E. A., Volodin E. M. // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41, No. 24. P. 9009.
25. Кудринская Т. В., Болдырева К. А., Новикова О. В. и др. // *Научная мысль Кавказа.* 2012. № 4. С. 95.
26. Silva H. G., Conceicao R., Melgao M., et al. // *Environ. Res. Lett.* 2014. V. 9, No. 11. P. 114025.
27. Xu B., Zou D., Chen B. Y., et al. // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 2013. V. 97, P. 85.
28. Ahmad N., Gurmani S. F., Qureshi R. M., Iqbal T. // *Advances in Space Research.* 2019. V. 63, No. 2. P. 927.

29. Silva H. G., Conceicao R., Khan M. A. H., et al. // J. Electrostat. 2016. V. 84. P. 32.
30. Sheftel V. M., Chernyshev A. K., Chernysheva S. P. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, No. D5. P. 10793.
31. Смирнов С. Э., Анисимов С. В., Шихова Н. М. // Сб. докл. V Международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» 2–7 августа 2010 года, с. Паратунка, Камчатский край. С. 208.
32. Торопов А. А., Козлов В. И., Каримов Р. Р. // Наука и образование. 2016. № 2. С. 58.
33. Апсен А. Г., Канониди Х. Д., Чернышева С. П. и др. Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве. М.: Наука, 1988. 150 с.
34. Williams E., Mareev E. // Atmos. Res. 2014. V. 135–136. P. 208.

Поступила в редакцию 25 декабря 2018 г.; принята в печать 28 марта 2019 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF DIURNAL AND SEASONAL VARIATIONS IN THE ATMOSPHERIC ELECTRIC FIELD

M. V. Shatalina, E. A. Mareev, V. V. Klimenko, F. A. Kuterin, and K. A. Nicoll

In order to separate global and local effects of atmospheric electricity, measurements of the fair-weather electric field were performed in Nizhny Novgorod in 2013–2018. As a result of processing 139 diurnal records from four observation points spaced at 6–8 km from one another, diurnal variations in the fair-weather atmospheric electric field for different seasons and weekdays (working days and weekends) were studied. The curve of the local diurnal variation is shown to always have two maxima. The evening maximum of the diurnal variation (19:00–20:00 UT) coincides in time with the maximum of the Carnegie curve, which is a characteristic of the global electrical circuit. The highest values of the field amplitude are reached in the winter period. The field-intensity maximum in the first half of the day (09:00–11:00 LT) is characteristic of the urban environment and shows that local effects associated with the presence of aerosol particles in the air significantly contribute to the formation of diurnal variation, especially in summer. According to the 2013–2018 measurements, the seasonal variation in the monthly-average values of the atmospheric electric field is revealed and analyzed compared with the results of measurements of seasonal variation in other regions of the globe. The obtained results allow one to reveal the role of local effects in the formation of diurnal variation in the mid-latitude areas with temperate continental climate and provide a basis for developing a theory which can explain the physical mechanisms of local effects and suggest appropriate parametrization for finding the surface electric field in the weather and climate models.