

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 432—448  
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72):432—448

Научная статья  
УДК [551.508.85:551.576:551.594]:551.509.313  
doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-432-448

## **Прогноз развития грозовых облаков с использованием ансамблевого подхода на базе моделей малой размерности**

*Марина Леонидовна Торопова, Николай Евгеньевич Веремей,  
Юрий Павлович Михайловский, Александр Борисович Куров,  
Андрей Александрович Синькевич*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия,  
marina-toropova@mail.ru

*Аннотация.* Приведены результаты апробации двух методик ансамблевого прогноза характеристик грозовых облаков на территории Северо-Западного региона РФ. Для прогноза применялись две версии модели конвективной облачности малой размерности, разработанные в ФГБУ «ГГО». Выполнена верификация результатов моделирования по данным радиолокационных наблюдений для двух контролируемых параметров: высоты верхней границы облаков и значений максимальной радиолокационной отражаемости. Показано, что использование возмущений начальных данных позволяет получать распределения моделируемых значений, улучшая результаты детерминированного прогноза. Это расширяет возможности краткосрочного прогноза конвекции и связанных с ней опасных явлений.

*Ключевые слова:* гроза, облака, численное моделирование, верификация, радиолокация.

*Благодарности:* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 22-27-20031) и Санкт-Петербургского научного фонда (Соглашение № 58/2022 от 15 апреля 2022 г.).

*Для цитирования:* Торопова М. Л., Веремей Н. Е., Михайловский Ю. П., Куров А. Б., Синькевич А. А. Прогноз развития грозовых облаков с использованием ансамблевого подхода на базе моделей малой размерности // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 432—448. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-432-448.

Original article

## **Forecast of the development of thunderstorms using the ensemble approach on the basis of low-dimensional models**

*Marina L. Toropova, Nikolai E. Veremei, Yurii P. Mikhailovskii,  
Alexander B. Kurov, Andrei A. Sin'kevich*

Voeikov Main geophysical observatory, St. Petersburg, Russia, marina-toropova@mail.ru

*Summary.* The results of approbation of two methods of ensemble forecast of the characteristics of thunderclouds on the territory of the North-West region of the Russian Federation are presented. For the

---

© Торопова М. Л., Веремей Н. Е., Михайловский Ю. П., Куров А. Б., Синькевич А. А., 2023

forecast, two versions of the low-dimensional convective cloudiness model developed at the Federal State Budgetary Institution “GGO” were used. Each version used its own method for introducing perturbations into the initial data. In the first technique, disturbances are introduced at all levels of the vertical distribution of temperature and humidity. In the second method, only surface values were perturbed. The maximum characteristics of clouds are obtained when disturbances are introduced, as well as the time to reach maximum values. It is shown that the highest sensitivity to disturbances in the initial data is shown by the velocities of updrafts, the microphysical characteristics of precipitation, and, as a consequence, the maximum radar reflectivity in the cloud. Due to the fact that the accounting for microphysical processes is parameterized differently in the models used, different distributions of microphysical characteristics are obtained. The obtained values of the deviations of the ensemble calculations from the control showed that the introduction of perturbations into the initial data (according to the methods used) are comparable in magnitude with the deviations obtained as a result of the perturbation of the model parameters. Verification of the simulation results based on radar observations for two controlled parameters: the height of the cloud top and the values of the maximum radar reflectivity was carried out. It is shown that the values from the simulation results generally correspond to the results of radar observations. It is shown that the use of initial data perturbations makes it possible to obtain distributions of simulated values, improving the results of a deterministic forecast. This expands the possibilities of short-term forecasting of convection and related hazards.

*Keywords:* thunderstorm, numerical modeling, verification, weather radar.

*Acknowledgments:* The work was prepared with the financial support of the Russian Science Foundation (Proj. No. 22-27-20031) and the Government of St. Petersburg (Agreement No. 58/2022 dated April 15, 2022).

*For citation:* Toropova M. L., Veremei N. E., Mikhailovskii Y. P., Kurov A. B., Sin'kevich A. A. Forecast of the development of thunderstorms using the ensemble approach on the basis of low-dimensional models. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 432—448 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-432-448.

## Введение

Прогноз опасных конвективных явлений и прогноз облачности в целом является одной из самых сложных задач численного прогноза погоды. Одним из традиционных способов прогноза опасных явлений (ОЯ) конвективного характера по-прежнему является анализ температурно-влажностной стратификации атмосферы. Существует большое количество методов оценки статической неустойчивости атмосферы при помощи теории всплывающей частицы или метода слоя [1—3]. Зачастую для таких оценок используются региональные модели, так как данные радиозондовых наблюдений нерегулярны по пространству и измерения проводятся всего два раза в сутки [4, 5].

Следует также отметить развитие подходов к использованию численных моделей для решения задач прогноза ОЯ и характеристик облачности. Одно из направлений развития — отказ от детерминированного подхода в пользу других вариантов, среди которых — использование нейронных сетей [6—8], стохастических методов [9, 10] и ансамблевого подхода [11—14]. Ансамблевый подход заключается в получении не единственного результата прогноза, а их множества. Это множество (ансамбль) генерируется на основании внесения возмущений в начальные данные или параметры численной модели [15—18].

При выполнении подобных работ особую актуальность представляет использование моделей малых размерностей совместно с региональными моделями или отдельно от них [19]. В отличие от трехмерных моделей конвективных облаков

[20—26] эти модели требуют довольно малых вычислительных ресурсов и могут применяться в оперативном режиме.

Задачей настоящего исследования является изучение возможности применения двух версий модели малой размерности конвективной облачности, разработанной в ГГО в рамках ансамблевого прогноза с целью прогноза характеристик грозных облаков. В данной работе исследование выполнено для случая грозы в Санкт-Петербурге 01 августа 2021 года. Для верификации результатов моделирования используются данные радиолокационных наблюдений.

### **Численная модель конвективных облаков**

В настоящем исследовании использовались две версии модели конвективной облачности малой размерности, разработанные в ФГБУ «ГГО» при участии авторов настоящей статьи [27]. Результаты моделирования представляют собой характеристики облака (атмосферы), изменяющиеся по высоте и осредненные по радиусу облака, поэтому модель считается полуторамерной.

Выбор модели малой размерности обусловлен несколькими причинами. Модель является уникальным инструментом исследования грозных облаков наряду с другими моделями конвективной облачности. По обеим разработанным в ГГО моделям продолжают работы в рамках различных проектов, в том числе работы по улучшению (доработке) самих моделей и методик их применения. Так, данная работа, помимо исследования возможности прогноза характеристик облаков, также имела целью апробацию новой методики верификации результатов моделирования. Важной особенностью модели малой размерности является то, что она позволяет получать детальные характеристики развития конвективных облаков и, в отличие от трехмерной модели, не требует больших вычислительных мощностей. Фактор оперативности явился решающим условием выбора класса модели для использования в рамках ансамблевого подхода.

Облако в модели представлено в виде гидродинамического течения с несущей паровоздушной фазой и взвешенными в ней частицами. Радиус облака входит в систему уравнений модели в качестве изменяемого параметра, который зафиксирован в данных расчетах.

Для описания микрофизических процессов используется параметрический подход. Представлены четыре фракции гидрометеоров: облачные и дождевые капли, а также ледяные кристаллы и градины. Начальные условия подразумевают равенство нулю содержания гидрометеоров на всех уровнях, а также вертикальных скоростей. Начальными данными для расчетов являются результаты радиозондирования атмосферы. На эти данные накладываются возмущения, которые инициируют развитие конвекции [27]. Исследования чувствительности модели к начальным условиям и параметрам показало, что на характеристики развивающегося облака значительное влияние оказывают задаваемый радиус облака, величина начального перегрева и влагосодержание атмосферы [27]. Система уравнений модели имеет вид:

Уравнение движения:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{R} \tilde{u} (\tilde{w} - w) + \frac{2}{R} \alpha^2 |w| (\bar{w} - w) + \frac{g(T_v - \bar{T}_v)}{\bar{T}_v} - g(Q_c + Q_R + Q_I). \quad (1)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{2}{R} \tilde{u} + \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a w) = 0. \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -w \left( \frac{\partial T}{\partial z} - \gamma_a \right) - \frac{2}{R} \tilde{u} (\tilde{T} - T) + \frac{2}{R} \alpha^2 |w| (\bar{T} - T) + F_T. \quad (3)$$

Уравнение баланса отношения смеси водяного пара:

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t} = -w \frac{\partial Q_v}{\partial z} - \frac{2}{R} \tilde{u} (\tilde{Q}_v - Q_v) + \frac{2}{R} \alpha^2 |w| (\bar{Q}_v - Q_v) + F_v. \quad (4)$$

Уравнение баланса отношения смеси облачных капель:

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} = -w \frac{\partial Q_c}{\partial z} - \frac{2}{R} \tilde{u} (\tilde{Q}_c - Q_c) + \frac{2}{R} \alpha^2 |w| (\bar{Q}_c - Q_c) + F_c. \quad (5)$$

Уравнение баланса отношения смеси дождевых капель:

$$\frac{\partial Q_R}{\partial t} = -(w - v_R) \frac{\partial Q_R}{\partial z} - \frac{2}{R} \tilde{u} (\tilde{Q}_R - Q_R) + \frac{2}{R} \alpha^2 |w| (\bar{Q}_R - Q_R) + \frac{Q_R}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a v_R) + F_R. \quad (6)$$

Уравнение баланса отношения смеси ледяных частиц:

$$\frac{\partial Q_I}{\partial t} = -(w - v_I) \frac{\partial Q_I}{\partial z} - \frac{2}{R} \tilde{u} (\tilde{Q}_I - Q_I) + \frac{2}{R} \alpha^2 |w| (\bar{Q}_I - Q_I) + \frac{Q_I}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a v_I) + F_I. \quad (7)$$

Использованы следующие обозначения:  $g$  — ускорение свободного падения;  $p$  — давление воздуха;  $Q_c$  — отношение смеси облачных капель;  $Q_R$  — отношение смеси дождевых капель;  $Q_I$  — отношение смеси градин;  $Q_v$  — отношение смеси водяного пара;  $T$  — температура среды;  $T_v$  — виртуальная температура среды;  $t$  — время;  $u$  — горизонтальная составляющая скорости движения среды;  $v_R$  — скорость седиментации дождевых капель;  $v_I$  — скорость седиментации ледяных частиц;  $w$  — вертикальная составляющая скорости движения среды;  $z$  — вертикальная координата;  $\alpha$  — коэффициент турбулентного вовлечения;  $\gamma_a$  — сухоадиабатический градиент температуры;  $\rho_a$  — плотность среды. Обозначения величин, относящихся к внешней по отношению к цилиндру радиуса  $R$  области и к его границе, снабжены горизонтальной чертой и тильдой соответственно.

Система дополнена уравнением состояния идеального газа, уравнением гидростатики, формулами для насыщающего значения отношения смеси водяного пара относительно плоской поверхности воды и льда. Значения источников-стоков субстанций в уравнениях (3)—(7) зависят от интенсивности

микрофизических процессов (фазовых переходов и обмена влагой между различными фракциями).

Граничные условия предполагают постоянство значений температуры, отношения смеси облачных, дождевых капель и ледяных частиц на верхней и нижней границах цилиндра и равенство соответствующим значениям параметров в окружающей среде [27].

Первая версия модели (V1) включает в себя учет процессов электризации, в то время как вторая (V2, физико-статистическая) использует эмпирические критерии грозоопасности. В моделях полностью различна параметризация микрофизических процессов (в частности, во второй отсутствует учет наличия мелких облачных кристаллов). Кроме того, первая модель также содержит аэрозольный блок и ряд других инструментов для изучения физических процессов развития конвекции. Вторая версия модели, дополненная эмпирическими параметрами, послужила базой для ранее разработанного метода специального краткосрочного прогноза развития конвективной облачности и связанных с ней опасных явлений. Метод прогноза прошел независимое тестирование и показал высокую оправдываемость [27]. Модель также может использоваться для диагностических исследований, например, совместно с данными реанализа для получения изменений климатических характеристик развития опасных явлений конвективного характера на территории России [19, 27].

### **Методика ансамблевого прогноза**

Ансамблевый подход в настоящем исследовании был реализован за счет внесения случайных возмущений в начальные данные.

В качестве обоснования величины вносимых возмущений приняты два фактора: ошибки радиозондовых наблюдений и учет неоднородности подстилающей поверхности. С одной стороны, в зависимости от используемых технических средств радиозондирования, ошибки изменения температуры и влажности могут варьироваться в достаточно широких пределах (в частности, превышать 1 °С для температуры) [28—30]. С другой стороны, в случае использования не данных непосредственных измерений, а результатов расчетов глобальных моделей атмосферы и региональных моделей прогноза погоды, также наблюдаются ошибки [31]. Исходя из приведенных в литературе оценок точности измерения температуры и влажности, были выбраны оценки возмущений, вносимых на всех уровнях радиозондирования.

Приземные значения температуры и влажности в значительной степени определяются микроклиматическими особенностями конкретной территории и в радиусе репрезентативности радиозонда (150 км) варьируются в достаточно широких пределах, точные оценки которых получить не представляется возможным, поэтому были установлены предельные величины вносимых возмущений в значения температуры и влажности у земли, которые могут быть уточнены в ходе дальнейших исследований.

Для внесения возмущений в начальные данные была разработана отдельная программа их подготовки. Для каждого уровня радиозондирования задавались

предельные значения возмущений (см. табл. 1). В заданных пределах варьировалась нормально распределенная случайная величина, которая и вносилась в качестве возмущения (отдельно на каждом уровне). Авторами были разработаны и апробированы две методики, отличающиеся уровнями внесения возмущений. Методика 1 применялась совместно с первой версией модели (V1), методика 2 — со второй (V2). Для выполнения ансамблевых расчетов по каждой из методик были сформированы 30 новых вертикальных распределений температуры и влажности.

*Методика 1* включала в себя внесение возмущений начальных данных на всех уровнях высоты. Приземные значения варьировались только в сторону увеличения, в то время как значения на высотах изменялись как в большую, так и в меньшую сторону. Физическим обоснованием положительных возмущений приземных данных является огромное значение для развития конвекции неравномерного прогрева разнородной подстилающей поверхности. Возмущения на высотах обусловлены, главным образом, ошибками радиозондовых наблюдений [28—30]. Величина возмущений значений температуры и относительной влажности приведена в табл. 1.

Таблица 1

Величина возмущений, вносимых в начальные данные  
The magnitude of perturbations introduced into the initial data

	Температура	Относительная влажность
Приземные значения (Методика 1, Методика 2)	$\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 15\text{ \%}$
Значения на высотах (Методика 1)	$\leq  1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq  15 \text{ \%}$

*Методика 2* включала внесение возмущений только в приземные значения. Величина приземных возмущений та же, что и в методике 1. Для каждой из методик (версий модели) была выполнена серия из 30 расчетов с внесенными возмущениями и контрольный расчет (без возмущений). Анализировались максимальные значения характеристик облаков, достигаемые в каждом расчете, а также время их достижения. Некоторые результаты отдельно для каждой из методик и версий были ранее опубликованы в [32].

Для исследования было выбрано 1 августа 2021 года, когда в Санкт-Петербурге и окрестностях наблюдались грозы. В качестве начальных данных моделирования использовались данные аэрологических наблюдений на станции Воейково (26075) 01.08.2021 15:00 Мск.

Верификация результатов моделирования проводилась по данным радиолокационных наблюдений ДМРЛ-С (пос. Воейково). Выбранные контролируемые параметры: высота верхней границы облаков и максимальная радиолокационная отражаемость в облаке. Отражаемость приведена в дБZ. Это внесистемная безразмерная величина, используемая при оценке коэффициента отражаемости и определяемая по формуле (8):



$$\text{дБЗ} = 10 \times \lg \left( \frac{Z}{Z_0} \right), \quad (8)$$

где  $Z_0 = 1 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ .

Так как результаты моделирования представляют собой максимальные значения за весь период развития облака, в то время как данные радиолокационных наблюдений содержат характеристики облаков для каждого обзора, то радиолокационные данные были подвергнуты обработке. Для каждого радиолокационного обзора были выбраны максимальные значения контролируемых параметров. Именно эти значения (за период 12:00 – 00:00 Мск) были использованы для верификации. Таким образом, ансамбль максимальных значений характеристик облаков по данным моделирования сопоставлялся с ансамблем максимальных за каждый обзор значений характеристик облаков по данным наблюдений.

### Максимальные характеристики облаков

Были рассмотрены максимальные характеристики основных параметров грозовых облаков: высота верхней границы облака ( $H_{\text{ТОР}}$ ), максимальные скорости восходящего потока в облаке ( $W$ ), максимальная радиолокационная отражаемость ( $Z_{\text{МАХ}}$ ), а также микрофизические характеристики облаков — водность облачных ( $Q_C$ ) и дождевых ( $Q_R$ ) капель, ледность кристаллических осадков ( $Q_I$ ). Также рассматривалась динамика развития облака, т.е. время достижения максимальных значений указанных характеристик.

Результаты моделирования показывают, что в случае использования различных версий модели и методик внесения возмущений получаются отличные по своим статистическим характеристикам ансамбли параметров облаков. Зависимость величины максимального значения параметров от модельного времени их достижения приведена на рис. 1. Статистические характеристики полученных ансамблей результатов приведены в табл. 2.

Размах (разность между максимальным и минимальным значением) значений высоты верхней границы облаков в V2 составил 1,0 км, в то время как в V1 аналогичное значение равно 1,6 км. Медианные значения высоты верхней границы V1 / V2 были достаточно близки и составили 10,2 / 10,6 км. При этом важно отметить, что по V1 получено большее различие медианы ансамблевых расчетов и значения  $H_{\text{ТОР}}$  в контрольном расчете, хотя полученные различия являются статистически значимыми, будь они получены при анализе данных радиолокационных наблюдений. В зависимости от удаления облака от радиолокатора их можно было бы охарактеризовать как достаточно малые.

В значительно более широких пределах варьировались значения  $W$  — размах достигал 22 м/с. При этом медианы составили 33,7 / 39,4 м/с. Такие значения соответствуют общим представлениям о вертикальной скорости в грозовых облаках. В V1 скорость восходящих потоков увеличивалась в два и более раз относительно контрольного расчета. В V2 увеличение чуть менее значительное по величине. Следует отметить, что в физико-статистической версии модели в целом наблюдался больший разброс значений, чем в полной версии.

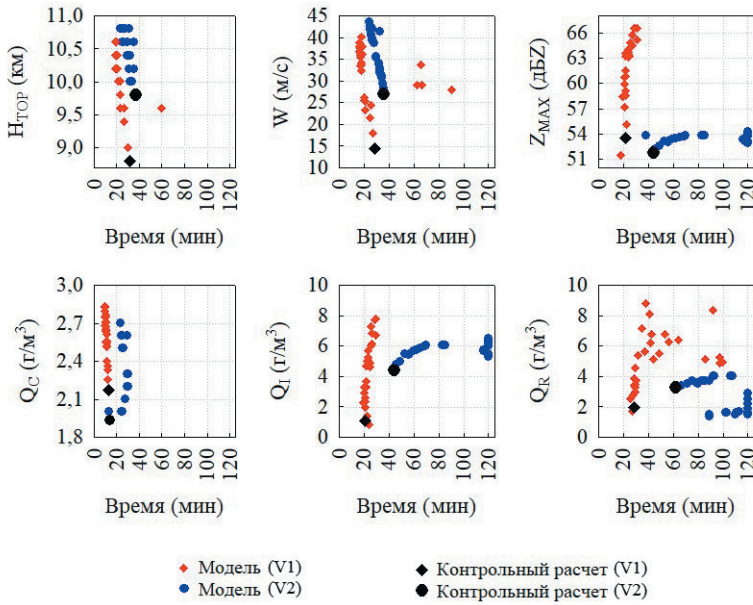


Рис. 1. Результаты ансамблевых расчетов.

Основные характеристики грозовых облаков: максимальные значения характеристик облака при внесении возмущений и время их достижения.

Fig. 1 The results of ensemble calculations.

The main characteristics of thunderclouds: the maximum values when disturbances are introduced and the time to reach them.

Таблица 2

Статистические характеристики результатов численного моделирования  
Statistical characteristics of the results of numerical simulations

	Модель	Среднее	Медиана	Мини-мум	Макси-мум	Ст. откл.	Размах	Контрольный расчет
$H_{TOP}$ (км)	V1	10,1	10,2	9,2	10,6	0,41	1,6	8,8
	V2	10,4	10,6	9,8	10,8	0,32	1,0	9,8
$W$ (м/с)	V1	31,9	33,7	18,0	40,1	6,04	22,1	14,5
	V2	37,3	39,4	28,3	43,7	4,77	15,4	26,9
$Z_{MAX}$ (дБZ)	V1	62,1	63,2	51,4	66,5	3,68	15,1	53,5
	V2	53,5	53,5	52,2	54,3	0,45	2,0	51,8
$Q_C$ (г/м <sup>3</sup> )	V1	2,6	2,6	2,2	2,8	0,18	0,7	2,2
	V2	2,4	2,5	2,0	2,7	0,24	0,7	2,0
$Q_R$ (г/м <sup>3</sup> )	V1	5,1	5,1	1,7	8,8	1,84	7,1	2,0
	V2	2,6	2,4	1,4	4,0	1,04	2,6	3,3
$Q_I$ (г/м <sup>3</sup> )	V1	4,7	5,0	0,8	7,7	2,02	6,9	1,1
	V2	5,8	5,7	4,8	6,5	0,39	1,7	4,4



Большие различия наблюдаются в полученных оценках максимальной радиолокационной отражаемости в облаке, что хорошо видно на рис. 1. В контрольных расчетах две версии модели показали достаточно близкий результат: 53,5 / 51,8 дБZ для V1 / V2 соответственно. Однако при внесении возмущений медианные значения распределений составили 63,2 / 53,5 дБZ. Важной особенностью является то, что размах значений максимальной радиолокационной отражаемости в полной версии модели составил 15,1 дБZ и оказался в разы больше соответствующей величины в физико-статистической версии модели — 2,0 дБZ. Такие отличия, очевидно, связаны как с разными алгоритмами расчетов радиолокационной отражаемости (в модели V2 используется усовершенствованный алгоритм), так и собственно с параметризацией микрофизических процессов.

Микрофизические характеристики облаков, полученные в ансамблевых и контрольных расчетах, явно демонстрируют различия в описании соответствующих процессов. Водность облачных капель оказывается наиболее стабильной по величине характеристикой. Медианы распределений были равны 2,6 / 2,5 г/м<sup>3</sup>, размах значений для обеих версий модели составил 0,7. При этом отдельные значения при внесении возмущений не превышали 2,8 и 2,7 г/м<sup>3</sup> в V1 и V2 соответственно, т.е. в целом были близки к медианным значениям. Таким образом, значения водности облачных капель оказались достаточно близки в обеих версиях модели и внесение возмущений привело к увеличению не более чем на 35 % по сравнению с контрольным расчетом.

Медианы ансамблевых расчетов водности дождевых капель  $Q_R$  равны 5,1 / 2,4 г/м<sup>3</sup>, т.е. различаются в 2 раза. В случае использования полной версии модели при внесении возмущений водность дождевых капель в большей части случаев увеличивается относительно контрольного расчета. В отдельных случаях значения возрастают более чем в 4 раза. В тоже время при использовании модели V2 величина  $Q_R$  в большинстве случаев при внесении возмущений, наоборот, уменьшается. В отдельных случаях уменьшение происходит более чем в 2 раза.

Ледность кристаллических осадков в целом ведет себя аналогично максимальной радиолокационной отражаемости. Значения  $Q_I$  увеличиваются относительно результатов контрольных расчетов в обеих версиях модели. В V1 увеличение наиболее значительно, медиана составляет 5,0 г/м<sup>3</sup> при значении контрольного расчета 1,1 г/м<sup>3</sup>. В отдельных случаях происходило увеличение  $Q_I$  в 7 раз или, наоборот, незначительное уменьшение. При использовании V2 медиана ансамблевых расчетов не столь сильно отличается от значений контрольного расчета — они равны 5,7 и 4,4 г/м<sup>3</sup> соответственно. Максимальные значения  $Q_I$  соответствуют увеличению значений контрольного расчета на 48%. Значения в целом обладают меньшей изменчивостью, что показано на рис. 1 и в табл. 1.

Ранее выполненные оценки влияния начальных условий на результаты расчетов [27] показали, что при фиксированном радиусе облака (5 км) и варьировании перегрева у подстилающей поверхности до +5 °C максимальные характеристики облака изменяются следующим образом: скорость восходящих потоков возрастает в 3 раза (на 16 м/с), высота верхней границы увеличивается на 3,2 км,

суммарная водность в облаке увеличивается на  $3 \text{ г/м}^3$  (в полной версии модели). Эти значения вполне сопоставимы с полученными величинами отклонений при внесении возмущений в данные радиозондирования.

### Динамика развития облаков

Результаты ансамблевых расчетов показали значительные различия не только в максимальных значениях параметров облаков, но и во времени их достижения, т.е. внесение возмущений в начальные данные в определенной степени влияет на динамику развития облака. Время здесь и далее приводится в модельных минутах. За 0 мин принято начало расчета. Стоит учитывать, что не проводилось работ по сопоставлению модельного и реального времени развития облака, хотя полученные ранее результаты показывают, что получаемые значения близки к характерным при протекании данных процессов в атмосфере. Результаты расчетов проиллюстрированы на рис. 2.

Показано, что при внесении возмущений в начальные данные (и в V1, и в V2) достижение максимального значения высоты верхней границы происходит быстрее, чем в контрольном расчете. Медиана времени достижения максимума составила 21 / 30 мин для V1 / V2 соответственно. При этом в V1 размах значений (разность максимальной и минимальной величины с учетом выбросов и экстремальных значений) составляет 41 мин, в то время как в V2 — всего 13 мин.

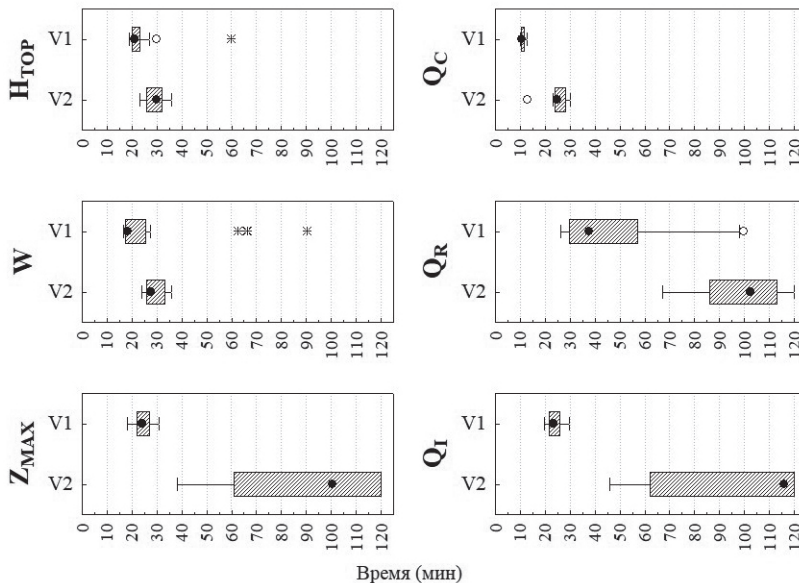


Рис. 2. Результаты ансамблевых расчетов. Время достижения максимальных значений параметров облаков.

Fig. 2 The results of ensemble calculations. The time to reach maximum values.

Похожая картина наблюдается для динамики восходящих потоков в облаке. Максимальное значение  $W$  в полной версии модели (V1) достигается в интервале от 17 до 91 мин (размах 74 мин). В то время как при использовании V2 размах составляет 12 мин, максимум достигается в течение 24—36 мин со времени начала расчета. Надо отметить несколько выбросов значений в V1, что говорит о формировании отдельных облаков с сильно отличной динамикой развития.

Обратная картина наблюдается для времени достижения  $Z_{\text{MAX}}$  в облаке. Медианы составили 24 / 101 мин. В полной версии модели максимум приходился на период 18—31 мин (размах 13 мин), в то время как в физико-статистической версии аналогичный период составляет 38—120 мин (размах — 82 мин). Здесь важно отметить, что 120 мин — время окончания расчета в V2, т.е. в V2 образуется более долгоживущее облако, развитие которого продолжается на момент завершения вычислений. Как уже было отмечено ранее, разброс значений  $Z_{\text{MAX}}$  в этой версии очень мал. Динамика  $Z_{\text{MAX}}$ , как и ее значения, определяются динамикой микрофизических характеристик облаков (главным образом — дождевых капель).

Водность облачных капель хотя и различается для V1 и V2, но в обеих моделях максимум достигается к 30 мин расчета. Медианы при этом составляют 11 / 25 мин. В полной версии модели размах значений меньше (3 мин), чем в упрощенной версии (17 мин).

Существенные отличия наблюдаются в динамике развития микрофизических характеристик осадков в облаке. Водность дождевых капель в облаке достигает максимума в период 26—100 мин (V1) и 67—120 мин (V2). Отметим, что 100 мин в V1 — это время окончания расчета. Таким образом, по результатам использования обеих версий модели при внесении возмущений образуются долгоживущие облака, которые продолжают существовать на момент окончания вычислений. Медианы времени достижения максимума составляют 38 / 103 мин (при учете всех значений). При исключении из анализа значений, соответствующих времени окончания расчета, медианы принимают значения 38 / 92 мин. Таким образом, V2 в ансамблевых расчетах демонстрирует более длительное развитие облака по динамике  $Q_R$ .

Различия в динамике ледности кристаллических осадков еще более значительны. Медианные значения времени достижения максимума составили 24 / 116 мин. При исключении 12 случаев, когда ледность продолжала увеличиваться к моменту окончания вычислений, медиана V2 равна 75 мин. При использовании полной версии модели максимум ледности приходится на период 20—30 мин, тогда как в версии с упрощенной микрофизикой этот период значительно увеличивается (46—120 мин), выходя за пределы расчетного времени.

В работе [27] приведены оценки влияния начальных условий расчета на динамику развития облака в полной версии модели. В частности, показано, что при фиксированном радиусе облака и варьировании перегрева у подстилающей поверхности стадия зрелости (осадкообразования) может наступить на 20 мин быстрее. Эта оценка соответствует результатам преобладающего большинства расчетов с возмущениями V1 (рис. 2) для водности дождевых капель. В то же время

показано, что внесение возмущений в начальные данные расчетов могут приводить к гораздо более значительным изменениям в динамике развития облака.

### Результаты верификации

Верификация результатов моделирования проводилась для двух контролируемых параметров — высоты верхней границы облаков и максимальной радиолокационной отражаемости. Результаты верификации с использованием квантильного анализа приведены на рис. 3.

По результатам моделирования  $H_{TOP}$  изменяется от 9,8 до 10,8 км (V2) и от 9,2 до 10,6 км (V1). Медианы составили 10,6 и 10,2 км соответственно. Значения  $H_{TOP}$  по данным радиолокационных наблюдений варьировались в пределах 9,4–15,0 км с медианой 11,7 км. Таким образом, значения высоты верхней границы облака по данным моделирования в целом оказались внутри интервала без выбросов по данным радиолокационных наблюдений. При этом медиана данных ДМРЛ-С превышает данные моделирования на 1,5 км. В данном случае максимальные значения  $H_{TOP}$  по данным наблюдений на несколько км превышают соответствующие значения по результатам моделирования. Важным параметром следует считать дисперсию полученных рядов. Разброс значений высоты верхней границы в V2 значительно ближе к разбросу значений данных радиолокационных наблюдений. Надо отметить, что данные наблюдений в этом случае также нуждаются в дополнительном контроле в связи с погрешностями измерения радиолокатором.

По результатам моделирования  $Z_{MAX}$  изменяется от 52,2 до 54,3 дБZ (V2) и от 51,4 до 66,5 дБZ (V1). Медианы составили 53,5 и 63,2 дБZ соответственно.

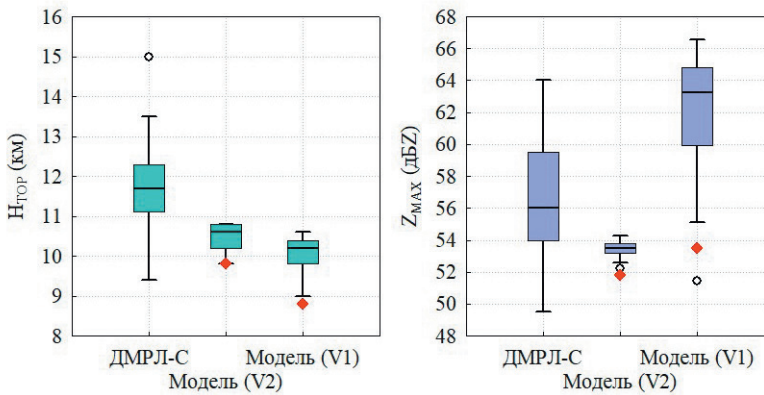


Рис. 3. Результаты верификации ансамблевых расчетов по данным радиолокационных наблюдений (ДМРЛ-С). Результаты контрольных расчетов (без возмущений) обозначены красным маркером.

Fig. 3. Verification results of ensemble calculations based on radar observations (C-band Doppler radar). The results of control calculations (without disturbances) are shown with a red marker.

Значения  $Z_{\text{MAX}}$  по данным радиолокационных наблюдений варьировались в пределах 49,5–64,0 дБZ с медианой 56,0 дБZ. Таким образом, медиана результатов второй версии модели оказывается на 2,5 дБZ меньше медианы данных наблюдений. В то время как медиана результатов расчетов с помощью первой версии наоборот на 7,2 дБZ превышает данные наблюдений. Разброс значений VI существенно ближе к результатам наблюдений. Подводя итог, данные моделирования  $Z_{\text{MAX}}$  в целом входят в интервал без выбросов по данным наблюдений.

### Заключение

В данной работе оценивалась возможность использования моделей малой размерности для прогноза характеристик грозовых облаков на примере грозы в Санкт-Петербурге 01 августа 2021 года.

Выявлено, что при внесении возмущений в начальные данные характеристики грозовых облаков меняются существенным образом. Наибольшую чувствительность демонстрируют скорость восходящих потоков, максимальная радиолокационная отражаемость и микрофизические характеристики осадков (водность дождевых капель и ледность градин). Различия микрофизических характеристик облаков объясняются их разными параметризациями в версиях модели. В свою очередь водность дождевых капель и ледность кристаллических частиц осадков определяют значения радиолокационной отражаемости. При этом высота верхней границы облаков для обеих используемых версий модели менялась слабо.

Показано, что полученные отклонения от результатов контрольных расчетов при внесении возмущений в начальные данные по своему масштабу соответствуют ранее полученным результатам исследования чувствительности полной версии модели к варьированию начальных условий расчета (параметров модели).

Выполнена верификация результатов моделирования по данным радиолокационных наблюдений. Показано, что значения высоты верхней границы облаков при используемых методиках внесения возмущений в начальные данные в целом занижаются, в то время как радиолокационная отражаемость — завышается (в одной из версий модели). При этом в целом данные моделирования соответствуют данным наблюдений. Продемонстрировано, что использование ансамблевого подхода позволяет улучшить результаты прогноза.

### Список литературы

1. Горбатенко В. П., Кречетова С. Ю., Беликова М. Ю., Нечепуренко О. Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектро радиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2015. №5. С. 10—19.
2. Губенко И. М., Рубинштейн К. Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27—38.
3. Pepler R. A. Review of Static Stability Indices and Related Thermodynamic Parameters. Illinois State Water Survey. Technical Report. 1988. 94 p.
4. Губенко И. М., Рубинштейн К. Г. Прогноз грозовой активности с помощью модели электризации кучево-дождевых облаков // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 5—19.

5. Калинин Н. А., Ветров А. Л., Связов Е. М., Попова Е. В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 9. С. 21—30.
6. Brenowitz N. D., Bretherton C. S. Prognostic validation of a neural network unified physics parameterization. // *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45. P. 6289—6298. doi: 10.1029/2018GL078510.
7. Gentine P., Pritchard M., Rasp S., et al. Could machine learning break the convection parameterization deadlock? // *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45. P. 5742—5751. doi: 10.1029/2018GL078202.
8. Ukkonen P., Mäkelä A. Evaluation of machine learning classifiers for predicting deep convection. // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2019. Vol. 11. P. 1784—1802. doi: 10.1029/2018MS001561.
9. Bengtsson L. and Körnich H. Impact of a stochastic parametrization of cumulus convection, using cellular automata, in a mesoscale ensemble prediction system. // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2016. Vol. 142. P. 1150—1159. doi: 10.1002/qj.2720.
10. Shutts G. A stochastic convective backscatter scheme for use in ensemble prediction systems. // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2015. Vol. 141. P. 2602—2616. doi: 10.1002/qj.2547.
11. Barthlott C., Burton R., Kirshbaum D. et al. Initiation of deep convection at marginal instability in an ensemble of mesoscale models: a case-study from COPS. // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 137. P. 118—136. doi: 10.1002/qj.707.
12. Gensini V. A., Tippett M. K. Global Ensemble Forecast System (GEFS) predictions of days 1–15 U.S. tornado and hail frequencies. // *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46. P. 2922—2930. doi: 10.1029/2018GL081724.
13. Subramanian A. C. and Palmer T. Ensemble super parameterization versus stochastic parameterization: A comparison of model uncertainty representation in tropical weather prediction. // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2017. Vol. 9. P. 1231—1250. doi: 10.1002/2016MS000857.
14. Weyn J. A., Durran D. R., Caruana R., Cresswell-Clay N. Sub-seasonal forecasting with a large ensemble of deep-learning weather prediction models. // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2021. Vol. 13. e2021MS002502. doi: 10.1029/2021MS002502.
15. Алферов Д. Ю., Ривин Г. С. Система мезомасштабного прогноза погоды COSMO-RU: ансамблевый прогноз // *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2011. № 346. С. 5—15.
16. Астахова Е. Д. Ансамблевый среднесрочный прогноз погоды: реализация технологии на современной компьютерной базе // *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2011. № 346. С. 33—46.
17. Di Narzo A. F. and Cocchi D. A Bayesian hierarchical approach to ensemble weather forecasting. // *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*. 2010. Vol. 59. P. 405—422. doi: 10.1111/j.1467-9876.2009.00700.x.
18. Kalnay E. Historical perspective: earlier ensembles and forecasting forecast skill. // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2019. Vol. 145 (Suppl. 1). P. 25—34. doi: 10.1002/qj.3595.
19. Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Ефимов С. В. и др. Исследование ливневой и грозовой активности на территории России с использованием численной модели конвективного облака и данных реанализа. // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 1. С. 32—43.
20. Ашабоков Б. А., Шаповалов А. В., Кулиев Д. Д. и др. Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития // *Известия Вузов. Радиофизика*. 2013. Т. 56, № 11—12. С. 900—907.
21. Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Затевахин М. А. и др. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака. // *Труды ГГО*. 2016. № 582. С. 45—91.
22. Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е. и др. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 3. Численное моделирование эволюции облака // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 8. С. 18—28.
23. Barthe C., Molinie G., Pinty J. P. Description and first results of an explicit electrical scheme in a 3D cloud resolving model // *Atmospheric Research*. 2005. V. 76 (1–4). P. 95—113. doi: 10.1016/j.atmosres.2004.11.021
24. Bo Zhang, Bin Chen, Lihua Shi, Qiang Chen. Modeling of the Stepped Leader Initiation Process in an Altitude Triggered Lightning // *Mathematical problems in engineering*. 2016. Vol. 2016. 10 pp. doi: 10.1155/2016/9201253.



25. Scavuzzo C. M., Masuelli S., Garanti G. M., Williams E. R. A numerical study of thundercloud electrification by graupel-crystal collisions// *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, No D12. P. 13963—13973. doi: 10.1029/97JD03734.
26. Ziegler C. L., McGorman D. R., Dye J. E., Ray R. S. A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm// *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96, No D7. P. 12833—12855. doi: 10.1029/91JD01246.
27. Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. Санкт-Петербург: Типография «Моби Дик». 2013. 220 с.
28. Алдухов О. А., Черных И. В. Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Том 1. Контроль качества и обработка данных. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. 2013. 306 с.
29. Зайцева Н. А., Балагуров А. М., Крестьяникова Н. Н., Николаев А. В. Современное состояние и перспективы развития аэрологической сети России // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 9. С. 5—20.
30. Хохлова А. В., Тимофеев А. А., Руденкова Т. В. Каталог аэрологических станций по архивам единого государственного фонда данных // *Труды ВНИИГМИ-МЦД*. 2020. № 187. С. 78—90.
31. Торопова, М. Л., Русин И.Н. Воспроизведение стратификации атмосферы с целью прогноза конвективных явлений при помощи мезомасштабной модели WRF-ARW // *Труды ГГО*. 2019. № 593. С. 160—176.
32. Торопова М. Л., Михайловский Ю. П., Веремей Н. Е. и др. Ансамблевый прогноз развития грозовой облачности на северо-западе ЕТР и верификация результатов моделирования // *Труды ГГО*. 2022. № 606. С. 7—31.

### References

1. Gorbatenko V. P., Krechetova S. Yu., Belikova M. Yu., Nечepurenko O. E. Comparison of atmospheric instability indices recovered from radiosounding and MODIS spectroradiometer data on days with thunderstorms over the territory of Western Siberia. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2015;(5):(10—19). (In Russ.)
2. Gubenko I. M., Rubinstein K. G. Analysis of the results of calculating thunderstorm activity using atmospheric instability indices according to the WRF-ARW numerical model. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2015;(1):(27—38). (In Russ.)
3. Pepler R. A. Review of Static Stability Indices and Related Thermodynamic Parameters. *Illinois State Water Survey*. Technical Report, 1988:94 p.
4. Gubenko I. M., Rubinstein K. G. Forecast of thunderstorm activity using the model of electrification of cumulonimbus clouds. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2017; (2):(5—19). (In Russ.)
5. Kalinin N. A., Vetrov A. L., Sviyazov E. M., Popova E. V. Study of intense convection in the Perm Region using the WRF model. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2013; (9):(21—30). (In Russ.)
6. Brenowitz N. D., Bretherton C. S. Prognostic validation of a neural network unified physics parameterization. *Geophysical Research Letters*. 2018; (45):6289—6298. doi: 10.1029/2018GL078510.
7. Gentine P., Pritchard M., Rasp S., et al. Could machine learning break the convection parameterization deadlock? *Geophysical Research Letters*. 2018; (45):5742—5751. doi: 10.1029/2018GL078202.
8. Ukkonen P., Mäkelä A. Evaluation of machine learning classifiers for predicting deep convection. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2019; (11):1784—1802. doi: 10.1029/2018MS001561.
9. Bengtsson L. and Körnich H. Impact of a stochastic parametrization of cumulus convection, using cellular automata, in a mesoscale ensemble prediction system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2016; (142):1150—1159. doi: 10.1002/qj.2720.
10. Shutts G. A stochastic convective backscatter scheme for use in ensemble prediction systems. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2015; (141):2602—2616. doi: 10.1002/qj.2547.
11. Barthlott C., Burton R., Kirshbaum D., et al. Initiation of deep convection at marginal instability in an ensemble of mesoscale models: a case-study from COPS. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011; (137):118—136. doi: 10.1002/qj.707.

12. Gensini V. A., Tippett M. K. Global Ensemble Forecast System (GEFS) predictions of days 1–15 U.S. tornado and hail frequencies. *Geophysical Research Letters*. 2019; (46):2922–2930. doi: 10.1029/2018GL081724.
13. Subramanian A. C., and Palmer T. Ensemble superparameterization versus stochastic parameterization: A comparison of model uncertainty representation in tropical weather prediction. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2017; (9):1231–1250. doi: 10.1002/2016MS000857.
14. Weyn J. A., Durran D. R., Caruana R., Cresswell-Clay N. Sub-seasonal forecasting with a large ensemble of deep-learning weather prediction models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2021; 13:e2021MS002502. doi: 10.1029/2021MS002502.
15. Alferov D. Yu., Rivin G. S. System of mesoscale weather forecast COSMO-RU: ensemble forecast. *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii = Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2011; (346):(5–15). (In Russ.)
16. Astakhova. E. D. Ensemble medium-term weather forecast: implementation of technology on a modern computer base. *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii = Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2011; (346):(33–46). (In Russ.)
17. Di Narzo A. F. and Cocchi D. A Bayesian hierarchical approach to ensemble weather forecasting. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*. 2010; (59):405–422. doi: 10.1111/j.1467-9876.2009.00700.x.
18. Kalnay E. Historical perspective: earlier ensembles and forecasting forecast skill. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2019; 145(Suppl. 1):25–34. doi: 10.1002/qj.3595.
19. Veremei N. E., Dovgalyuk Yu. A., Efimov S. V. et al. Investigation of rain and thunderstorm activity on the territory of Russia using a numerical model of a convective cloud and relativistic analysis data. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2013; (1):(32–43). (In Russ.)
20. Ashabokov B. A., Shapovalov A. V., Kuliyeu D. D and others. Numerical modeling of thermodynamic, microstructural and electrical characteristics of convective clouds at the stage of growth and maximum development. *Izvestiya vuzov. Radiophysica = News of Universities. Radiophysics*. 2013; (56):11–12:(900–907). (In Russ.)
21. Veremei N. E., Dovgalyuk Yu. A., Zatevakhin M. A., Ignatiev A. A., Morozov V. N., Pastushkov R. S. Description of the basic numerical nonstationary three-dimensional model of a convective cloud. *Trudy GGO = Proceedings of the MGO*. 2016; (582):(45–91). (In Russ.)
22. Sin'kevich A. A., Dovgalyuk Yu. A., Veremei N. E., et al. Studies of thunderstorm-hail cloud development. Part 3. Numerical simulation of cloud evolution. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2017; (8):(18–28).
23. Barthe C., Molinie G., Pinty J. P. Description and first results of an explicit electrical scheme in a 3D cloud resolving model. *Atmospheric Research*. 2005; 76(1–4):95–113. doi: 10.1016/j.atmosres.2004.11.021
24. Bo Zhang, Bin Chen, Lihua Shi, Qiang Chen. Modeling of the Stepped Leader Initiation Process in an Altitude Triggered Lightning. *Mathematical problems in engineering*. 2016; 2016:10 pp. doi: 10.1155/2016/9201253.
25. Scavuzzo C. M., Masuelli S., Garanti G. M., Williams E. R. A numerical study of thundercloud electrification by graupel-crystal collisions. *J. Geophys. Res.* 1998; (103):D12:13963–13973. doi: 10.1029/97JD03734.
26. Ziegler C. L., McGorman D. R., Dye J. E., Ray R. S. A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm. *J. Geophys. Res.* 1991; (96):D7:12833–12855. doi: 10.1029/91JD01246.
27. Dovgalyuk Yu. A., Veremei N. E., Sin'kevich A. A. *Application of a one-and-a-half-dimensional model for solving fundamental and applied problems of cloud physics*. St. Petersburg: Moby Dick Printing House. 2013: 220 pp. (In Russ.)
28. Aldukhov O. A., Chernykh I. V. Methods of analysis and interpretation of atmospheric radiosounding data. Vol. 1. *Quality control and data processing*. Obninsk: FSBI “VNIIGMI-MCD”. 2013: 306 pp. (In Russ.)

29. Zaitseva N. A., Balagurov A.M., Krestyanikova N. N., Nikolaev A.V. The current state and prospects of development of the aerological network of Russia. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2021; (9):(5—20). doi: 10.52002/0130-2906-2021-9-5-20. (In Russ.)
30. Khokhlova A. V., Timofeev A. A., Rudenkova T. V. Catalog of aerological stations in the archives of the Unified State Data Fund. *Trudy Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrometeorologicheskoy informacii - Mirovogo centra dannyh = Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center*. 2020; (187):(78—90). (In Russ.)
31. Toropova M. L., Rusin I. N. Reproducing of atmospheric stratification in order to predict convective phenomena using the WRF-ARW model. *Trudy GGO = Proceedings of MGO*. 2019; (593):(160—176).
32. Toropova M. L., Mikhailovskii Yu. P., Veremei N. E. and others. Ensemble forecast of thunderstorm cloud development in the north-west of the ETR and verification of simulation results. *Trudy GGO = Proceedings of MGO*. 2022; (606):(7—31). (In Russ.)

### **Информация об авторах**

*Марина Леонидовна Торопова*, научный сотрудник Отдела геофизического мониторинга и исследований Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, marina-toropova@mail.ru.

*Юрий Павлович Михайловский*, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отдела геофизического мониторинга и исследований Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, yupalych@yandex.ru.

*Александр Борисович Куров*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Отдела геофизического мониторинга и исследований Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, remotesensing@mail.ru.

*Андрей Александрович Синькевич*, доктор технических наук, главный научный сотрудник Отдела геофизического мониторинга и исследований Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, sinkevich51@mail.ru.

*Николай Евгеньевич Веремей*, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отдела геофизического мониторинга и исследований Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, veremey@gmail.com.

### **Information about authors**

*Marina Leonidovna Toropova*, research scientist, Department of geophysical monitoring and research of the Voeikov Main geophysical observatory, marina-toropova@mail.ru.

*Nikolai Evgenievich Veremei*, PhD, leading research scientist, Department of geophysical monitoring and research of the Voeikov Main geophysical observatory, yupalych@yandex.ru.

*Yurii Pavlovich Mikhailovskii*, PhD, leading research scientist, Department of geophysical monitoring and research of the Voeikov Main geophysical observatory, remotesensing@mail.ru.

*Alexander Borisovich Kurov*, PhD, senior research scientist, Department of geophysical monitoring and research of the Voeikov Main geophysical observatory, sinkevich51@mail.ru.

*Andrei Alexandrovich Sin'kevich*, PhD, main research scientist, Department of geophysical monitoring and research of the Voeikov Main geophysical observatory, veremey@gmail.com.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 23.04.2023*

*Принята к печати после доработки 07.07.2023*

*The article was received on 23.04.2023*

*The article was accepted after revision on 07.07.2023*