

УДК 551.576.11

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ В КАЧЕСТВЕ ПРЕДИКТОРОВ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЛАКОВ

В.А. Шаповалов

Высокогорный геофизический институт, atajuk@mail.ru

Представлена методика формирования трехмерных исходных данных состояния атмосферы для численного моделирования образования и развития конвективных облаков, которая основана на использовании выходной информации глобальной модели атмосферы. Начальные значения параметров атмосферы (давления, температуры воздуха, точки росы, направления и скорости ветра) задаются с использованием данных глобальной модели GFS в формате GRIB. Для демонстрации подхода проведены расчеты по трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака с детальным описанием термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Сравнивались характеристики облаков при горизонтально однородном и трехмерном задании термодинамических параметров атмосферы в начальный момент времени в пространственном домене. Использование трехмерных данных при моделировании позволяет более адекватно воспроизводить эволюцию конвективных облаков при естественном развитии и при активном воздействии.

Ключевые слова: численное моделирование, конвективные облака, трехмерные данные, начальное состояние, термодинамические параметры атмосферы.

USING THE OUTPUT DATA OF THE GLOBAL ATMOSPHERE MODEL AS PREDICTORS FOR NUMERICAL CLOUD MODELING

V.A. Shapovalov

High-Mountain Geophysical Institute

The method is presented for the formation of three-dimensional initial atmospheric state data for the numerical simulation of the formation and development of convective clouds, which is based on the use of the output information of the global atmospheric model. Initial values of atmospheric parameters (pressure, air temperature, dew point, direction and wind speed) are set using the GFS global model data in the GRIB format. To demonstrate the approach, calculations are carried out on a three-dimensional unsteady numerical model of a convective cloud with a detailed description of thermodynamic, microphysical and electrical processes. The characteristics of clouds were compared for horizontally homogeneous and three-dimensional setting of thermodynamic parameters of the atmosphere at the initial time in the spatial domain. The use of three-dimensional data in modeling allows more adequately reproduce the evolution of convective clouds in natural development and under active influence.

Keywords: numerical modeling, convective clouds, three-dimensional data, initial state, thermodynamic parameters of the atmosphere.

Введение

Разработка математических моделей конвективных облаков и широкое их использование для проведения исследований вопросов физики облаков встречают серьезные трудности. Одной из проблем является формирование входных данных

для моделей, и связана она с несопоставимостью пространственно-временных масштабов конвективных облаков и существующих сетей наземных метеостанций и станций аэрологического зондирования атмосферы. Поэтому до сих пор в качестве входных данных моделей облаков часто используются горизонтально однородные начальные условия (стратификация атмосферы по вертикали). Это может приводить к недостаточно адекватным результатам при расчетах параметров облаков. Использование входных данных для численных моделей в виде трехмерных полей метеорологических параметров способствовало бы более адекватному моделированию формирования и развития конвективных облаков и за счет этого значительному продвижению в развитии теории облако- и осадкообразования и вопросов активного воздействия на облака.

От правильного формирования входных данных численной модели зависят не только возможности получения соответствующего физическим закономерностям облака в результате расчетов, но и в существенной степени возможности проведения самих расчетов. Адекватный выбор этих условий становится особенно актуальным для полных многомерных численных моделей облаков [2—5, 7].

В настоящей работе представлена методика формирования трехмерных исходных данных состояния атмосферы для численного моделирования конвективных облаков, которая основана на использовании выходной информации глобальной модели атмосферы. Начальные значения параметров атмосферы (давления, температуры воздуха, точки росы, направления и скорости ветра) предложено задавать с использованием данных глобальной модели GFS в формате GRIB.

1. Анализ применимости выходных данных полей метеопараметров глобальных моделей атмосферы

Оперативная доступность результатов расчетов глобальных моделей атмосферы открывает новые возможности для развития методов исследования на основе новой информационной базы конвективных процессов в атмосфере и явлений погоды, связанных с ними.

Оперативно доступны в формате GRIB следующие данные [12, 13]:

- давление на уровне подстилающей поверхности;
- скорость ветра на высоте 10 м;
- скорость ветра в порывах;
- температура воздуха на высоте 2 м;
- минимальная, максимальная и потенциальная температура воздуха на высоте 2 м;
- относительная влажность на высоте 2 м;
- общее количество осадков (мм/ч);
- доля покрытия небосвода (%);
- точка росы на высоте 2 м;
- положение изотермы 0 °С;
- CAPE (возможная потенциальная энергия конвекции) на уровне земной поверхности;

— значения метеорологических параметров на изобарических поверхностях 925, 850, 700, 500 и 300 гПа: геопотенциальная высота, скорость и направление ветра, температура воздуха, точка росы;

— вероятность выпадения града (ливней).

Доступна автоматическая загрузка данных GRIB:

— метеоданные NOAA (модель GFS);

— определенные файлы GRIB, созданные для и в *zyGrib*;

— обновления каждые 6 часов (зависит от доступности данных NOAA);

— прогноз на срок до 10 дней с шагом 3 часа;

— покрытие всей поверхности Земли с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ по широте и долготе.

Достаточно хорошее совпадение прогнозных значений стратификации атмосферы, получаемых по глобальным моделям атмосферы, с фактическими данными аэрологического зондирования означало бы решение информационного обеспечения этих исследований. Этим и вызван определенный интерес к проведению исследований по валидации выходных данных полей метеопараметров глобальных моделей атмосферы. Например, в работах [8, 9] проводилась проверка применимости выходной продукции Глобальной системы прогнозов (GFS NCEP) на примере использования ее данных при расчетах параметров атмосферы, используемых в прогнозе града, а следовательно, условий, приводящих к развитию мощных кучевых облаков.

В ходе проверки выходных данных глобальной модели GFS путем сравнения их с фактическими аэрологическими данными пунктов Минеральные Воды и Дивное было показано их хорошее совпадение [9]. Необходимо подчеркнуть, что такое совпадение получено, несмотря на заблаговременность 18—24 часов. Это может свидетельствовать о том, что использование выходных данных глобальной модели GFS в качестве входных данных моделей облаков будет давать некоторый запас времени, необходимый для проведения расчетов по существующим моделям облаков, с возможностью использования результатов расчетов в оперативной работе противорадовых служб.

Информационные интернет-сервисы о состоянии атмосферы в основном представлены интернет-сайтами предоставляющими пользователю результаты прогноза метеорологических величин на ближайшее время в каком-либо определенном регионе [12, 13].

2. Применение объемных начальных данных при моделировании конвективных облаков

Использование выходных данных региональных моделей, таких как модель WRF, может быть достаточно эффективным при моделировании конвективных облаков на основе современных трехмерных численных моделей [1—5, 7, 11, 14]. Входные данные моделей в этом случае можно задавать в виде трехмерных матриц термодинамических параметров атмосферы.

Следует отметить, что моделирование мощных кучевых облаков, в частности градовых процессов, производится в пространственной области, размером от

30×30×16 до 60×60×16 км. В пределах этой области в реальных условиях наблюдаются довольно существенные градиенты полей метеорологических величин (градиент температуры воздуха — до 1—2 °С, скорости ветра — до 10—15 м/с, направления ветра — до 180°), которые до настоящего времени не учитывались должным образом при формировании входных данных моделей облаков.

Для демонстрации усовершенствованного подхода при задании начальных полей термодинамических параметров атмосферы в трехмерных моделях в настоящей работе использовались объемные начальные данные в численных экспериментах. Они были получены путем интерполяции данных модели GFS из нескольких ближайших к выбранному домену узлов. В частности, на домен с горизонтальными размерами 60×60 км приходилось до девяти узлов в модели GFS, это позволяло получать неоднородные параметры состояния атмосферы в горизонтальных плоскостях на разной высоте. Были проведены расчеты по трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака с детальным описанием термодинамических, микрофизических и электрических процессов, изложенной в работах [1, 2].

Гидротермодинамический блок модели состоит из уравнений, описывающих влажную конвекцию в приближении Буссинеска, в которых учитывается адвективный и турбулентный перенос, силы плавучести, трения и барических градиентов.

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 (электрическую коагуляцию).

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

Для сопоставления с данными наблюдений с помощью метеорологических радиолокаторов МРЛ-5 и ДМРЛ-С [6, 10] в модели рассчитывается радиолокационная отражаемость облака на трех длинах волн (3, 5 и 10 см). Для расчета отражаемости использовалось следующее выражение:

$$Z_{rad}(x, y, z, t) = \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left(\int_0^{r_1 \max} \sigma_1(r, \lambda) \cdot f_1(x, y, z, r, t) \cdot dr + \int_0^{r_2 \max} \sigma_2(r, \lambda) \cdot f_2(x, y, z, r, t) \cdot dr \right), \quad (1)$$

где Z_{rad} — радиолокационная отражаемость (дБZ); $f_1(x, y, z, r, t)$ и $f_2(x, y, z, r, t)$ — функции распределения по размерам капель и ледяных частиц соответственно; $\sigma_1(r, \lambda)$ и $\sigma_2(r, \lambda)$ — сечения обратного рассеяния для капель и кристаллов радиусом r на длине волны излучения λ . Поскольку при расчетах использовалась модель облака с детальной микрофизикой, то при численных экспериментах функции распределения частиц по размерам (или массам) в узлах пространственной сетки известны, что позволяет вычислять радиолокационную отражаемость

в элементарных объемах $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$. Параметры $\sigma_1(r, \lambda)$ и $\sigma_2(r, \lambda)$ заданы в виде таблиц, которые вычисляются один раз заранее для всех классов размеров частиц. При сравнениях модельных и фактических радиолокационных характеристик облаков использовались данные наблюдений высокого пространственного разрешения с дискретностью 0,5 км. Импорт данных не составляет проблемы, так как автор является одним из разработчиков программного обеспечения радиолокатора ДМРЛ-С. Следует отметить, что ДМРЛ-С обеспечивает по отражаемости разрешение по лучу до 0,25 км, что можно будет использовать в дальнейшем при повышении разрешения численной модели.

В описываемом здесь численном эксперименте использовался пространственный домен размером $60 \times 60 \times 16$ км, шаг сетки составлял $dx = dy = 0,5$ км по горизонтали и $dz = 0,25$ км по вертикали. Облако инициировалось заданием перегрева у подстилающей поверхности в виде части сферы.

Начальные значения давления, температуры воздуха, точки росы, направления и скорости ветра заполнены с использованием программы *zyGrib* [12], позволяющей считывать данные глобальной модели GFS в формате GRIB. При этом начальное состояние термодинамических параметров во всех узлах пространственной сетки модели облака вычислялось с применением трехмерной бикубической интерполяции данных девяти ближайших вертикальных «столбов» данных глобальной модели. В качестве примера интенсивность осадков и поле ветра по GFS в мезорайоне, к которому относится расчетная область, приведены на рис. 1.

Центр расчетной области относится к аэропорту Минеральные Воды, в котором установлен современный российский доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С. В аэропорту имеется пункт аэрологического зондирования атмосферы. В мезорайоне функционирует радиолокационная метеорологическая сеть, включающая семь радиолокаторов МРЛ-5 противорадиолокационных служб и два ДМРЛ-С штормооповещения, что важно для сравнения радиолокационных характеристик модельных облаков с данными наблюдений.

Результаты моделирования облака с объемными начальными данными и с горизонтально однородными данными, заполненными по данным аэрологического зондирования, представлены на рис. 2. Приведены изолинии водности облака на 30-й минуте развития в вертикальной плоскости XZ , проходящей через максимум этого параметра. Представлены два случая структуры облака на одинаковой координатной сетке. На рис. 2 *а* приведена структура облака, полученная при расчетах с объемными начальными данными ($T_0(x, y, z)$, $Tr_0(x, y, z)$, $U_0(x, y, z)$, $V_0(x, y, z)$), на рис. 2 *б* — с горизонтально однородными начальными данными ($T_0(z)$, $Tr_0(z)$, $U_0(z)$, $V_0(z)$).

Сравнение изолиний водности на рис. 2 показывает, что многие ее характеристики различаются: максимальное значение, его координаты в облаке, пространственное распределение водности, а также перемещения облака в целом. В частности, для случая, представленного на рис. 2 *а*, максимальная водность составляет $4,84 \text{ г/м}^3$, координаты (км) максимума: $x = 20$; $y = 30$; $z = 5,0$. В случае горизонтально однородных начальных условий (см. рис. 2 *б*) максимальная водность составляет $5,04 \text{ г/м}^3$, координаты (км) максимума: $x = 19$; $y = 30$; $z = 4,25$.

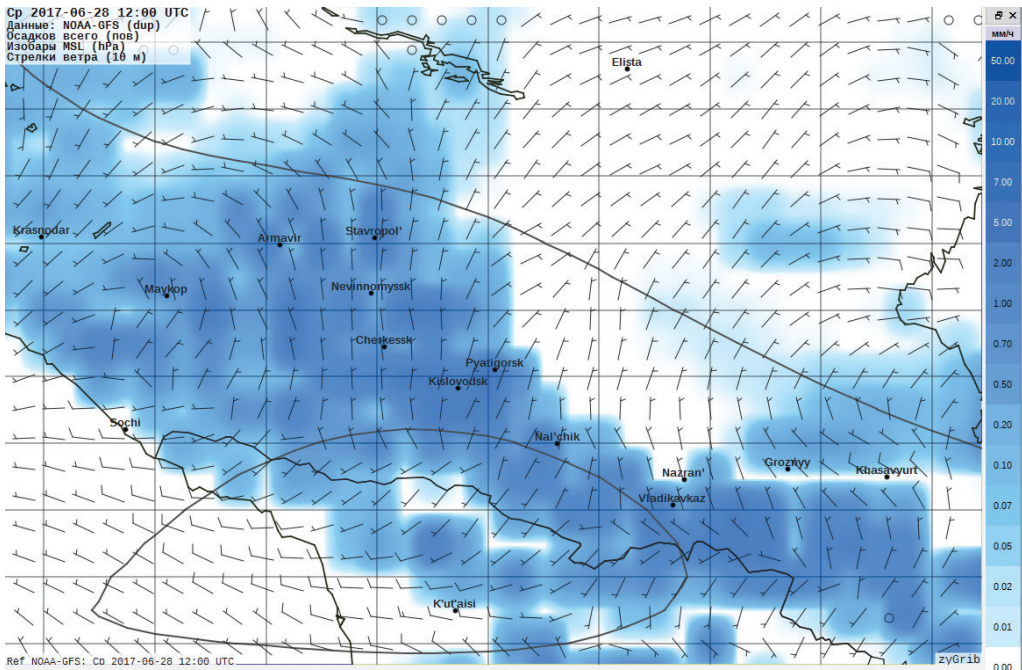


Рис. 1. Данные глобальной модели GFS за 28 июня 2017 г., 12:00, отображаемые в программе zyGrib: интенсивность осадков и ветер в Северо-Кавказском регионе.

Таким образом, разность значений максимума влажности составляет $0,2 \text{ г/м}^3$, по вертикали максимум в случае объемных данных находится выше на $0,75 \text{ км}$, по горизонтали (ось X) разность составляет $1,0 \text{ км}$. Высота верхней границы облака также различается для данного момента времени: при объемных начальных данных облако выше на 500 м , чем при горизонтально однородном задании параметров. Имеют место и другие различия, на которых в данной статье мы не останавливаемся.

Структура потоков воздуха в вертикальной плоскости, пересекающей облако по направлению его движения, на 30-й минуте развития изображена на рис. 3.

Обращает на себя внимание сложность взаимодействия облака с окружающей атмосферой. Воздух втекает в облако снизу и с левой стороны нижней части облака. Верхняя часть облака обтекается ветром в атмосфере. При этом характер взаимодействия облака с атмосферой с высотой изменяется.

По результатам расчетов ведущий поток в атмосфере на высоте 5 км обтекает облако. Кроме этого, возмущение ветра в атмосфере охватывает обширное пространство вокруг облака. Его объем значительно больше объема самого облака.

Важно отметить, что изменение структуры поля ветра в атмосфере приводит к существенному изменению характера взаимодействия облака с атмосферой. Этот вопрос требует детального изучения, так как процессы образования и развития облаков в существенной степени определяются структурой воздушных

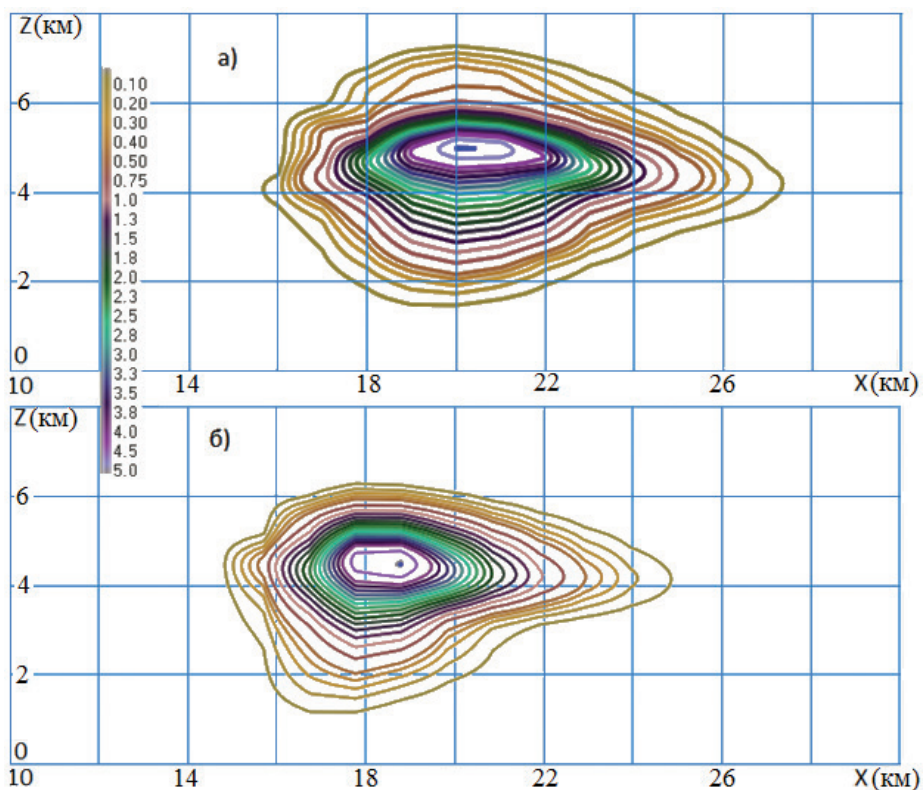


Рис. 2. Изолинии водности (г/м^3) облака на 30-й минуте развития при трехмерном задании начального состояния термодинамических параметров атмосферы (а) и при горизонтально однородном распределении (б).

потоков в атмосфере, а эффективность того или иного способа доставки частиц льдообразующего реагента в облако при активном воздействии будет зависеть от структуры воздушных потоков в околооблачном пространстве.

В дальнейшем планируется изучить возможность использования для инициализации численных моделей конвективных облаков и других данных, более детальных, например из моделей WRF [17], COSMO [16], MM5 [15] и т.п.

Заключение

Изложен подход, основанный на использовании данных расчетов термодинамических параметров состояния атмосферы по глобальной модели NOAA GFS для решения прикладных задач физики конвективных облаков и активных воздействий на них, в частности для численного моделирования конвективных облаков.

Моделирование трехмерного конвективного облака с объемными начальными данными показывает отличие полученных результатов от значений параметров

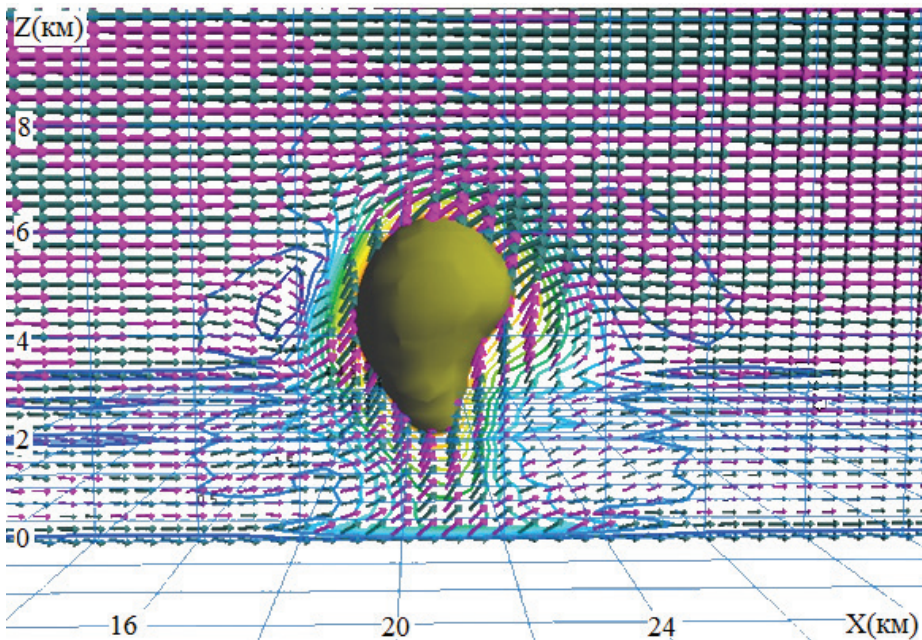


Рис. 3. Структура потоков в вертикальной плоскости, пересекающей облако по направлению его движения (стрелки).

В центре рисунка приведена изоповерхность вертикальной скорости $W = 10$ м/с.

облака, рассчитанных при горизонтально однородном задании начальных термодинамических параметров атмосферы. Изменение структуры поля ветра в атмосфере приводит к существенному изменению характера взаимодействия облака с атмосферой и характеристик облака.

Использование выходных данных глобальных моделей атмосферы в качестве предикторов при моделировании облаков позволяет более адекватно воспроизводить эволюцию конвективных облаков при естественном развитии и при активном воздействии.

При использовании выходных данных глобальной модели GFS в качестве входных данных моделей облаков у специалистов появляется определенный запас времени (12—24 ч), необходимый для проведения расчетов для оперативного использования результатов моделирования в работах по модификации погоды, в частности в противорадовых службах.

Список литературы

1. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В. Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. Нальчик: изд-во КБНЦ РАН, 2008. 257 с.
2. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Кулиев Д.Д., Продан К.А., Шаповалов В.А. Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных

- облаков на стадии роста и максимального развития // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2013. № 11—12, т. 56. С. 900—907.
3. Белова М.В., Дрофа А.С. Исследование процессов осадкообразования в конвективных облаках по результатам численного моделирования // Труды ГГО. 2017. Вып. 585. С. 77—84.
 4. Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. 2016. Вып. 582. С. 45—91.
 5. Владимиров С.А., Пастушков Р.С. Комплексный метод активных воздействий на конвективные облака с целью регулирования осадков. Трехмерное численное моделирование // Труды ГГО. 2016. Вып. 582. С. 116—127.
 6. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. М.: изд-во Росгидромета, 2014. 110 с.
 7. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.А., Шаповалов А.В. Концепция разработки численной нестационарной трехмерной модели эволюции осадкообразующего конвективного облака в естественных условиях и при активных воздействиях // Труды ГГО. 2016. Вып. 582. С. 7—44.
 8. Кагермазов А.Х. Валидация выходных данных Глобальной системы прогнозов GFS (Global Forecasts System) с результатами аэрологического зондирования. Известия КБНЦ РАН. 2014. № 3 (59). С. 32—36.
 9. Кагермазов А.Х. Прогноз града по выходным данным глобальной модели атмосферы (T254 NCEP) // Метеорология и гидрология. 2012. № 3. С. 28—34.
 10. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. СПб: Гидрометеоиздат, 1993. 356 с.
 11. Farley, R.D., Orville H.D. Numerical modeling of hailstorms and hailstone growth. Part I: Preliminary model verification and sensitivity tests // J. Climate Appl. Meteor. 1986. 25. P. 2014—2035.
 12. <http://www.zygrib.org> (дата обращения 20.04.2018).
 13. <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/> (дата обращения 20.04.2018).
 14. Khain, A.P., Lynn B.H. Simulation of a supercell storm in clean and dirty atmosphere using weather research and forecast model with spectral bin microphysics // J. Geophys. Res. 2009. 114. P. 2963—2982.
 15. MM5 Modeling System Overview. <http://www2.mmm.ucar.edu/mm5/overview.html> (дата обращения 12.07.2018).
 16. Rockel B., Will A., Hense A. The regional climate model COSMO-CLM (CCLM) // Meteorologische Zeitschrift. 2008. В. 17. No. 4. S. 347—348.
 17. Skamarock W.C. et al. A description of the advanced research WRF version 2. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Co. Mesoscale and Microscale Meteorology Div., 2005. No. NCAR/TN-468.