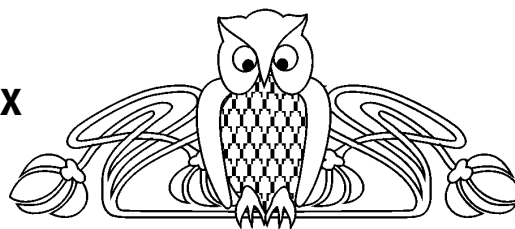




УДК 551.576.11

ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ МОЩНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ВЕТРА В АТМОСФЕРЕ



В. А. Шаповалов

Шаповалов Виталий Александрович, кандидат физико-математических наук, ст. научный сотрудник отдела физики облаков, Высогогорный геофизический институт, Нальчик, atajuk@mail.ru

Приведено описание разработанной трехмерной математической модели конвективного облака, которая включает уравнения гидротермодинамики, микрофизики и электростатики. В модели используется явное описание микрофизических процессов на основе кинетических уравнений для функций распределения частиц по массам. Рассмотрены результаты моделирования образования и развития конвективных облаков при различных характеристиках поля горизонтального ветра в атмосфере. Определено, что на термодинамические параметры облаков, форму и размеры областей локализации капель и ледяных кристаллов значительное влияние оказывает изменение направления и скорости ветра с высотой в атмосфере. Имело место усиление параметров облака при отсутствии поворота ветра с высотой.

Ключевые слова: конвективное облако, трехмерная численная модель, явная микрофизика, термодинамические и микроструктурные параметры, влияние направления и скорости ветра с высотой.

Formation and Development of Powerful Convective Clouds with Different Characteristics of Wind in the Atmosphere

V. A. Shapovalov

Vitaly A. Shapovalov, <https://orcid.org/0000-0003-1204-6332>, High-Mountain Geophysical Institute, 2, Lenin Ave, Nalchik, 360030, Russia, atajuk@mail.ru

The description of the developed three-dimensional mathematical model of convective cloud, which includes the equations of hydrothermodynamics, microphysics and electrostatics is given. The model uses an explicit description of microphysical processes based on kinetic equations for particle mass distribution functions. The result of modeling the formation and development of convective clouds at different characteristics of the horizontal wind field in the atmosphere are considered. It is determined that the thermodynamic parameters of clouds, the shape and size of the areas of localization of drops and ice crystals are significantly influenced by changes in the wind direction and velocity in the atmosphere. There was an increase in the parameters of the cloud in the absence of wind rotation with height.

Key words: convective cloud, three-dimensional numerical model, explicit microphysics, thermodynamic and microstructural parameters, influence of wind direction and velocity with height.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2018-18-4-259-264>

Введение

Решение задач физики конвективных облаков требует комплексного подхода и исполь-

зования эффективных методов, важнейшее место среди которых занимает математическое моделирование. Следует отметить, что, несмотря на определенные успехи, многие процессы в облаках до настоящего времени изучены на недостаточном уровне. Это относится, например, к гидротермодинамике мощных облаков, к процессам электризации облачных частиц, образованию града и ко многим другим.

Математическое моделирование позволяет детально изучать как отдельные физические процессы, так и их взаимодействие между собой. Несомненным преимуществом моделирования является тот фактор, что оно позволяет изучать малодоступные для экспериментального исследования процессы.

Математическое моделирование облаков на основе трехмерных моделей развивается в нашей стране [1–7] и за рубежом [8–14]. Разработаны модели различной размерности и степени детальности учета микрофизических и электрических процессов.

Численные модели с детальным учетом микрофизических процессов позволяют исследовать формирование микроструктурных характеристик облаков, образование ледяных частиц, рост частиц осадков и другие процессы. В большинстве таких моделей для описания микрофизических процессов используются кинетические уравнения для распределения частиц по размерам или массам [5, 8]. Следует отметить, что микрофизические процессы охватывают широкий спектр размеров частиц – от микронных до миллиметровых капель и сантиметровых градин, поэтому предпочтительно использовать модели с детальным описанием термогидродинамических процессов и детальной микрофизикой.

Важным этапом физики конвективных облаков является исследование влияния характеристик ветра в атмосфере на формирование их макро- и микроструктурных характеристик [15]. В данной работе приведены результаты моделирования образования и развития конвективных облаков при различных характеристиках поля горизонтального ветра в атмосфере.

Методика исследования

Остановимся на постановке задачи математической модели конвективного облака. Разработанная модель включает уравнения гидротермодинамики, микрофизики и электростатики.



Гидротермодинамический блок модели состоит из уравнений движения, описывающих влажную конвекцию в приближении Буссинеска. Уравнения и методика решения изложены в работе [5].

Микрофизический блок модели описывает процессы нуклеации, конденсации, коагуляции капель с каплями, сублимации, аккреции, замерзания капель, осаждения облачных частиц в поле силы тяжести, их перенос воздушными потоками, а также взаимодействие облачных частиц под влиянием электрического поля облака [1].

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + u \frac{\partial f_1}{\partial x} + v \frac{\partial f_1}{\partial y} + (w - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} = \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КД}} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КТ}} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{АК}} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{ДР}} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_1 + I_1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial t} + u \frac{\partial f_2}{\partial x} + v \frac{\partial f_2}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} = \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_C + \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\text{АК}} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_2 + I_2 + I_{\text{АВ}}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial t} + u \frac{\partial f_3}{\partial x} + v \frac{\partial f_3}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_3}{\partial z} = \left(\frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_3 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{\text{АК}} + \Delta' f_3, \quad (3)$$

$$0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad 0 \leq z \leq L_z,$$

$$0 \leq m < \infty, \quad t > 0,$$

где $V_1(m)$, $V_2(m)$ – установившиеся скорости падения жидких и твердых частиц;

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КД}}, \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КТ}}, \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{АК}}, \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{ДР}}, \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3 - \text{изменения}$$

функции распределения капель за счет микрофизических процессов конденсации, коагуляции капель, аккреции капель и кристаллов, дробления и замерзания соответственно;

$$\left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_C, \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\text{АК}}, \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_3 - \text{изменения функции}$$

распределения кристаллов за счет сублимации, аккреции и замерзания капель;

$$\left(\frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_3, \left(\frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{\text{АК}} - \text{изменения функции распреде-$$

ления $f_3(\vec{r}, m, t)$ за счет образования осколков при спонтанном замерзании переохлажденных облачных капель и их аккреции с кристаллами;

I_1 и I_2 – источники капель и кристаллов;

$I_{\text{АВ}}$ – источник искусственных кристаллов при активном воздействии льдообразующими реагентами;

$$\Delta' = \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial}{\partial z},$$

$u(\vec{r})$, $v(\vec{r})$, $w(\vec{r})$ – компоненты вектора скорости воздушных потоков в облаке. Для системы уравнений (1)...(3) использовались следующие начальные и граничные условия:

Физический процесс разделения электрических зарядов на стадии формирования осадков – это зарядение переохлажденных капель при их быстром замерзании (знак заряда «минус»), образующиеся при замерзании мелкие осколки заряжаются положительно согласно физической гипотезе [16].

Система уравнений для функций распределения по массам капель $f_1(\vec{r}, m, t)$, ледяных частиц $f_2(\vec{r}, m, t)$ и осколков замерзания капель $f_3(\vec{r}, m, t)$ имеет следующий вид:

$$f_1(\vec{r}, m, 0) = f_2(\vec{r}, m, 0) = f_3(\vec{r}, m, 0) = 0, \quad (4)$$

$$f_1(\vec{r}, m, t) = f_2(\vec{r}, m, t) = f_3(\vec{r}, m, t) = 0 \text{ при } x = 0, L_x,$$

$$f_1(\vec{r}, m, t) = f_2(\vec{r}, m, t) = f_3(\vec{r}, m, t) = 0 \text{ при } y = 0, L_y,$$

$$f_1(\vec{r}, m, t) = f_2(\vec{r}, m, t) = f_3(\vec{r}, m, t) = 0 \text{ при } z = L_z,$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial z} = \frac{\partial f_2}{\partial z} = \frac{\partial f_3}{\partial z} = 0 \text{ при } z = 0.$$

Выражения для расчета слагаемых, входящих в уравнения (1)...(4), подробно изложены в работе [1].

Расчеты проводились в прямоугольной пространственной области $40 \times 40 \times 16$ км [16]. Развитие облака инициировалось внесением теплового импульса вблизи поверхности земли со следующими параметрами: координаты центра импульса в расчетной области (м) – 16000; 16000; 1500, размеры импульса по трем осям координат (м) – 1500; 1500; 2000, перегрев $\Delta T = 1^\circ\text{C}$.

Результаты и их обсуждение

Ниже излагаются результаты исследования влияния распределения ветра в атмосфере на образование и развитие конвективных облаков, что является одним из механизмов влияния атмосферы на процессы облакообразования.

Результаты расчетов параметров облака на 30-й минуте развития приведены на рис. 1. Представлены несколько изолиний скорости вертикальных потоков с шагом 1 м/с и трехмерная изоповерхность $W = 10$ м/с. Изолинии изображены в вертикальной плоскости, проходящей через центр облака параллельно оси OX . Справа на рис. 1 схематически изображено распределение по вертикали горизонтального ветра в атмосфере.



Стрелки указывают направление ветра, а их длина пропорциональна его скорости. С применением авторской программы трехмерной визуализации расчетных данных получены рис. 1–4 [17]. Можно заметить, что изменение ветра по направлению и величине носит достаточно сложный характер. В численных экспериментах рассчитывалась также радиолокационная структура облака на длинах

волн метеорологических радиолокаторов 3, 5 и 10 см для сравнения с данными наблюдений [18].

Максимальные значения параметров облака следующие: скорость нисходящих и восходящих потоков $W_{\text{нис}} = -1,86$ м/с и $W_{\text{вос}} = 17,3$ м/с, $z = 4000$ м; водность $5,8$ г/м³, $z = 4500$ м; ледность 5×10^{-4} г/м³, $z = 5500$ м; радиолокационная отражаемость на длине волны 10 см 17,5 dBZ,

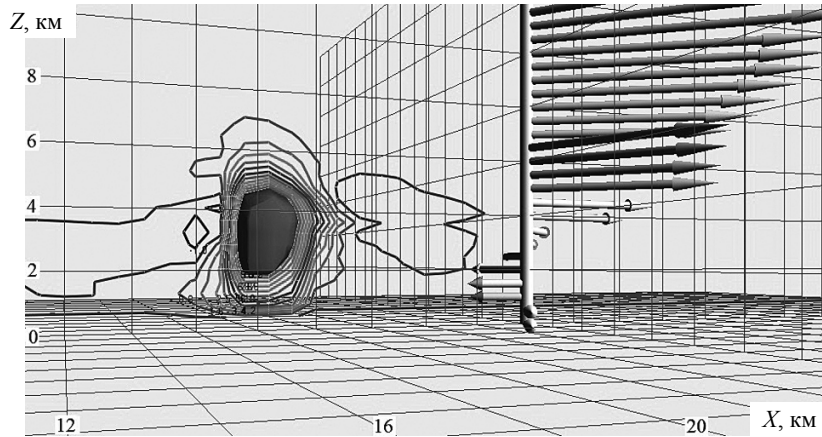


Рис. 1. Восходящие и нисходящие потоки и горизонтальный ветер по зонду в трехмерной области. Трехмерная изоповерхность $W_{\text{вос}} = 10$ м/с

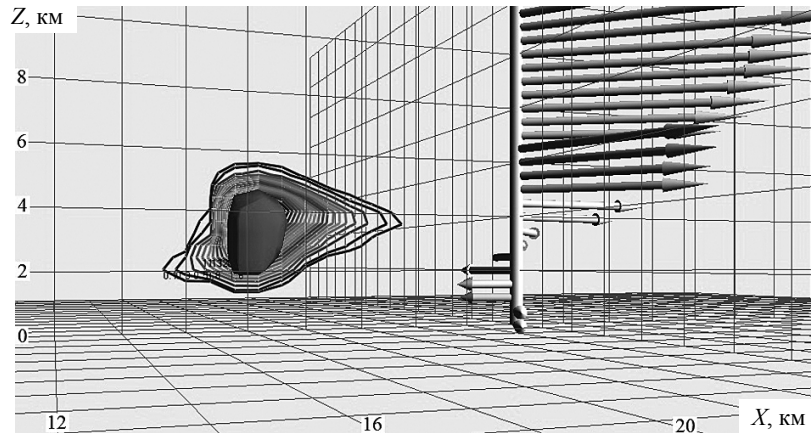


Рис. 2. Изолинии водности и изоповерхность восходящих потоков $W_{\text{вос}} = 10$ м/с

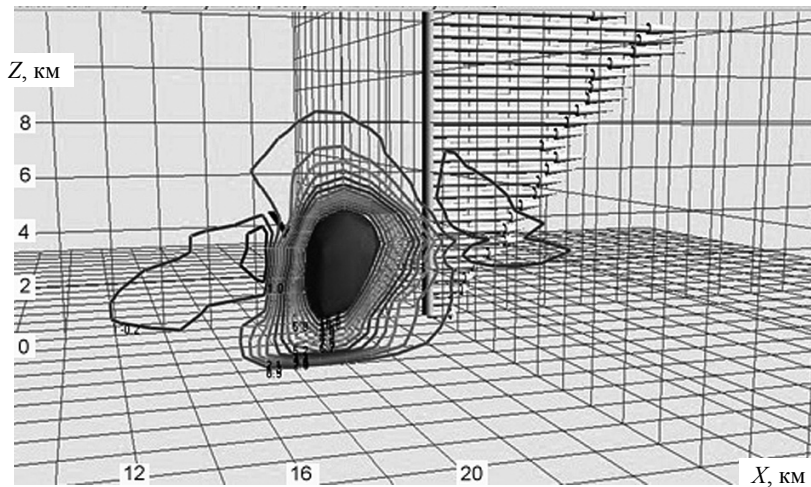
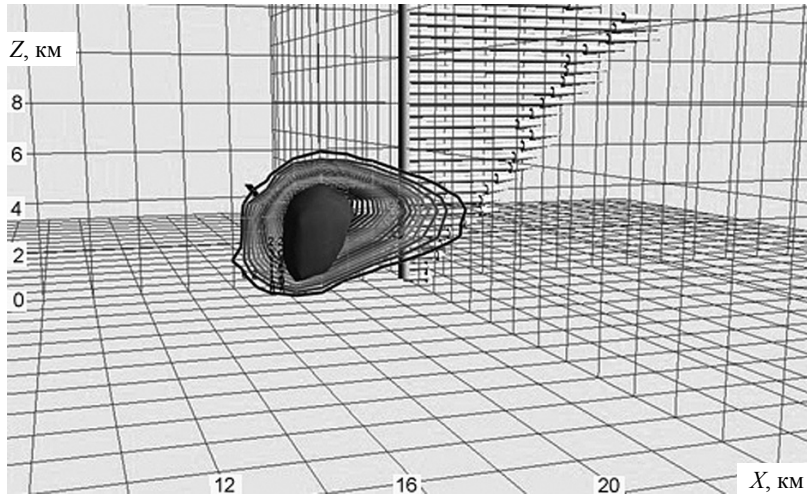


Рис. 3. Изолинии восходящих и нисходящих потоков на 30-й минуте, изоповерхность $W = 10$ м/с и распределение фонового ветра по вертикали

Рис. 4. Изолинии водности. Исоповерхность $W = 10$ м/с

$z = 4500$ м. Параметры соответствуют развивающемуся конвективному облаку. Можно заметить, что структура воздушных потоков внутри облака и вокруг него носит достаточно сложный характер, при этом восходящие потоки более упорядочены, чем нисходящие потоки в обширной области вокруг зоны восходящих потоков.

Изолинии водности приведены на рис. 2, максимальное значение водности составляет около 6 г/м^3 . Как можно заметить из рис. 2, изолинии водности в облаке локализируются в зоне восходящих потоков, что согласуется с теорией формирования жидкокапельной фракции в облаке. Можно еще заметить, что на форму области локализации капель в облаке значительное влияние оказывает распределение ветра по высоте в атмосфере.

Область формирования кристаллов расположена в верхней части изоповерхности $W_{\text{вос}} = 10 \text{ м/с}$. По результатам расчетов в силу малой концентрации и незначительных размеров кристаллов в рассматриваемый момент времени радиолокационная структура облака формируется преимущественно жидкокапельной фракцией.

Такие же данные были получены в ходе расчетов по модели для 35 мин и 40 мин развития облака.

Максимальные значения параметров облака на 35-й минуте были следующие: скорость нисходящих и восходящих потоков $W_{\text{н}} = -2,26 \text{ м/с}$ и $W_{\text{в}} = 16,4 \text{ м/с}$, $z = 4500 \text{ м}$; водность $7,77 \text{ г/м}^3$, $z = 4000 \text{ м}$; ледность $3,94 \text{ г/м}^3$, $z = 6500 \text{ м}$; отражаемость 55 dBZ , $z = 4000 \text{ м}$.

Можно заметить, что по сравнению с предыдущим моментом времени имеет место некоторое уменьшение скорости восходящих потоков, а максимальное значение скорости нисходящих потоков наоборот заметно увеличилось. Значительно увеличилась и ледность, максимальное ее значение увеличилось на порядки, что свидетельствует об интенсивном росте кристаллов в облаке. Изменились также высоты, на которых располагаются рассматриваемые параметры об-

лака: выше оказались максимальные значения скорости восходящих и нисходящих потоков, а также ледности. Это, видимо, связано с тем, что в верхней части зоны локализации капель происходит интенсивное их поглощение кристаллами, в результате которого образуются градины.

Остановимся на некоторых результатах расчетов, которые были проведены для исследования влияния на характеристики облака изменения распределения горизонтального ветра с высотой. При проведении расчетов на рис. 2 все параметры атмосферы, использованные в рис. 1, оставались неизменными, но для горизонтального ветра было принято условие, что поток имеет одно и то же направление на всех высотах в атмосфере – вдоль оси OX (идеализированный случай). Характеристики направления и скорости ветра по высоте в этом варианте приведены в виде стрелок на рис. 3.

Изолинии, соответствующие различным значениям скорости восходящих и нисходящих потоков в облаке и вокруг него на 30-й минуте, приведены на рис. 3. Горизонтальная и вертикальная вспомогательные сетки имеют ячейки $2 \times 2 \text{ км}$.

Более темным цветом выделена трехмерная изоповерхность $W = 10 \text{ м/с}$. Как показывают результаты расчетов, структура воздушных потоков внутри и вокруг облака носит достаточно сложный характер. Можно заметить, что восходящие потоки более упорядочены, чем нисходящие. Кроме того, максимальные значения скорости восходящих потоков воздуха в облаке заметно выше этих же значений нисходящих потоков. Последние занимают обширную область вокруг зоны восходящих потоков.

Из анализа рис. 3 видно, что на формирование поля скоростей воздушных потоков в облаке и вокруг него влияет структура ветра в атмосфере. Под его влиянием нарушается симметричность параметров облака, характеризующих поля восходящих и нисходящих потоков воздуха: зона восходящих потоков наклоняется к горизонтали, структура нисходящих потоков значительно ус-



ложняется. Некоторое расширение верхней части этой зоны, видимо, можно связать с влиянием ветра в атмосфере.

По нашему мнению, упорядоченный характер зоны восходящих потоков связан с тем, что большая энергия неустойчивости атмосферы и, соответственно, большие скорости этих потоков приводят к некоторому ослаблению влияния ветра в атмосфере на структуру восходящих потоков. Благодаря этому данная зона по отношению к ветру в атмосфере ведет себя как препятствие, которое обтекается горизонтальным ветром.

Изолинии, соответствующие различным значениям влажности, и изоповерхность $W = 10$ м/с изображены на рис. 4. Можно заметить, что изолинии влажности локализуются в зоне восходящих потоков в облаке, что согласуется с теоретическими представлениями о формировании капельной фракции в облаке. Максимальное значение данного параметра располагается в верхней половине зоны восходящих потоков.

Можно также заметить, что под влиянием ветра в атмосфере нарушена симметричность зоны локализации влажности в облаке. Верхняя часть данной зоны вытянута в направлении ветра в атмосфере. Значительное влияние на форму этой зоны оказывает изменение по высоте значения и направления скорости ветра в атмосфере. В то же время величина влажности в облаке в этот момент времени достаточно большая: максимальное ее значение немногим меньше 6 г/м^3 . Отметим, что влажность в облаке в рассматриваемый момент времени обусловлена жидкокапельной фракцией, а ледность в облаке пока еще незначительна. Она примерно равна $3 \times 10^{-4} \text{ г/м}^3$, т. е. фазовые переходы воды в облаке пока еще не очень интенсивны.

Максимальные значения параметров облака на 30-й минуте развития: скорость нисходящих и восходящих потоков $W_{\text{н}} = -1,780$ м/с и $W_{\text{в}} = 15,2$ м/с, $z = 4000$ м; влажность $5,48 \text{ г/м}^3$, $z = 4500$ м; ледность $3 \times 10^{-4} \text{ г/м}^3$, $z = 5500$ м; отражаемость на 10 см $17,5 \text{ dBZ}$, $z = 4500$ м – были представлены на рис. 2.

Сравнение этих значений параметров с соответствующими их значениями на рис. 1 в этот же момент времени показывает, что имеет место некоторое уменьшение максимальных значений всех параметров. Кроме того, как показывает сравнение, на рис. 2 появился наклон изоповерхности $W = 10$ м/с к горизонтальной плоскости. Имеет место также некоторое расширение области восходящих потоков, а область нисходящих потоков изменилась незначительно.

Максимумы параметров облака на 35-й минуте оказались равными: скорость нисходящих и восходящих потоков $W_{\text{н}} = -1,8$ м/с и $W_{\text{в}} = 17,1$ м/с, $z = 5000$ м; влажность $9,02 \text{ г/м}^3$, $z = 4500$ м; ледность $4,63 \text{ г/м}^3$, $z = 6500$ м; отражаемость $65,5 \text{ dBZ}$, $z = 4500$ м. В этом случае имеет место небольшое увеличение максимального значения скорости восходящих потоков. Более заметно увеличились

максимальные значения влажности и ледности в облаке.

Сравнение расчетных вариантов указывает на значительную роль в формировании макро- и микроструктурных характеристик облака распределения по высоте горизонтального фонового ветра в атмосфере.

Выводы

В заключение отметим, что по результатам исследований характеристики ветра в атмосфере оказывают заметное влияние на процессы облакообразования. Результаты расчетов характеристик облака с поворотом горизонтального ветра с высотой и без такового в одной и той же синоптической ситуации показали, что имело место усиление параметров облака при отсутствии поворота ветра, причем это усиление становилось заметным после начала выпадения осадков. Это можно объяснить тем, что поворот горизонтального ветра в атмосфере разносит в пространстве зоны восходящих потоков и выпадения осадков. При отсутствии такого поворота данные зоны оказываются в одной вертикальной плоскости, что приводит к усилению восходящих движений воздуха в облаке и, тем самым, к интенсификации процессов облако- и осадкообразования.

Библиографический список

1. Ашабоков, Б. А., Шаповалов, А. В. Конвективные облака : численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. Нальчик : Изд-во Института информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, 2008. 257 с.
2. Бекряев, В. И., Гурович, М. В. Нестационарная численная модель Сб // Труды / ГГО. 1991. № 538. С. 109–121.
3. Довгалюк, Ю. А. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. I. Структура модели и основные уравнения гидротермодинамического блока // Труды / ГГО. 2008. № 558. С. 102–142.
4. Довгалюк, Ю. А. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. II. Микрофизический блок модели // Труды / ГГО. 2010. № 562. С. 7–39.
5. Коган, Е. Л., Мазин, И. П., Сергеев, Б. Н., Хворостьянов, В. И. Численное моделирование облаков. М. : Гидрометеоздат, 1984. 186 с.
6. Пастушков, Р. С. Физико-математические модели конвективных облаков (краткий обзор и классификация) // Труды / ЦАО. 1973. № 112. С. 3–14.
7. Сергеев, Б. Н., Смирнов, В. И. Численное моделирование микрофизических процессов в капельных конвективных облаках // Труды / ЦАО. 1980. № 137. С. 3–26.
8. Berry, E. X., Reinhard, R. L. An analysis of cloud drop growth by collection. Part I. Double distributions // Journal of the Atmospheric Sciences. 1974. Vol. 31, № 7. P. 1825–1831.
9. Clark, T. Numerical Simulation with a Tree-Dimension Cloud Model : lateral Boundary Condition Experiments and



- Multicellular Severe Storm Simulations // Journal of the Atmospheric Sciences. 1979. Vol. 36, № 11. P. 2191–2215.
10. Cotton, W. R., Stephens, M. A., Neuhoff, T., Tripoli, G. J. The Colorado State University three-dimensional cloud model – 1982. Part II : An ice phase parameterization // Journal de Recherches Atmospheriques. 1982. № 16. P. 295–320.
11. Farley, R. B. Numerical Modeling of Hailstone Growth. Part III : Simulation of an Alberta Hailstorm – Natural Seeded Cases // Journal of Climate and Applied Meteorology. 1987. Vol. 26, № 7. P. 789–812.
12. Orville, R. D., Kopp, F. J. Numerical simulation of the life history of a hailstorm // Journal of the Atmospheric Sciences. 1977. Vol. 34, № 10. P. 1596–1618.
13. Rawlins, F. A numerical study of thunderstorm electrification using a three dimensional model incorporating the ice phase // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1982. Vol. 108. P. 779–801.
14. Straka, J. M. Cloud and precipitation microphysics. Principles and Parameterizations. Cambridge : Cambridge University Press, 2009. 392 p.
15. Пастушков, Р. С. О влиянии вертикального сдвига ветра на развитие конвективной облачности // Известия АН СССР. ФАО. 1973. Т. IX, № 1. С. 12–26.
16. Куповых, Г. В., Ашабоков, Б. А., Бейтуганов, М. Н., Шаповалов, А. В., Продан, К. А., Шаповалов, В. А. Численное моделирование электрических характеристик конвективных облаков // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2012. № 6. С. 65–68.
17. Шаповалов, А. В., Шаповалов, В. А. Трехмерная визуализация геофизической информации для решения прикладных задач // Наука. Инновации. Технологии. 2014. № 1. С. 65–71.
18. Довиак, Р., Зрнич, Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л. : Гидрометеоиздат, 1988. 511 с.

Образец для цитирования:

Шаповалов В. А. Образование и развитие мощных конвективных облаков при различных характеристиках ветра в атмосфере // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2018. Т. 18, вып. 4. С. 259–264. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2018-18-4-259-264>

Cite this article as:

Shapovalov V. A. Formation and Development of Powerful Convective Clouds with Different Characteristics of Wind in the Atmosphere. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2018, vol. 18, iss. 4, pp. 259–264 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2018-18-4-259-264>