

МЕЗОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРЕ ТГУ СКИФ CYBERIA

В. П. Горбатенко¹, А. В. Старченко^{1,2,3}

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, Томск*

² *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, Томск*

³ *Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Новосибирск*

УДК 551.509

Аннотация. Представляются работы по мезомасштабному моделированию атмосферных процессов на суперкомпьютере ТГУ СКИФ Cyberia: уровня загрязнения воздуха в г. Томск по ряду показателей, прогнозу обледенения самолетов над аэропортом г. Томск с заблаговременностью до 36 часов, прогнозу развития мезомасштабной конвекции и грозы, прогнозу осадков и метеорологической дальности видимости с привлечением численных расчетов по мезомасштабной модели. Для реализации большинства алгоритмов была использована модернизированная мезомасштабная метеорологическая модель TSU-NM3. Для моделирования конвекции и количества выпавших осадков использовалась модель WRF.

Ключевые слова: суперкомпьютер СКИФ Cyberia, моделирование атмосферных процессов.

Введение

Проблема предсказания погоды и климата на основе численного моделирования является центральной среди многочисленных задач, связанных с исследованием как климатической системы Земли в целом, так и отдельных компонентов на разных временных масштабах. К настоящему времени предложен ряд математических моделей для решения задач прогноза погоды и климата и численных алгоритмов для их решения.

Однако, уравнения гидротермодинамики, описывающие атмосферные процессы, сложны, и актуальной задачей остается необходимость разработки новых алгоритмов, способных с большей точностью решить широкий спектр задач динамической метеорологии и прогноза погоды. Построение качественных алгоритмов решения таких задач способствует решению проблемы аппроксимации уравнений гидротермодинамики атмосферных процессов и устойчивости полученных разностных схем, которые являются основными ориентирами при создании новых численных алгоритмов.

Целью настоящей работы является представление мезомасштабных моделей атмосферного пограничного слоя с высоким разрешением, созданных для улучшения прогноза ряда опасных явлений погоды и состояния атмосферы Сибирского региона.

Математические модели для численного решения рассматриваемых задач опираются на использование многомерных нестационарных уравнений динамической метеорологии для полей компонент скорости, температуры, влажности. В мезомасштабной метеорологической модели TSU-NM3 учитывается коротковолновый и длинноволновый радиационный перенос тепла, турбулентный обмен, образование облачной и дождевой влаги. Численное решение задач выполнялось на высокопроизводительной многопроцессорной вычислительной технике с использованием технологий параллельного программирования OpenMP и MPI. Статистическая интерпретация результатов численного прогноза погоды и опасных явлений погоды осуществлена с использованием методов математической статистики: регрессионный, дискриминантный анализ (расчет синхронных связей между прогностическими полями, полученными по модели, и элементами погоды).

Методика выполнения работы базируется на использовании метода конечных разностей и метода конечного объема, явных и неявных разностных схем. При разработке параллельных алгоритмов для численного решения дифференциальных уравнений на суперкомпьютере ТГУ СКИФ CYBERIA применяется принцип

декомпозиции сеточной области, метод красно-черного упорядочивания узлов сетки, стандарты параллельного программирования Message Passing Interface и OpenMP.

Качество прогнозов состояния атмосферы — важнейшая характеристика, которая определяет способность прогнозов отвечать требованиям потребителя: полнота, достоверность, своевременность, удобство представления и использования. Качество прогнозов обеспечивается применением эффективных прогностических моделей, соблюдением процедур подготовки прогнозов, использованием однотипных методик и рассчитываемых характеристик для оценки прогнозов. Для проверки результатов моделирования, представленных в настоящей работе, использованы наблюдения, проводимые с помощью как существующей приборной базы в аэропорту Томска, на гидрометеорологической станции Томск, Институте оптики атмосферы СО РАН (ТОР-станция), так и профилемеров, лидаров, акустических датчиков.

1 Моделирование переноса примесей

При моделировании переноса примеси с использованием фотохимической модели исследуемая территория разбита на 104 квадратов размерами $0,5 \times 0,5$ км, из которых чуть более 1500 приходится на Томск. Оставшаяся часть приходится на окрестности Томска. При моделировании используются данные о рельефе и категориях землепользования (24 категории USGS) с пространственным разрешением $30''$ (секунд). Рассчитанные метеопараметры включают следующие характеристики: значения температуры воздуха, удельной влажности, атмосферного давления, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, направление ветра на 30 уровнях, сгущающихся при приближении к поверхности земли, накопленные суммы осадков, облачность. Данные представлены в цифровом виде для каждого узла квадрата для каждого уровня за определенный момент времени. Фотохимическая модель позволяет рассчитать выбросы 17-ти различных веществ: пыль, сажа, CO, SO₂, NO₂, NO, CH₂O, C₆H₅OH, CH, C₇H₈, C₈H₁₀, CH₃OH и других. Уровень загрязнения (содержание примесей) рассчитывается в ppb (10^{-9} значения величины). Результаты расчетов по модели могут быть представлены в виде цифровых данных по площади за отдельные моменты времени, а также для отдельных точек в виде изменения во времени содержания различных примесей.

В процессе работы, исходя из современных представлений о характеристиках состояния атмосферы и уровня загрязнения с учетом погрешностей приборов, а также возможностей математических моделей, было проведено сравнение расчетов по модели TSU NM3 температуры воздуха на уровне 2 м, относительной влажности, скорости ветра, температуры точки росы. Оценка фотохимической модели выполнена построением графических зависимостей изменения во времени различных примесей для точек, соответствующих пунктам наблюдений. Изменения содержания примесей дается на основе рассчитываемых по фотохимической модели и по фактическим данным. Соотношения позволяют оценить соответствие расчетов фактическим значениям [1, 2].

Результаты моделирования переноса примесей:

При отсутствии опасных концентраций загрязняющих веществ прогностические кривые всех загрязняющих веществ совпали с реальными кривыми по наблюдениям на ТОР-станции.

Результаты расчетов хорошо отражают влияние метеорологических условий и в первую очередь стратификации температуры атмосферы. Вертикальные профили температуры в районе центральной части г. Томск и в районе аэропорта Богашево, расстояние между которыми составляет 24 км принципиальных отличий в видах стратификации температуры и в ее значениях не имеют. Можно лишь отметить наличие некоторых расхождений в прогностическом профиле в ночные и утренние часы в одном из экспериментов для октября [3].

Достаточно хорошо моделируются увеличение концентрации озона в дневное время, увеличение содержания примесей и индекса загрязнения после 18 часов. Однако фотохимическая модель несколько завышает содержание озона и диоксида азота. При этом модель детально отражает содержание различных примесей по времени и в пространстве, фиксируя их изменения.

Кроме того, модель подтверждает наличие острова тепла в нижнем слое над исследуемой территорией, толщина которого составляет 100–200 м при небольшой интенсивности ($1 - 2^\circ\text{C}$).

К достоинствам результатов следует отнести большую детализацию расчетов состояния атмосферы и содержания примесей во времени и пространстве [4].

2 Эксперименты с метеорологической дальностью видимости

Прогноз метеорологической дальности видимости (МДВ) осуществлялся для случаев ухудшения прозрачности атмосферы в условиях: 1) тумана и дымки и 2) при дожде. В первом случае моделировались значения МДВ на фоне малоградиентного барического поля и фронта окклюзии. Наблюдалась облачная погода с прояснениями, небольшой дождь, местами умеренный, днем гроза. В районе Томска отмечались дым, дымка, туман, обусловленные пожарами и конденсацией водяного пара при понижении температуры в ночные и утренние часы. Влагосодержание воздуха при этом увеличилось за счет выпадения осадков [5, 6].

Во втором случае на фоне пониженного давления и прохождения атмосферных фронтов наблюдалась облачная погода с прояснениями, небольшие, местами умеренные, дожди, ливни.

Исходя из физических закономерностей и имеющихся методик метеорологическая дальность видимости в тумане зависит от его водности, а в дожде — от интенсивности. В качестве прогностических характеристик использованы рассчитываемая по модели характеристика водности — содержание облачной влаги в атмосфере, а интенсивность дождя оценивалась как модельная величина — скорость выпадения осадков.

При прогнозе видимости в тумане и дымке фактическая и прогностическая МДВ различаются как по величине (модель уменьшает МДВ по сравнению с фактической), так и по времени регистрации (запаздывание примерно 2 часа и удлинение периода минимальных значений видимости). Возможная причина отклонений обусловлена погрешностями модели в прогнозе температурно-влажностных характеристик. Тем не менее полученный результат расчета МДВ следует признать как вполне обнадеживающий. Для получения количественных показателей необходим набор достаточного числа случаев. Видимость в дожде прогнозировалась от 1000 м в начале дождя до 190 в его конце, что соответствует физическим представлениям о значениях метеорологической дальности видимости в дожде. Получено, что фактическая МДВ была несколько выше спрогнозированной.

Опыт применения модели для прогноза видимости показывает перспективность ее использования при формировании достаточного количества числа модельных расчетов.

3 Эксперименты с обледенением воздушных судов

Оценка прогнозов была выполнена за отдельные дни в октябре — ноябре 2014–2015 гг., так как в эти месяцы обледенение воздушных судов отмечается наиболее часто. Погодные условия в это время схожи: отрицательная температура воздуха (от 0 до -16°C), высокая влажность, наличие облаков и (или) осадков. Оценка прогнозов была проведена для температуры воздуха, температуры точки росы и относительной влажности.

На основе мезомасштабной метеорологической модели TSU-NM3B выполнены прогнозы метеоусловий, способствующих обледенению воздушных судов в атмосферном пограничном слое [7, 8, 9, 10]. В качестве критериев возможности обледенения самолета при взлете или посадке использовались формула Годске, основанная на расчете температуры насыщения над льдом, метод NCER и статистический метод Гидрометцентра РФ. Результаты численного прогноза сравнивались с реальными наблюдениями в атмосферном пограничном слое в районе аэропорта Богашево (Томск). Предложенная на основе выходной продукции численной модели TSU-NM3 методика прогноза обледенения воздушных судов показала свою эффективность и может быть положена в основу разработки регионального метода прогноза зон обледенения.

Выполненные оценки успешности модельного прогноза температуры, влажности воздуха и скорости ветра при разных погодных условиях указывают на примерно одинаковые погрешности для разных пунктов территории.

В пределах рассматриваемого периода прогноза (до 40 ч) погрешности не зависят от срока прогноза. Отмечена тенденция завышения температуры и занижения относительной влажности воздуха в дневное и вечернее время. Для температуры и влажности воздуха знак систематической ошибки может изменяться при разных погодных условиях. Скорость ветра несущественно завышается моделью.

Показатели погрешностей модельного прогноза зависят от характера погоды. Наилучшие результаты получены при условиях, способствующих обледенению, т.е. небольших отрицательных температурах и повышенной влажности в осенне-зимний период. Качество прогноза в таких ситуациях лучше, чем для существующих региональных моделей. При погодных условиях, характеризующихся выпадением осадков, появлением тумана, качество модели TSU NM3 сопоставимо с моделями, используемыми в настоящее время в оперативной практике прогнозов погоды. Наибольшие погрешности прогнозирования температуры воздуха отмечены в условиях слабого ветра.

По статистической интерпретации результатов численного прогноза погоды и опасных явлений погоды, в частности, обледенения воздушных судов, использовалась методология РР-концепции. В качестве физико-статистических зависимостей были привлечены алгоритм Годске, дискриминантная функция Гидрометцентра РФ количественные интервалы температуры воздуха и относительной влажности, предложенные NCEP (National Centers for Environmental Prediction, USA).

Проведенные расчеты показали, что, в целом, мезомасштабная модель хорошо предсказывает развитие метеорологических условий, а качество прогностической продукции модели TSU NM3 в неблагоприятных метеорологических условиях для авиации и других отраслей хозяйства можно признать достаточно хорошим, что указывает на возможность использования модели для обслуживания соответствующих потребителей.

4 Определение пространственной локализации конвективных кластеров

В настоящее время прогноз динамики и пространственной локализации развитых конвективных кластеров имеет важнейшее значение для территорий, слабо освещенных данными наземных наблюдений. К числу опасных проявлений конвективной деятельности относят сильные грозы, град, шквалы, смерчи, которые обладают огромной разрушительной силой, наносят значительный материальный ущерб различным отраслям хозяйства и нередко приводят к гибели людей. Признаки, по которым в атмосфере Земли можно выявить зоны неустойчивости и наличие опасных конвективных явлений, изложены в [11]. В рамках настоящих исследований была предпринята попытка WRF моделирования пространственного положения одного из конвективных кластеров, продуцировавшего грозу и град. Положение кластера оценивалось по индексу неустойчивости TOTL, верифицирование границ конвекции произведено с использованием данных спектро радиометра MODIS, установленного на спутнике TERRA [12, 13]. Модель основана на численном решении системы уравнений гидротермодинамики атмосферы. Было показано, что она дает удовлетворительные результаты при прогнозе метеорологических параметров. В качестве начальных и граничных условий в модели WRF использовались результаты численного прогноза по глобальной модели ПЛАВ ГУ Гидрометцентр России. Выходная продукция модели WRF — ежечасные прогностические поля метеовеличин. Для моделирования был выбран конкретный случай образования опасного конвективного явления на территории Кемеровской области, которое не было спрогнозировано практикуемыми методами. Моделировалось поле распределения индекса неустойчивости TOTL, содержащего значения температуры и влажности воздуха на заданных уровнях. Критерием развития явления служат пороговые значения индексов неустойчивости, определенные для вероятностей 50%, 70% и 90% [14, 15]. Например значения индекса $TOTL > 50^\circ\text{C}$ свидетельствуют о высокой вероятности развития грозы и града в анализируемый период. Получено, что результаты расчета глобальной модели ПЛАВ достаточно хорошо выделяют зону со значениями индекса $TOTL > 50^\circ$, однако зона конвективной активности по площади несколько больше, чем получено по данным данными MOD07_L2. Тем не менее, можно отметить, что приведенный пример иллюстрирует перспективу использования космических снимков в совокупности с численным моделированием погоды, который позволит успешнее прогнозировать динамику и пространственную локализацию развитых конвективных кластеров для территории Западной Сибири.

Заключение

Применение для Сибирского региона мезомасштабных моделей атмосферного пограничного слоя с высоким разрешением, созданных для улучшения прогноза ряда опасных явлений погоды и состояния атмосферы, показало:

1. Расчеты по модели TSUNM3 предсказывают для г. Томска в осенний период наличие острова тепла небольшой мощности, суточное изменение концентрации озона, совпадающее с наблюдениями ТОР станции ИОА СО РАН, существенное влияние вертикальной стратификации приземного слоя атмосферы на уровень загрязнения воздуха при слабом ветре, перспективность применения модели для прогнозирования метеорологической дальности видимости и обледенения воздушных аппаратов на взлете и посадке.

2. Расчеты по модели WRF в сочетании с информацией, получаемой из космических снимков, могут применяться для прогнозирования динамики и пространственной локализации развитых конвективных кластеров для территории Западной Сибири.

Список литературы

- [1] Starchenko A. V., Bart A. A., Kizhner L. I., Barashkova N. K., Volkova M. A., Zhuravlev G. G., Kuzhevskaya I. V., Terenteva M. V. Analysis of observations and results of numerical modeling of meteorological parameters and atmospheric air pollution under weakwind conditions in the city of Tomsk // Proc. SPIE 9680, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 96806Z (November 19, 2015). P. 1–7.
- [2] Старченко А. В., Барт А. А., Кижнер Л. И., Барашкова Н. К., Волкова М. А., Журавлев Г. Г., Кужевская И. В., Терентьева М. В. Анализ наблюдений и численного моделирования метеорологических условий и загрязнения атмосферного воздуха в условиях слабого ветра в Томске // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Тезисы докладов XXI Международного симпозиума. — Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2015. — С.11–14.
- [3] Akhmetshina A. S., Kizhner L. I., Kuzhevskaya I. V., Bart A. A., Zuev V. V., Shelekhov A. P. Using WRF mesoscale model to restore temperature profile in atmosphere boundary layer in Tomsk // Proc. SPIE 9680, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 968069 (November 19, 2015). P. 1–5.
- [4] Кижнер Л.И., Барашкова Н.К., Ахметшина А.С., Барт А.А., Поляков Д.В. Оценка точности численных прогнозов метеорологических условий в районе г. Томска с использованием модели WRF // Вестник Томского государственного университета. 2013, № 375, С. 174–178.
- [5] Старченко А.В., Барашкова Н.К., Кижнер Л.И., Волкова М.А., Кужевская И.В., Барт А.А. О прогнозируемости метеорологической дальности видимости с использованием мезомасштабных моделей высокого разрешения. // Материалы XXII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2016. D376–D380.
- [6] Starchenko A., Barashkova N., Kizhner L., Volkova M., Kuzhevskaya I., Bart A. Meteorological optical range predictability with the use of high resolution mesoscale models // 22nd International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Proc. of SPIE Vol. 10035, 100356X-1-100356X-5.
- [7] Волкова М.А., Старченко А.В., Барт А.А., Кужевская И.В., Кижнер Л.И., Барашкова Н.К., Новаева Г.А. Обледенение в пограничном слое атмосферы: условия формирования и прогноз. // Материалы XXII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2016, D31–D34.
- [8] Volkova M.A., Starchenko A.V., Kuzhevskaya I.V., Bart A.A., Kizhner L.I., Barashkova N.K. Forecast of icing zones using possibilities of hydrodynamic simulation for the atmospheric boundary layer // 22nd International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Proc. of SPIE Vol. 10035, 1003567-1-1003567-7.
- [9] Sitnikov G. I., Starchenko A. V., Terenteva M. V., Barashkova N. K., Volkova M. A., Kuzhevskaya I. V., Kizhner L. I. Forecast of Extreme Weather Conditions that Promote Aircraft Icing During Take-off or Landing // Proc. SPIE 9680, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 96806T (November 19, 2015). P. 1–7.
- [10] Kizhner L. I., Barashkova N. K., Akhmetshina A. S., Bart A. A., Starchenko A. V. Forecast of precipitation in the area of Bogashevo airport using the WRF model // Atmospheric and Oceanic Optics, March 2014, Volume 27, Issue 2, pp 187–194.
- [11] Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектрорадиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири. // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 10–19.
- [12] Nечepurenko O.E., Gorbatenko V.P, Bart A. A, Belikova M.Yu.. The forecast of the spatial position of convective cells using a data by global SL-AV NWP model // Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100356N (November 29, 2016); 100356N-1-100356N-5.

- [13] Горбатенко В.П., Нечепуренко О.Е., Барт А.А., Беликова М.Ю. Прогноз пространственной локализации конвективных кластеров по данным глобальной модели прогноза ПЛАВ // Материалы XXII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2016. С. D11–D14.
- [14] D.A. Konstantinova, V.P. Gorbatenko. Threshold values of characteristics of atmosphere instability during thunderstorms// Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100356Q (November 29, 2016) 100356Q-1- 100356Q-6.
- [15] Д.А. Константинова, В.П. Горбатенко. Пороговые значения термодинамических характеристик атмосферы при различных конвективных явлениях. // Материалы XXII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2016. D436-D438.

Горбатенко Валентина Петровна — д.г.н., заведующий кафедрой метеорологии и климатологии Томского государственного университета;

e-mail: vrgor@ggf.tsu.ru;

Александр Васильевич Старченко — д.ф.-м.н., декан Механико-математического факультета

Томского государственного университета;

e-mail: starch@math.tsu.ru.

Дата поступления — 31 мая 2017 г.