

К ВОПРОСУ О МОНИТОРИНГЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Болдырев А.С., Болдырева К.А., Куповых Г.В., Пестов Д.А., Пестова О.В., Редин А.А.

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия (Ростовская область, 347928, г. Таганрог, ГСП-17А, пер. Некрасовский, 44), e-mail: boldyrev@sfedu.ru

В работе рассматриваются вопросы мониторинга электрического поля атмосферы по данным наземных наблюдений. Приводится описание электродинамических процессов в приземном слое атмосферы и методов их измерения. Выделяются высокогорные пункты измерений на континентальных станциях как перспективные, поскольку при отсутствии на них загрязнений они могут быть глобально-репрезентативными в электрическом отношении. Рассмотрен вопрос об изменчивости электрических характеристик под влиянием электродного эффекта. Описаны два крайних случая электродного эффекта – классический и турбулентный. В условиях «хорошей погоды» объемный электрический заряд вблизи поверхности земли положителен, а масштаб его распределения определяется толщиной электродного слоя и составляет несколько метров. Значения плотности объемного электрического заряда определяются как мощностью источника ионообразования, так и величиной электрического поля. Показано, что использование различных типов моделей электродного эффекта для описания электрических процессов в приземном слое атмосферы должно быть обосновано соответствующими физическими и метеорологическими условиями. На основании результатов проведенных исследований сформулированы рекомендации для решения задач мониторинга атмосферно-электрических параметров.

Ключевые слова: мониторинг, электрическое поле, атмосфера, электродный эффект, аэрозоль, рекомендации.

ABOUT MONITORING OF THE ATMOSPHERIC ELECTRIC FIELD USING GROUND-BASED OBSERVATIONS

Boldyrev A.S., Boldyreva K.A., Kupovykh G.V., Pestov D.A., Pestova O.D., Redin A.A.

Southern Federal University, Taganrog, Russia (Rostov region, 347928, Taganrog, GSP-17A, Nekrasovsky, 44), e-mail: boldyrev@sfedu.ru

The problems of atmospheric electric field monitoring using ground-based observation is considered in the paper. Electrodynamic processes in the atmospheric surface layer and its measuring methods are observed. Alpine monitoring points on the continental stations are indicated as perspective because they could be globally-representative. Electric characteristics variability under electrode effect is considered. Two extreme cases of electrode effect – classical and turbulent are observed. The space charge near surface is positive and its distribution scale is determined by electrode layer thickness about few meters under "fair weather" conditions. Space charge density is determined by ion-formation source power and electric field value. It is showed that usage of different types of the electrode effects models for electric processes describing should be based on the appropriate physical and meteorological conditions. The recommendations for atmospheric parameters monitoring is formulated based on research results.

Keywords: monitoring, electric field, atmosphere, electrode effect, aerosol, recommendations.

Для осуществления глобального мониторинга электрического поля атмосферы, решения ряда специальных задач атмосферного электричества особый интерес представляют нестационарные процессы в приземном слое атмосферы. Суточные вариации электрического поля имеют две компоненты: глобальную и локальную. В роли глобальной компоненты обычно выступает унитарная вариация потенциала ионосферы, имеющая утренний минимум (03-05) UT и вечерний максимум (19-20) UT. Унитарная вариация хорошо получается при наблюдениях над океанами [10]. При соответствующем отборе и обработке рядов данных по большому количеству неполярных станций также получается кривая,

хорошо согласующаяся с кривой унитарной вариации [1,3,4]. Локальные возмущения определяются электрическими процессами в приземном слое, связанными с действием электродного эффекта вблизи поверхности земли, и, в частности, наличием аэрозольных частиц в атмосфере [4].

Выделение глобальных вариаций электрического поля на фоне локальной изменчивости данных требует точной информации о физических причинах возмущений, происходящих вблизи поверхности земли. Статистические методы обработки экспериментальных данных требуют длительных рядов наблюдений и не дают прямой информации о механизме формирования электрических структур в приземном слое. В связи с этим необходимо развитие теоретических представлений о нестационарных электрических и метеорологических процессах в нижних слоях атмосферы и их взаимодействия с верхней атмосферой.

Процессы обмена в приземном слое атмосферы являются нестационарными вследствие зависимости нагрева атмосферы и горизонтальной скорости ветра от времени. В течение суток это может приводить к изменению стратификации приземного слоя. Нестационарность турбулентных термодинамических процессов выражается в виде зависимости коэффициента турбулентного обмена от времени, который имеет суточный ход. Это приводит к нестационарным электрическим процессам в приземном слое в течение суток, проявляющимся в изменении напряженности электрического поля (E) и электрической проводимости воздуха (λ) в приземном слое со временем. С другой стороны, временные вариации электрических характеристик в приземном слое могут быть обусловлены нестационарностью электрических полей и токов выше приземного слоя, в частности, определяться глобальными электрическими процессами в верхних слоях атмосферы.

На протяжении последних нескольких десятилетий ведется дискуссия о возможности выделения глобальных эффектов в атмосферном электричестве по данным наземной сети [4, 8]. Существуют две крайние точки зрения. Первая утверждает, что локальные возмущения приземного слоя и аэрозоль в атмосфере обуславливают и большую изменчивость электрических данных, и появление особенностей в суточном и сезонном ходах, что на их фоне невозможно выделение глобальных вариаций электрического поля [4]. Вторая предполагает, что при наличии длинных рядов наблюдений, используя специальные статистические методы и предъявляя жесткие требования к методике измерений, в особенности к размещению аппаратуры, подобная задача может быть решена.

Реально дело обстоит так, что в некоторых местах влияние локальных факторов незначительно и глобальные эффекты на их фоне легко выделяются, а в других это сделать

практически невозможно. Ярким примером первого случая является глобальная унитарная вариация градиента потенциала, хорошо проявляющаяся при наблюдениях в океане [1,4,8]. Но на континентальных станциях решение этой задачи весьма затруднено [4]. Этот факт объясняется прежде всего тем, что на континенте атмосфера обладает большим загрязнением аэрозольными частицами, чем в открытом океане. Кроме того, в качестве локального источника объемного электрического заряда может выступать обменный (конвективный) генератор [4].

Можно предполагать, что континентальные станции при отсутствии на них значительных загрязнений могут быть глобально-репрезентативными в электрическом отношении. Примером этому могут служить пункты наблюдения, расположенные в высокогорных районах [1,3,6,8,9], где отсутствуют сильные источники ионизации, а концентрации аэрозольных частиц малы. Хотя и в горных условиях при достаточно значительных скоростях ветра и, следовательно, развитой турбулентной диффузии, которая разрушает объемный заряд, может возникнуть обменный генератор.

Таким образом, отбрасывая влияние изменений концентрации аэрозольных частиц в атмосфере, способных при достаточно больших концентрациях влиять на ее электрическое состояние, остается рассмотреть вопрос об изменчивости электрических характеристик под влиянием электродного эффекта. Под электродным эффектом в атмосфере понимают совокупность процессов, происходящих вблизи поверхности земли, приводящих к появлению зависимости электрических характеристик атмосферы от расстояния до нее. В условиях «хорошей погоды» толщина электродного слоя меняется от нескольких десятков сантиметров до десятков метров. Электрические характеристики приземного слоя атмосферы определяются степенью ионизации воздуха, турбулентным и конвективным переносом, аэрозольным и радиоактивным загрязнением воздуха. Кроме того, существенное влияние на них оказывают метеорологические факторы.

Процессы ионизации воздуха обуславливаются как естественными, так и искусственными причинами. Последние, как и загрязнения воздушной среды, могут быть связаны с антропогенным воздействием на атмосферу.

В теории проблема электродного эффекта формулируется в виде задачи о нахождении распределения концентрации положительных и отрицательных легких ионов (аэроионов), напряженности электрического поля и плотности электрического тока в приземном слое. В зависимости от метеорологического режима атмосферы рассматриваются два крайних случая: классический (нетурбулентный) электродный эффект и турбулентный электродный эффект. Первый имеет место при отсутствии турбулентного перемешивания в атмосфере.

При этом предполагается, что пространственно-временное распределение аэроионов в приземном слое обусловлено только электрическими силами.

Во втором случае предполагается, что перенос аэроионов в атмосфере осуществляется, наряду с электрическими силами, турбулентными потоками воздуха, причем турбулентность может играть основную роль. Присутствие аэрозольных частиц в атмосфере, являющихся стоком для аэроионов, оказывает влияние на электродный эффект. При достаточно больших концентрациях электрическое состояние приземного слоя может определяться только тяжелыми ионами, образовавшимися за счет взаимодействия аэрозоля с аэроионами.

Для горизонтально-однородного свободного от аэрозоля турбулентного приземного слоя исходная система уравнений может быть представлена к виду [2,4,7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} \cdot n_{1,2} E) - \frac{\partial}{\partial z} (D_T(z,t) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z}) &= q - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{\partial E}{\partial z} &= 4\pi e(n_1 - n_2). \end{aligned} \quad (1)$$

где $D_T(z,t)$ – коэффициент турбулентной диффузии легких ионов (аэроионов).

Характерное время протекания метеорологических гидродинамических процессов (T) составляет несколько часов, тогда как время протекания электрических процессов $\tau = 250$ с для $q = 10^7 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ и $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3\text{с}^{-1}$. Поэтому во многих случаях стационарное приближение для описания электродного эффекта в приземном слое правомерно.

Система уравнений классического электродного эффекта для свободного от аэрозоля приземного слоя может быть записана в виде [2]:

$$\begin{aligned} \pm \frac{d}{dz} (b_{1,2} n_{1,2} E) &= q(z) - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{dE}{dz} &= 4\pi e(n_1 - n_2). \end{aligned} \quad (2)$$

$$n_2(z=0), n_{1,2}(\infty) = (q(\infty)/\alpha)^{1/2}; E(0) = E_0 \text{ (или } E(\infty) = j_0/\lambda_\infty \text{)},$$

где j_0 – плотность электрического тока.

В соответствии с работой [4] можно сделать следующие выводы о классическом электродном слое. Электрическая структура нетурбулентного приземного слоя атмосферы определяется действием классического электродного эффекта. Распределение электрических характеристик в электродном слое зависит от степени ионизации воздуха, величины электрического поля и концентрации аэрозольных частиц в атмосфере.

Значение электродного эффекта (E_0/E_∞) в свободной от аэрозоля атмосфере при усилении электрического поля у поверхности земли практически не меняется, а толщина электродного слоя и, следовательно, масштаб распределения электрических величин увеличивается. Как следствие этого, изменяются параметры электродного эффекта: электродный эффект E/E_∞ на высоте нескольких метров с усилением поля на поверхности увеличивается, отношение n_1/n_∞ практически не меняется, отношение n_2/n_∞ уменьшается.

Усиление электрического поля у земли при наличии аэрозоля в атмосфере, так же как и в чистой атмосфере, приводит к увеличению электродного эффекта E/E_∞ на высоте нескольких метров, но в меньшей степени. При этом параметры электродного эффекта меняются: отношения n_2/n_∞ уменьшается, а отношение n_1/n_∞ практически остается постоянным.

В условиях «хорошей погоды» объемный электрический заряд вблизи поверхности земли положителен, а масштаб его распределения определяется толщиной электродного слоя и составляет несколько метров. Значения плотности объемного электрического заряда определяются как мощностью источника ионообразования, так и величиной электрического поля.

Отрицательный объемный заряд появляется при наличии тонкого слоя повышенной ионизации вблизи поверхности земли (несколько десятков сантиметров) и приводит к реверсу электродного эффекта. Такой же эффект возникает при небольшой степени ионизации воздуха, но при слабых электрических полях (порядка нескольких десятков В/м). При усилении электрического поля или увеличении масштаба распределения функции ионообразования объемный заряд становится положительным.

Для турбулентного электродного эффекта уравнения с граничными условиями представляются в виде [4,7]:

$$-\frac{d}{dz} \left(D_T(z) \frac{dn_{1,2}}{dz} \right) \pm \frac{d}{dz} (b_{1,2} n_{1,2} E) = q(z) - \alpha n_1 n_2,$$

$$\frac{dE}{dz} = 4\pi e(n_1 - n_2), \quad (3)$$

$$n_1(z=z_0)=n_2(z=z_0)=0; \quad n_1(\infty) = n_2(\infty) = (q(\infty)/\alpha)^{1/2}; \quad E_\infty = \frac{j_0}{\lambda_\infty}.$$

Введение параметра шероховатости z_0 , зависящего от числа Рейнольдса, эквивалентно определению характера динамического взаимодействия турбулентного потока с подстилающей поверхностью. В случае аэродинамически гладкой поверхности параметр $z_0 = 0$.

Турбулентный электродный слой характеризуется следующим [2,4,6,7]:

– При наличии турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы его электрическая структура определяется действием турбулентного электродного эффекта. В отличие от классического электродного эффекта, перенос аэроионов осуществляется турбулентной диффузией, наряду с электрическими силами. Коэффициент турбулентной диффузии аэроионов обуславливается метеорологическими условиями в атмосфере.

– При небольших скоростях ветра ($\sim 1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) и, следовательно, коэффициентах турбулентности ($D_I \approx 0,02-0,03 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) профиль концентрации положительных ионов n_1 очень быстро растет и на высоте приблизительно 1 м достигает своего асимптотического значения. Положительный объемный заряд вблизи поверхности в этом случае максимален, а на высоте 6 м разница в значениях n_1 и n_2 уже не превышает 5 %.

– При увеличении скорости ветра в приземном слое толщина электродного слоя и масштаб распределений электрических характеристик увеличиваются и достигают нескольких десятков метров. Электродный эффект на высоте до 2 метров (стандартной для установки датчиков при атмосферно-электрических наблюдениях) увеличивается, но отношение E_0/E_∞ остается постоянным. Это объясняется тем, что турбулентность «размывает» объемный заряд, образующийся вблизи поверхности земли, но не является дополнительным генератором объемного заряда.

– При скорости ветра $5-6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ($D_I \approx 0,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) профили n_1 и n_2 становятся близкими, и разница значений на высоте 1 м не превышает 10 %. Объемный заряд положителен, но его значения уменьшаются по сравнению с классическим электродным эффектом.

– При повышенной ионизации [5] в тонком слое у земли и небольшой скорости ветра (до $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) вблизи поверхности земли появляется отрицательный объемный заряд, как и в случае классического электродного эффекта, при этом масштаб его распределения увеличивается (до 10–15 м), а величина уменьшается. При усилении турбулентного перемешивания или электрического поля объемный заряд становится положительным.

– Электрическая структура приземного слоя в сильном электрическом поле (порядка 500 В/м) характеризуется ослаблением влияния турбулентности. Положительный объемный заряд увеличивается, электродный эффект вблизи поверхности земли усиливается, и распределения электрических величин становятся похожими на классический электродный эффект.

Использование различных типов моделей электродного эффекта для описания электрических процессов в приземном слое атмосферы должно быть обосновано соответствующими физическими и метеорологическими условиями.

Рассмотрим теперь вопрос о выделении на этом фоне глобальных эффектов в атмосферном электричестве. Для этого необходимо уточнить, как мы понимаем турбулентную диффузию в приземном слое: как глобальный или локальный фактор. Тот факт, что турбулентное перемешивание в атмосфере происходит в любом месте земной поверхности и при этом имеет четко выраженный суточный ход, обусловленный разницей ночных и дневных температур, отражает глобальную сторону этого метеорологического процесса [14]. С другой стороны, суточные колебания, связанные с турбулентной диффузией, происходят по местному времени, тогда как, например, глобальная унитарная вариация градиента потенциала электрического поля атмосферы проявляется одновременно на всем земном шаре вне зависимости от месторасположения пункта наблюдений во временном поясе [4]. Поэтому выделение такого периодического сигнала на фоне локальных факторов достаточно просто решаемая задача, особенно при использовании данных по нескольким станциям.

Гораздо сложнее обстоит дело, когда глобальное возмущение является эпизодическим, например, эффект влияния солнечной вспышки на электрическое поле. В этом случае необходимы детальный анализ возмущения, происходящего в электрическом поле, и определение, не связан ли он с локальными причинами, о которых говорилось выше.

Для решения задач атмосферно-электрического мониторинга можно сделать следующие рекомендации для станций наземной сети [3,4,6,8]:

1. Для решения задач фоновго мониторинга атмосферно-электрических параметров при размещении пунктов наблюдения необходимо выбирать районы, в которых концентрации аэрозольных частиц незначительны (менее 10^9 м^{-3}). На континентах такими районами могут быть полярные или высокогорные области.
2. Дополнить состав измеряемых электрических параметров сопутствующей метеоинформацией, спектральным составом аэрозольных частиц, а также контролем радиоактивности воздуха.
3. При анализе атмосферно-электрических данных по условиям невозмущенной погоды современную методику анализа электрических данных следует доработать. Например, разделять данные по типу и значениям параметров турбулентного перемешивания в приземном слое.
4. В частности, успешным представляется сортировка электрических данных по значениям и направлениям скорости ветра. При этом обязательно соблюдать условие о малости концентрации аэрозольных частиц.

Список литературы

1. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. 137 с.
2. Болдырев А.С., Клово А.Г., Куповых Г.В. О взаимодействии аэрозольных частиц с аэроионами в приземном слое атмосферы // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2006. Т. 64. № 9-2. С. 63-64.
3. Ваюшина Г.П., Куповых Г.В., Мартынов А.А., Соколенко Л.Г. и др. Результаты наблюдений за атмосферным электричеством на горной станции Пик Чегет в Приэльбрусье // Труды ГГО. Вып. 545. СПб.: Гидрометеиздат, 1995. С. 36-46.
4. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
5. Новикова О.В., Редин А.А., Болдырев А.С., Болдырева К.А., Пестов Д.А. Электродинамическая модель приземного слоя атмосферы с учетом массопереноса радона в грунте и над поверхностью земли // Научная мысль Кавказа. 2012. № 4. С. 98-102.
6. Boldyrev A., Kupovykh G., Redin A. Surface layer electrodynamic structure according to the meteorological state. Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Electronic Computer Technology 2010 International Conference on Electronic Computer Technology, ICECT 2010. Kuala Lumpur, 2010. P. 247-251.
7. Boldyreff A., Kupovykh G., Redin A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer. Journal of Electrostatics. Elsevier. 71. 2013. P. 305-311.
8. Kupovykh G., Boldyrev A. Alpine Atmospheric Electricity Monitoring on the Peak Terskol in 2004-2005. International Conference on Atmospheric Electricity ICAE 2007. Beijing. China.
9. Kupovykh G., Morozov V, Shvartz Ya. Electrode Effect under Alpine Conditions // Proc. 11th Int. Conf. on Atmosph. Electr., Versailles, 2003. 4 p.
10. Mauchly S.J. Diurnal variation on the potential gradient of atmospheric // Terr. Magn. Atm. El. V. 28. 1923. P.61-81.

Рецензенты:

Илюхин А.А., д.ф-м.н., профессор, профессор кафедры математического анализа Таганрогского государственного педагогического института имени А.П. Чехова, г. Таганрог.
Жорник А.И., д.ф-м.н., профессор, профессор кафедры теоретической, общей физики и технологии Таганрогского государственного педагогического института имени А.П. Чехова, г. Таганрог.