

# РАДИО- ТЕХНИКА

**113/2000**



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ**  
**УНИВЕРСИТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**РАДИОТЕХНИКА**

**Всеукраинский межведомственный**  
**научно-технический сборник**

Основан в 1965 г.

**В Ы П У С К 113**

Харків

Харківський державний технічний  
університет радіоелектроніки

2000

## АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО МЕГА-ПОЛИСОВ И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ АТМОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Известно, что ионосфера Земли чувствительна к внешним воздействиям, поэтому параметры ионосферы испытывают как регулярные, так и нерегулярные вариации. Регулярные вариации обычно связаны с воздействием солнечной радиации и космического излучения. Нерегулярные (как кратковременные, так и сравнительно длительные) аномальные изменения параметров ионосферы являются следствием процессов, происходящих в тропосфере, на поверхности Земли и под Землей.

Изучение вопросов возникновения и пространственно-временной динамики атмосферных электрических полей в последние годы стало актуальным по ряду причин, связанных, например, с радиоактивным загрязнением окружающей среды, крупными пожарами (как лесными, так и на нефтяных и газовых добывающих комплексах), различного рода авариями на химических и других предприятиях и т. д. В этой связи в литературе широко изучаются процессы, влияющие на изменение градиента потенциала электрического поля в тропосфере (см., например, [1-3]). Выделяют естественные и антропогенные факторы, механизмы влияния которых на приземную атмосферу имеют много общих характерных особенностей.

Среди естественных факторов обычно выделяют два комплекса источников: 1) тропосферные процессы; 2) процессы, происходящие в литосфере и на поверхности Земли. К первому классу относятся, например, пылевые и песчаные бури, вулканическая деятельность; радиоактивные загрязнения и др. Ко второму: землетрясения, процессы на поверхности и под водой в океане и (на море) такие как, например, морские и океанические течения, разного рода катаклизмы (цунами, тайфуны и т. д.), испарения с поверхности океана (моря) и т. д. В литературе практически не исследован вопрос о формировании электрического поля в и над мега-полисами, которые занимают достаточно большую площадь  $S$  на поверхности Земли (например для Харькова  $S > 250 \text{ км}^2$ ). В связи с этим остаётся практически не исследованным вопрос о влиянии электрического поля (градиентов электрического потенциала и проводимости) в мега-полисе на здоровье людей и животных.

Следует отметить, что в районах мега-полисов и крупных энергетических объектов техногенная загрязнённость приземной атмосферы, восходящие тепловые потоки и инфразвуковые колебания, как показывают оценки, могут привести к нестационарности в процессах формирования объемного заряда атмосферы и заметным отклонениям от естественной величины не скомпенсированного заряда.

Вопросам проникновения электрических полей в ионосферу посвящена обширная литература (см., например, [4 - 7]). В частности, в [4,5] решается задача о проникновении электрического поля из тропосферы в ионосферу, а в [6, 7] моделируются возможные изменения основных параметров  $D$  – области ионосферы. Задача взаимосвязи атмосферно-ионосферного электричества в литературе решается, как правило, двумя способами: первый из них включает в себя построение модели и расчёт проникающих из атмосферы в ионосферу электрических полей  $E$  (обычно для вертикальной составляющей  $E_z$ , см., например, [4, 5]); второй – основан на гипотезе о том, что система Земля – ионосфера является глобальным пространственным конденсатором, в котором одной из обкладок является поверхность Земли (и приземная атмосфера), а другой, – нижняя граница ионосферы (высоты  $z \sim 60 - 65 \text{ км}$  днем и  $z \sim 80 - 90 \text{ км}$  ночью) [8 - 10].

Плотность вертикального электрического тока в этом случае определяют его компоненты – ток проводимости, диффузионный и конвективный ток:

$$J = ZE_z - z_1 e [(K_T + D_M) \frac{\partial N_{\pm}}{\partial z} + N_{\pm} V_{\infty}] \quad (1)$$

Здесь  $E_z$  – напряжённость электрического поля,  $K_T$ ,  $D_M$  – коэффициенты турбулентной и молекулярной диффузии,  $N_{\pm}$  – концентрации аэроионов,  $V_{\infty}$  – скорость ветра,  $(ez_1)$  – заряд иона,  $Z_1$  – число зарядов,  $Z$  – полная электрическая проводимость воздуха, определяемая характеристиками аэроионов разных знаков: зарядом  $(ez_1)$  и спектром подвижностей  $\mu_{\pm}$ :

$$Z = \int_0^{\infty} N_+(\mu) \mu_+ d\mu + \int_0^{\infty} N_-(\mu) \mu_- d\mu,$$

В реальной атмосфере преобладающий вклад в проводимость вносят лёгкие ионы ( $\mu_{\pm} = 0,5 \dots 5 \text{ см}^2/(\text{В с})$ ), поэтому на практике используют запись для полярных проводимостей  $\lambda_{\pm}$  через средние значения подвижности и единичные заряды ( $z_1=1$ ):

$$\lambda_{\pm} = qN_{\pm}\bar{\mu}_{\pm},$$

где  $q = ez_1 = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $\bar{\mu}_- = 1,3$  и  $\bar{\mu}_+ \approx 1,8 \text{ см}^2/(\text{В с})$ .

Сопротивление столба атмосферы рассчитывают по данным о высотном распределении суммарной электрической проводимости воздуха. Вклад различных участков атмосферы в сопротивление  $R$  распределяется следующим образом [10]: приземный слой – 10 %, слой обмена (0,1 - 2 км) – 60 %, верхняя тропосфера и стратосфера – 30 %. Глобальное общее сопротивление земной атмосферы составляет 200 - 240 Ом. Максимум проводимости и соответственно минимум сопротивления столба воздуха достигается на восходе Солнца, а максимум  $R$  – в 14-16 часов местного времени.

Рассмотрим основные факторы, которые могут быть источниками атмосферного электричества в пределах мега-полиса. Условно их можно разделить на следующие 3 категории: 1: электромагнитные; 2: тепло-пылевые; 3: химические. К первой из них отнесём:

- протяжённые высоковольтные линии электропередачи (для них характерно присутствие практически постоянных, распределённых в пространстве (вдоль линии) коронирующих разрядов, интенсивность которых заметно возрастает при неблагоприятных погодных условиях);

- трансформаторные подстанции промышленных предприятий (они занимают сравнительно большие площади и характеризуются значительным повышением распределённого объёмного заряда и электромагнитного поля в их зоне и окрестности);

- телевизионные и радиопередающие станции всех диапазонов (характеризуем как постоянно действующие и относительно локализованные источники мощных нестационарных электромагнитных полей, сравнительно равномерно облучающих зону мега-полиса);

- линии электропередачи городского наземного электротранспорта (для них характерны большие протяжённости, густота, относительная равномерность пространственного распределения в зоне мега-полиса, наличие большого числа коронирующих разрядов вследствие короткого замыкания и плохих контактов в сетях, особенно при неблагоприятных погодных условиях);

- городская осветительная электрическая сеть (характерным для неё является то, что она создаёт постоянно присутствующий нестационарный электромагнитный фон, примерно равномерно распределённый у поверхности Земли).

Известно, что атмосферная пыль (в широком понимании этого термина она включает как грунтовую пыль, так и продукты техногенной деятельности людей, последствия пожаров и т. д.) является источником нестационарного атмосферного электричества [11]. Поэтому ко второй категории отнесём следующие основные источники:

- компоненты, поступающие в атмосферу при работе ТЭЦ, которые включают в себя газовые и пылевые продукты сгорания различного топлива; тепловые потоки и водяной пар. Наличие наряду с крупными ТЭЦ сравнительно большого числа мелких структур подобного типа (котельни предприятий, районов и т. д.) позволяет рассматривать этот источник загрязнения как неравномерно распределённый в зоне мега-полиса;

- тепловое и газовое загрязнение атмосферы наземным транспортом при сжигании бензинового, газового и дизельного топлива (характерны относительная неравномерность уровня загрязнения относительно времени суток);

- тепло-пылевые компоненты работы промышленных предприятий (при работе крупных промышленных печей, литейных производств и т.п.) (как правило, характерна высокая степень концентрации различных пылевых компонентов, часто с неравномерным распределением во времени и в зоне мега-полиса);

- собственно грунтовая пыль (наиболее весомая составляющая её - пыль автодорог и тротуаров), которая в результате постоянного присутствия различных горизонтальных и восходящих (часто сильных) воздушных потоков является как источником загрязнения атмосферы, так и нестационарного атмосферного электричества [11];

– газо-тепловое излучение зданий и асфальтового покрытия (влияние этого компонента будет заметно, в основном, в летний период при сравнительно высокой температуре, когда происходит выделение в атмосферу различных газовых компонентов из твёрдых покрытий зданий и поверхности Земли, а также тепловой конвекции).

К третьей категории отнесём:

– выбросы и утечка химических веществ, недостаточную очистку на различных предприятиях химической, текстильной, кондитерской и т. д. отраслей промышленности (как правило характерны относительно высокая степень загрязнённости атмосферы; пространственно-временную неравномерность; наличие не только относительно пассивных аэрозолей, но и химически (а следовательно и электрически) активных составляющих).

Перечисленные источники часто по-разному влияют на атмосферное электричество в и над мегаполисом в зависимости от времени года и суток.

Отметим, что в ряде случаев в пределах мега-полисов возможны генерация и усиление акустических и инфразвуковых колебаний, которые также способствуют разделению зарядов в атмосфере.

Перечисленные факторы могут стимулировать поднятие заряженных структур на большие высоты (по сравнению с зоной вне мега-полиса) и привести к усилению воздействия электрического поля, образующегося в зоне мега-полиса, на ионосферу. Поскольку с увеличением высоты электрическая прочность атмосферы понижается, то в отдельных областях заряженных структур может реализоваться режим сильных электрических полей, близких к полям коронных разрядов. В этих условиях связь между электрическим током  $\vec{J}$  и полем  $\vec{E}$  становится нелинейной

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + (\sigma_k / E_k) \alpha \vec{E}, \quad (1)$$

где  $\sigma, \sigma_k$  – линейная и нелинейная проводимости атмосферы,  $\sigma \ll \sigma_k$ ,  $\vec{E}_k$  – критическое поле зажигания заряда,  $\alpha$  – коэффициент. В [12] сделаны оценки и показано, что вклад нелинейного эффекта в формирование заряженных структур велик, и за счёт этого электрическое поле в ионосфере будет заметно усилено.

Взаимосвязь основных элементов электричества в атмосфере (над мега-полисом в частности), рассматривая основные характеристики  $N_{\pm}, \mu_{\pm}, E_{\pm}$ , с другими характеристиками атмосферы можно проследить, рассматривая уравнение баланса ионов в атмосфере (случай моноподвижных ионов и аэрозолей) [13]:

$$\frac{dN_{\pm}}{dt} + V_{\infty} \nabla N_{\pm} = \nu - \alpha_{\pm} N_{+} N_{-} - \beta_{\pm} N_{\pm} N_a + \mu_{\pm} \frac{d(E_{\pm} N_{\pm})}{dz} + \frac{d}{dz} (K_T \frac{dN_{\pm}}{dz}). \quad (2)$$

Здесь второе слагаемое слева описывает адвективный перенос; первое слагаемое справа – интенсивность ионообразования; второе – рекомбинацию; третье – адсорбцию ионов с аэрозолями; последние два слагаемых учитывают перенос ионов в электрических и турбулентных полях.

Для расчёта кинетики концентраций ионов обоих знаков (отрицательных и положительных)  $N_{\pm}$  и электрического поля  $E$  в горизонтально-однородной атмосфере применима система уравнений [14]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_{+}}{\partial t} &= \nu - \alpha_{\pm} N_{+} N_{-} + \frac{\partial(K_T + D_{+})}{\partial z} \frac{\partial N_{+}}{\partial z} - e\mu_{+} \frac{\partial(EN_{+})}{\partial z}; \\ \frac{\partial N_{-}}{\partial t} &= \nu - \alpha_{\pm} N_{+} N_{-} + \frac{\partial(K_T + D_{-})}{\partial z} \frac{\partial N_{-}}{\partial z} + e\mu_{-} \frac{\partial(EN_{-})}{\partial z}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e(N_{+} - N_{-})}{\epsilon_0},$$

где  $\nu$  – интенсивность ионообразования,  $\alpha_{\pm}$  – коэффициент рекомбинации ионов,  $D_{\pm}$  – коэффициенты диффузии,  $N$  – концентрация аэрозолей. (Отметим, что для полноты картины в уравнения (2) для

где  $\nu$  – интенсивность ионообразования,  $\alpha_{\pm}$  – коэффициент рекомбинации ионов,  $D_{\pm}$  – коэффициенты диффузии,  $N_a$  – концентрация аэрозолей. (Отметим, что для полноты картины в уравнения (2) для реальной атмосферы необходимо добавить члены, учитывающие конвективное и турбулентное размытие ионного облака, физико-химическое состояние естественного аэрозоля, перенос в воздух ионов растворённых в воде веществ и образование конденсата при биполярной ионизации воздуха (см., например, [15]).

Решение системы (3) в стационарном случае позволяет сделать оценки  $E \approx 100 - 200$  В/м, что сравнимо с эмпирическими значениями [16].

Согласно предварительным оценкам увеличение концентрации ионов до  $10^5 - 10^6$  см<sup>-3</sup> в атмосфере над мегаполисом должно приводить к усилению напряжённости электрического поля в 2-3 раза. В связи с этим крайне важно провести измерения электрического поля в атмосфере над мега-полисом и наладить регулярный мониторинг для целей изучения, прогнозирования и учёта влияния атмосферного электричества на экологическую обстановку и здоровье людей в мега-полисе.

Известно, что в регионах природных катаклизмов (например, в регионах подготовки сильных землетрясений, извержений вулканов и т. д.), где обнаружены литосферно - атмосферные взаимодействия, кратковременно меняются параметры среды обитания (в частности, наблюдаются многочисленные случаи нарушения физиологического состояния живых организмов, людей в том числе). По сравнению с такими источниками условия в мега-полисах отличаются долговременностью действия факторов атмосферно-ионосферного взаимодействия. Влияние таких факторов в литературе практически не исследовалось с такой постановкой задачи, что делает актуальной задачу комплексного мониторинга приземной атмосферы как в, так и над мега-полисом.

**Список литературы:** 1. *Атмосферное электричество* / Под ред. Б.Ф. Евтеева, Ф.Х. Халилова, Я.М. Шварца. // Тр. II Всесоюз. Симпоз. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 280 с. 2. *Атмосферное электричество* // Тр. III Всесоюз. Симпоз. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 288 с. 3. *Красногорская Н.В.* Электричество нижних слоёв атмосферы и методы его измерения. М.: Гидрометеиздат, 1972. 323 с. 4. *Park C.G., Dejnakarinta M.* Penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere and magnetosphere. 1. Middle and subauroral latitudes // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78, № 287. P. 6623—6633. 5. *Ким В.П., Хегай В.В., Иллич-Свитыч П.В.* Возможные эффекты в E-области ионосферы перед сильными землетрясениями // В сб.: Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений. 1999. Вып. 1. С. 87—93. 6. *Гоков А.М., Мартыненко С.И.* Изменения частоты соударений электронов и электрические поля в нижней ионосфере // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1997. Т. 37, № 1. С. 76—80. 7. *Martynenko S.I.* Atmospheric electric field and disturbances of the lower ionosphere parameters // *J. of Atmos. Electricity.* 1999. V. 19, № 1. P. 1—9. 8. *Bering E.A., Few A.A., Renbrook J.R.* The global Electric circuit. *Physics Today.* 1998. Oktober. P. 24 — 30. 9. *Проблемы электричества атмосферы* / Под ред. Я.М. Шварца. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 362 с. 10. *Muhleisen K.* The global circuits and its parameters // *Proc. 5-th Intern. Conf. on Atmos. Electr. Parmstadt,* 1977. P. 467 — 476. 11. *Фетт В.* Атмосферная пыль. М.: Иностранная литература, 1961. 336 с. 12. *Гуфельд И.П., Гусев Г.А., Козырева О.В., Похотелов О.А., Рожной А.А.* Предвестники сильных землетрясений в нижней ионосфере: экологические аспекты проблемы // В сб.: Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений. 1999. Вып. 1. С. 94—100. 13. *Cobb W.E., Wells R.I.* The electrical conductivity of oceanic air and its correlation to global atmospheric pollution // *J. Atmos. Sci.* 1970. V 27. P. 814—819. 14. *Свиркунов П.Н.* Диффузионный механизм формирования электрического поля в приземном слое атмосферы // Тр. ИЭМ. 1987. Вып. 44, № 131. С. 3—8. 15. *Смирнов В.А.* Деформация ионного, газового и аэрозольного состава воздуха при его радиоактивном загрязнении // Тр. ИЭМ. 1992. Вып. 19, № 152. С. 46—59. 16. *Чалмерс Дж. А.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 420 с.

Харьковский Национальный университет

Поступила в редколлегию 29.10.99