УДК 551.594

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРОЗ С УЧЁТОМ ТУРБУЛЕНТНЫХ ЭФФЕКТОВ

С. О. Дементьева, Е. А. Мареев*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Проведено исследование воздействия турбулентности на электризацию грозовых облаков. Выполнены аналитические оценки обусловленных турбулентными эффектами возмущений электрических параметров (в частности, тока зарядки) при различных характеристиках турбулентности и гидрометеоров. Полученные результаты использованы для совершенствования параметризации электрических процессов. Детальное сравнение результатов численного моделирования грозовых событий без учёта и с учётом турбулентных эффектов позволило выявить ряд характерных особенностей в изменении распределений электрических параметров грозового облака. Обнаружены и проанализированы различные сценарии вариации электрических параметров при учёте высокого уровня турбулентности в грозовых облаках: интенсификация электрических процессов в целом без существенного изменения структуры электрически активных зон; рост электрического потенциала вблизи максимальных значений с одновременным уменьшением потенциалов на периферии; рост электрического потенциала со слиянием близлежащих зон максимальных значений потенциала.

ВВЕДЕНИЕ

Своевременный прогноз грозовых событий является важной и актуальной задачей как внутри научного сообщества, так и за его пределами. В первую очередь это связано с высоким ущербом, который наносит этот вид опасных быстроразвивающихся природных явлений. Существующие численные прогнозные модели могут помочь в решении данной задачи, однако многие физические процессы в них не заложены, или их описание требует существенных доработок. Такие процессы включают, в частности, электризацию грозовых облаков и турбулентное перемешивание частиц внутри облака. Так, например, различными научными группами были развиты аналитические и численные модели роста крупномасштабного электрического поля в грозовых облаках в отсутствие турбулентности [1–5]. Влияние турбулентности на мелкомасштабные флуктуации электрического поля в пограничном слое атмосферы рассматривалось в работах [6, 7]. При этом учёт влияния турбулентности на грозовую электризацию, которая имеет особое значение для инициации молнии, в современных численных моделях не проводился.

В работе [8] авторами данной статьи был предложен подход к описанию электрических процессов в двухкомпонентной турбулентной среде, в частности в грозовом облаке, и разработан метод, позволяющий оценить роль турбулентности в данных процессах. Полученные результаты позволили выявить условия, при которых турбулентность значительно усиливает процессы электризации в грозовых облаках. Это дало основание полагать, что более детальное исследование воздействия турбулентности на электризацию грозовых облаков и численное моделирование грозовых событий с учётом турбулентных эффектов будут полезны для понимания физических механизмов, играющих первостепенную роль в грозовой электродинамике, и позволят улучшить качество численного моделирования конвективных событий. Параметризация электрических характеристик без учёта турбулентных эффектов была разработана в [4] и затем применялась в [5] для прогноза грозовых событий.

* svetadem91@mail.ru

В рамках данной работы проведено теоретическое и численное исследование воздействия колмогоровской турбулентности на безындукционную электризацию грозовых облаков. Для этого с использованием методов статистической радиофизики для описания случайных процессов выполнены аналитические оценки возникающих при наличии турбулентности изменений электрических параметров. С учётом полученных результатов разработаны параметризации электрических процессов, применяемые совместно с существующими численными моделями прогноза погоды. Для исследования возникающих в грозовых облаках эффектов проведено численное моделирование грозовых событий.

1. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ

Электризация грозовых облаков связана с переносом электрического заряда сталкивающимися частицами, который сопровождается ростом крупномасштабного электрического поля и, как следствие, появлением электрических разрядов. Схожие процессы можно наблюдать во многих природных и антропогенных явлениях: в метелях, пылевых бурях, извержениях вулканов, при помоле мелкодисперсных круп (например, на мукомольных фабриках). Обычно электризация происходит в потоках воздуха с высоким уровнем турбулентности, однако на данный момент достаточно мало исследований посвящено влиянию турбулентности на процессы электризации. Возникновение флуктуаций относительной скорости частиц, обусловленных турбулентным перемешиванием частиц различных масс, является одной из характерных особенностей турбулентности в многокомпонентных средах, наблюдающихся в перечисленных выше явлениях. При этом ток зарядки зависит от относительной скорости частиц, а значит и от её турбулентных флуктуаций. Следовательно, турбулентность может существенно влиять на разделение зарядов и рост крупномасштабного электрического поля. Исходя из данных рассуждений, кажется интересным исследование эффектов, возникающих при учёте турбулентности в моделях грозовой электризации.

Грозовые и конвективные облака представляют собой слабопроводящую среду, содержащую несколько типов гидрометеоров и аэрозолей. Многочисленные соударения этих частиц сопровождаются переносом электрического заряда, что приводит к быстрому росту крупномасштабного электрического поля. Подробное описание турбулентности, наблюдающейся в грозовых облаках, представляет довольно сложную задачу, поэтому для проведения первичных расчётов и оценок применяются упрощённые модели. Такой анализ необходим для выявления физических процессов, играющих главную роль в грозовой электродинамике, и их дальнейшего включения в численные модели грозовой электризации (см. например, [3, 4]).

Для эффективной электризации грозовых облаков необходимо наличие как минимум двух типов гидрометеоров с различными свойствами. По этой причине в данной работе будет рассмотрено облако, содержащее частицы снежной крупы с радиусом $1 \div 2$ мм и ледяные кристаллы с радиусом $50 \div 100$ мкм [9–11]. Предшествующие работы содержат множество исследований, посвящённых различным физическим механизмам и факторам, влияющим на перенос заряда (см., например, [9, 10]). В целом, все механизмы могут быть разделены на два класса: индукционные и безындукционные. Индукционной зарядкой принято называть разделение электрического заряда при столкновении двух частиц, поляризованных во внешнем электрическом поле. Безындукционная зарядка обычно означает, что разделение заряда происходит из-за различия физико-химических свойств сталкивающихся частиц. Таким образом, электрический заряд, переносимый за соударение, зависит от напряжённости электрического поля при индукционном разделении заряда и не зависит при безындукционном. При этом в обоих случаях в системе существует выделенное направление, которое мы выберем в качестве оси z. Стоит отметить, что в настоящее

время считается, что безындукционное разделение заряда на сталкивающихся частицах снежной крупы и льда при наличии мелких капель воды играет наиболее важную роль в электризации грозовых облаков [2, 10, 12–14], поэтому в данной статье основным механизмом зарядки будем считать безындукционный.

Основной задачей, рассматриваемой в данной работе, является исследование эффектов, возникающих при учёте турбулентности в колмогоровском приближении в процессах безындукционной электризации грозовых облаков. Анализ турбулентных эффектов в грозовых облаках представляет собой сложную (в общем случае нелинейную) задачу, связанную с описанием большого количества флуктуирующих физических параметров. Для её решения в данном исследовании применяется статистический подход, в основе которого лежит работа с усреднёнными величинами (подобный подход часто используется в радиофизике для описания различных случайных процессов, в частности шумов). Анализ эффектов, вызываемых турбулентностью при электризации грозовых облаков, следует начать с уравнения, описывающего эволюцию электрического поля $\mathbf{E}$:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 4\pi(\mathbf{J} - \mathbf{j}_{\mathrm{cd}} - \mathbf{j}_{\mathrm{dif}}), \tag{1}$$

где $\mathbf{J}$ — ток зарядки, $\mathbf{j}_{\mathrm{cd}} = \sigma\mathbf{E}$ — ток проводимости, σ — проводимость среды, $\mathbf{j}_{\mathrm{dif}}$ — ток диффузии. Величину последнего можно оценить формулой $j_{\mathrm{dif}} = -D(\partial^2 E)/(\partial z^2) \approx -(V_{\mathrm{ed}}L_0)/(L_{\mathrm{f}}^2)E$, где D — коэффициент диффузии, V_{ed} — характерная турбулентная скорость, L_0 — характерный внешний масштаб турбулентности, L_f — характерный масштаб изменения крупномасштабного электрического поля. Проведённые оценки параметра $(V_{\mathrm{ed}}L_0)/(L_{\mathrm{f}}^2\sigma)$, характеризующего отношение токов диффузии и проводимости, показали, что ток проводимости на несколько порядков превосходит ток диффузии, а следовательно, в дальнейшем слагаемое, связанное с током диффузии, можно опустить. Предполагая, что рассматривается квазиэлектронейтральная система, можно записать ток зарядки в виде

$$\mathbf{J} = QN\mathbf{V} + qn\mathbf{v} = QN\mathbf{U}, \tag{2}$$

где Q и q — заряды, N и n — концентрации, $\mathbf{V}$ и $\mathbf{v}$ — скорости больши́х и малых частиц соответственно, $\mathbf{U}$ — их относительная скорость. Для описания динамики системы будет применяться двухмасштабная аппроксимация: электрическое поле, ток зарядки, относительная скорость и заряды будут представлены как сумма их средних значений (математических ожиданий) и флуктуаций, средние значения которых равны нулю. В этом предположении $Q = Q_0 + Q_1$, $U_z = U_0 + U_1$, где $\langle Q\rangle = Q_0$, $\langle Q_1\rangle = 0$, $\langle U_z\rangle = U_0$, $\langle U_1\rangle = 0$, а среднее значение тока зарядки может быть выражено в виде суммы

$$J_{0z} = \langle QNU_z\rangle = \langle Q_0NU_0\rangle + \langle Q_1NU_1\rangle = J' + J'', \tag{3}$$

где J' отвечает средним значениям заряда и относительной скорости, а J'' — средним значениям их флуктуаций (угловые скобки обозначают усреднение по времени и пространству). Слагаемые $\langle Q_1NU_0\rangle$ и $\langle Q_0NU_1\rangle$ равны нулю, вследствие чего они в уравнении (3) опущены.

Эволюция зарядов больши́х и малых частиц в случае интенсивной зарядки может быть описана в квазигидродинамическом приближении. Подробный вывод выражений для зарядов больши́х и малых частиц приведён в работе [8], в которой установлено, что эти заряды могут быть записаны в виде

$$Q = -\eta\delta q\,\nu_Q/\nu_{\mathrm{r}}, \tag{4}$$

$$q = \eta\delta q\,\nu_q/\nu_{\mathrm{r}}. \tag{5}$$

Здесь $\eta = [1 + \pi^2/6(r/R)^2]^{-1}$ — безразмерная положительная функция отношения размеров частиц, описывающая влияние их геометрических размеров на величину разделяемого заряда, δq — заряд, разделяемый за одно соударение изначально незаряженных частиц, $\nu_Q = S\,|U_z|\,n$ и $\nu_q = S\,|U_z|\,N$ — средние частоты столкновений частиц с радиусами R и r соответственно ($R \gg r$), $S = \pi(r+R)^2$ — сечение столкновения, $\nu_\mathrm{r} = \nu_\mathrm{i} + \eta\nu_q + (1-\eta)\nu_Q$ — обратное эффективное время установления заряда, ν_i — коэффициент прилипания ионов, который принят одинаковым для больши́х и малых частиц. Используя уравнения (3) и (4), можно найти J'':

$$J'' = \langle Q_1 N U_1 \rangle = \left\langle U_1 \left(\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}U}\right)\Bigg|_{U=U_0} N U_1 \right\rangle = \left(\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}U}\right)\Bigg|_{U=U_0} N\,\langle U_1^2 \rangle. \tag{6}$$

Для описания движения частиц осуществляется переход к спектральным представлениям, при этом считается, что спектр турбулентной скорости колмогоровский. Полный вывод выражения для среднего квадрата флуктуаций относительной скорости можно найти в работе [8], здесь приведём только результат. В предположении однородной и стационарной колмогоровской турбулентности средний квадрат флуктуаций (дисперсия) относительной скорости

$$\langle U_1^2 \rangle = b\left(\frac{\varepsilon}{k_0}\right)^{2/3}\left(1 - \frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^2, \tag{7}$$

где $b \approx 1{,}74$ — безразмерный коэффициент, ε — уровень диссипации турбулентной энергии, k_0 — обратный внешний масштаб турбулентности, ν_1 и ν_2 — обратные Стоксовы времена для больши́х и маленьких частиц ($\nu_2 \gg \nu_1$). Принимая во внимание тот факт, что в грозовых облаках величина установившегося электрического заряда определяется электроёмкостью больши́х частиц, а объёмная проводимость мала (вследствие чего выполнено условие $\nu_\mathrm{r} \gg \nu_\mathrm{i}$), подставим выражение (7) в формулу (6). Получаемая в результате компонента тока зарядки при безындукционном механизме разделения заряда имеет вид

$$J'' = b\left(\frac{\varepsilon}{k_0}\right)^{2/3}\left(1 - \frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^2 p\,\delta q U_0^{-1} N \eta\left[1 - \eta\left(1 - \frac{N}{n}\right)\right]^{-1}, \tag{8}$$

где $p = 2 \div 3$ — безразмерный параметр, который описывает зависимость величины δq от относительной скорости U ($\delta q \propto |U|^p$).

Таким образом, с помощью методов статистической радиофизики для описания случайных процессов были найдены оценки электрических параметров турбулентных зон грозовых облаков, которые продемонстрировали, что турбулентность при безындукционной зарядке вызывает линейный во времени рост электрического поля. Этот рост определяется добавкой к среднему значению тока зарядки, возникающей за счёт интенсивных флуктуаций электрического заряда.

Как известно, турбулентные процессы в облаках довольно сложны как для экспериментальных исследований, так и для теоретического анализа, поэтому чаще всего при описании турбулентности используются некоторые характерные значения основных параметров. В реальных процессах эти параметры имеют некоторый диапазон значений. Так, например, внешний масштаб турбулентности L_0 может меняться от десятков до сотен метров, а скорость диссипации турбулентной энергии ε принимает значения от 100 см^2 с$^{-3}$ в небольших облаках [15, 16], 200 см^2 с$^{-3}$ в развитой облачности [17], 700 см^2 с$^{-3}$ в областях глубокой конвекции [18] и до 2 000 см^2 с$^{-3}$ в больши́х кучево-дождевых облаках [19]. Размер частиц в грозовом облаке также может варьироваться. В расчётах, проведённых в данной работе, концентрации больши́х и малых частиц не изменялись и были равны $N = 10^{-2}$ см$^{-3}$ и $n = 500$ см$^{-3}$. Параметры гидрометеоров, используемые в вычислениях, соответствуют наблюдаемым в эксперименте уровням радиолокационной

Таблица 1. Соотношение флуктуационной и постоянной составляющей тока зарядки при безындукционном механизме зарядки для различных параметров грозового облака

r, мм	R, мм	U_0, м/с	L_0, м	J', нА/м^2	J'', нА/м^2 (J''/J', %)			
					$\varepsilon = 100$ см^2 с$^{-3}$	$\varepsilon = 200$ см^2 с$^{-3}$	$\varepsilon = 700$ см^2 с$^{-3}$	$\varepsilon = 2\,000$ см^2 с$^{-3}$
0,1	2,0	8,08	100	58,6	1,24 (2,12 %)	1,97 (3,36 %)	4,59 (7,76 %)	9,25 (15,62 %)
0,1	1,0	5,78	100	10,6	0,4 (3,77 %)	0,62 (5,9 %)	1,45 (13,68 %)	2,91 (27,45 %)
0,05	0,5	3,64	100	6,7	0,63 (9,43 %)	0,98 (14,89 %)	2,29 (34,28 %)	4,62 (69,16 %)
0,1	2,0	8,08	50	58,6	0,78 (1,335 %)	1,24 (2,12 %)	2,89 (4,89 %)	5,83 (9,84 %)
0,1	1,0	5,78	50	10,6	0,25 (2,36 %)	0,39 (3,72 %)	0,91 (8,58 %)	1,83 (17,26 %)
0,05	0,5	3,64	50	6,7	0,4 (5,99 %)	0,62 (9,38 %)	1,44 (21,56 %)	2,91 (43,56 %)
0,1	2,0	8,08	20	58,6	0,425 (0,725 %)	0,67 (1,15 %)	1,57 (2,65 %)	3,16 (5,34 %)
0,1	1,0	5,78	20	10,6	0,14 (1,32 %)	0,21 (2,02 %)	0,5 (4,72 %)	1,0 (9,43 %)
0,05	0,5	3,64	20	6,7	0,21 (3,14 %)	0,34 (5,09 %)	0,78 (11,68 %)	1,58 (23,65 %)

отражаемости [20]. Выполненные в данной работе оценки соотношения флуктуационной и постоянной составляющей тока зарядки в грозовом облаке при безындукционном механизме зарядки для различных параметров облака приведены в табл. 1.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В основе численного моделирования, результаты которого будут рассмотрены в данном разделе, лежит использование модели WRF-ARW [21]. Модель WRF представляет собой систему численного прогноза погоды и моделирования атмосферы, разработанную для исследовательских и прикладных задач; она применяется для большого количества приложений от маломасштабных задач до глобального моделирования. Она включает в себя большое количество параметризаций микрофизических процессов, облачной физики, планетарного пограничного слоя, подстилающей поверхности и излучения. Для прогноза грозовых событий авторами работы ранее была разработана параметризация электрических процессов [4, 5], применяемая совместно с численной моделью WRF, которая позволяет выполнять расчёт распределения электрического потенциала и электрического поля в грозовом облаке. В основе данной параметризации лежит предположение о безындукционном разделении заряда на двух типах твёрдых гидрометеоров, средние размеры которых отличаются. В рамках данной работы параметризация электрических процессов была модифицирована с учётом турбулентного перемешивания частиц в облаке. Влияние турбулентности на данном этапе исследований задаётся в виде увеличенного тока зарядки в областях грозового облака с высокой радиолокационной отражаемостью, где процессы разделения электрических зарядов, как правило, наиболее интенсивны. Величина дополнительной компонен-

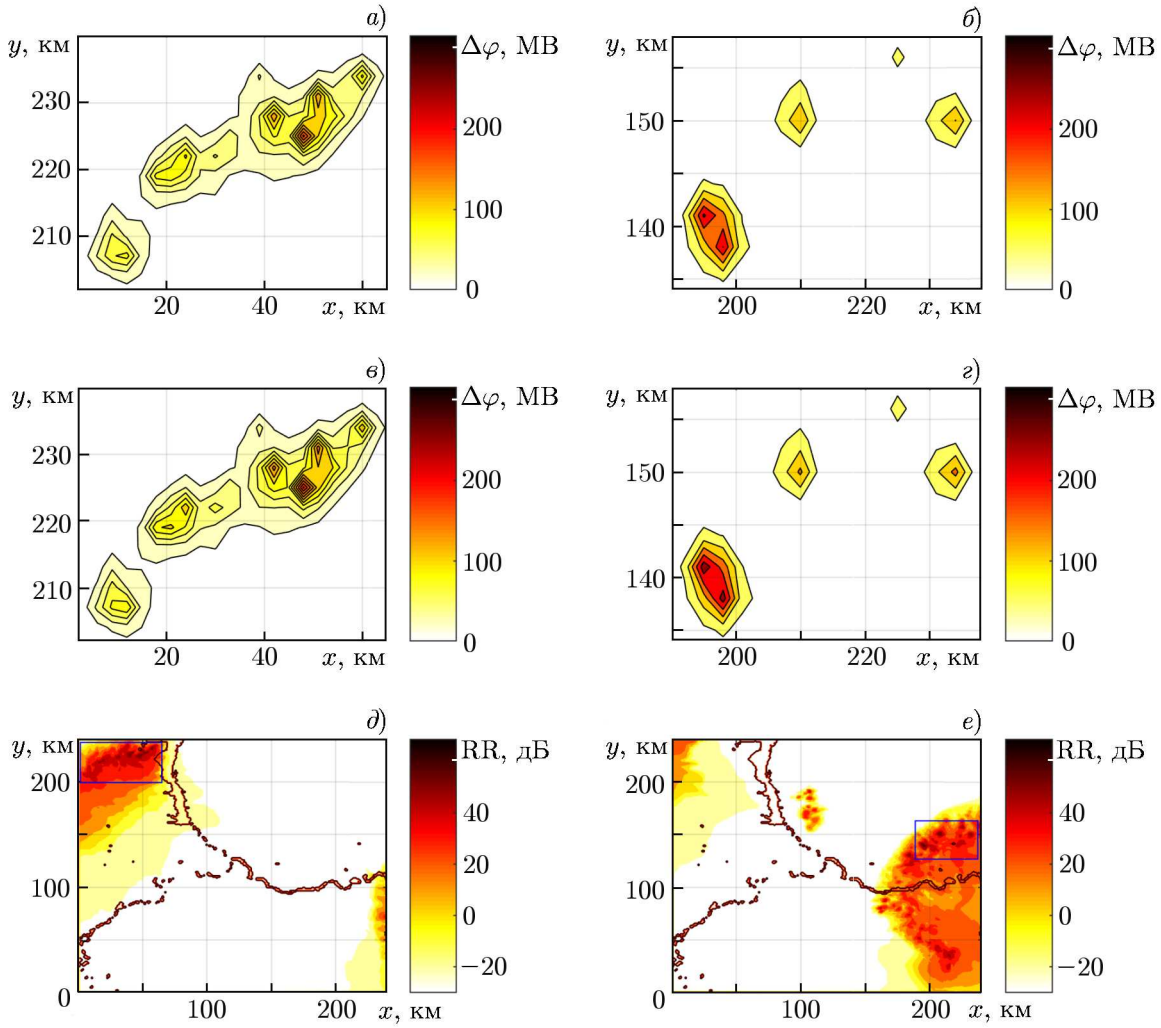

Рис. 1. Результаты моделирования грозы 23 июня 2013 года в 17:50 UTC (левый столбец) и в 18:50 UTC (правый столбец): разность потенциалов $\Delta\varphi$ между электрически активной зоной облака и землёй, полученная при моделировании без учёта (*а*, *в*) и с учётом (*б*, *г*) турбулентных эффектов, а также максимальная радиолокационная отражаемость RR (*д*, *е*, где прямоугольниками обозначена область, приведённая на панелях *а*–*г*)

ты тока зарядки, обусловленная турбулентным перемешиванием частиц, определяется исходя из результатов аналитических оценок, представленных в табл. 1. При этом соответствующие строки таблицы (величины r, R, U_0) в каждый момент времени выбирались исходя из наилучшего совпадения с данными модели WRF [21]. Дополненная параметризация электрических процессов была применена для прогноза и моделирования грозовых событий на территории Нижегородской области.

При моделировании конвективных событий с помощью модели WRF использовались две вложенные горизонтальные сетки центром в Нижнем Новгороде: внешняя расчётная область с размером 1 200×1 200 км и разрешением 3×3 км охватывает бóльшую часть Европейской территории России, внутренняя расчётная область с размером 210 × 210 км и с разрешением 1 × 1 км хорошо покрывает территорию Нижегородской области. В ряде случаев размер внутренней расчётной области увеличивался до 240×240 км с сохранением пространственного разрешения. В вертикаль-

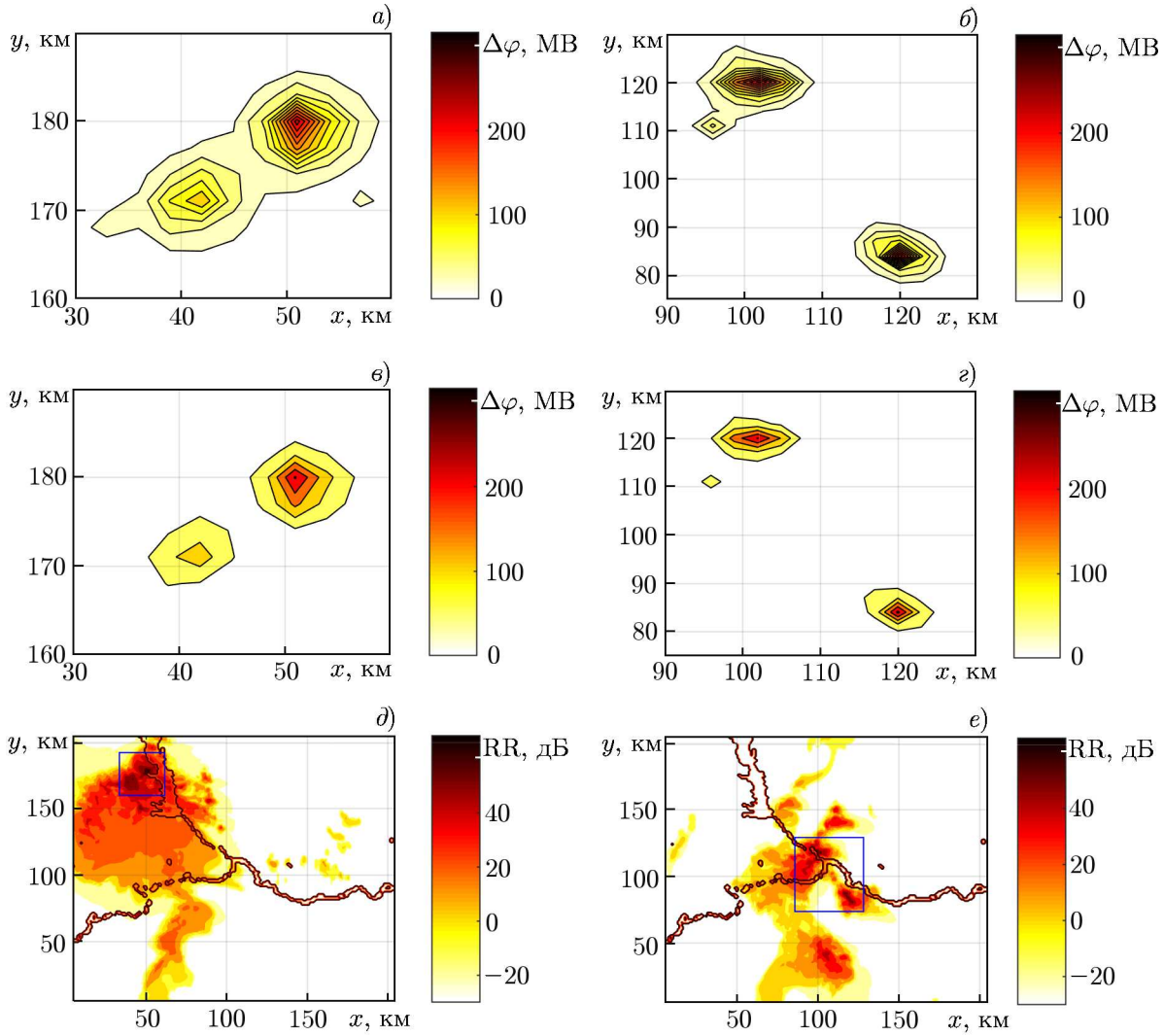

Рис. 2. То же, что рис. 1, для грозы 31 мая 2015 года в 14:40 UTC (левый столбец) и в 18:30 UTC (правый столбец)

ном направлении расчётная сетка представляет собой 40 уровней от 0 до 20 км. Электрические параметры рассчитывались только на внутренней сетке.

В качестве объектов моделирования были выбраны грозы, которые происходили на территории Нижегородской области 23 июня 2013 года, 31 мая 2015 года и 1 июня 2015 года. В указанных грозовых событиях наблюдалась интенсивная конвекция; это даёт основание считать, что уровень турбулентности в облаках был довольно высок. Параметры турбулентности при моделировании данных гроз были приняты следующими: $L_0 = 100$ м, $\varepsilon = 700$ см^2 с$^{-3}$. Учёт вклада турбулентности при расчёте электрических параметров позволил выявить ряд отличий в распределениях разности потенциалов и электрического поля в грозовых облаках для турбулентного и нетурбулентного случаев. Результаты моделирования грозы 23 июня 2013 года приведены на рис. 1, грозы 31 мая 2015 года — на рис. 2, грозы 1 июня 2015 года — на рис. 3 и 4. На панелях *а*, *б* данных рисунков изображена разность потенциалов между электрически активной зоной облака и землёй, полученная в результате моделирования без учёта турбулентности. На панелях *в*, *г* показана та же разность потенциалов, но найденная в результате моделирования с учётом турбулентности.

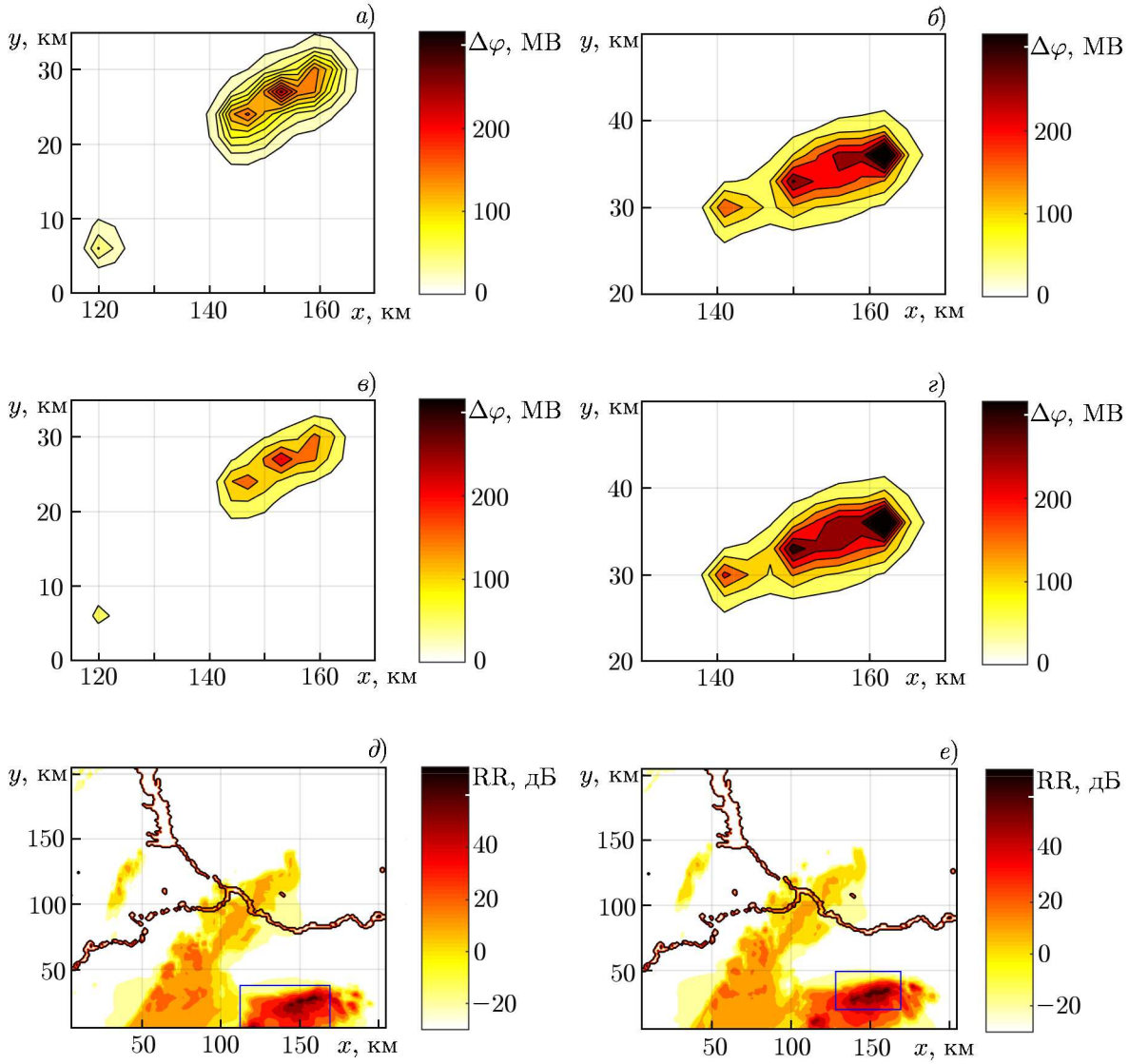

Рис. 3. То же, что рис. 1, для грозы 1 июня 2015 года в 18:10 UTC (левый столбец) и в 18:20 UTC (правый столбец)

На панелях *д*, *е* приведена общая картина максимальной радиолокационной отражаемости для указанных моментов времени, прямоугольниками выделена область, показанная на панелях *а*–*г*.

Анализируя данные результаты, можно отметить, что в целом учёт турбулентности при расчёте электрических параметров приводит к усилению электрических процессов в облаках с высоким уровнем турбулентности, что соответствует данным эксперимента. Проводя более детальный анализ, можно отметить ряд особенностей. Так, например, для грозы 23 июня 2013 года, наименее интенсивной из представленных (см. рис. 1), и для завершающей стадии развития грозового фронта 1 июня 2015 года (см. рис. 4) характерно увеличение электрических потенциалов с соответствующим ростом областей с высокими значениями потенциалов. Для более интенсивной грозы 31 мая 2015 года (см. рис. 2) и на начальном этапе развития грозы 1 июня 2015 года (рис. 3*а*, *в*, *д*) наблюдается уменьшение области высоких потенциалов, разъединение возникающих вокруг максимальных значений электрического потенциала ячеек с интенсификацией элек-

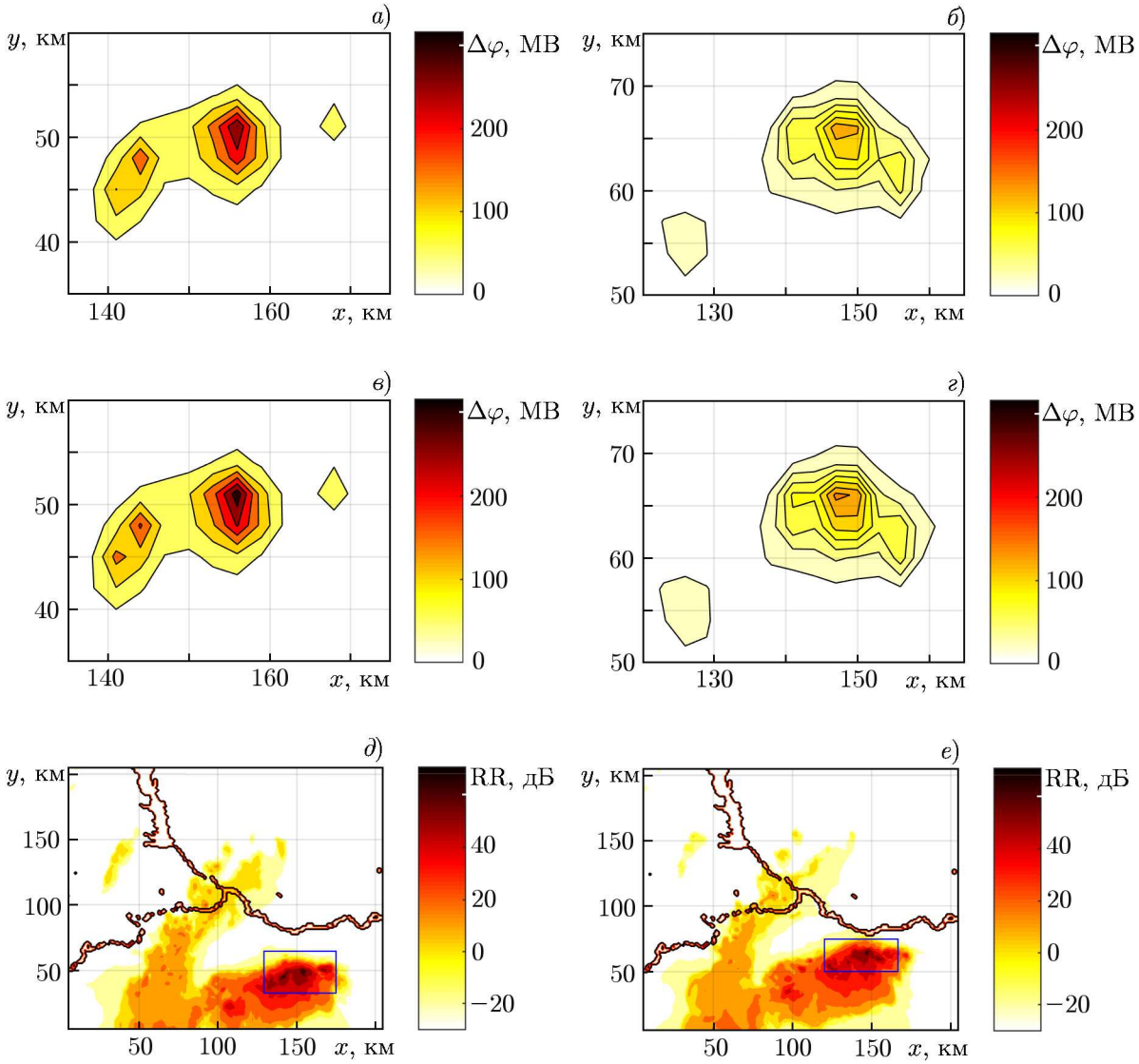

Рис. 4. То же, что рис. 1, для грозы 1 июня 2015 года в 18:40 UTC (левый столбец) и в 19:00 UTC (правый столбец)

трических процессов внутри каждой образовавшейся ячейки. Для наиболее интенсивной стадии развития грозы 1 июня 2015 года (см. рис. 3*б*, *г*, *е*) можно отметить не только рост электрического потенциала и усиление процессов электризации, но также и тенденцию к объединению двух областей максимальных значений электрического потенциала в одну ячейку. Описанные отличия связаны, в первую очередь, с интенсивностью турбулентного перемешивания и мощностью грозовых событий в целом. В первом случае за счёт преобразования кинетической энергии турбулентного перемешивания в энергию электрического поля наблюдается увеличение электрического потенциала. Во втором случае имеют место две явно выраженные области максимальных значений потенциалов, в которых за счёт турбулентности происходит значительный рост потенциалов. При этом в соединяющей их области электрические процессы недостаточно интенсивны, вследствие чего электрически активная зона распадается на две отдельные ячейки. Третий случай является наиболее интенсивным, так что кинетической энергии турбулентного перемешивания достаточно для того, чтобы усилить не только зоны максимальных значений потенциалов, но

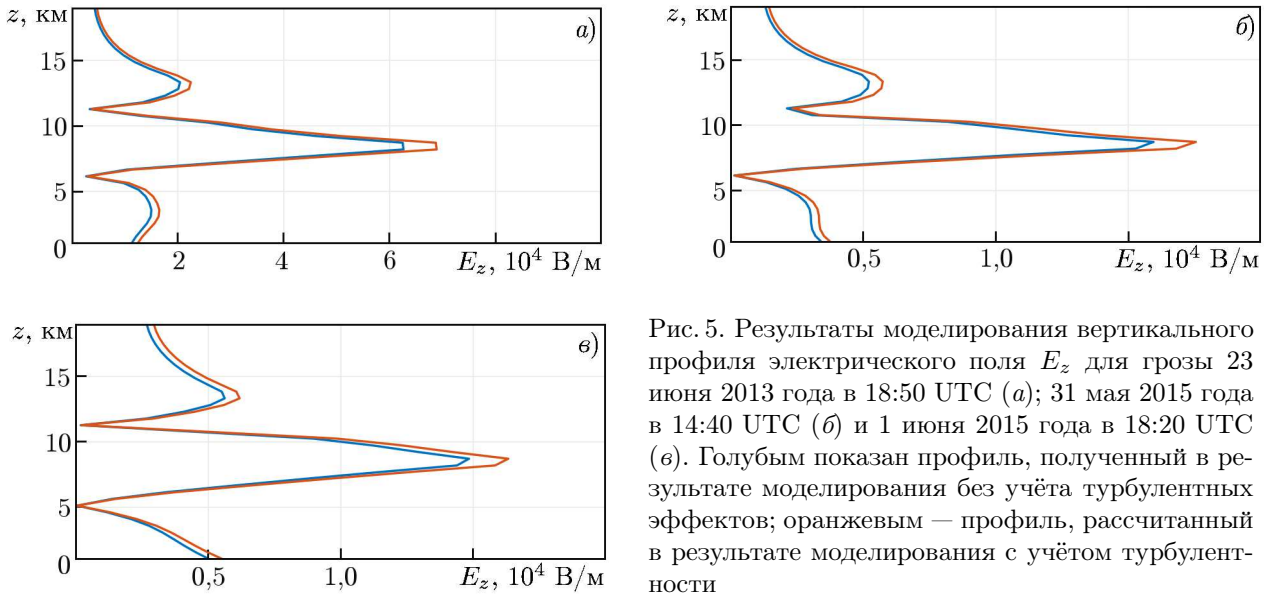

Рис. 5. Результаты моделирования вертикального профиля электрического поля E_z для грозы 23 июня 2013 года в 18:50 UTC (*а*); 31 мая 2015 года в 14:40 UTC (*б*) и 1 июня 2015 года в 18:20 UTC (*в*). Голубым показан профиль, полученный в результате моделирования без учёта турбулентных эффектов; оранжевым — профиль, рассчитанный в результате моделирования с учётом турбулентности

также и область между ними, что приводит к объединению электрически активных зон грозового облака.

На рис. 5 показаны вертикальные профили электрического поля для различных гроз. Голубым цветом показан профиль, полученный без учёта турбулентных эффектов, оранжевым — профиль, рассчитанный с учётом турбулентности. Можно увидеть, что турбулентность вызывает рост электрического поля. Также хорошо заметно, что наибольшие различия профилей электрического поля наблюдаются в районе максимумов, где его изменения особо важны в силу возможности возникновения электрических разрядов. При этом стоит также отметить, что рост электрического поля имеет нелинейный характер, т. е. его увеличение за счёт турбулентности происходит не пропорционально его величине.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность и значимость своевременного прогноза и качественного моделирования грозовых событий обусловлены высоким ущербом, наносимым данным видом опасных быстроразвивающихся природных явлений, которые, с учётом их масштаба распространения и продолжительности, оказывают поражающее воздействие на людей, объекты экономики и окружающую среду. Описание динамики электрических процессов в грозовых облаках представляет собой сложную задачу, для численного решения которой требуются больши́е вычислительные ресурсы. В связи с этим, прежде чем включать в численные прогнозные модели подробное описание электрических процессов, сопровождающихся турбулентным перемешиванием частиц, следует проверить, является ли роль турбулентности в этих процессах существенной. Данная статья содержит краткое описание всех стадий разработки модели электризации грозового облака, от теоретического рассмотрения процессов электризации с учётом турбулентных эффектов до опыта её практического применения при моделировании реальных грозовых событий. Применяемые в данной работе подходы могут быть также адаптированы для моделирования более широкого круга явлений (например, в астрофизике, гидро- и газодинамике).

В данной работе показано, что рост электрического поля, обусловленный безындукционным разделением заряда на сталкивающихся частицах, может быть заметно усилен благодаря турбу-

лентному перемешиванию частиц с различными массами. Линейный рост напряжённости электрического поля за счёт безындукционного механизма зарядки при наличии турбулентности может усилиться на несколько десятков процентов. Проведённые оценки были использованы для модернизации разработанной ранее параметризации электрических процессов [4], применяемой совместно с численной моделью WRF. Впервые выполнено моделирование электрических параметров реальных грозовых событий с учётом турбулентных эффектов. Проведено сравнение с результатами аналогичного моделирования без учёта турбулентности. В целом результаты моделирования соответствуют данным экспериментальных исследований грозовых облаков [22–24], демонстрируя усиление электризации в грозовых облаках с высоким уровнем турбулентности. Однако в зависимости от интенсивности конвективного события были выявлены имеющие нелинейный характер сценарии изменения электрических параметров, возникающего при учёте турбулентных эффектов.

В данной статье не рассматриваются эффекты, связанные с индукционной зарядкой гидрометеоров. Их первичные оценки приведены в работах [8, 25]. В частности, в этих работах показано, что при индукционной зарядке и некоторых параметрах облака наблюдается экспоненциальный во времени рост электрического поля, возникающий за счёт корреляции флуктуаций электрического заряда и относительной скорости. Сравнение индукционного и безындукционного механизмов разделения заряда в турбулентных грозовых облаках позволило обнаружить, что в отсутствие турбулентности безындукционный механизм играет первостепенную роль, приводя к достижению пробойного электрического поля раньше, чем индукционный механизм. Однако с ростом уровня диссипации турбулентной энергии вклад индукционной зарядки становится более значительным и при значениях, характерных для больши́х кучево-дождевых облаков, может быть сравним со вкладом безындукционного механизма. Существует ряд сложностей как для включения данного эффекта в численные модели, так и для его экспериментального наблюдения; тем не менее, описанный эффект представляет большой интерес и требует дальнейшего исследования.

Аналитические оценки проведены в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект 0035–2014–0034). Численное моделирование выполнено при поддержке РФФИ (проект 18–35–00673).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuettner J P., Levin Z., Sartor J. D. // J. Atmos. Sci. 1981. V. 38, No. 11. P. 2 470.
2. Mansell E. R., MacGorman D. R., Ziegler C. L., Straka J. M. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, No. D12. Art. no. D12101.
3. Mansell E. R., Ziegler C. L. // J. Atmos. Sci. 2013. V. 70, No. 7. P. 2 032.
4. Дементьева С. О., Ильин Н. В., Мареев Е. А. // Изв. РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 2. С. 210.
5. Шаталина М. В., Дементьева С. О., Мареев Е. А. // Метеорология и гидрология. 2016. № 11. С. 81.
6. Anisimov S. V., Mareev E. A., Shikhova N. M., Dmitriev E. M. // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, No. 24. P. 70.
7. Anisimov S. V., Mareev E. A., Shikhova N. M., et al. // Atmos. Res. 2005. V. 76, No. 1–4. P. 16.
8. Mareev E. A., Dementyeva S. O. // J. Geophys. Res. A. 2017. V. 122, No. 13. P. 6 976.
9. Pruppaher H. R., Klett J. D. Microphysics of clouds and precipitation. New York: Kluwer Academic Publ., 1997. 955 p.
10. Saunders C. // Space Sci. Rev. 2008. V. 137, No. 1–4. P. 335.

11. Mathpal K. C., Varshneya N. C., Narsingh D. // Rev. Geophys. 1980. V. 18, No. 2. P. 361.
12. Takahashi T. // J. Atmos. Sci. 1978. V. 35, No. 8. P. 1 536.
13. Saunders C. P. R., Keith W. D., Mitzeva R. P. // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, No. D6. P. 11 007.
14. Volland H. Atmospheric Electrodynamics. Berlin: Springer, 1985. 201 p.
15. Мазин И. П., Силаева В. И., Струнин М. А. // Изв. АН СССР. ФАО. 1984. Т. 20, № 1. С. 10.
16. Мазин И. П., Хргиан А. Х., Имянитов И. М. Облака и облачная атмосфера. Справочник. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1989. 647 с.
17. Ackerman B. // J. Appl. Meteorology. 1967. V. 6, No. 1. P. 61.
18. Panchev S. Random Fluctuations and Turbulence. Oxford: Pergamon, 1971. 458 pp.
19. Weil J. C., Lawson R. P., Rodi A. R. // J. Appl. Meteorology. 1989. V. 32. P. 1 055.
20. Брылёв Г. Б., Гашина С. Б., Низдойминога Г. Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков, Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. 234 с.
21. https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model
22. Bateman M. G., Rust W. D., Smull B. F., Marshall T. C. // J. Geophys. Res. 1995. V. 100, No. D8. P. 16 341.
23. Marshall T. C., Rust W. D., Winn W. P., Gilbert K. E. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94, No. D2. P. 2 171.
24. Stolzenburg M., Marshall T. C., Krehbiel P. R. // J. Geophys. Res. 2015. V. 120, No. 21. P. 11 253.
25. Дементьева С. О., Мареев Е. А. // Изв. РАН. ФАО. 2018. Т. 54, № 1. С. 28.

Поступила в редакцию 17 мая 2018 г.; принята в печать 26 сентября 2018 г.

MODELING OF ELECTRIC PARAMETERS OF THUNDERSTORMS INCLUDING TURBULENT EFFECTS

S. O. Dementyeva and E. A. Mareev

We study the effects of turbulence on the electrification of thunderclouds. Analytical estimates of the disturbances of electric parameters (in particular, charging current) stipulated by turbulent effects are performed for different parameters of turbulence and hydrometeors. The obtained results are used to improve the parameterization of electric processes. A detailed comparison of the results of numerical simulation of thunderstorm events with and without taking into account turbulent effects revealed some characteristic features in the change of the electric parameter distributions in a thundercloud. Various scenarios of the electric parameter variations due to taking into account a high level of turbulence in thunderclouds are found and analyzed. They are (1) general intensification of the electric processes without any significant change in the structure of the electrically active areas; (2) an increase in the electric potential near the maximum values with a simultaneous decrease in potentials at the periphery; (3) an increase in the electric potential with the fusion of nearby areas of the maximum values of the potential.