

УДК 550.3+550.4+551.558

АКУСТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ СИЛЬНЫХ ГРОЗОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ МЕГАПОЛИСА

© 2017 г. А.А. Спивак, Ю.С. Рыбнов, С.П. Соловьев, В.А. Харламов

Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия

Приведен анализ результатов инструментальных наблюдений за электрическим полем и микропульсациями атмосферного давления в приземной атмосфере в периоды сильных гроз в г. Москва в 2014–2016 гг. Показано, что приход грозового фронта предварялся длиннопериодными (~ 10 мин) вариациями напряженности электрического поля, внутренними гравитационными волнами, а также повышенными значениями импедансного акустического соотношения. После прихода холодного атмосферного фронта, а также в период грозных явлений наблюдаются более высокочастотные (~ 1 мин) вариации электрического поля и повышенная турбулизация атмосферы. На заключительной стадии явления практически отсутствуют ветровые движения в атмосфере, наблюдаются внутренние гравитационные волны, период вариаций электрического поля увеличивается до ~ 15 мин.

Ключевые слова: мегаполис, инструментальные наблюдения, грозовая ячейка, метеопараметры, электрическое поле, акустические колебания.

Введение

Среди наиболее ярких проявлений атмосферного электричества особое место занимают грозы. Грозовые явления в приземной атмосфере связаны с образованием мощных кучево-дождевых сильно электризованных облаков (заряд грозового облака составляет в среднем величину около 50 Кл) и как результат электрическими разрядами разного типа между облаками, отдельными областями одного и того же облака или между облаком и землей. Напряженность электрического поля в промежутке грозовое облако – земля превышает 10^4 В/м, достигая в отдельных случаях значения 20 кВ/м. Этой величины достаточно для формирования молниевых разрядов, в которых кратковременная сила тока достигает величин ~ 500 кА при напряжении до 10^9 В/м [Чалмерс, 1974; Имянитов, 1981; Volland, 1984; Lyons et al., 1998; McGorman, Rust, 1998; Rakov, Uman, 2003]. Сложности, связанные с прогнозированием координат молниевых разрядов, препятствуют установлению более или менее точной статистики вариаций напряженности электрического по-

ля, вызываемых молниями. Однако некоторые оценки [Кашилева, 2008] позволяют говорить о том, что при величине проводимости в грозовом облаке $\lambda = 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ и токе нисходящего лидера $i_{\text{л}} = 10^2 \text{ А}$ напряженность электрического поля на расстоянии около 200 м от молниевых разрядов может превышать величину $2 \cdot 10^6 \text{ В/м}$.

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. Они нарушают привычное течение биофизических процессов на клеточном уровне, вызывают сбои в естественных ритмах физиологических процессов и нервной регуляции на организменном уровне, функционировании сердечно-сосудистой системы, а также воздействуют на психофизическое состояние [Goodman et al., 1983; Сидякин, 1986; Bell et al., 1994; Тихонов и др., 1997; Алексеева и др., 1999; Мартынюк, 2005; Jamieson et al., 2007; Экология..., 2008; Колесник и др., 2009; Тужилкин и др., 2011; Черешнев и др., 2016]. Особое значение эти явления приобретают в условиях крупных городских конгломераций, где на человека влияют как естественные, так и техногенные факторы, усиливая при этом взаимное 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.

В настоящей работе приводятся результаты регистрации и анализа вариаций напряженности электрического поля и микропульсаций атмосферного давления в приземной атмосфере г. Москва в предшествующие грозам периоды и во время сильных грозовых явлений.

Исходные данные

В качестве исходных данных использовались ряды инструментальных наблюдений за напряженностью электрического поля и микропульсациями атмосферного давления, выполняемых в Центре геофизического мониторинга г. Москва Института динамики геосфер РАН (ИДГ РАН) (55.7052° с.ш.; 37.5707° в.д.) [Спивак и др., 2016а]. Напряженность электрического поля (вертикальная компонента E_z) регистрируется электростатическим флюксометром ИНЭП, который обеспечивает измерения E_z в интервале от 1 В/м до 6 кВ/м в частотном диапазоне 0–20 Гц. Регистрация микропульсаций атмосферного давления выполняется с использованием микробарометра МБ-03 [Спивак и др., 2016б] в диапазоне амплитуд 0.01–200 Па в полосе частот 0.001–10 Гц. Метеопараметры атмосферы (температура T и влажность W воздуха, атмосферное давление P , скорость ветра V) регистрируются с помощью цифровой автоматической метеостанции Davis Vantage Pro2. Регистрация выполняется в приземном слое атмосферы. Результаты регистрации в виде привязанных ко времени цифровых рядов $E(t)$ и $P(t)$ накапливаются на жестких носителях и выкладываются на сайте ИДГ РАН в графическом и цифровом виде (<http://idg.chph.ras.ru/~idg/data/>).

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

Оценка спектральных характеристик вариаций E_z и микропульсаций атмосферного давления выполнялась с использованием авторегрессионных моделей цифровых рядов.

Акустические и электрические эффекты сильных гроз

Анализ данных, полученных в результате инструментальных наблюдений, показал, что сильные грозы характеризуются не только интенсивностью (количество и мощность молниевых разрядов, амплитуда вариаций электрического поля и т.д.), но также рядом признаков, представляющих особый интерес с точки зрения изучения явления и разработки прогностических критериев.

В качестве одного из примеров на рис. 1 приведены результаты регистрации вариаций электрического поля E_z , амплитуды микробарических пульсаций P и метеопараметров

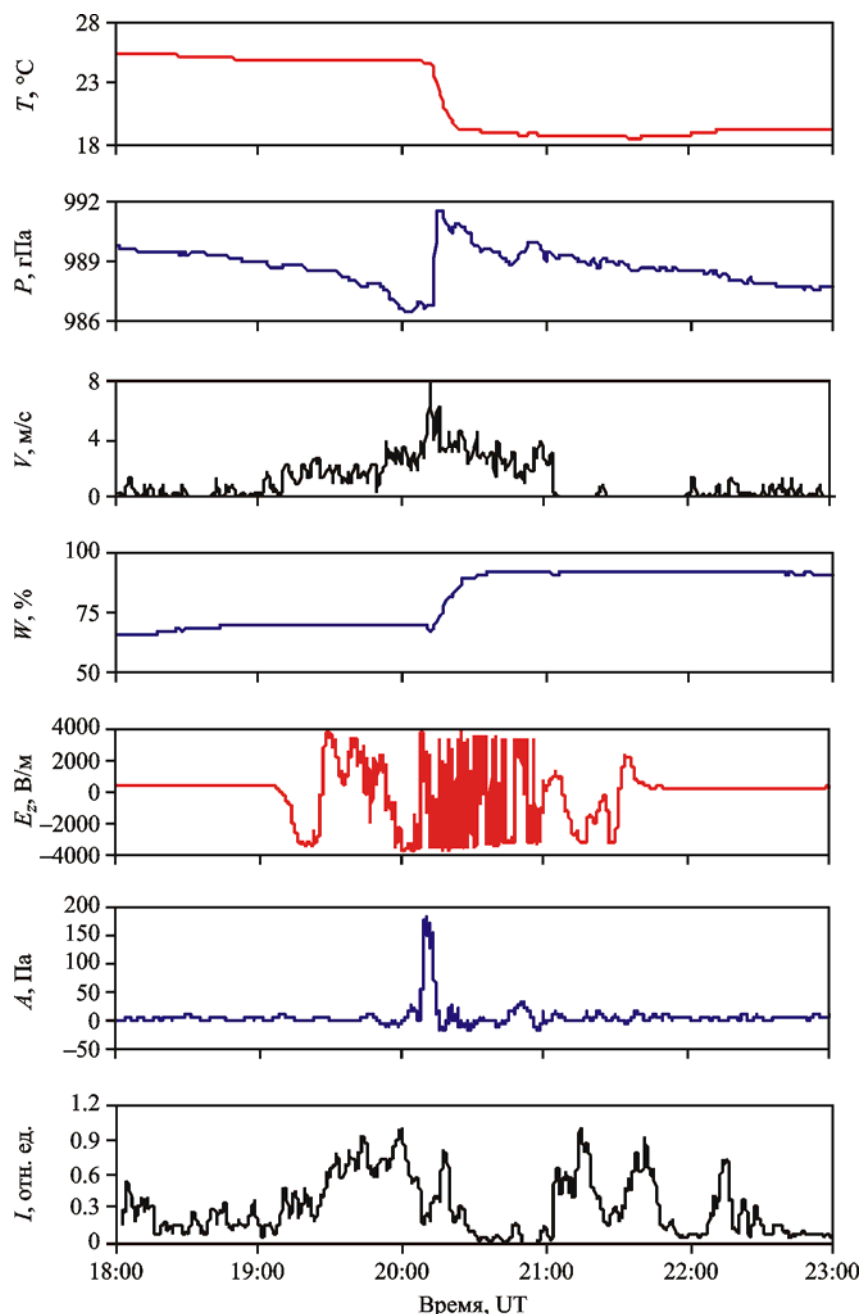


Рис. 1. Результаты регистрации метеопараметров (атмосферного давления P , температуры воздуха T , скорости ветра V и влажности воздуха W), вертикальной компоненты электрического поля E_z и амплитуды микробарических пульсаций атмосферного давления A в период грозовой активности 13.07.2016 г. в г. Москва

атмосферы, выполненной 13.07.2016 г. в период сильного грозового явления в г. Москва. Из данных, представленных на рис. 1, видно, что в 20:07 UT наблюдалось прохождение холодного атмосферного фронта, который вызвал резкое падение температуры T на 5.8° , кратковременное усиление скорости ветра V на ~ 7 м/с, увеличение амплитуды микробарических пульсаций P до ~ 180 Па и рост влажности воздуха W (за 20-минутный интервал величина W увеличилась почти на 21 %). Особо следует отметить резкое увеличение атмосферного давления P_0 – скачок давления составил около 500 Па, хотя по результатам многочисленных наблюдений сильные события, аналогичные событию 13.07.2016 г., имели более высокие градиенты нарастания величины P_0 – до 600–700 Па/мин.

Вариации электрического поля. Вариации электрического поля для события 13.07.2016 г. наблюдались начиная примерно с 19:10 UT, задолго до прихода атмосферного фронта. При этом, как это следует из данных, представленных на рис. 1, отчетливо выделялись три стадии вариаций E_z , отличающиеся периодом и, вероятнее всего, амплитудой¹. Начальная (первая) стадия вариаций E_z продолжительностью около 1 ч (с 19:10 UT до прихода атмосферного фронта в 20:07 UT) характеризовалась амплитудой около 4000 В/м с преимущественным периодом около 10 мин. На этой стадии отмечался приход к точке наблюдений мощного кучево-дождевого облака формы *Cb inc*, а также внутриоблачные свечения.

Затем с приходом атмосферного фронта спектральные характеристики вариаций E_z резко изменились. В период 20:07–21:00 UT амплитуда вариаций E_z составила ~ 1 мин. В этом временном интервале наблюдались основные признаки грозы: интенсивные молниевые разряды типа облако–земля, количество которых достигало 2–3 разряда в минуту (рис. 2). И, наконец, на заключительной стадии явления амплитуда вариаций E_z снизилась до ~ 2000 – 3000 В/м с увеличением периода до ~ 15 мин.

Рис. 3 демонстрирует отличие спектров вариаций E_z на первой и второй стадиях развития грозовой активности. Если на первой стадии основные вариации E_z наблюдались в диапазоне $(1\text{--}2.5)\cdot 10^{-3}$ Гц при пиковой частоте $1.45\cdot 10^{-3}$ Гц (период – 11.3 мин), то на второй стадии основные вариации E_z наблюдались в диапазоне частот $6.8\cdot 10^{-3}$ – $2\cdot 10^{-2}$ Гц при ярко выраженном пиковом значении на частоте $1.56\cdot 10^{-2}$ Гц (период – 1.06 мин).

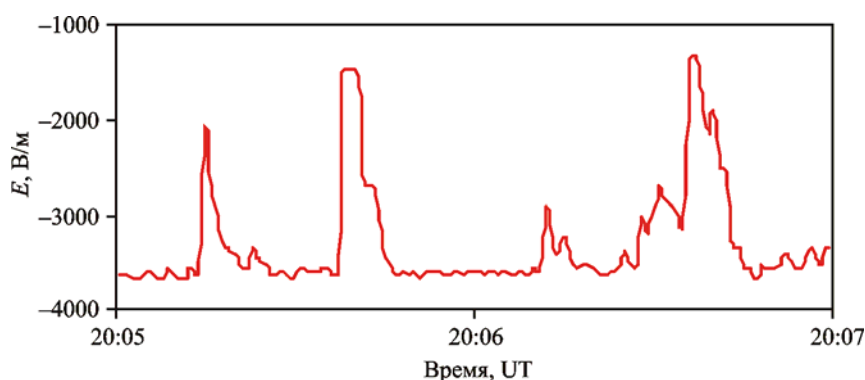


Рис. 2. Пример регистрации вариаций электрического поля в приземном слое атмосферы в период молниевых разрядов типа облако–земля во время грозовой активности 13.07.2016 г. в г. Москва

¹ Динамический диапазон применяемых средств регистрации не обеспечил установление амплитуды вариаций электрического поля на второй, «высокочастотной», стадии; однако на приведенной на рис. 1 записи видно, что амплитуда вариаций в период 20:07–21:00 UT превышала амплитуду на первой и третьей стадиях.

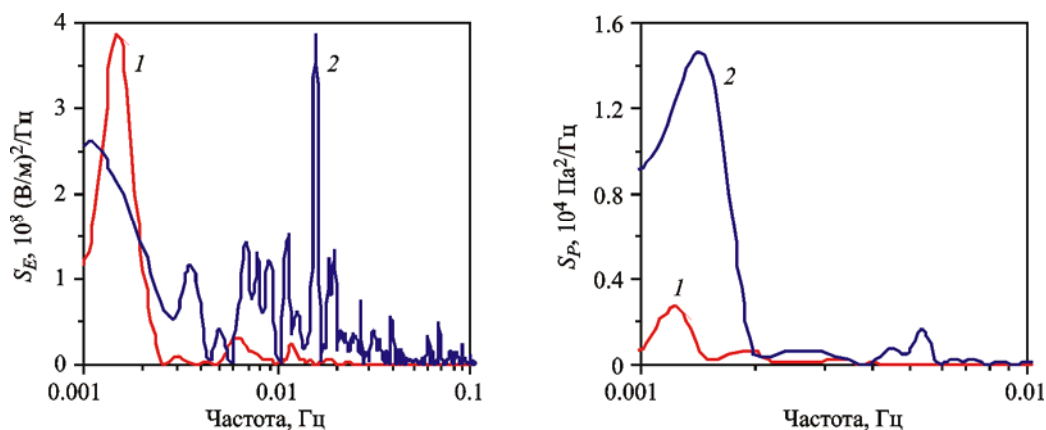


Рис. 3. Спектральная плотность мощности вариаций напряженности электрического поля S_E и микробарических пульсаций атмосферного давления S_P в период грозовой активности 13.07.2016 г. в г. Москва
1 и 2 – соответственно первая и вторая стадии развития явления

Микробарические вариации. Аналогичные стадии развития грозовой активности можно проследить также по вариациям амплитуды микробарических пульсаций, нарастание интенсивности которых отмечается за 1–2 ч до прихода грозowego фронта. В качестве примера на рис. 4 приведена сонограмма барических вариаций для события 13.07.2016 г.

Имеющиеся на сегодняшний день литературные данные свидетельствуют о том, что движение грозowego облака сопровождается генерацией внутренних гравитационных

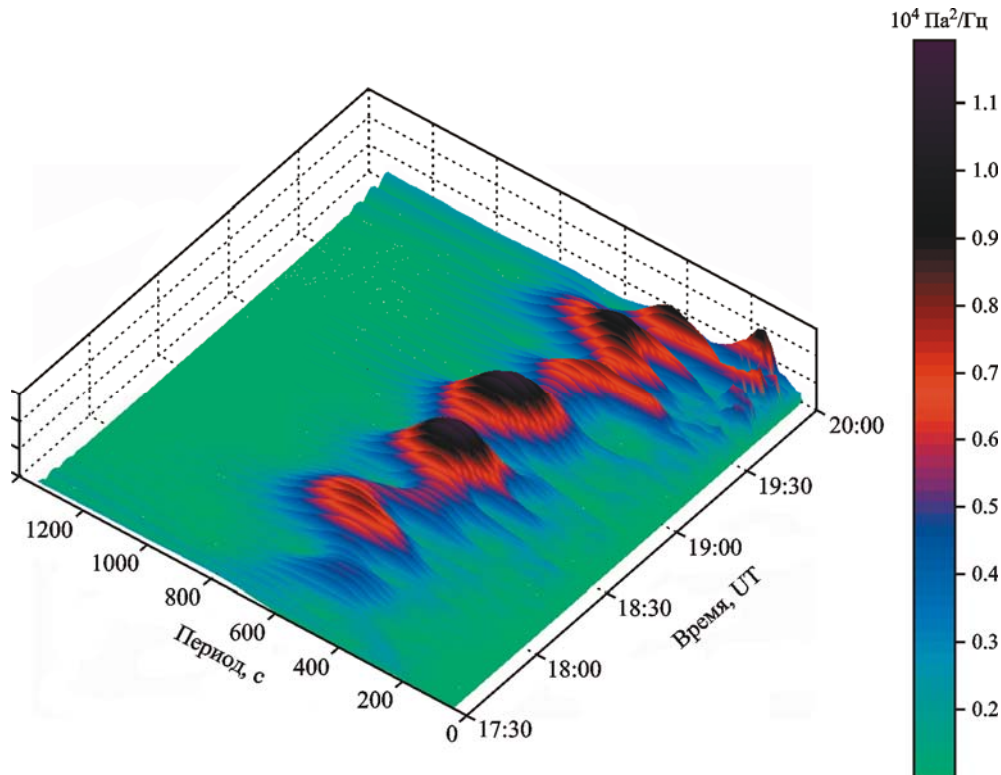


Рис. 4. Сонограмма вариаций атмосферного давления в период, предшествующий приходу грозowego фронта в г. Москва 13.06.2016 г.

волн (ВГВ) [Госсард, Хук, 1978; Санина и др., 2008; Соловьев и др., 2008]. При этом возможны два механизма генерации ВГВ, один из которых связан с турбулентными пульсациями, формирующимися в результате интенсивного преобразования облака в последовательности $As \rightarrow Ns \rightarrow Sb$, другой – с температурными пульсациями, вызванными пространственно-временными флуктуациями выделяемого тепла при конденсационных процессах [Госсард, Хук, 1978; Лайтхилл, 1981; Нетреба, Свиркунов, 1995]. Генерируемые грозовым облаком ВГВ можно наблюдать на значительных расстояниях [Санина и др., 2008; Соловьев и др., 2008].

Результаты настоящих исследований подтверждают наличие предвестника приближающейся грозы в виде ВГВ. Действительно, как это следует из данных, представленных на рис. 3, спектральная амплитуда микробарических пульсаций S_p на второй стадии более чем в 5 раз выше соответствующей амплитуды на первой стадии. При этом характерные периоды вариаций микробарических пульсаций на первой и второй стадиях явления близки между собой и составляют соответственно 11.3 и 13.6 мин. Это совпадает с оценками, приведенными в работе [Данилов, Свертилов, 1991], в которой показано, что верхняя кромка грозового облака колеблется по вертикали с периодом 5–15 мин, что и является причиной формирования ВГВ. При этом следует отметить, что энергия указанных колебаний может достигать величины $\sim 3 \cdot 10^{10}$ Дж, что обеспечивает распространение ВГВ на большие расстояния [Бериташвили, Ломинадзе, 1969].

Приведенные выше данные демонстрируют сложный характер сильной грозы. При этом следует отметить, что поэтапное развитие сопутствующих грозе геофизических эффектов не является уникальным и отмечалось нами неоднократно в периоды сильных грозовых явлений в г. Москва (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.).

Обсуждение результатов

Полученные нами в ходе наблюдений 13.07.2016 г. данные хорошо согласуются с результатами оптических и визуальных исследований, которые свидетельствуют о том, что развитие сильной грозовой активности происходит поэтапно. Перед приходом холодного атмосферного фронта (первая стадия развития грозового явления) отмечались 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 было связано с приходом холодного атмосферного фронта, характеризовалась мощными молниевыми разрядами типа облако–земля, которые сопровождалась сильными акустическими эффектами.

Обобщая результаты наблюдений, можно констатировать, что за 1–2 ч до прихода грозовой конвективной ячейки в атмосфере регистрируются колебания с периодом 9–12 мин, а за 0.5–1 ч – вариации напряженности электрического поля значительной амплитуды с таким же периодом. Здесь следует отметить, что волновые возмущения в атмосфере, вызванные прохождением холодных атмосферных фронтов, регистрируются повсеместно, причем скорость их распространения существенно превышает скорость движения, например, грозовой конвективной ячейки (рис. 5) [Попова и др., 2011].

Зарегистрированные в предшествующий приходу атмосферного фронта период вариации электрического поля объясняются формированием на этой стадии в атмосфере

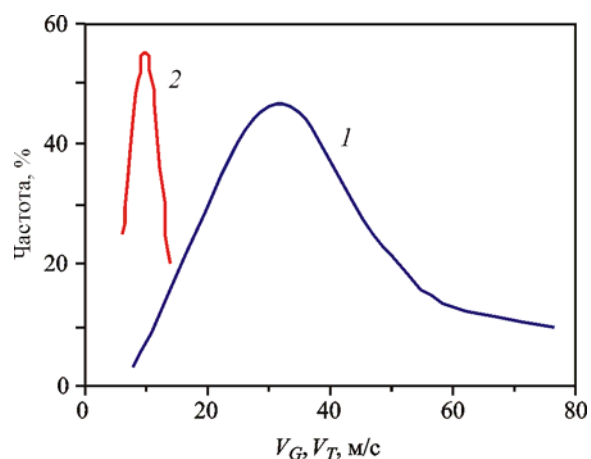


Рис. 5. Результаты инструментальной регистрации скоростей распространения ВГВ $V_G(1)$ и грозовой конвективной ячейки $V_T(2)$

ВГВ [Данилов, Свертилов, 1991; Рыбнов, Харламов, 2006; Санина и др., 2008; Соловьев, Рыбнов, 2008; Соловьев и др., 2008]. Следует отметить, что ВГВ, вызываемые в атмосфере различными источниками, представляют собой самостоятельный и весьма интересный объект исследований. Это связано с тем, что ВГВ не только являются индикаторами и предвестниками таких опасных явлений, как сильные грозы, штормы, смерчи и т.д., но и играют значительную роль в развитии мезомасштабных атмосферных аномалий, внося определенный вклад в энергетику атмосферных процессов, а порой выступая в роли триггера [Романова, Якунин, 1995].

Выполним идентификацию ВГВ на примере грозовой активности 13.07.2016 г., для чего воспользуемся критерием, основанным на вычислении акустического импедансного соотношения [Романова, Якунин, 1995]:

$$I(t) = \frac{P(t)}{\rho V(t)}, \quad (1)$$

где $P(t)$ – пульсации атмосферного давления; $V(t)$ – горизонтальная составляющая скорости ветра; ρ – плотность воздуха; t – время.

В соответствии с данными работы [Романова, Якунин, 1995] совпадение (близость) фазовых характеристик колебаний скорости ветра и пульсаций атмосферного давления свидетельствует о наличии ВГВ. В случае слабой фазовой корреляции микропульсации атмосферного давления обусловлены конвекцией, которая, как правило, связана с развитием турбулентности.

Результаты расчетов по формуле (1), выполненные для явления 13.07.2016 г., представлены на рис. 1 в виде нормированной величины $I(t)$. Приведенные данные свидетельствуют о том, что величина нормированного импедансного соотношения (НИС) значительно изменяется со временем. Наблюдается резкое уменьшение НИС на второй стадии развития грозовой активности по сравнению с первой и третьей стадиями. Превышение НИС величины 0.5–0.6 на первой и третьей стадиях грозовой активности в соответствии с выводами работы [Романова, Якунин, 1995] свидетельствует о существовании в атмосфере ВГВ. Напротив, практически нулевые значения НИС на второй стадии демонстрируют существенные различия в фазах вариаций скорости атмосферных движений и давления. Таким образом, можно утверждать, что первая стадия развития грозового явления в месте наблюдений связана с пришедшей ВГВ, вторая – с формированием турбулентных движений.

Оценим характерный период ВГВ для условий события 13.07.2016 г. Из уравнения состояния газа (воздуха) следует:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P_0}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{1}{T} \cdot \frac{\partial T}{\partial z},$$

где P_0 – атмосферное давление; T – температура воздуха; ρ – плотность воздуха; z – высота, отсчитываемая от земной поверхности. С учетом

$$\frac{\partial P_0}{\partial z} = -\rho \cdot g = -\frac{P_0 \cdot g}{R \cdot T}$$

имеем

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\frac{1}{T} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{R} \right),$$

где g – ускорение свободного падения; R – газовая постоянная.

Для оценки примем уровень нижней кромки грозового облака равной ~ 1 км, а его высоту (мощность) – ~ 2 км [Хргиан, 1978]. Изменение плотности воздуха на такой высоте по стандартной модели атмосферы Земли не превышает 10 %. В этом случае

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{g}{R} - \frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \frac{T_0}{\rho_0} \approx 0.008 \text{ К/м},$$

где T_0 и ρ_0 – соответственно температура и плотность воздуха у земной поверхности.

Оценки, выполненные с использованием представленных на рис. 1 результатов инструментальных наблюдений (температура воздуха на земной поверхности составляет 24.9 °С (~ 298 К), относительная влажность – 69 %, давление – 990 гПа, скорость ветра – 1.8 м/с), следующие: температура воздуха на высоте нижней кромки грозового облака составляет ~ 290 К, на высоте верхней кромки – $T_z \sim 274$ К.

В соответствии с данными работ [Беритаивили, Ломинадзе, 1969; Хргиан, 1978] период $T_{\text{ВГВ}}$ вертикальных колебаний верхней кромки грозового облака (фактического источника ВГВ) записывается в виде соотношения

$$T_{\text{ВГВ}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g}{T_z} \cdot (\gamma_a - \gamma_{\text{вл}})}}, \quad (2)$$

где $\gamma_a \approx 0.0098$ К/м – сухоадиабатический градиент температуры; $\gamma_{\text{вл}}$ – влажноадиабатический градиент температуры (рис. 6).

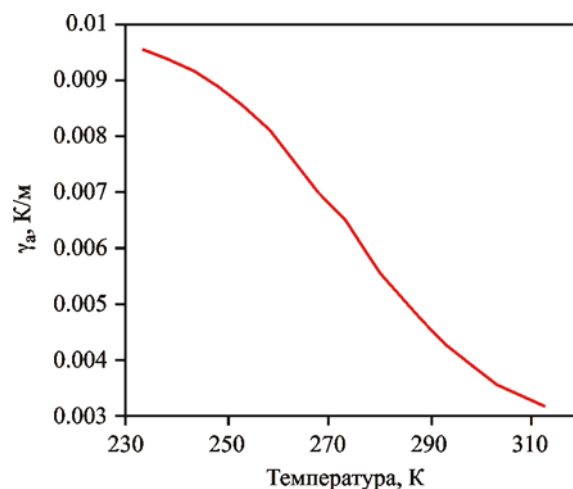


Рис. 6. Зависимость сухоадиабатического градиента температуры от температуры воздуха

Для рассматриваемого случая период колебаний, вычисленный на основе зависимости (2), составляет ~ 9.6 мин. Полученная оценка соответствует приведенным выше результатам измерений и может служить подтверждением того, что зарегистрированные перед приходом грозового облака колебания атмосферного давления являются ВГВ.

Резюме

Представленные в настоящей работе данные свидетельствуют о том, что формирование и движение грозовой конвективной ячейки сопровождается генерацией и распространением в атмосфере ВГВ. Как следствие, приближение сильной грозы предваряется возникновением колебаний с частотой Брента–Вяйсяле и длиннопериодными вариациями электрического поля значительной амплитуды, что позволяет рассматривать их в качестве предвестников и индикаторов сильной грозовой активности. При этом важно отметить, что указанные процессы регистрируются имеющимися в настоящее время техническими средствами.

Результаты работы могут быть использованы как при разработке общей модели грозовых явлений, так и при установлении прогностических критериев их интенсивности.

Благодарности

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием (проект 0146-2014-0015) при поддержке Программы фундаментальных исследований IV.8 Отделения наук о Земле РАН (проект 0146-2015-0011) в части обработки геофизических данных.

Литература

- Алексеева Н.Т., Федоров В.П., Байбаков С.Е.* Реакция нейронов различных отделов ЦНС на воздействие электромагнитного поля // Электромагнитное поле и здоровье человека: Материалы 2-й Междунар. конф. «Проблемы электромагнитной безопасности человека. Фундаментальные и прикладные исследования», г. Москва, 20–24 сентября 1999 г. М., 1999. С. 47–48.
- Бериташвили Б.И., Ломинадзе В.П.* Размеры вершин конвективных облаков // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5, № 10. С. 1093–1095.
- Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
- Данилов С.Д., Свертилов А.И.* Внутренние гравитационные волны, генерируемые при прохождении гроз // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1991. Т. 27, № 3. С. 234–241.
- Имянитов И.М.* Строение и условия развития грозовых облаков // Метеорология и гидрология. 1981. № 3. С. 4–17.
- Кашлева Л.В.* Атмосферное электричество. СПб., 2008. 116 с.
- Колесник А.Г., Колесник С.А., Побаченко С.В.* Электромагнитная экология. Томск: ТМЛ-Пресс, 2009. 336 с.
- Лайтхилл Дж.* Волны в жидкостях. М.: Мир, 1981. 598 с.
- Мартынюк В.С.* Связь динамики электрических характеристик организма человека с вариациями космической погоды // Геофизические процессы и биосфера. 2005. Т. 4, № 1. С. 53–61.
- 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. 2012. Т. 11, № 2. С. 16–39.

- Нетреба С.Н., Свиркунов П.Н. О возможности прогноза интенсивных циклонов по изменчивости амплитуды инфразвуковых пульсаций давления // *Метеорология и гидрология*. 1995. № 3. С. 28–36.
- Попова О.П., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Генерация волновых возмущений в системе о. Байкал – Тункинская долина // *Межгеосферные взаимодействия: Материалы семинара-совещания*, г. Москва, 26–27 сентября 2011 г. М.: ГЕОС, 2011. С. 27–42.
- Романова Н.Н., Якунин И.Г. Внутренние гравитационные волны в нижней атмосфере и источники их генерации // *Физика атмосферы и океана*. 1995. Т. 31, № 2. С. 163–186.
- Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Локальный мониторинг акустико-гравитационных волн // *Динамические процессы во взаимодействующих геосферах*. М.: ГЕОС, 2006. С. 227–233.
- Санина И.А., Рыбнов Ю.С., Солдатенков А.М., Харламов В.А. Сейсмоакустические эффекты при грозовой активности // *Геофизика межгеосферных взаимодействий*. М.: ГЕОС, 2008. С. 67–79.
- Соловьев С.П., Рыбнов Ю.С. Возмущение электрического поля и генерация акустико-гравитационных волн, обусловленные приближением атмосферного фронта // *Геофизика межгеосферных взаимодействий*. М.: ГЕОС, 2008. С. 95–97.
- Соловьев С.П., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Акустико-гравитационные волны и сопутствующие им возмущения электромагнитного поля // *Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы*. М.: ГЕОС, 2008. С. 256–263.
- Сидякин В.Г. Влияние глобальных экологических факторов на нервную систему. Киев: Наук. думка, 1986. 160 с.
- Спивак А.А., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А. Геофизические поля мегаполиса // *Геофизические процессы и биосфера*. 2016а. Т. 15, № 2. С. 39–54.
- 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*. 2016б. Т. 52, № 2. С. 65–78.
- Тихонов М.Н., Кудрин И.Д., Довгуша В.В., Довгуша Л.В. Электромагнитная среда и человек // *Вопросы охраны окружающей среды*. 1997. № 11. С. 55–84.
- Тужилкин Д.А., Апряткина М.Л., Бородин А.С. Влияние вариаций физических полей окружающей среды на функционирование сердечно-сосудистой системы человека // *Физика окружающей среды*. Томск: Изд-во ТГУ, 2011. С. 285–288.
- Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Т. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 319 с.
- Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 421 с.
- Черешнев В.А., Гамбурцев А.Г., Сигачев А.В., Верхотурова Л.Ф., Горбаренко Е.В., Гамбурцева Н.Г. Внешние воздействия – стрессы – заболеваемость. М.: Наука, 2016. 168 с.
- Экология человека в изменяющемся мире. Изд. 12-е, доп. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 570 с.
- Bell G., Marino A.A., Chesson A.L. Frequency-specific blocking in the human caused by electromagnetic fields // *Neuroreport*. 1994. V. 5. P. 510–512.
- Goodman R., Basset C.A., Henderson A.S. Pulsing electromagnetic fields induce celllular transcription // *Sciece*. 1983. V. 220. P. 128–130.
- Jamieson K.S., Apsimon H.M., Jamieson S.S., Bell J.N.B., Yost M.G. The effects of electric fields on charged molecules and particles in individual microenvironments // *Atmospheric Environment*. 2007. V. 41, N 25. P. 5224–5235.
- Lyons W.A., Nelson Th.E., Williams E.R., Cramer J.A., Turner T.R. Enhanced positive cloud-to-ground lightning in thunderstorms ingesting smoke from fires // *Science*. 1998. V. 282. P. 77–80.
- MacGorman D.R., Rust W.D. The electrical nature of storms. N.Y., Oxford: Oxford Univ. Press, 1998. 422 p.
- Rakov V., Uman M. Lightning: Physics and effects. Cambridge: Camb. Univ. Press, 2003. 687 p.
- Volland H. Atmospheric electrodynamics. Berlin: Springer, 1984. 205 p.

Сведения об авторах

СПИВАК Александр Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт динамики геосфер РАН. 119334, г. Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел. +7 (495) 939-75-91. E-mail: spivak@idg.chph.ras.ru

РЫБНОВ Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, г. Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел. +7 (495) 939-75-91. E-mail: rybnov@idg.chph.ras.ru

СОЛОВЬЕВ Сергей Петрович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, г. Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7 (916) 530-93-37. E-mail: soloviev@idg.chph.ras.ru

ХАРЛАМОВ Владимир Александрович – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, г. Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел. +7 (910) 009-81-27. E-mail: kharlamov@idg.chph.ras.ru

**ACOUSTIC AND ELECTRIC PRECURSORS
OF HEAVY THUNDERSTORM
UNDER MEGALOPOLIS CONDITIONS**

A.A. Spivak, Yu.S. Rybnov, S.P. Soloviev, V.A. Kharlamov

Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Analysis of the instrumental observation results of electric field and microvariations of atmosphere pressure in the ground atmosphere during heavy thunderstorms in the Moscow city for the period 2014–2016 was carried out. It is shown that storm-cloud arrival is forestalled by variations of electric field strength, internal gravity waves and increased magnitudes of impedance acoustic correlation. More high-frequency (~ 1 min) variations of the electric field and increased turbulization of atmosphere are observed after arrival of cold atmospheric front also during period of thunderstorm phenomena. Wind motions in atmosphere practically absent and internal gravity waves are observed at the final stage of the phenomena. The period of electric field variations increased up to ~ 15 min at the same time.

Keywords: megalopolis, instrumental observations, thunderstorm cell, meteoparameters, electric field, acoustic vibrations.