

УДК 551.594.2

Сравнительный анализ электрического состояния приземного слоя атмосферы при прохождении кучево-дождевых облаков в теплый и холодный периоды года

К.Н. Пустовалов, П.М. Нагорский*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634050, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 8.02.2018 г.

На основе данных мониторинга электрических величин приземного слоя атмосферы в Томске в 2006–2017 гг. исследованы их медленные вариации, связанные с прохождением кучево-дождевых облаков и сопутствующих атмосферных явлений в теплый и холодный периоды года. Всего рассмотрено 463 и 210 случаев для теплого и холодного периодов соответственно. Проведен статистический анализ медленных вариаций градиента потенциала электрического поля. Показано, что распределение общей длительности медленных вариаций градиента потенциала описывается степенным распределением (распределение Парето). Данное распределение в теплый период года аппроксимируется двумя участками, а в холодный период — одним.

Ключевые слова: атмосферное электричество, кучево-дождевые облака, ливневые осадки, приземный слой атмосферы; atmospheric electricity, cumulonimbus, showers, surface air layer.

Введение

Электрическое поле приземного слоя атмосферы тесно связано с оптической погодой и атмосферным аэрозолем, поэтому оно весьма чувствительно к метеорологическим условиям и существенно изменяется под влиянием облачности, особенно конвективных форм, и сопровождающих ее атмосферных явлений [1–3]. Это обстоятельство может быть использовано для диагностирования и уточнения метеорологических условий и условий переноса излучений в атмосфере на основе данных об электрических характеристиках приземного слоя. Однако для решения такой задачи требуется накопление надежных сведений об особенностях влияния метеорологических и иных факторов на приземное электрическое поле.

На данный момент проведены исследования влияния различных природных факторов на электрическое поле приземной атмосферы во многих регионах земного шара [4–10], однако полученные результаты дают лишь общие представления о закономерностях изменения напряженности электрического поля. Известно, что при прохождении кучево-дождевых облаков наблюдаются медленные (термин впервые введен А.Х. Филипповым [4]) вариации градиента

потенциала электрического поля ($\nabla\varphi$), обусловленные объемными зарядами в кучево-дождевых облаках и осадками, но не связанные с молниевыми разрядами. Полученные к настоящему времени оценки медленных вариаций градиента потенциала имеют главным образом качественный характер и не дают информации о детальной структуре этих вариаций.

Прохождение кучево-дождевых облаков (*Cb*) в любой сезон года вызывает наибольшие искажения приземного электрического поля [4–8]. Это обусловлено большими объемными зарядами, существующими в таких облаках [11]. Однако в теплый период года вертикальная мощность кучево-дождевых облаков, а следовательно, и величина объемных электрических зарядов в этих облаках значительно больше, чем в холодный [12–15]. Кроме того [4, 7], осадки в виде дождя и мокрого снега приводят к уменьшению $\nabla\varphi$ и переходу его в область отрицательных значений, в то время как снег и метель при прохождении *Cb* вызывают увеличение положительных значений $\nabla\varphi$. Таким образом, медленные вариации приземного электрического поля под воздействием кучево-дождевых облаков и сопутствующих атмосферных явлений в теплый и холодный периоды года должны существенно отличаться.

Цель данной работы — сравнительный анализ амплитуд и временной динамики медленных вариаций $\nabla\varphi$, зарегистрированных при прохождении кучево-дождевой облачности и сопутствующих ей атмосферных явлений в теплый и холодный периоды года.

* Константин Николаевич Пустовалов (const.pv@yandex.ru); Петр Михайлович Нагорский (npm_sta@mail.ru).

1. Экспериментальный материал и методика его обработки

Для оценки изменчивости медленных вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении Cb и сопутствующих им атмосферных явлений были использованы данные мониторинга метеорологических и атмосферно-электрических величин за период 2006–2017 гг., полученные в геофизической обсерватории Института мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН (г. Томск). Градиент потенциала электрического поля приземной атмосферы измерялся электрическим флюксометром «Поле-2», полярные электропроводности воздуха — с помощью прибора «Электропроводность-2», разработанными в ГГО им. А.И. Воейкова. Дополнительно были использованы данные об облачности и атмосферных явлениях в стандартные метеорологические сроки на метеостанции «Томск», расположенной примерно в 6 км от ИМКЭС СО РАН. За анализируемый период по методике [3, 16] из данных метеостанции были отобраны интервалы измерений $\nabla\varphi$ отдельно за теплое (май–сентябрь) и холодное (ноябрь–март) полугодия, характеризующиеся:

- 1) наличием кучево-дождевых облаков;
- 2) наличием ливневых осадков (ливневого дождя или снега соответственно);
- 3) отсутствием слоисто-дождевых (Ns), высоко-слоистых (As) и слоистых (St) облаков;
- 4) отсутствием обложных, морсящих, жидких и смешанных ливневых осадков;
- 5) отсутствием дымки, тумана и смога.

В отобранных данных вначале выявлялись участки с интенсивными изменениями величины и знака $\nabla\varphi$, связанные с прохождением Cb . При этом учитывалось, что интервал времени между отдельными событиями должен составлять не менее 30 мин [3, 16]. Всего было отобрано 463 и 210 случаев вариаций $\nabla\varphi$ во время прохождения Cb в теплый и холодный периоды года соответственно.

На следующем этапе проводилась оценка границ интервалов медленных вариаций $\nabla\varphi$. Для этой цели из данных $\nabla\varphi$ во время Cb выделялись отдельные структурные элементы вариаций — возмущения (d_n), имеющие как положительную, так и отрицательную полярности, в качестве которых принимались временные отрезки со значениями $\nabla\varphi < B_1$ и $\nabla\varphi > B_2$. Граничные значения B_1 , B_2 определялись как отклонения от значений $\nabla\varphi$, характерных для невозмущенной атмосферы ($B_0 \approx 150$ В/м), на величину $s_x = 450$ В/м для холодного сезона и $s_t = 750$ В/м для теплового: $B_1 = B_0 - s_{x,t}$, $B_2 = B_0 + s_{x,t}$, где $s_{x,t}$ — эмпирический коэффициент, позволяющий отделить вариации $\nabla\varphi$, обусловленные Cb , от влияния других сопутствующих форм облачности. Данные по $\nabla\varphi$ обрабатывались в интервале между началом первого и окончанием последнего возмущения.

Данные мониторинга градиента потенциала электрического поля показали, что при прохождении мощной конвективной облачности регистрируются медленные вариации градиента потенциала электри-

ческого поля, характеризующиеся изменением как абсолютной величины, так и знака $\nabla\varphi$ [15, 16]. При этом формы временной динамики $\nabla\varphi$ под воздействием Cb в теплый и холодный сезоны года имеют свои характерные особенности. Типичные примеры медленных вариаций атмосферно-электрических величин, а также температуры и атмосферного давления в теплый и холодный периоды года иллюстрируются рис. 1.

Для оценки структуры медленных вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевых облаков и сопутствующих им атмосферных явлений в теплое и холодное полугодия определялись следующие параметры: D_v — общая длительность медленных вариаций $\nabla\varphi$; A_v — амплитуда медленных вариаций $\nabla\varphi$; N_d — количество структурных элементов вариаций $\nabla\varphi$; N_{d+} — количество положительных возмущений; D_{d+} — длительность положительных возмущений; V_{d+} — средние значения $\nabla\varphi$ в пределах положительного возмущения; N_{d-} — количество отрицательных возмущений; D_{d-} — длительность отрицательных возмущений; V_{d-} — средние значения $\nabla\varphi$ в пределах отрицательного возмущения (рис. 2).

2. Полученные результаты и их анализ

Полученные в результате статистической обработки характеристики медленных вариаций $\nabla\varphi$ в теплый и холодный периоды года суммированы в табл. 1, а распределения средних значений $\nabla\varphi$ показаны на рис. 3. В холодное время года при прохождении Cb среднее значение $\nabla\varphi$ (табл. 1) превышает в 1,5 раза абсолютную величину аналогичного значения для теплового времени года и имеет противоположный знак. Однако среднеквадратичное отклонение средних значений $\nabla\varphi$ для теплового периода года в 1,8 раза больше, чем для холодного. При сравнении распределений $\nabla\varphi$ в теплый и холодный сезоны (см. рис. 3) выявлено смещение главной моды из области отрицательных значений $\nabla\varphi$ в область положительных. Интерквартильный размах (разница между 0,25- и 0,75-квантилями) средних значений $\nabla\varphi$ в теплый период в 1,8 раза больше, чем в холодный.

Сравнительный анализ временной структуры медленных вариаций градиента потенциала (см. табл. 1) показал, что их общая длительность, а также длительность их структурных элементов в холодный период года в среднем больше аналогичных параметров в теплый период. Это, по-видимому, связано с тем, что в холодное полугодие Cb имеют только фронтальное происхождение. В теплый период они могут образовываться как под действием динамической конвекции на атмосферных фронтах, так и вследствие внутримассовой (термической) конвекции. В теплый сезон года размах медленных вариаций градиента потенциала, абсолютная величина $\nabla\varphi$ в пределах их структурных элементов и само количество структурных элементов вариаций $\nabla\varphi$ (N_d , N_{d+} , N_{d-}) значительно превосходят аналогичные характеристики для холодного периода. Последнее объясняется

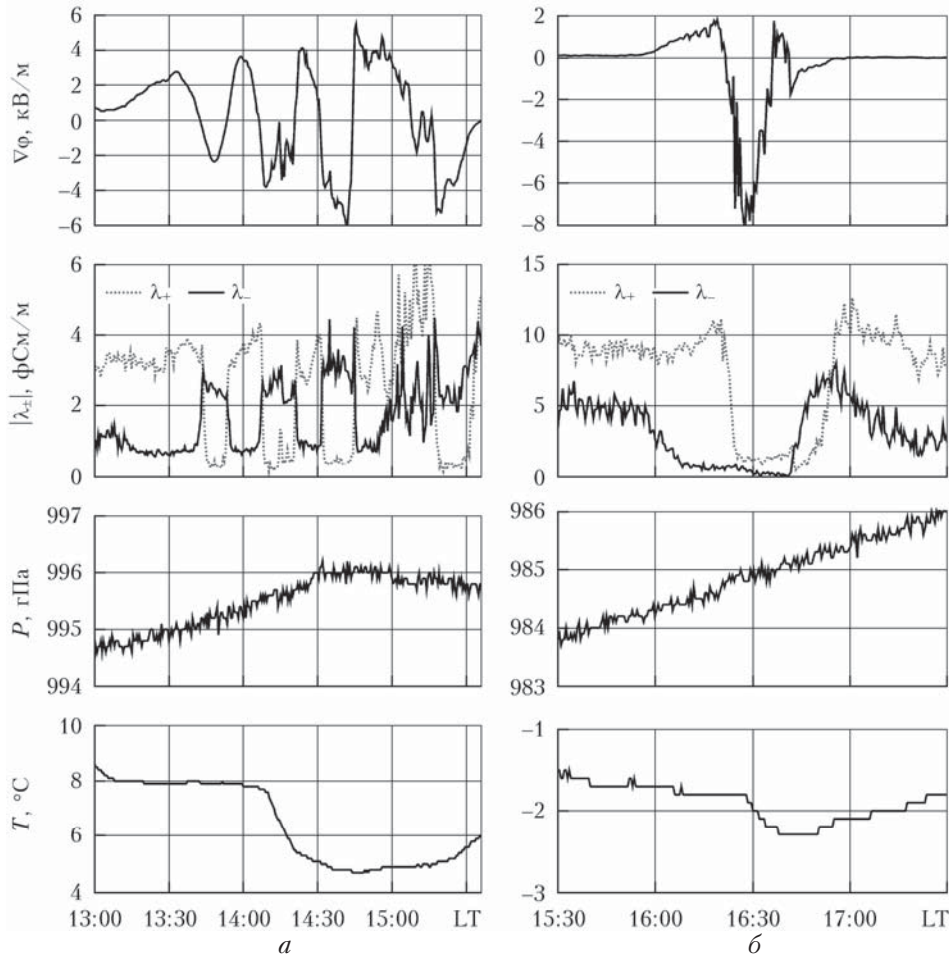


Рис. 1. Динамика электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере за 27.05.2016 г. (а) и 13.11.2012 г. (б): $\nabla\phi$ – градиент потенциала электрического поля; $|\lambda_{\pm}|$ – абсолютные значения полярных электропроводностей; P – атмосферное давление; T – температура воздуха

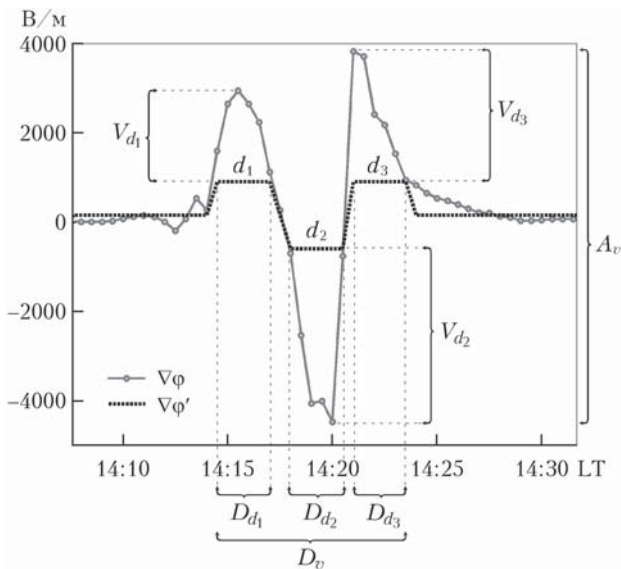


Рис. 2. Схема оценки временной структуры медленных вариаций $\nabla\phi$ при воздействии Cb : $\nabla\phi$ и $\nabla\phi'$ – исходные и модифицированные значения градиента потенциала; D_v и A_v – длительность и размах медленных вариаций $\nabla\phi$; D_{d_n} и V_{d_n} – длительность n -го возмущения (d_n) и его средняя величина $\nabla\phi$

более мощными источниками энергии, обеспечивающими более быстрое развитие конвективной облачности летом и, как следствие, обуславливающими большую величину объемных электрических зарядов и большее количество конвективных ячеек (в случае фронтальной облачности) в кучево-дождевых облаках.

Представим распределение D_v в двойном логарифмическом масштабе (рис. 4). Согласно этому рисунку распределение D_v не подчиняется нормальному закону ни для летних, ни для зимних условий. Рис. 4 иллюстрирует следующее: полученные распределения являются степенными и при больших значениях аргумента дают вероятности, значительно превышающие оценки, полученные из нормального закона распределения (обладают так называемыми тяжелыми хвостами). Для аппроксимации полученных распределений воспользуемся усеченными степенными распределениями, когда из генеральных совокупностей изъяты все элементы с длительностью (признаком усечения) менее c_0 . Для теплого времени года в эмпирическом распределении существует перегиб, поэтому аппроксимируем распределение D_v составным степенным распределением Парето (рис. 4, отрезки 1а, 1б):

$$F_{\xi}(t) \sim 1 - (c_0/t)^{\alpha}.$$

Таблица 1

Статистические характеристики значений $\nabla\phi$, зарегистрированные во время прохождения Cb в теплый и холодный периоды года

Параметр	Среднее			Среднеквадратичное отклонение		
	Теплый период	Холодный период	Отношение теплый/холодный	Теплый период	Холодный период	Отношение теплый/холодный
$\nabla\phi$, В/м	-300	450	0,7	2400	1350	1,8
D_v , мин	53	58	0,9	54	93	0,6
A_v	5750	2700	2,1	4000	2600	1,5
N_d	4	2,4	1,7	4,3	3	2,9
N_{d+}	1,7	1,2	1,4	2,2	1,5	1,5
V_{d+} , В/м	2450	1150	2,1	1100	750	1,5
D_{d+} , мин	9	24	0,4	9	62	0,1
N_{d-}	2,3	1,2	1,9	2,1	1,5	1,4
V_{d-} , В/м	-1950	-850	2,3	1100	700	1,6
D_{d-} , мин	11	15	0,7	11	23	0,5

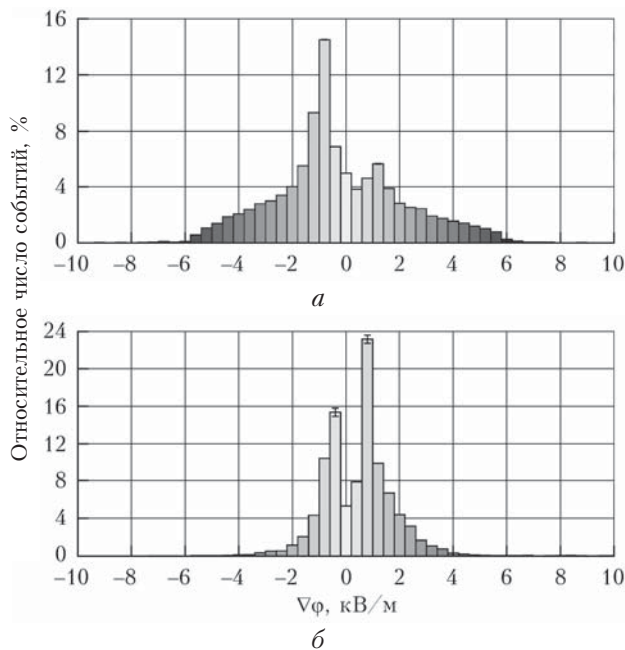


Рис. 3. Распределение средних значений $\nabla\phi$ при прохождении Cb в теплый (а) и холодный (б) периоды года

Перегиб в распределении D_v приходится на длительность $t \sim 60$ мин. Представляется разумным предположить, что аппроксимируемые участки распределения связаны с принципиально различными проявлениями кучево-дождевой облачности в летних условиях: одиночные внутримассовые Cb (отрезок 1а) и конгломераты фронтальных Cb (отрезок 1б) [17, 18]. Параметры аппроксимирующих распределений Парето для теплого и холодного периодов года суммированы в табл. 2.

Внутримассовая конвективная облачность отсутствует в холодный период года, поскольку нет источника тепла, связанного с нагревом земной поверхности солнечной радиацией. В это время года Cb образуются только под действием динамической конвекции на атмосферных фронтах. Поэтому в распределении общей длительности медленных вариаций градиента потенциала в холодный сезон отсутствует перегиб, характерный для летних условий

и связанный с существованием внутримассовой грозовой облачности, а само распределение хорошо аппроксимируется степенным законом распределения (табл. 2, рис. 4).

Таблица 2

Параметры распределений Парето D_v медленных вариаций $\nabla\phi$ для теплого и холодного времен года

Параметр распределений D_v	Теплое время года		Холодное время года
	1а, внутримассовые	1б, фронтальные	2, фронтальные
c_0 , мин	5	56	5
t , мин	$5 \leq t \leq 56$	$t \geq 56$	$t \geq 5$
α	-0,37	-2,10	-1,04

Примечание. c_0 – признак усечения (длительность) распределения D_v ; t – интервал анализируемых значений D_v ; α – наклон линии регрессии распределения D_v .

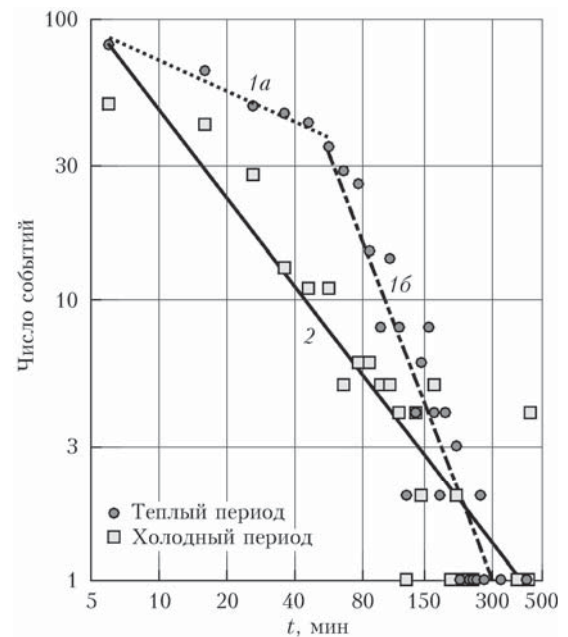


Рис. 4. Распределение D_v медленных вариаций $\nabla\phi$. Линейные тренды 1а, 1б и 2 – аппроксимации распределений D_v для теплого и холодного периодов года соответственно

Отметим, что наклон линии регрессии $D_v(\alpha)$ на участке 1б более чем в 2 раза превышает аналогичную величину для второго участка (табл. 2, рис. 4). Данная особенность предположительно связана с тем, что в теплый период года фронтальные *Cb* могут развиваться как в виде гряд перед приземным клином атмосферных фронтов, так и в виде полос затопленной конвекции на изгибах фронтальной поверхности. В холодный сезон кучево-дождевые облака представлены главным образом затопленной конвекцией [17, 18].

Заключение

В результате анализа данных по медленным вариациям напряженности электрического поля, связанных с прохождением кучево-дождевой облачности, отдельно для теплого и холодного полугодий установлено следующее.

1. Распределение общей длительности медленных вариаций $\nabla\phi$ описывается усеченным степенным распределением (Леви–Парето). В теплый период года оно состоит из двух участков, которые связаны с принципиально различными проявлениями конвективной облачности (одиночные *Cb* или их конгломераты), а в холодный период из-за отсутствия внутримассовой конвективной облачности аппроксимируется одним участком.

2. Общая длительность медленных вариаций $\nabla\phi$, а также длительность их структурных элементов в холодное время года в среднем больше аналогичных параметров в теплое время, а размах вариаций градиента потенциала, абсолютная величина $\nabla\phi$ в пределах их структурных элементов и само количество структурных элементов вариаций $\nabla\phi$ в теплый период значительно превосходят аналогичные характеристики для холодного времени.

3. Среднее абсолютное значение $\nabla\phi$ при прохождении *Cb* в холодное полугодие превышает в 1,5 раза аналогичное значение для теплого, а среднеквадратичное отклонение и интерквартильный размах значений $\nabla\phi$ в теплый период года в 1,8 раза больше, чем в холодный.

Исследования поддержаны грантом Президента РФ (МК-179.2017.5).

K.N. Pustovalov, P.M. Nagorskiy. The comparative analysis of electrical quantities of a surface layer during passage of cumulonimbus clouds in the warm and cold seasons.

Using the monitoring data of electrical quantities of a surface layer in Tomsk in 2006–2017, the their slow variations connected with passage of cumulonimbus (*Cb*) clouds and concomitant weather phenomena in the warm and cold seasons were studied. In total, 453 and 210 events for warm and cold seasons, respectively, were considered. A statistical analysis of these slow variations in the electric field potential gradient was carried out. The distribution of the total duration of the potential gradient slow variations is described by the power-series distribution (Pareto distribution).

1. *Тверской Н.П.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоиздат, 1949. 252 с.
2. *Chalmers J.A.* Atmospheric Electricity. 2nd Edition / J.A. Chalmers. Oxford: Pergamon Press Ltd, 1967. 515 p.
3. *Пустовалов К.Н., Назорский П.М.* Основные типы вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 8. С. 647–653.
4. *Филиппов А.Х.* Грозы Восточной Сибири. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 75 с.
5. *MacGorman D.R., Rust W.D.* The Electrical Nature of Storms. New York: Oxford Univ. Press, 1998. 432 p.
6. *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003. 687 p.
7. *Bennett A.J., Harrison R.G.* Atmospheric electricity in different weather conditions // Weather. 2007. V. 62. P. 277–283.
8. *Понов И.Б.* Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы // Тр. ГГО. 2008. Вып. 558. С. 152–161.
9. *Marshall T.C.* Electrical evolution during the decay stage of New Mexico thunderstorms // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. P. D02209.
10. *Toropov A.A., Kozlov V.I., Mullayarov V.A., Starodubtsev S.A.* Experimental observations of strengthening the neutron flux during negative lightning discharges of thunderclouds with tripolar configuration // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2013. N 94. P. 13–18.
11. *Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.М.* Электричество облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 94 с.
12. *Шметер С.М.* Термодинамика и физика конвективных облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 287 с.
13. *Bluestein H.B.* Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013. 456 p.
14. *Wang P.K.* Physics and Dynamics of Clouds and Precipitation. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2013. 467 p.
15. *Houze R.A.* Cloud Dynamics. 2nd Edition. New York; London: Acad. Press, 2014. 496 p.
16. *Нагорский П.М., Морозов В.Н., Смирнов С.В., Пустовалов К.Н.* Электродный слой в электрическом поле мощной конвективной облачности // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 11. С. 853–863.
17. *Hobbs P.M.* Organization and structure of clouds and precipitation on the mesoscale and microscale in cyclonic storms // Rev. Geophys. Space Phys. 1978. V. 16, N 4. P. 741–755.
18. *Шметер С.М.* Характеристики затопленной конвекции во фронтальных облаках и условия ее образования // Метеорол. и гидрол. 1990. № 11. С. 36–44.