

УДК 550.837;551.594

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА

© 2019 г. А. А. Спивак^{1, *}, С. А. Рябова^{1, **}, В. А. Харламов^{1, ***}

¹Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: spivak@idg.chph.ras.ru

**e-mail: riabovasa@mail.ru

***e-mail: kharlamov@idg.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 26.09.2018 г.

После доработки 27.09.2018 г.

Принята к публикации 24.01.2019 г.

Приведены и анализируются результаты инструментальных наблюдений напряженности электрического поля в условиях г. Москвы в период с 2014–2018 гг. Обсуждаются спектральные характеристики вариаций электрического поля и его суточный ход. Демонстрируется влияние холодных атмосферных фронтов, ураганов, шквалов и гроз, а также техногенных явлений (крупных пожаров) на вариации электрического поля. Показано, что ураганам, шквалам и грозам предшествуют периоды длительностью от одного до 4 часов, характеризующиеся специфическими вариациями электрического поля, что может рассматриваться в качестве возможного прогностического признака сильных атмосферных явлений.

DOI: 10.1134/S0016794019040163

1. ВВЕДЕНИЕ

Электрическое поле в приземном слое атмосферы является весьма информативным индикатором целого ряда геофизических явлений и процессов, протекающих как в ионосфере и магнитосфере, так и в окрестности границы земная кора–атмосфера [Чалмерс, 1973; Kelley, 2014]. Весьма важным представляется исследование электрической активности приземных слоев атмосферы с целью предупреждения негативных последствий природных явлений, связанных с мощной конвективной облачностью, формированием грозových ячеек и т.д. Особый интерес представляет изучение характеристик электрического поля при рассмотрении вопросов, касающихся взаимодействия геосфер, поскольку можно полагать, что такие взаимодействия осуществляются в большинстве случаев посредством взаимодействий и преобразований физических полей [Адушкин и др., 2006; Адушкин, Спивак, 2014]. Представляется, что в указанных процессах не последнюю роль как индикатора играет электрическое поле [Адушкин, Спивак, 2014].

Одновременно с этим мониторинг электрической активности приземной атмосферы важен с точки зрения контроля среды обитания человека, оказывающей значительное влияние на его самочувствие и организм в целом [Адушкин и др., 1995; Экология, 2006]. Здесь следует подчеркнуть,

что современная экологическая ситуация, и прежде всего в условиях крупных промышленных центров и агломераций, характеризуется существенной ролью техногенного фактора [Климат, 1995; Спивак и др., 2016a]. Что касается мегаполисов, типичным примером которых является г. Москва, то экологическая ситуация в них во многом определяется также экологическим состоянием их пригородов.

В настоящей работе рассматриваются результаты регистрации электрического поля в атмосфере Москвы. И здесь следует отметить важную роль локальных факторов как техногенного, так и природного происхождения. Их действие способно при определенных условиях значительно изменить характеристики электрического поля в конкретном месте [Чалмерс, 1974; Шулейкин, 2006]. По этой причине особый интерес вызывает изучение возмущенной составляющей, амплитуда которой может на несколько порядков превосходить фоновые значения [Кузнецов, 2011; Dolezal, 1972].

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных использовались цифровые ряды инструментальных наблюдений за вертикальной компонентой электрического поля E , которые выполняются в Центре геофизи-

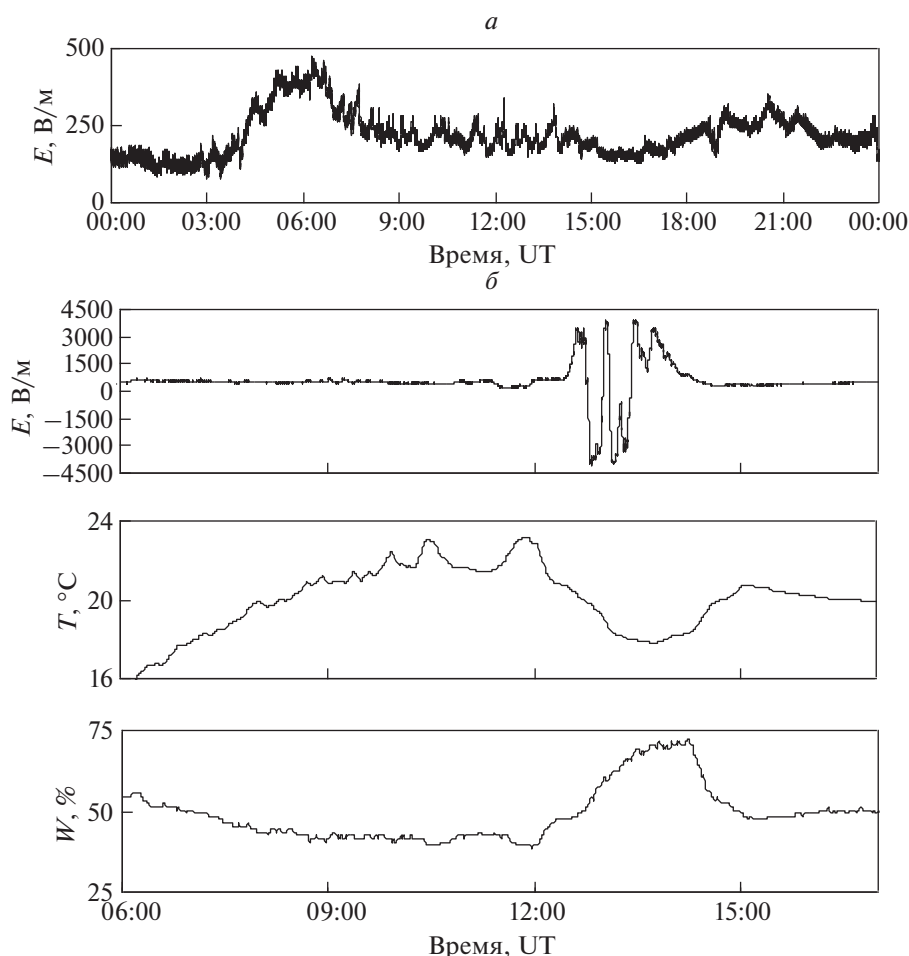


Рис. 1. Пример суточных вариаций вертикальной компоненты напряженности электрического поля в г. Москве: (а) — 18.08.2018 г. в период отсутствия сильных атмосферных явлений, (б) — 05.05.2018 г. в период прохождения холодного атмосферного фронта, характеризующегося резким падением температуры (T) и повышением влажности (W) воздуха.

ческого мониторинга г. Москвы ИДГ РАН (ЦГМ) с 2014 г. по настоящее время [Спивак и др., 20166]. Регистрация проводится с использованием электростатического флюксметра ИНЭП, размещенного на измерительной платформе на высоте ~ 10 м от земной поверхности. Технические характеристики применяемых электростатических флюксметров обеспечивают устойчивую регистрацию напряженности электрического поля в частотном диапазоне от 0 до 20 Гц с амплитудами от 1 В/м до 10 кВ/м и более в зависимости от конкретного экземпляра прибора (с целью очистки рабочих поверхностей ИНЭП от загрязнения регистраторы периодически сменяются). При этом погрешность измерений не превышает $\pm 5\%$ при амплитудах поля более 50 В/м. Датчик может быть вынесен на расстояние 30 м от управляющего блока прибора.

Примеры регистрации электрического поля в условиях хорошей погоды и при наличии возму-

щений, вызванных прохождением холодного атмосферного фронта, представлены на рис. 1.

Одновременно с помощью цифровой автоматической метеостанции Davis Vantage Pro2 регистрируются метеорологические параметры: скорость ветра V , температура T и влажность воздуха W , атмосферное давление P_0 и мощность солнечного излучения S , характеристики которых служат в качестве дополнительной информации о состоянии приземной атмосферы.

Результаты регистрации в виде привязанных ко времени t цифровых рядов $P(t)$ накапливаются на жестких носителях и выкладываются на сайте ИДГ РАН (<http://idg-comp.chph.ras.ru/~idg/Data/>) в графическом и цифровом видах.

Подготовка данных для обработки и анализа заключалась в обнаружении и удалении выбросов (спайков) с привлечением критериев на основе диаграммы “ящик с усами” [Hoaglin et al., 2000], Титъена-Мура [Tietjen, Moore, 1972] и Граббса [Дубров, 2003]. Пропуски во временных реализа-

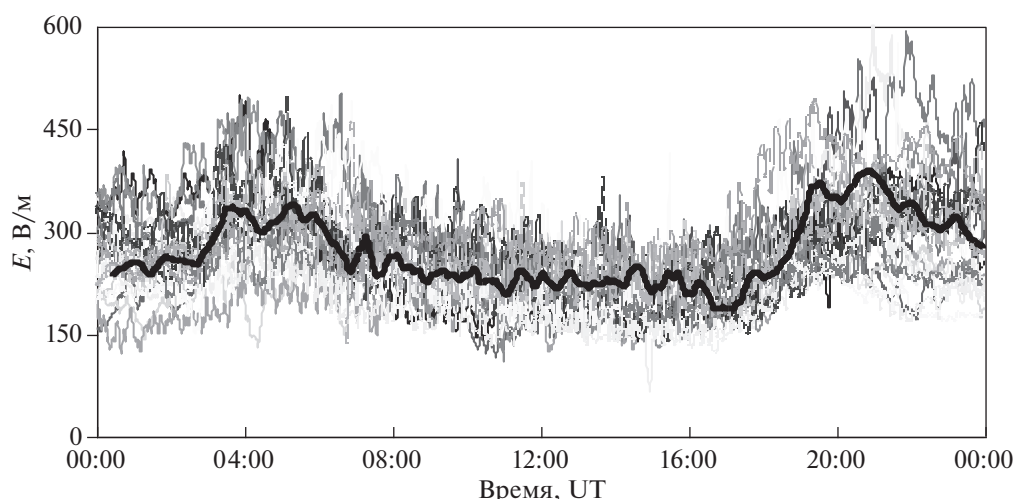


Рис. 2. Суточный ход вертикальной компоненты электрического поля в г. Москве в дни с “хорошей погодой” в летний период 2014 г. (черная линия — среднее значение E).

циях, включая возникшие в результате удаления выбросов, удалялись при их незначительном количестве (1–5) с помощью линейной интерполяции, в случае единичных более продолжительных интервалов пропущенных значений для восстановления ряда применялось двойное преобразование Фурье [Грачев, 2004].

Для анализа использовались ряды цифровых данных, сформированные с дискретностью 1 с. При вычислениях спектров использовались стационарные временные ряды, полученные в результате фильтрации исходных цифровых рядов данных с помощью фильтра верхних частот Баттерворта 5-порядка (частота среза изменялась от 3×10^{-3} до 3×10^{-5} Гц). Проверка нормальности закона распределения вариаций электрического поля относительно среднего значения выполнялась с использованием критерия согласия Колмогорова [Шор, 1962]. Оценка спектров вариаций E выполнялась с использованием авторегрессионных моделей цифровых рядов. При рассмотрении эффекта лунно-солнечного прилива в вариациях E применялся метод выделения гармонических составляющих с помощью узкополосных адаптивных режекторных фильтров [Уидроу, Стирнз, 1989].

3. СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В МОСКВЕ

При определении суточного хода амплитуды электрического поля анализировались результаты регистрации E в периоды “хорошей погоды” [Клеймёнова и др., 2010; Dolezalek, 1960; Israelsson, 1978; Красногорская, 1972], характеризующейся отсутствием грозových явлений, осадков, тумана, низкой плотной облачности и скоростью

ветра менее 6 м/с. Результаты регистрации E в дни с “хорошей погодой” в летне-осенний период 2014 г. приведены на рис. 2, который демонстрирует значительную нестабильность напряженности электрического поля при сходных синоптических условиях: величина E колеблется в достаточно широком интервале от ~150 до ~650 В/м. Это свидетельствует о том, что даже в условиях “хорошей погоды” величина E определяется не только факторами, которые входят в перечень, определяющий условия “хорошей погоды”, но и зависит от ряда других, влияние которых еще предстоит выяснить.

Из рисунка 2 также следует, что характер суточного хода E в целом соответствует устоявшимся представлениям о суточных изменениях напряженности электрического поля над континентами [Israel, 1973; Kandalgaonkar, Manohar, 1991]: суточный ход имеет характер двойной волны с увеличенными значениями E в период 7:00–10:00 LT и в вечерние часы (20:00–22:00 LT) и минимумами в районе ~5:00 LT (перед восходом Солнца) и ~17:00 LT.

В условиях “хорошей погоды” наличие максимума в утренние часы обусловлено в значительной мере эффектом терминатора (восход Солнца), что отмечалось неоднократно [Крашенинников и др., 2015; Israelsson, Tammet, 2001; Kumar et al., 2009; Marshall et al., 1999; Retalis, Retalis 1997]. Возникающие при восходе Солнца конвективные процессы приводят к разрушению сформированного в ночные часы положительно заряженного электродного слоя в приповерхностном слое атмосферы, переносу электрических зарядов в вертикальном направлении и, следовательно, к увеличению плотности положительных зарядов в атмосфере [Kamra, 1982; Law, 1963]. Другой меха-

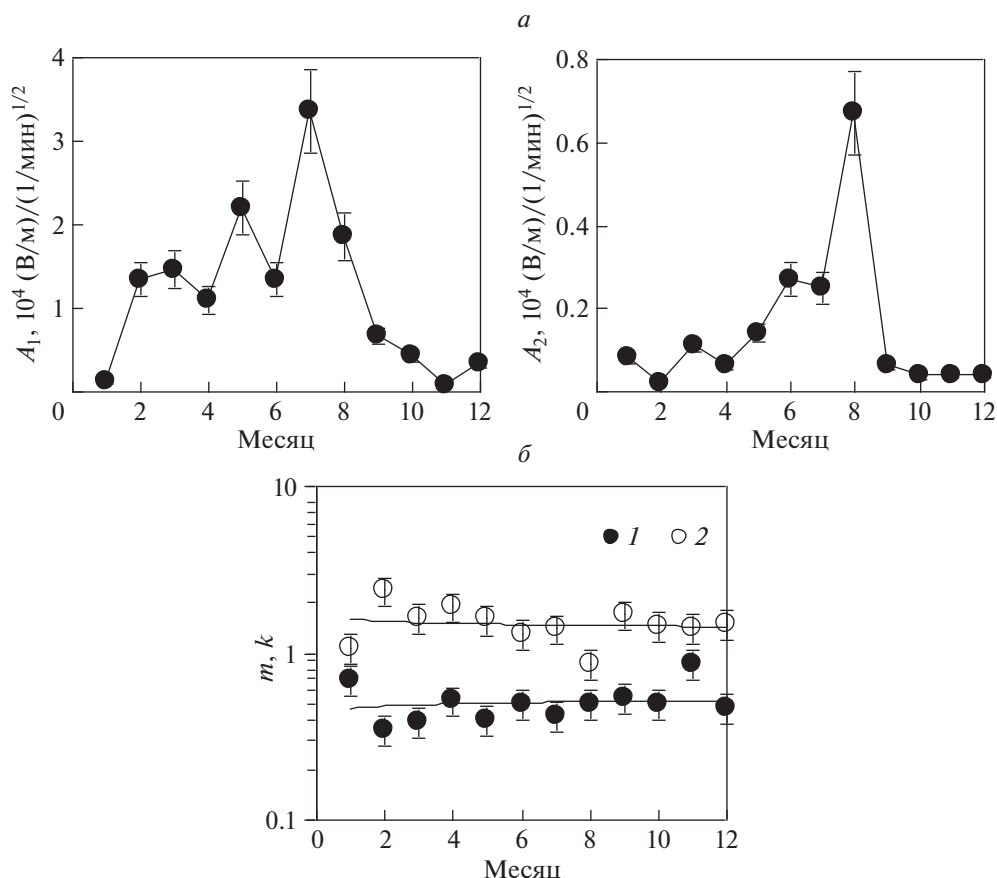


Рис. 3. (а) — Изменение коэффициентов A_1 и A_2 (б) — Изменение значений показателей степени m (1) и k (2) по месяцам 2016 г.

низм, вызывающий увеличение напряженности электрического поля в утренние часы, связан с изменением концентрации аэрозолей в воздухе (что особенно характерно для городской среды). Это влияет на локальную проводимость атмосферы, что в предположении постоянства тока проводимости между ионосферой и земной поверхностью приводит к увеличению градиента потенциала электрического поля [Jayaratne, Verma, 2004; Harrison, 2006].

Утренний максимум вариаций E сменяется снижением градиента потенциала, который в нашем случае (рис. 2) достигает минимальных значений в ~17:00 LT. Это связано с достижением максимальной интенсивности конвективных процессов к концу дня, что вызывает вертикальные потоки аэрозолей и приводит к уменьшению их концентрации вблизи земной поверхности. В результате в атмосфере восстанавливается концентрация ионов, локальная проводимость увеличивается, и, как следствие, градиент потенциала уменьшается [O'Connor, 1976; Serrano et al., 2006; Silva et al., 2014].

Второй максимум суточного хода E в ~21:00 LT, хорошо проявляющийся на рис. 2, естественным образом соответствует вечернему максимуму, описываемому кривой Карнеги, и обусловлен глобальными электрофизическими процессами [Чалмерс, 1974].

Анализ приведенных на рис. 2 данных, выполненный на основе методики, описанной в работе [Дешеревский, Сидорин, 2012], показал, что в период утреннего максимума и дневного минимума неопределенность регистрации амплитуды электрического поля приближается к 60%, в период вечернего максимума — к 90%. Амплитуда суточной вариации E составляет в среднем ~30%.

4. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В МОСКВЕ

Анализ спектральных характеристик вариаций E представляет значительный интерес при описании аэроэлектрических пульсаций и их связи с турбулентным перемешиванием электрически заряженных частиц и дрейфом объемного электрического заряда в приземном слое атмосферы

[Анисимов, Мареев, 2000; Анисимов и др., 2011; Анисимов, Шихова, 2015]. При этом важными являются данные о временных, например, сезонных вариациях спектров электрического поля, которые позволяют тестировать имеющиеся теоретические и расчетные модели аэроэлектрических структур, опираясь на результаты инструментальных наблюдений, выполненных в существенно отличающихся метеорологических условиях.

Спектры вариаций электрического поля приземной атмосферы в диапазоне периодов 10–100 с подробно проанализированы в работе [Анисимов, Мареев, 2001]. В настоящей работе на основе обработки месячных данных установлены характеристики сезонных вариаций напряженности электрического поля в Москве в диапазоне периодов 2.5–100 мин. Типичная зависимость спектральной плотности S месячных вариаций E от частоты f имеет степенной вид, который представим в виде:

$$S(f) = \begin{cases} A_1 f^{-m} & \text{при } f \in [0.01-0.03] \text{ 1/мин} \\ A_2 f^{-k} & \text{при } f \in [0.03-0.4] \text{ 1/мин.} \end{cases}$$

Сезонный ход спектра $S(f)$ характеризуется изменением коэффициентов A_1 , A_2 , m и k , которые демонстрируют рис. 3. Из рисунка 3б следует, что показатели степени m и k практически постоянны в течение всех сезонов и принимают значения соответственно ~ 0.5 и ~ 1.5 . Сложнее ведут себя амплитудные коэффициенты A_1 и A_2 (рис. 3а), величина которых значительно вырастает в летние месяцы и принимает минимальные значения в зимний период года.

5. ПРОЯВЛЕНИЕ ЛУННО-СОЛНЕЧНОГО ПРИЛИВА В ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Несмотря на значительную техногенную зашумленность электрического поля в условиях мегаполиса в вариациях E наблюдаются эффекты, связанные с приливными явлениями [Гохберг и др., 2007; Грунская и др., 2010]. Оценка спектров вариаций E демонстрирует наличие квазигармонических спектральных составляющих, периоды которых близки к периодам основных приливных волн. На рисунке 4а представлен генеральный спектр вариаций E за 2016 г., включающий интервал околосуточных периодов. На графике рис. 4а отчетливо выделяются пики, соответствующие околосуточным приливным волнам O_1 , J_1 , K_1 , M_1 и Q_1 (помечены в поле рисунка принятыми обозначениями). При этом следует отметить, что максимальная спектральная плотность наблюдается у приливной волны K_1 , что свидетельствует о преимущественном влиянии приливного потенциала в твердой среде (в атмосфер-

ном приливе максимум спектральной плотности соответствует приливной волне S_1).

Как это видно из рис. 4а, в спектре, хотя и не так ярко, удается выделить также приливные волны с близкими периодами: ϕ_1 , P_1 и π_1 . Помимо этого в результате вычисления обзорного спектра вариаций E выделяются длиннопериодные приливные волны (рис. 4б): лунная деклинационная M_f (период 13.66 сут) и лунная эллиптическая M_m (период 27.55 сут).

Фрагмент спектра для полусуточных периодов приведен на рис. 5, который демонстрирует отклик вариаций E на спектральных периодах t_S основных полусуточных приливных волн: K_2 ($t_S = 0.4986$ сут), S_2 ($t_S = 0.5$ сут), T_2 ($t_S = 0.5007$ сут), M_2 ($t_S = 0.5175$ сут), v_2 ($t_S = 0.5261$ сут) и μ_2 ($t_S = 0.5363$ сут).

Таким образом, выполненные инструментальные наблюдения и анализ результатов показывают, что спектры вариаций электрического поля содержат квазигармонические составляющие, периоды которых близки к периодам лунно-солнечных приливных волн. Анализ приливной составляющей в вариациях E создает основу для уточнения и разработки новых моделей генерации электрического поля Земли.

6. ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ХОЛОДНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ

Вопрос о влиянии метеорологических явлений и процессов на напряженность электрического поля в приповерхностной зоне атмосферы представляется весьма важным. Особый интерес представляет установление возможных связей между амплитудой вариаций электрического поля у земной поверхности и параметрами, характеризующими возмущение атмосферы при наиболее часто встречающемся явлении — прохождении холодных атмосферных фронтов, когда регистрируется достаточно резкое падение температуры воздуха и, как правило, увеличение атмосферного давления. Одновременно с этим такой фронт определяет повышенные градиенты температуры, изменение влажности воздуха, а также повышение скорости ветра (рис. 1б). Изменение температуры воздуха T при прохождении холодного атмосферного фронта может достигать 10–15 градусов, повышение атмосферного давления 200–500 Па.

Такие сильные за достаточно небольшой промежуток времени изменения в метеоусловиях (длительность прохождения переходной зоны t_0 изменяется в промежутке от нескольких минут до нескольких десятков минут) и вызванные процессы перемещения воздушных масс, как правило, сказываются на вариациях электрического

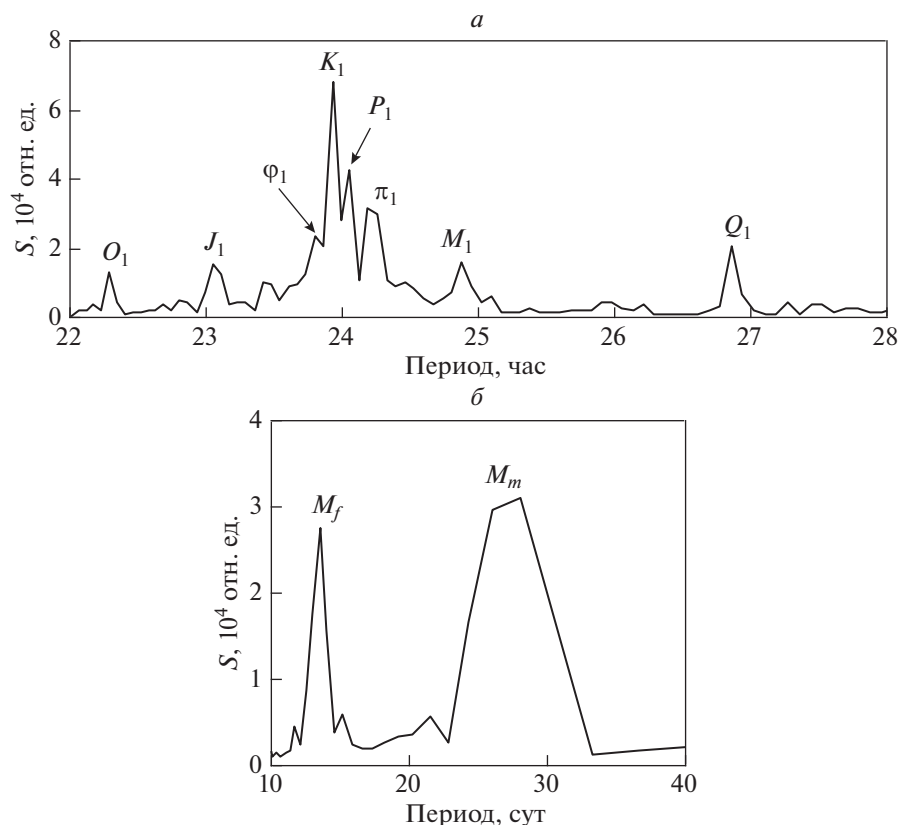


Рис. 4. Спектральная плотность вариаций E : (а) — в диапазоне суточных периодов; (б) — в диапазоне приливных волн M_f и M_m .

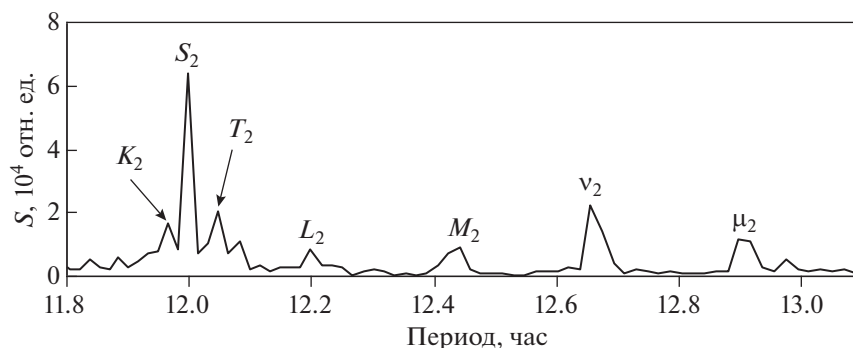


Рис. 5. Спектральная плотность вариаций E в диапазоне полусуточных периодов.

поля. Основной причиной таких вариаций является нарушение установившегося распределения объемных электрических зарядов в приземном слое атмосферы за счет турбулизации воздушных течений, что приводит к формированию аэро-электрических структур, вброса электрических зарядов в приповерхностный слой атмосферы в результате подъема и перемешивания пылевых частиц и аэрозолей, нарушения вертикального распределения концентрации тяжелого радона,

изменения влажности воздуха и т.д. [Анисимов, Мареев, 2000; Шулейкин, 2006].

Особо следует отметить, что холодный атмосферный фронт вызывает не только изменение термодинамических характеристик воздушных масс в пункте регистрации. Продвижение холодного атмосферного фронта вызывает также процессы, связанные с конденсацией водяных паров в зафронтальной области и как следствие — формирование облачности, которое происходит с неко-

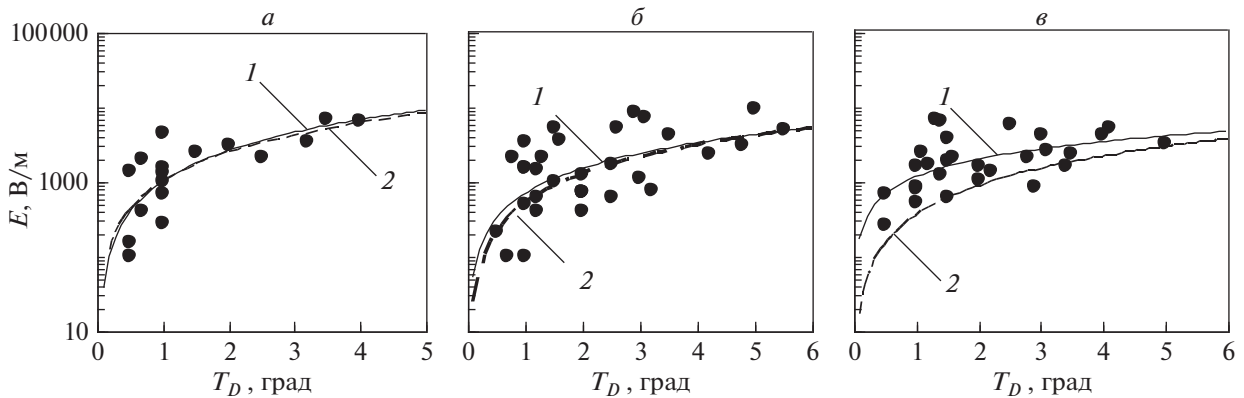


Рис. 6. Линии 1 – зависимость $E(T_D)$ для разных интервалов значений t_0 : (а) – при $t \in 0\text{--}15$ мин, (б) – при $t \in 15\text{--}25$ мин, (в) – при $t \in 25\text{--}35$ мин (линия тренда обозначена сплошной линией); пунктирные линии 2 – результаты расчета с использованием модели.

торой задержкой относительно переднего края фронта, что связано с необходимостью накопления критической массы увлажненного воздуха.

Для получения количественных оценок влияния собственно холодного атмосферного фронта на вариации электрического поля в приземной атмосфере в настоящей работе рассматривались фронты, не сопровождающиеся плотной кучевой облачностью и грозовыми явлениями. Анализ результатов регистрации показал, что прохождение холодного атмосферного фронта всегда сопровождается вариациями электрического поля, но при этом не каждый раз наблюдаются вариации атмосферного давления. В связи с этим в качестве основного параметра, характеризующего интенсивность (мощность) холодного атмосферного фронта, была выбрана амплитуда изменения температуры воздуха T_D в переходной области.

Прямое сопоставление амплитуды вариации E электрического поля и T_D не приводит к ожидаемой функциональной зависимости $E(T_D)$. По этой причине зависимость $E(T_D)$ рассматривалась отдельно для разных интервалов t_0 . Действительно, представляется естественным, что скорость изменения температуры также, как и параметр T_D характеризует интенсивность процессов, протекающих в переходной зоне фронта. Анализировались по отдельности данные с $t_0 \in (0\text{--}15)$ мин, $t_0 \in (15\text{--}25)$ мин, $t_0 \in (25\text{--}35)$ мин, $t_0 \in (35\text{--}45)$ мин и $t_0 \in (45\text{--}55)$ мин. Некоторые результаты представлены на рис. 6, из которого видно, что, несмотря на значительный разброс данных, можно считать, что при разделении данных с разными значениями t_0 отчетливо наблюдается тенденция к формированию зависимости $E(T_D)$. Более того, зависимость $E(T_D)$ допустимо описывать формулой:

$$E = AT_D^\alpha, \quad (1)$$

где значение коэффициента A определяется величиной t_0 , а степень $\alpha \sim 1.3$.

Для определения зависимости коэффициента A в формуле (1) от t_0 выполнялся анализ зависимости $E(t_0)$ при разных значениях T_D . Результаты такого анализа показывают, что зависимость $E(t_0)$ допустимо представить в виде степенного соотношения:

$$E = Bt_0^\alpha, \quad (2)$$

где B – коэффициент, зависящий от величины T_D .

При построении феноменологической модели влияния холодного атмосферного фронта на вариации электрического поля будем полагать:

1. Основными параметрами, характеризующими интенсивность процессов, связанных с прохождением холодного атмосферного фронта, являются перепад температуры воздуха на фронте T_D и время t_0 , за которое этот перепад происходит.

2. Облачность в области, охваченной фронтом, отсутствует (рассматриваются короткие времена после прохождения переднего участка холодного атмосферного фронта до формирования облачности).

3. Отсутствуют сильные изменения влажности воздуха, что позволяет не учитывать процессы, связанные с конденсацией в атмосфере.

4. Основной причиной, вызывающей изменение пространственного распределения и, как следствие, характерного масштаба объемного электрического заряда у земной поверхности при прохождении холодного атмосферного фронта, является нарушение пространственного распределения объемных электрических зарядов в результате движения воздушных масс (наведенная турбулентность, в частности, термотурбулент-

ность воздушных потоков вследствие увеличения скорости ветра).

Основываясь на данных инструментальных наблюдений, запишем выражение для прироста скорости ветра ΔV при прохождении атмосферного фронта в виде:

$$\Delta V(T_D, t_0) = \frac{T_D^{\alpha_1}}{t_0^{m_1}}, \quad (3)$$

где T_D — перепад температуры на холодном атмосферном фронте, произошедший за время t_0 ; степени α_1 и m_1 положительны.

При сделанных предположениях естественно предполагать, что степень возмущения воздушных масс с высотой определяется скоростью воздушных потоков в атмосферном пограничном слое, т.е. скоростью ветра у земной поверхности [Белоцерковский и др., 2013; Зилитинкевич, 2013]. Степень возмущения, очевидно, определяется максимальным размером вихревой ячейки R , величину которой в случае отсутствия турбулентных проявлений в атмосфере в начальный момент времени $t = 0$ запишем в виде:

$$R \sim \frac{\Delta V^{\alpha_2}}{t_0^{m_2}}. \quad (4)$$

Примем, что изменение масштаба возмущенной области ΔM , который определяет величину вариаций электрического поля в приземном слое атмосферы, пропорционально размеру R . В этом случае

$$\Delta M \sim R^{\alpha_3}. \quad (5)$$

Таким образом, рассматривая задачу в первом приближении, можно записать с учетом (1)–(5):

$$E_Z \sim \Delta M^{\alpha_4} \sim R^{\alpha_3 \alpha_4} \sim \frac{\Delta V^{\alpha_2 \alpha_3 \alpha_4}}{t_0^{m_1}} \sim \frac{T_D^{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4}}{t_0^{\alpha_3 \alpha_4 (m_1 \alpha_2 + m_2)}},$$

или, объединяя степени:

$$E_Z = A \frac{T_D^\alpha}{t_0^m}, \quad (6)$$

где A — некоторая константа, $\alpha = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 > 0$ и $m = \alpha_3 \alpha_4 (m_1 \alpha_2 + m_2) > 0$.

На рисунке 6 приведены зависимости $E(T_D)$ для разных значений t_0 , вычисленные с использованием соотношения (6) при следующих значениях параметров модели: $A \approx 10^3$, $\alpha \approx 1.3$ и $m \approx 1$. Хорошо видно, что расчеты с использованием предложенной простейшей модели процесса с учетом разброса экспериментальных данных в целом описывают ход $E(T_D)$ при временах $t_0 < 30$ мин. Заметное занижение расчетных данных относительно результатов регистрации при $t_0 = 30$ мин можно объяснить тем, что в этом случае начинает формироваться плотная облачность. Электризация

облаков, которая не учитывается в предложенной феноменологической модели, существенно повышает напряженность электрического поля в слое атмосферы, расположенном между облаками и земной поверхностью.

Полученные данные свидетельствуют о том, что вариации напряженности электрического поля Земли в приземном слое атмосферы зависят, в частности, от возмущающего воздействия холодного атмосферного фронта.

7. ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЕРИОД УРАГАНОВ И ШКВАЛОВ

Исследование вариаций электрического поля в период сильных атмосферных явлений в виде ураганов и шквалов представляет значительный интерес с точки зрения разработки прогностических признаков указанных явлений, которые могли бы составить основу мероприятий по предупреждению населения и городских коммунальных служб.

Анализ данных, полученных в результате инструментальных наблюдений, показывает, что сильные возмущения атмосферы отличаются не только значимыми изменениями метеорологических характеристик (температура, атмосферное давление, скорость ветра, влажность и т.д.), но также вариациями электрического поля. В качестве примера рассмотрим вариации метеорологических параметров и вертикальной компоненты электрического поля E в период урагана 29.05.2017 г. в Москве [Спивак и др., 2018]. Особенностью указанного события, максимальная интенсивность которого наблюдалась в период 12:40–13:00 UT, является отсутствие грозовой активности при сильно возмущенном состоянии атмосферы. Приход холодного атмосферного фронта, который сопровождается резким падением температуры воздуха T , увеличением атмосферного давления P_0 , скорости ветра V , значительным повышением влажности воздуха W и резким снижением мощности солнечного излучения S на земной поверхности, вызвал значительные вариации напряженности электрического поля.

Анализ и обобщение событий ураганного и шквального типов в г. Москве, зарегистрированных за период 2009–2017 гг. позволяют отметить следующее. Интенсивные атмосферные возмущения вызывают значительные вариации напряженности электрического поля, амплитуда которых достигает 3000–6000 В/м. За 3–4 ч до прихода события ураганного типа наблюдаются увеличение амплитуды вариаций и возникновение длиннопериодных пульсаций E с периодом около 40 мин (рис. 7а). При этом значительно изменяется спектр вариаций E , что хорошо видно из рис. 7б. Фоновые вариации характеризуются ам-

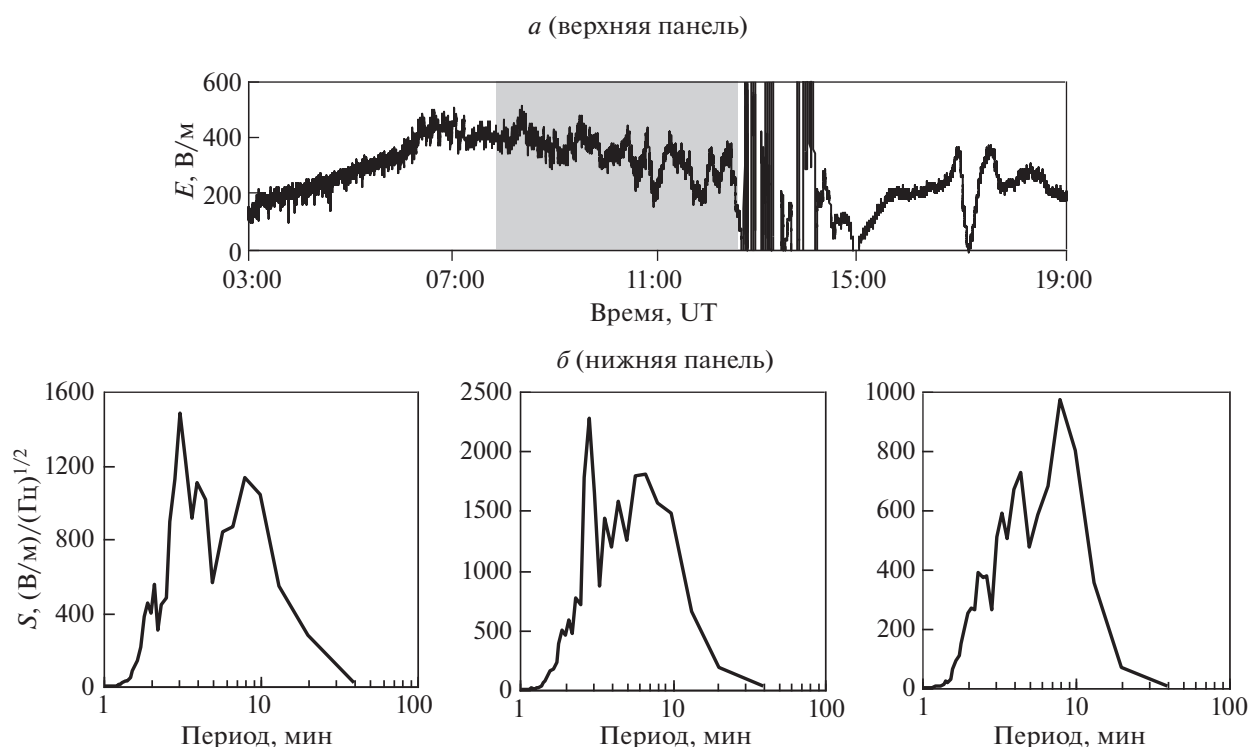


Рис. 7. Верхняя панель: (а) — вариации вертикальной компоненты электрического поля в период, непосредственно предшествующий урагану 29.05.2017 г. (8:15–12:20 UT), фоном выделена область повышенных вариаций E перед ураганом. Нижняя панель (б) спектры вариаций электрического поля, при спокойном состоянии атмосферы (слева), в период, предшествующий урагану (посередине) и в период урагана (справа).

плитудой вариации E в диапазоне 40–80 В/м (преимущественная частота ~ 8 Гц), на участке предвестника — в диапазоне 100–150 В/м (преимущественная частота ~ 10 Гц) с амплитудой пульсаций 200–240 В/м (период 30–45 мин) и во время наиболее сильных вариаций — в диапазоне 5000–12000 В/м (преимущественная частота ~ 6 –7 Гц).

8. ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ГРОЗАХ

Высокая электризация приземного слоя атмосферы в периоды грозовой активности и сильные короткопериодные вариации электрического поля при молниевых разрядах оказывают значительное влияние на живые организмы, особенно на человека, нарушая привычное течение биофизических процессов на клеточном уровне, вызывая сбои в естественных ритмах физиологических процессов и нервной регуляции на организменном уровне, функционировании сердечно-сосудистой системы, а также нарушение психофизического состояния [Bell et al., 1994; Тихонов и др., 1997; Jamieson et al., 2007; Экология, 2008; Колесник и др., 2009; Тужилкин и др., 2011; Черешнев и др., 2016]. Особое значение это приобретает в условиях крупных городских агломераций, где на

человека оказывают кооперативное влияние естественные и техногенные факторы, которые при этом взаимно усиливают отрицательное воздействие на его организм [Мартынюк и др., 2012].

В связи с этим значительный интерес представляет изучение предвестников грозовых явлений, что важно при прогнозировании и разработке подходов к оценке возможной силы грозового явления в части амплитудных вариаций геофизических полей, а также для профилактических мер медицинского характера.

Для анализа привлекались данные, полученные в период 2014–2018 гг. в дни, когда наблюдались сильные грозовые явления в Москве. При этом следует отметить, что особой грозовой активностью характеризуется 2016 г. (из 21-й грозы, зарегистрированной в период с мая по август в Москве, 9 отличались значительно более высокой интенсивностью грозовых проявлений).

Анализ данных, полученных в результате инструментальных наблюдений, показал, что сильные грозы выделяются не только своей интенсивностью (количество и мощность молниевых разрядов, амплитуда вариаций электрического поля и т.д.), но также наличием отличительных признаков, представляющих особый интерес с точки

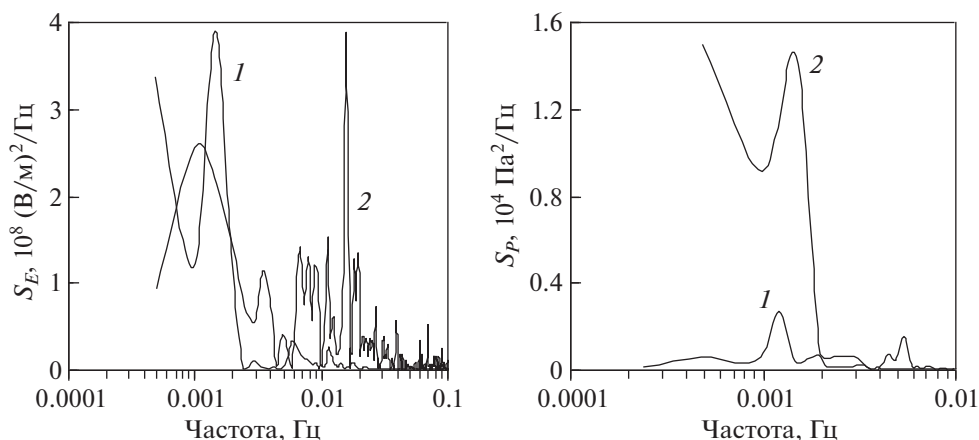


Рис. 8. Спектральная плотность мощности вариаций напряженности электрического поля S_E и акустических колебаний S_P в период грозовой активности 13.07.2016 г. в г. Москва (1 и 2 — соответственно первая и вторая стадия развития явления).

зрения изучения явления и разработки прогностических критериев.

В качестве одного из примеров рассмотрим сильное грозовое явление, наблюдавшееся в г. Москва 13.07.2016 г. [Спивак и др., 2017]. В 20:07 UT наблюдалось прохождение холодного атмосферного фронта, который вызвал резкое падение температуры T на 5.8 град., кратковременное усиление скорости ветра V на ~ 7 м/с и увеличение амплитуды микробарических пульсаций P до ~ 180 Па, а также рост влажности воздуха W (за 20 минутный интервал величина W выросла на $\sim 21\%$). Особо следует отметить резкое увеличение атмосферного давления P_0 (скачок давления составляет около 500 Па). В отличие от многочисленных наблюдений сильные события аналогичные рассматриваемому событию 13.07.2016 г. отличаются высоким градиентом нарастания величины P_0 , которое достигает 600–700 Па/мин. Вариации электрического поля для рассматриваемого события наблюдаются, начиная примерно с 19:10 UT, задолго до прихода атмосферного фронта. При этом отчетливо выделяются три стадии вариаций E , отличающиеся периодом и вероятнее всего амплитудой (динамический диапазон применяемых средств регистрации не обеспечил установление амплитуды вариаций электрического поля на второй “высокочастотной” стадии; однако, из приведенной записи видно, что амплитуда вариаций в период 20:07–21:00 UT превышает амплитуду на первой и третьей стадиях).

Начальная (первая) стадия вариаций E продолжительностью около 1 ч (с 19:10 до прихода атмосферного фронта в 20:07 UT) характеризуется амплитудой около 4000 В/м с преимущественным периодом около 10 мин. На этой стадии отмечаются приход к точке наблюдений мощного кучево-дождевого облака формы Cb inc, а также внутриоблачные свечения. Возмущения атмосферы

акустико-гравитационными волнами, генерируемыми приближающейся к точке наблюдений грозовой ячейкой, сопровождаются вариациями электрического поля [Спивак и др., 2017].

Затем с приходом атмосферного фронта резко изменяются спектральные характеристики вариаций E . В интервале 20:07–21:00 UT преимущественный период вариаций составляет ~ 1 мин. В этом временном интервале наблюдаются основные признаки грозы: интенсивные молниевые разряды типа облако-земля, количество которых достигает 2–3 разряда в минуту. И наконец на заключительной стадии явления амплитуда вариаций E снижается до ~ 2000 – 3000 В/м с увеличением периода до ~ 15 мин.

Рисунок 8 демонстрирует отличие в спектрах вариаций E на первой и второй стадии развития грозовой активности. Если на первой стадии основные вариации E наблюдаются в диапазоне $(1\text{--}2.5) \times 10^{-3}$ Гц при пиковой частоте 1.45×10^{-3} Гц (период 11.3 мин), то на второй стадии основные вариации E наблюдаются в диапазоне частот 6.8×10^{-3} – 2.1×10^{-2} Гц при ярко выраженном пиковом значении на частоте 1.56×10^{-2} Гц (период 1.06 мин).

Таким образом, данные, полученные в результате инструментальных наблюдений, демонстрируют сложный характер сильной грозы. При этом следует отметить, что продемонстрированное поэтапное развитие сопутствующих грозе рассмотренных геофизических эффектов в г. Москве не является уникальным и отмечалось нами неоднократно в периоды сильных грозовых явлений (07.06.2014 г., 09.06.2014 г., 25.08.2014 г., 29.05.2015 г., 20.06.2015 г., 04.06.2016 г., 18.06.2016 г., 18.07.2016 г., 20.07.2016 г., 02.08.2016 г., 28.07.2018 г., 15.08.2018 г., 30.07.2018 г.) и менее выражено в ряде других случаев.

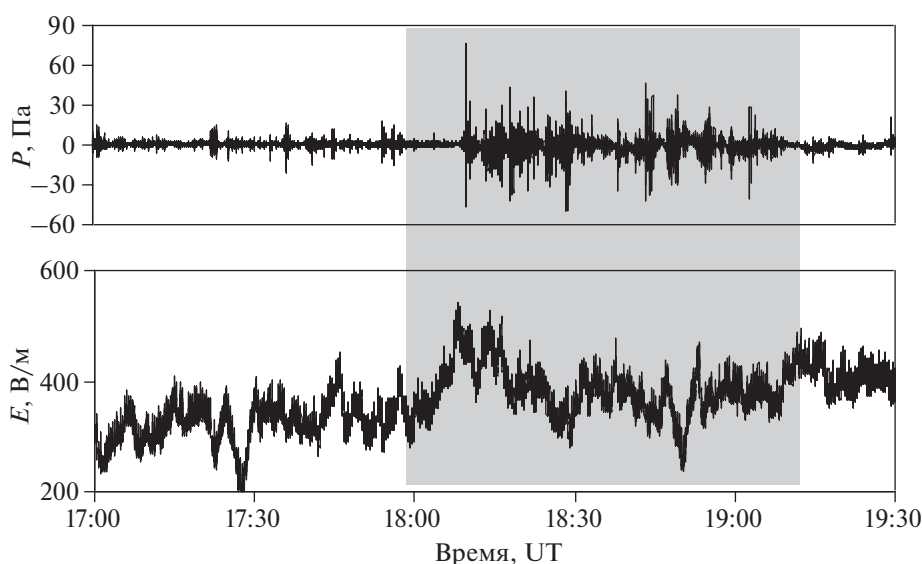


Рис. 9. Вариации амплитуды акустических колебаний в атмосфере P и напряженности электрического поля E (вертикальная компонента), вызванные пожаром на Тушинском машиностроительном заводе 10.12.2015 г. в г. Москве (фоновым выделена активная стадия пожара). Регистрация в ЦГМ на расстоянии ~ 16.5 км от очага возгорания.

Приведенные выше данные хорошо согласуются с результатами оптических и визуальных наблюдений, которые свидетельствуют о том, что развитие сильной грозовой активности происходит поэтапно. Перед приходом холодного атмосферного фронта (период первой, выделенной выше стадии) отмечаются многочисленные вспышки в атмосфере, практически не сопровождавшиеся акустическими колебаниями, что можно объяснить сильным затуханием амплитуды объемных акустических волн, которые вызывались молниевыми разрядами типа облако-облако на достаточно больших расстояниях от точки наблюдения. Вторая стадия, начало которой характеризуется приходом холодного атмосферного фронта, характеризуется, как уже отмечалось, мощными молниевыми разрядами типа облако-Земля, которые сопровождаются сильными акустическими эффектами [Спивак и др., 2017].

9. ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ПОЖАРАХ

Одним из факторов техногенной природы, влияющих на вариации электрического поля в условиях мегаполиса, являются крупные пожары. Нагрев воздушных масс и вброс в атмосферу продуктов горения в виде твердых частиц и аэрозолей вызывают локальные электродинамические процессы, которые приводят к вариациям электрического поля на значительных расстояниях от очага горения [Гостинцев и др., 1985]. В качестве примера на рис. 9 приведены результаты регистрации E и акустических колебаний, в период крупного пожара в Москве 10.12.2015 г. (пожар 4-го класса

опасности, площадь возгорания ~ 15 тыс. м^2 , площадь обрушения $\sim 10^3$, м^2). Регистрация выполнялась в ЦГМ на расстоянии ~ 16.5 км от очага возгорания. Оценки, выполненные с учетом расстояния до пожара и зарегистрированных амплитуд вариаций электрического поля (~ 190 В/м) и акустических колебаний (~ 80 Па), показывают [Спивак и др., 2016а], что наведенные вариации E в очаге пожара могли превышать 10^3 В/м.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вариации электрического поля следует рассматривать в качестве важного фактора, определяющего электрическую активность приземного слоя атмосферы. При этом следует отметить, что электрическая зашумленность мегаполиса не камуфлирует проявление в вариациях E эффектов от явлений и процессов как природного, так и техногенного происхождения. Суточные и сезонные изменения E совпадают с общепринятыми представлениями о такого рода вариациях.

Особый интерес вызывает возможность выделения в условиях мегаполиса приливной компоненты в вариациях E . При этом можно сделать вывод о том, что основным источником приливной составляющей в вариациях E являются не литосферные, а вызванные гравитационным взаимодействием в системе Земля–Луна–Солнце атмосферные процессы [Адушкин и др., 2017].

Наряду с сильными атмосферными явлениями в виде урагана и грозы на электрическую активность приземной атмосферы в условиях такой крупной агломерации как г. Москва оказывает

заметное влияние и более слабое по энергетике природное явление в виде холодного атмосферного фронта. Также следует отметить, что техногенные явления в виде крупных пожаров, хотя и в гораздо меньшей степени по сравнению с атмосферными фронтами, также оказывают влияние на вариации электрического поля в условиях мегаполиса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Соловьев С.П., Будников В.А. Литосферные источники загрязнения атмосферы // Геология и геофизика. Т. 36. № 8. С. 103–110. 1995.
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе земная кора-атмосфера // Физика Земли. № 7. С. 34–51. 2006.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 360 с. 2014.
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Приливные волны и вариации давления в атмосфере Земли // Геофизические исследования. Т. 18. № 3. С. 67–80. 2017.
- Анисимов С.В., Мареев Е.А. Аэроэлектрические структуры в атмосфере // Докл. АН. Т. 371. № 1. С. 101–104. 2000.
- Анисимов С.В., Мареев Е.А. Спектры пульсаций электрического поля приземной атмосферы // Докл. АН. Т. 381. № 1. С. 107–112. 2001.
- Анисимов С.В., Галиченко С.В., Дмитриев Э.М., Шихова Н.М., Афиногенов К.В. Электрическое поле приземной атмосферы // Динамика физических полей Земли. Ред. Эпов М.И., Адушкин В.В., Соболев Г.А. М.: Светоч Плюс, 2011. С. 268–296.
- Анисимов С.В., Шихова Н.М. Фрактальные свойства аэроэлектрических пульсаций // Геофизич. исслед. Т. 16. № 4. С. 41–58. 2015.
- Белоцерковский О.М., Андрущенко В.А., Шевелев Ю.М. Динамика вихреобразных течений в атмосфере, обусловленных природными факторами. М.: Изд. центр “Полет Джанотана”, 432 с. 2013.
- Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Копылов Н.И., Шацких Ю.В. Волновые возмущения атмосферы при больших пожарах // Физика горения и взрыва. Т. 19. № 4. С. 62–64. 1985.
- Гохберг М.Б., Колосницын Н.И., Николаев А.И. Приливные деформации и электрокинетический эффект в двухслойной поронасыщенной среде // Физика Земли. № 8. С. 85–89. 2007.
- Грачев А.В. К восстановлению пропусков в экспериментальных данных // Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Сер. Радиофизика. Нижний Новгород: ННГУ. Вып. 2. С. 15–23. 2004.
- Грунская Л.В., Морозов В.Н., Ефимов В.А., Закиров А.А. Лунные приливы в электрическом поле пограничного слоя атмосферы // Изв. вузов. Физика. № 1. С. 22–27. 2010.
- Дещеревский А.В., Сидорин А.Я. Суточная периодичность представительных землетрясений Греции // Сейсмические приборы. Вып. 48. № 3. С. 5–31. 2012.
- Дубров А.М. Многомерные статистические методы: учебник для студентов экономических специальностей высших учебных заведений / А.М. Дубров, В.С. Мхитарян, Л.И. Трошин. — М.: “Финансы и статистика”, 351 с. 2003.
- Зилитинкевич С.С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои. М.: ФИЗМАТЛИТ, 252 с. 2013.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Кубицки М., Михновски С. Утренние полярные суббури и вариации атмосферного электрического поля // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 1. С. 51–60. 2010.
- Климат, погода, экология Москвы. С.-Пб: Гидрометеиздат, 437 с. 1995.
- Колесник А.Г., Колесник С.А., Побаченко С.В. Электромагнитная экология. Томск: ТМЛ-Пресс, 336 с. 2009.
- Красногорская Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. — Л.: Гидрометеиздат, 322 с. 1972.
- Кузнецов В.В. Физика Земли. Учебник-монография. Новосибирск: ИГИГ, 840 с. 2011.
- Мартынюк В.С., Цейслер Ю.В., Темурьянц Н.А. Интерференция механизмов влияния слабых электромагнитных полей крайне низких частот на организм человека и животных // Геофизические процессы и биосфера. Т. 11. № 2. С. 16–39. 2012.
- Спивак А.А., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А. Геофизические поля мегаполиса // Геофизич. процессы и биосфера. Т. 15. № 2. С. 39–54. 2016а.
- Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А. Аппаратура и методики для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН // Сейсмические приборы. Т. 52. № 2. С. 65–78. 2016б.
- Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Акустические и электрические предвестники сильных грозовых явлений в условиях мегаполиса // Геофизич. процессы и биосфера. Т. 16. № 4. С. 81–91. 2017.
- Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Вариации геофизических полей при ураганах и шквалах // Докл. АН. Т. 480. № 5. С. 592–95. 2018.
- Тихонов М.Н., Кудрин И.Д., Довгуша В.В., Довгуша Л.В. Электромагнитная среда и человек // Вопросы охраны окружающей среды. № 11. С. 55–84. 1997.
- Тузилкин Д.А., Апряткина М.Л., Бородин А.С. Влияние вариаций физических полей окружающей среды на функционирование сердечно-сосудистой системы человека // Физика окружающей среды. Томск: Томское университетское изд-во. С. 285–288. 2011.
- Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 440 с. 1989.
- Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 384 с. 1973.
- Черешнев В.А., Гамбурцев А.Г., Сигачев А.В., Верхотурова Л.Ф., Горбаренко Е.В., Гамбурцева Н.Г. Внешние воздействия-стрессы-заболеваемость. М.: Наука, 168 с. 2016.

- Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М.: “Советское радио”, с. 102. 1962.
- Шулейкин В.Н. Атмосферное электричество и физика Земли. М.: Институт проблем нефти и газа, 159 с. 2006.
- Экология человека в изменяющемся мире / Колл. авторов. Изд. 2-е, доп. Екатеринбург: УрО РАН, 570 с. 2008.
- Bell G., Marino A.A., Chesson A.L. Frequency-specific blocking in the human caused by electromagnetic fields // *Neuroreport*. V. 5. P. 510–512. 1994.
- Dolezalek H. Zur berechnung des luftelektrischen Strokreis III. Kontrolle des Ohmschen gesetzes durch messung // *Geophys. Pur. Appl.* V. 46. P. 125–144. 1960.
- Dolezalek H. Discussion of fundamental problem of atmospheric electricity. *PAGEOPH.* V. 100. P. 8–43. 1972.
- Hoaglin D.C., Mosteller F., Tukey J.W. Understanding robust and exploratory data analysis. 2nd edition. New-York: John Wiley & Sons, 472 p. 2000.
- Israel H., Atmospheric Electricity, V. II. / Jerusalem: Israel program for scientific translation, 350 p. 1973.
- Israelsson S. On the conception – fair weather condition in atmospheric electricity // *Pure Appl. Geophys.* V. 116. P. 149–158. 1978.
- Israelsson S., Tammet H. Variation of fair weather atmospheric electricity at Marsta Observatory, Sweden, 1993–1998 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 63. P. 1693–1703. 2001.
- Jamieson K.S., Apsimona H.M., Jamieson S.S., Bell J.N., Yost M.G. The effects of electric fields on charged molecules and particles in individual micro environments// *Atmos. Environ.* V. 41. № 25. P. 5224–5235. 2007.
- Jayaratne E.R., Verma T.S. Environmental aerosols and their effect on the Earth’s local fair-weather electric field // *Meteorol. Atmos. Phys.* V. 86. P. 275–280. 2004.
- Harrison R.G. Urban smoke concentrations at Kew, London, 1898 – 2004 // *Atmos. Environ.* V. 40. P. 3327–3332. 2006.
- Kamra A.K. Fair weather space charge distribution in the lowest 2 m of the atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 87. № C6. P. 4257–4263. 1982.
- Kandalgaonkar S.S., Manohar G.K. Variation in the atmospheric electric field at tropical station during 1930–1987 // *Adv. Atmos. Sci.* V. 8. P. 99–106. 1991.
- Kelley M.C. The Earth’s Electric Field. Elsevier Inc., San Diego, CA, 232 p. 2014.
- Kumar V.V., Ramachandran V., Buadromo V., Prakash J. Surface fair-weather potential gradient measurements from a small tropical island station Suva, Fiji // *Earth Planets Space*. V. 61. P. 747–753. 2009.
- 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. N D20. P. 24455–24469. 1999.
- Law J. The ionisation of the atmosphere near the ground in fair weather // *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.* V. 89. P. 107–121. 1963.
- O’Connor W.P. Seasonal changes in diurnal variation of potential gradient at Fargo, North Dakota // *Pure Appl. Geophys.* V. 114. P. 933–943. 1976.
- Retalis D., Retalis A. The atmospheric electric field in Athens–Greece // *Meteorol. Atmos. Phys.* V. 63. 235–241. 1997
- Serrano C., Reis A.H., Rosa R., Lucio P.S. Influences of cosmic radiation, artificial radioactivity and aerosol concentration upon the fair-weather atmospheric electric field in Lisbon (1955–1991) // *Atmos. Res.* V. 81. P. 236–249. 2006.
- Silva H.G., Conceição R., Melgão M., Nicoll K., Mendes P.B., Tlemçani M., Reis A.H., Harrison R.G. Atmospheric electric field measurements in urban environment and the pollutant aerosol weekly dependence // *Environ. Res. Lett.* V. 9. 2014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326.9.11.114025>
- Tietjen G.L., Moore R.H. Some Grubbs-type statistics for the detection of several outliers // *Technometrics.* V. 14. P. 583–597. 1972.