

Л.И. Коломеец, С.П. Смышляев

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТЬЮ И СОСТАВОМ АТМОСФЕРЫ

L.I. Kolomeets, S.P. Smyshlyaev

EVALUATING OF THE FEEDBACKS BETWEEN LIGHTNING ACTIVITY AND ATMOSPHERIC COMPOSITION CHANGES FOR MESOSCALE NUMERICAL MODEL

Численная модель WRF-Chem была адаптирована и апробирована для северо-запада Российской Федерации и центральной Европы. WRF-Chem позволяет параметризовать концентрацию NO_x и проанализировать вклад грозовых ячеек в образование озона, в изменение полей температуры. Модельные эксперименты для нейтральной стратификации показали, что грозовая активность неоднозначно влияет на концентрацию озона и температуры. У поверхности земли вклад грозовых разрядов на концентрацию озона минимален, а на высоте 10–12 км она существенно увеличивается. Проведенные расчеты демонстрируют важность окислов азота грозового происхождения для баланса озона, связанных с ним газов, а также для распределения температуры верхней тропосферы/нижней стратосферы.

Ключевые слова: модельное исследование, грозовая активность, параметризация, окислы азота, распределение озона, скорость молниевых вспышек, адаптация, состав атмосферы.

We have implemented the WRF-Chem model parameterizations for lightning flash rate using prescribed inter cloud: cloud ground ratios and the associated resolution dependency, which are based on cloud-top height. In our implementation, the cloud-top height is estimated by the level of neutral buoyancy (LNB). Scaling for resolution dependency may be performed by areal ratio against a base-case resolution, defined as that producing 1 storm per grid within the domain of interest (15 km grid spacing in this study). Upper troposphere/lower stratosphere is sensitive to changes of NO_x concentrations. NO and NO_x initial mixing ratios are relatively high near the surface, low in the mid troposphere and moderately high in the UTLS.

Key words: model study, feedbacks, lightning activity, parameterization, lightning-generated NO_x , ozone distribution, flash rates, adaptation, atmospheric composition.

Введение

Молниевая активность создает обширные возбуждения атмосферных полей, вызывая при этом диссоциацию и ионизацию многих атмосферных составляющих. Как известно, молнии являются одними из основных источников окислов азота в тропосфере (по оценкам IPCC глобальная скорость продукции, приходящаяся на грозы составляет 5 ТгN/год в верхней тропосфере) [Price, 2007]. В свою очередь, окислы азота способны вносить значимый вклад в перераспределение химически и радио-активных

газов, которые влияют на температурные поля, а значит, влияют на изменение погоды и климата [Jacob, 1999; Суходолов и Смышляев, 2013].

Изменчивость погоды и климатических особенностей влияют на распределение грозовых облаков, в результате чего происходит перераспределение частоты молниевых вспышек, которые вносят существенный вклад в концентрацию оксидов азота [Price, 2007]. Таким образом, образуются непрерывные положительные и отрицательные взаимосвязи между грозовой активностью, химическим составом атмосферы и изменениями погоды и климата [Jacob, 1999]. И региональные, и глобальные эффекты этих сложных цепочек связей влияют на состав и структуру атмосферы [Price, 2007]. Рис. 1 представляет собой схему прямых и обратных связей между грозовой активностью, составом атмосферы, температурой и конвекцией.



Рис. 1. Прямые и обратные связи между грозовой активностью, озоном и температурой

Окислы азота, генерируемые молниями (LNO_x) эффективно влияют на ускорение образования тропосферного озона (к примеру, что в летнее время Северный Американский муссон может вносить дополнительно от 25–30 ppbv озона в верхнюю тропосферу). Это связано с окислением окиси углерода, метана и других углеводородов [Jacob, 1999]. В стратосфере озон, наоборот, начинает разрушаться под действием окислов азота.

Эта неоднозначность влияния окислов азота на концентрацию озона вызывает все больший интерес на высотах, соответствующих области между тропосферой и стратосферой (UTLS — Upper troposphere/lower stratosphere).

При использовании численных моделей прогноза погоды и климата особую роль играет прогноз количества молниевых вспышек, их координаты, распределение по столбу атмосферы и по пространству. Одним из современных достижений в этой области являются онлайн-модели, в которых химический блок решается наряду с физическим [Price, 2007].

В настоящей статье идет речь о численных экспериментах, выполненных с помощью модели WRF-Chem (в качестве косвенного показателя подсчетного параметра верхней части облака используется параметризация конвекции Grell-Devenyi (это позволяет оценить влияние скорости образования молниевых вспышек на основе параметризации Price и Rind (1992, 1994) [Allen, 2002], модифицированной Barh и Wang (2013)) [Price, 2007; Smyshlyaev, 2010].

Основной задачей настоящей работы является исследование чувствительности атмосферной химии и полей температуры к возмущениям, связанным с изменением содержания окислов азота под действием молниевых разрядов.

Аналогичные исследования проводились и для глобальных моделей [Суходолов и Смышляев, 2013], но полученные результаты лишь демонстрируют важность окислов азота грозового происхождения, но не дают точных количественных оценок, что связано с подсчетным масштабом самих молниевых вспышек [Barthe, 2008].

Цель данного исследования заключается в адаптации региональной модели WRF-Chem для выбранного района, в определении относительного вклада LNO_x в общую концентрацию NO_x и оценки роли обратных связей между молниевой активностью, продукцией озона (и других активных газов), температурой и конвекцией.

Методология модельного исследования

Настоящее исследование заключается в анализе как метеорологических, так и химических полей атмосферы. С учетом того, что молниевые вспышки относятся к подсчетному масштабу явлений, то необходимо использовать региональные модели, чувствительные к мелкомасштабным процессам. Помимо разрешающей способности, модель должна содержать одновременно физический и химический блоки.

С учетом этих соображений, для исследования чувствительности атмосферного содержания газовых примесей к грозовой продукции окислов азота было проведено восемь численных экспериментов с использованием региональной модели The Weather Research and Forecasting model (WRF-Chem) версия 3.5 [Barthe, 2008]. В каждом модельном эксперименте проводился расчет основных метеорологических величин, химических газовых составляющих для двух случаев: с учетом грозовой активности и, соответственно, без учета грозовых вспышек. Расчеты проводились до урона 50 гПа, но особое внимание уделялось анализу высотной области UTLS (граница между верхней тропосферой и нижней стратосферой). Сопоставление результатов позволило оценить влияние окислов азота молниевое происхождения на распределение температуры, озона и других газов. Эксперименты проводились для летнего периода 2013 г., когда наблюдалась гроза (в общей сумме было выбрано 57 дней с грозой, с синоптической ситуацией, показанной на рис. 2).

Для расчета молниевой продукции окислов азота в каждом узле сетки использовалась параметризация Price и Rind (PR92, PR94) для нейтральной стратификации [Barthe, 2008], основанная на следующих предположениях и уравнениях:

$$f_c(z_{top}) = 3,44 \times 10^{-5} z_{top}^{4,9}, \quad (1)$$

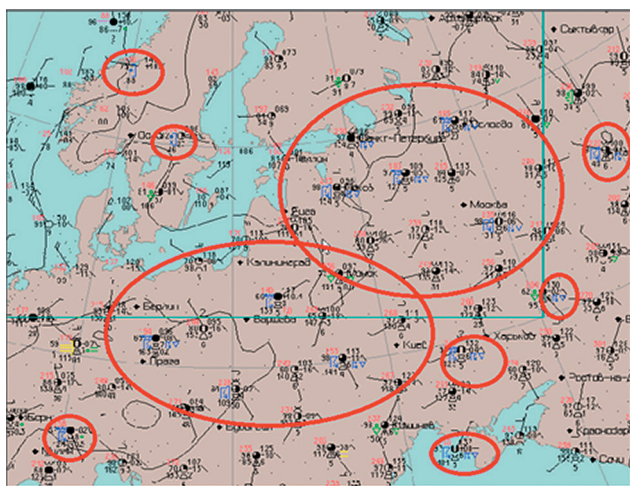


Рис. 2. Синоптическая ситуация 6 июня 2013 г. в 18:00:00 Ут

где f_c — скорость континентальных молниевых вспышек; Z_{top} — верхняя граница грозового облака.

$$Z = 0,021d4 - 0,648d3 + 7,49d + 63,09, \quad (2)$$

где Z — отношение IC:CG; d — Верхняя замерзшая часть облака (разность между высотой облака и уровнем начала замерзания).

Для учета размера сетки по пространству вводится «экстраполированный коливровочный коэффициент C », который рассчитывается как:

$$C = 0,97241 \exp(0,048203R), \quad (3)$$

где R — площадь модельной сетки (не зависит от широты, долготы или времени года); для размера сетки, используемой в настоящем исследовании (15×15 км) $C = 0,973$.

Основной задачей данной параметризации является прогноз временного и пространственного распределения отдельных грозовых вспышек без использования дополнительной сложной электрической схемы [Pickering, 1998].

Предполагается, что количество окислов азота, генерируемых молниями (LNOx) зависят от длины самой молнии и от давления.

$$nNO(p) = a + bP, \quad (4)$$

где nNO — количество молекул NO; $a = 0,34 \times 1021$; $b = 1,30 \times 1016$; P — давление.

Хочется отметить, что коэффициенты a и b могут варьировать в значительных пределах ($1-13 \times 10^{21}$ молекул NO m^{-1} за одну вспышку), что подтверждается экспериментальными и лабораторными исследованиями.

Описанная выше параметризация LNO_x включена в WRF-Chem с некоторыми упрощениями и/или дополнениями [Barthe, 2008]. Для расчетов использовались следующие предположения: отношение IC:CG принимается равным 1,74 (зная общее количество молекул NO_x , генерируемых суммой всех молний, легко рассчитать количество молекул окислов азота отдельно для IC и CG-вспышек) ($n\text{NO}(\text{CG}) = 10 n\text{NO}(\text{IC})$)

Важно отметить, что такой подход пригоден в использовании при радиолокационной отражаемости, превышающей 20 dBZ или при температуре ниже -15°C .

Описание используемой модели

Численная мезомасштабная модель WRF-Chem была адаптирована для центральной Европы и Северо-запада Российской Федерации, как показано на рис. 3.

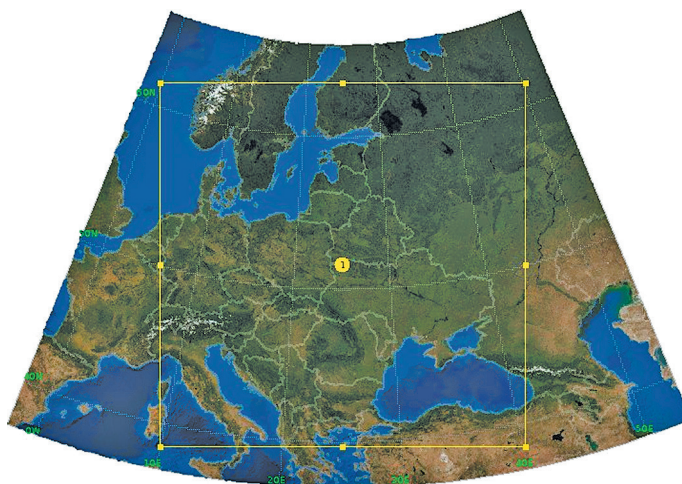


Рис. 3. Экспериментальная область для использования модели WRF-Chem

Используемая версия модели WRF-Chem (в конусоидальной проекции Ламберта) охватывает высотный диапазон от земной поверхности до уровня 50 гПа (35 вертикальных σ -уровней). Шаг по пространству фиксированный ($dx = dy = 15$ км). Шаг по вертикали переменный: у поверхности ≈ 60 м, от 1–3 км составляет от 200–400 м, и для 5–13 км оценивается как 500–600 м. Разрешение модели 180×180 . В качестве метеорологических граничных условий используются данные реанализа NCEP GFS FNL (National Center for Environmental Protection Global Forecasting System final gridded analysis), с шагом по пространству $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (≈ 55.5 км). Обновление данных происходит каждые 6 ч (00, 06, 12, 18 UT).

Модель WRF-Chem предлагает большое количество схем параметризации, которые можно совмещать в любом виде. В этой модели рассматриваются различные схемы представления процессов подсеточного масштаба от простых, эффективных схем до сложных, требующих трудоемких вычислений, от новых развивающихся до хорошо испытанных, которые используются в современных рабочих моделях

Для моделирования микрофизики влаги предлагается восемь схем параметризации, отличающихся областью применения и детализацией представления фазовых состояний атмосферной влаги. Для описания потоков длинноволновой радиации имеются две схемы, коротковолновой — три схемы. Температура и влажность подстилающей поверхности могут рассчитываться на основе одной из трех многослойных моделей тепло- и влагообмена в почве. Для представления параметров планетарного пограничного слоя предлагаются три схемы параметризации. Такое же количество схем реализовано в WRF-модели для параметризации конвективных процессов.

В модели реализована совместная параметризация конвекции Grell-Devenyi, объединенная с микрофизикой Thompson, пограничный слой описывается схемой Mellon-Yamada-Janjic (MYJ), приземный слой параметризуется схемой Мони́на-Обухова (с использованием термического уровня шероховатости Зелинкевича) [Barthe, 2010].

В общем виде модель состоит из 4 блоков:

1. Скачивается набор входных данных (текущее состояние атмосферы). Затем запускается модуль пре-процессинга (WPS), который состоит из трех программ: `geogrid.exe` — обрабатывает статические данные (рельеф, типы почвы, гидрография); `ungrib.exe` — распаковывает начальные данные; `metgrid.exe` — интерполирует, полученные выше данные, в сетку модели.
2. После этапа пре-процессинга начинается процесс ассимиляции данных (WRF-VAR).
3. Затем стартует ядро модели, которое с помощью численных методов решает нелинейную систему дифференциальных уравнений в частных производных (ARW). Оно состоит из двух распараллеленных программ: `real.exe` — выполняет вертикальную интерполяцию входных данных; `wrf.exe` — разрешающее ядро.
4. Начинается пост-процессинг (в этот блок так же входят методы визуализации). После завершения расчета пользователь получает набор данных, т.е. прогноз состояния атмосферы на несколько суток вперед с дискретизацией в 1 ч.

WRF-Chem требует дополнительной сетки входных данных, связанных с химическим блоком. Этот дополнительный ввод данных обеспечивается либо полями выбросов пыли, либо иницируются в расчетном блоке (поля сжигания биомассы, поля биогенных выбросов, фоновые поля GOCART, антропогенные выбросы, вулканические выбросы и т.д.).

Прогностическими переменными в модели являются три составляющие скорости ветра, удельная влажность, потенциальная температура, коротковолновая и длинноволновая радиация. Диагностическими переменными являются давление и геопотенциал. В результате работы модели пользователь может оценить 198 параметров, входящих в состав и структуру атмосферы. Скалярный транспорт интегрирован схемой Рунге-Кутты с использованием наветренной стороны операторов адвекции. Переносимые скаляры включают в себя водяной пар, различные категории гидрометеоров и

химические вещества. Массовые соотношения облачных капель, дождя, снега, льда, крупы/града прогнозируются согласно обратному экспоненциальному закону распределения. WRF-Chem позволяет исследовать соотношения метана (CH_4), окиси углерода (CO), озона (O_3), гидроксильных радикалов (OH), гидропероксидных радикалов (HO_2), оксидов азота (NO), азотной кислоты, перекиси водорода (H_2O_2), метиловой перекиси водорода, формальдегида (CH_2O), муравьиной кислоты, диоксида серы, аммиака, сульфатных аэрозолей и т.д. Отдельно хочется выделить, что трассер LNO_x только транспортируется и не претерпевает никаких химических реакций. Биогенные выбросы включают в себя выбросы изопрена, монотерпенов и почвенные выбросы азота [Yoshida, 2009].

Результаты модельных расчетов

Восемь численных экспериментов проводились для периода с 1 июня по 30 августа. Анализировались данные за срок с 5 июня по 30 августа, чтобы избежать спинового эффекта в течение первых нескольких дней. Для каждого эксперимента модель запускалась дважды (без учета параметризации LNO_x и с учетом данной параметризации) [Yoshida, 2009].

Высота верхней границы облачности оценивается по уровню нейтральной плавучести (LNB), которая задается при помощи простого «метода частицы». Во-первых, определяется понижение температуры точки росы на модельном уровне поверхности, который в последствии используется для нахождения уровня адиабатического подъема конденсата (LCL). Основываясь на данных LCL рассчитывается влажный адиабатический градиент (Γ_m) и уровень свободной конвекции (LFC) (определяется линейной экстраполяцией влажной адиабаты, используя более низкий уровень Γ_m). Далее выполняется поиск дополнительного уровня модели, пока уровень LNB не превышен. Точки, где $\text{LFC} < 500$ м или температура выше температуры замерзания отбрасываются.

Как известно, длина молнии может достигать от 20 до 50 км [Zhao, 2009]. Среднее значение длины молнии обычно принимается как 19–20 км (если короткие вспышки не рассматриваются (≤ 1 мс), то 32–34 км). Для оценки вклада длины молнии на концентрацию LNO_x в ходе проведения чувствительных тестов задается разная длина молний (табл. 1). Некоторые эксперименты проводились для молний с длиной 21 км (LENGTH_21). Это значение соответствует логарифмически нормальному распределению длин молний (при учете коротких вспышек). Это значение соответствует более реалистичному логарифмическому распределению длин молний (используемое для экспериментов RESULT, Lightning_option, SHORT_FLASH). Эксперимент SHORT_FLASH демонстрирует влияние коротких вспышек на концентрацию LNO_x (используется нормальное распределение длин молний, но короткие вспышки не «генерируют» молекулы NO_x). Результаты данного эксперимента показывают, что короткие вспышки не влияют на общую тенденцию изменения концентрации NO_x , но могут в значительной степени изменить их магнитуду. В настоящей работе длина коротких молний принимается равной 1 км. Более детальное изучение коротких вспышек не рассматривается в данной работе, и остается вопросом для дальнейших дискуссий.

Таблица 1

Чувствительные тесты, использующие LNO_x параметризацию.DCOO/-/-: бимодальное распределение Desaria / нижняя изотерма (oC) / верхняя изотерма (oC),
lognormal — логарифмически нормальное распределение

Название эксперимента	dx , км	Длина молнии	Вертикальное распределение	dt , с	Продолжительность эксперимента
RESULT	15	lognormal	DCOO/-15/-50	60	7–9 June, 2013
LENGTH_21	15	21 км	DCOO/-15/-50	60	11–13 June, 2013
LENGTH_21	15	21 км	DCOO/-15/-50	60	21–24 June, 2013
LENGTH_21	15	21 км	DCOO/-15/-50	60	4–6 July, 2013
LENGTH_21	15	21 км	DCOO/-15/-50	60	9–11 July, 2013
Lightning_option	15	lognormal	DCOO/-15/-50	60	12–14 July, 2013
Lightning_option	15	lognormal	DCOO/-15/-50	60	5–7 August, 2013
SHORT_FLASH	15	lognormal	DCOO/-15/-50	60	25–28 August, 2013

Особый интерес представляют концентрации NO , NO_2 , O_3 (все результаты, проиллюстрированные далее выполнены при заранее выбранной функции WRF-Chem $LNO_x = 1$: комбинированное отношение IC:CG вспышек относится к вертикальному распределению с одной модой).

На рис. 4 представлено высотное изменение концентрации NO_3 . Полученные поля NO_3 показывают, что максимальные значения концентраций наблюдаются на поверхности земли, в средней тропосфере значения концентраций низкие, а на уровне UTLS относительно высокие. Максимальные поверхностные концентрации молекул NO_3 связаны с их зависимостью от давления (как показано в уравнении (4)). Можно предположить, что относительный рост значений концентраций в верхней тропосфере/нижней стратосфере является результатом действия удаленного источника грозовой продукции. Это дает повод проводить сравнительный анализ полей озона и гидроксильных радикалов для случаев без дополнительного источника грозовой активности и с его участием [Smyshlyaev, 2010]. На рис. 5 представлены концентрации озона у поверхности земли с/без дополнительных источников LNO_x .

Модель хорошо реагирует на дополнительные источники LNO_x , при этом видно, как изменяется концентрация озона. Положительный тренд наблюдается на всех высотах, основные очаги продукции озона остаются неизменными, но появляются дополнительные источники, вносящие весомый вклад в общую концентрацию этого парникового газа.

Рис. 6 отображает значения концентраций озона на уровне 250 гПа. Выше уровня 300 гПа начинается значительный рост концентрации озона. Без учета молниевых вспышек эти значения находятся в пределах от 0,012–0,042 ppmv, при запуске параметризации LNO_x общее содержание озона несколько увеличивается от 0,016 до 0,045 ppmv. Это не столь существенное различие в полях концентраций озона объясняется относительно грубой сеткой модели, не точным описанием локальных условий, использованием нейтральной стратификации и т.д.

Рис. 7 изображает концентрацию NO на уровне 1000 гПа. Видно, что максимальные концентрации NO совпадают с максимальными концентрациями O_3 на поверхности.

В атмосфере этот газ обычно образуется при грозовых разрядах (тепловой эффект реакции — 180,9 кДж). Интересно заметить, что пики максимальных значений NO совпадают с географическим расположением максимального числа гроз на синоптических картах. Это говорит о важности точных оценок количества молекул NO как на поверхности, так и на уровне верхней тропосферы/нижней стратосферы. Оксиды азота (IV), наряду с озоном, представляют серьёзную опасность для экологической ситуации, так как способны вызывать кислотные дожди, а также сами по себе являются токсичными веществами, вызывающими раздражение слизистых оболочек. Двуокись азота воздействует в основном на дыхательные пути и легкие, а также вызывает изменения состава крови, в частности, уменьшает содержание в крови гемоглобина.

В специальной литературе также указывается на то, что воздействие на организм человека диоксида азота снижает сопротивляемость к заболеваниям, вызывает кислородное голодание тканей, особенно у детей. Усиливает действие канцерогенных веществ, способствуя возникновению злокачественных новообразований. Поэтому даже незначительные изменения в концентрациях NO₂ в атмосфере не желательны [Yoshida, 2009].

Рис. 8 иллюстрирует модельные расчеты концентрации NO₂ на уровне 250 гПа с учетом (справа) и без учета (слева) параметризации LNO_x.

Помимо влияния на концентрацию озона, грозовое изменение концентраций окислов азота может повлиять на основной окислитель тропосферы — атмосферный гидроксильный радикал OH. Химия азотных и водородных составляющих тесно взаимосвязана как в тропосфере, так и в стратосфере через образование компонентов, содержащих и водород и азот, таких как азотная кислота HNO₃ и HO₂NO₂. Эти составляющие подвержены фазовым переходам в атмосфере вместе с аэрозолем. Увеличение окислов азота в результате молниевой продукции ведет к существенному росту концентраций OH в тропосфере вследствие увеличения количества озона, а следовательно, и возбужденного атомарного кислорода O (1D), который при реакции с водяным паром продуцирует гидроксильный радикал [Smyshlyaev, 2010]. Это создает благоприятные условия для окисления окиси углерода, метана и других углеводородов (это, в свою очередь, может повышать продукцию озона). Все это создает положительную обратную связь между молниевой продукцией азота и увеличением содержания озона.

С учетом того, что озон является токсичным газом, вредным для живой оболочки Земли, увеличение его концентрации в нижней и средней тропосфере является опасным [Smyshlyaev, 2010].

В силу того, что озон является радиационно-активным газом, изменения в его концентрации влияют на изменения полей температуры. Рис. 9 изображает поля потенциальной температуры на уровне 250 гПа. На поверхности поля температуры не чувствительны к введению параметризации LNO_x. Это связано с неоднозначностью взаимозависимостей между температурой и окислами азота на поверхности. Однако выше уровня 300 гПа и до уровня 50 гПа заметны небольшие изменения в полях температуры, хотя природа этих колебаний остается пока не совсем ясной. С одной стороны в тропосфере окислы азота способствуют увеличению озона, с другой стороны, в стратосфере, они являются его разрушителями. Помимо этих факторов, нужно учитывать все неопределенности, связанные с региональной и глобальной продукцией окислов азота, которые могут задаваться в больших пределах. Для более детального

изучения обратных связей между грозовой активностью и температурой планируется уменьшать шаг сетки до 5 км, и до 1,5 км, задавать более жесткие граничные условия и использовать более сложные схемы для параметризации конвекции и LNO_x , где будет учет континентальных и морских вспышек, разделение на вспышки IC и CG.

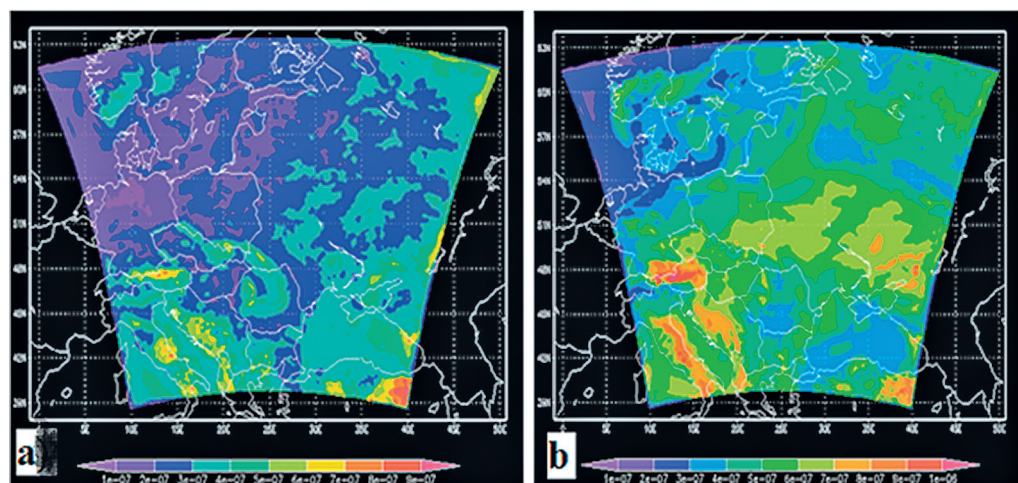


Рис. 4. Распределение концентрации NO_3 :
 а — на уровне 250 гПа 2013-06-09 06:00:00 UT; б — на уровне 1000 гПа 2013-06-09 06:00:00 UT

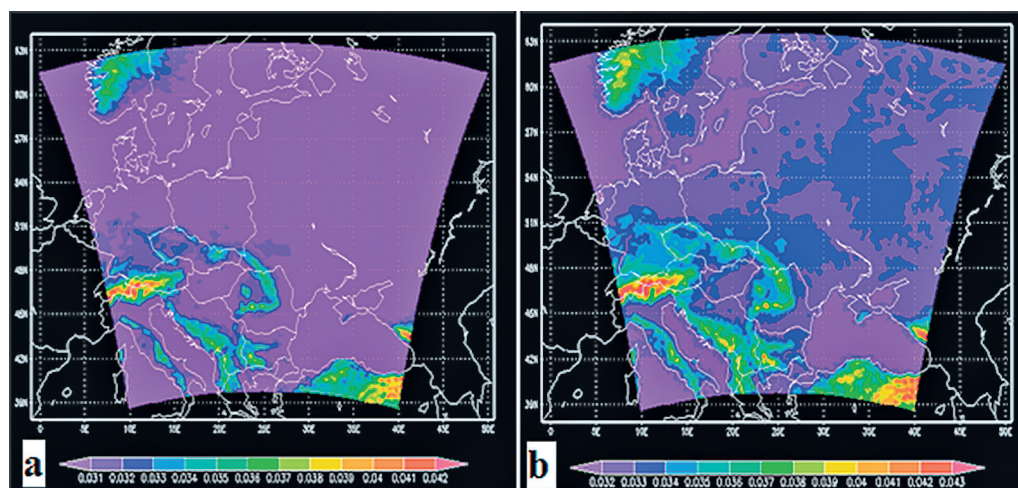


Рис. 5. Модельные расчеты концентрации O_3 2013-06-11 00:00:00 UT на уровне 1000 гПа:
 а — концентрация озона без окислов азота грозового происхождения;
 б — концентрация озона с учетом окислов азота, генерируемых молниевыми вспышками

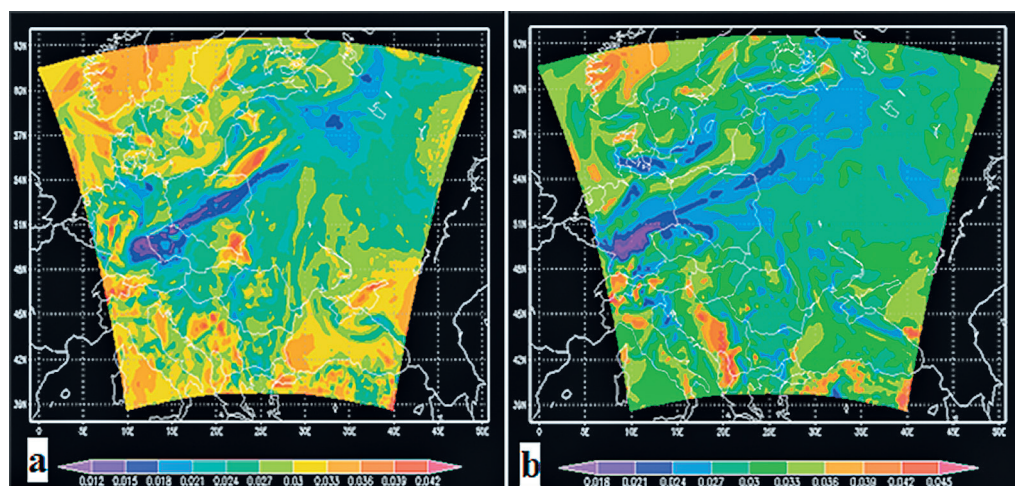


Рис. 6. Модельный расчет концентрации O_3 2013-06-11 00:00:00 UT на уровне 250 гПа:
a — концентрация озона без окислов азота грозового происхождения;
b — концентрация озона с учетом окислов азота, генерируемых молниевыми вспышками

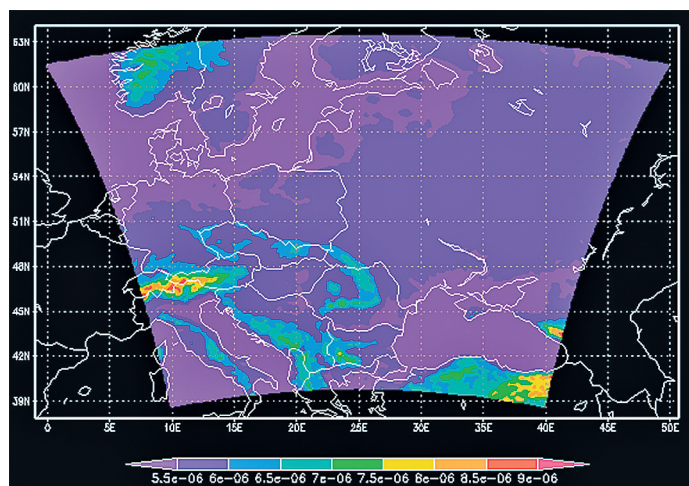


Рис. 7. Модельные расчеты концентрации NO 2013-06-11 00:00:00 UT на уровне 1000 гПа

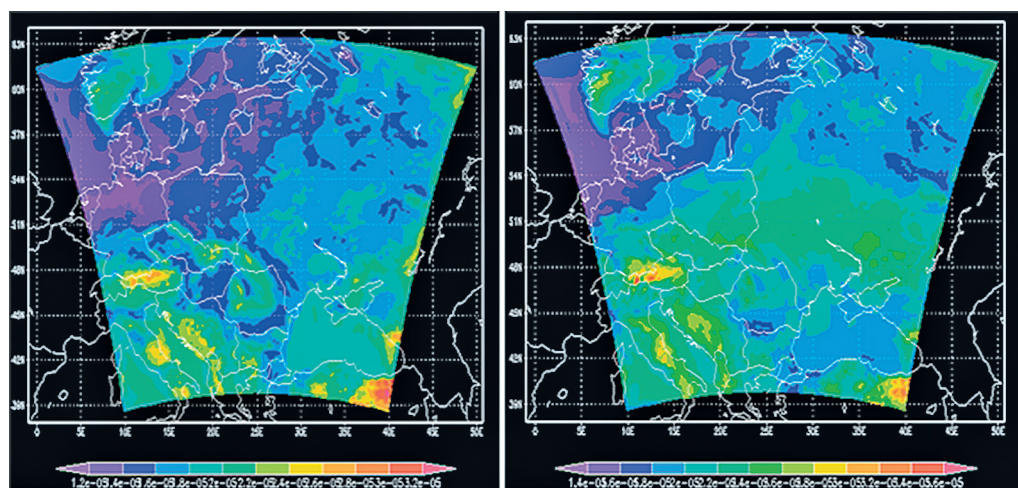


Рис. 8. Модельный расчет концентрации NO_2 2013-06-11 00:00:00 UT на уровне 250 гПа:

a - концентрация NO_2 без окислов азота грозового происхождения;

b - концентрация NO_2 с учетом окислов азота, генерируемых молниевыми вспышками

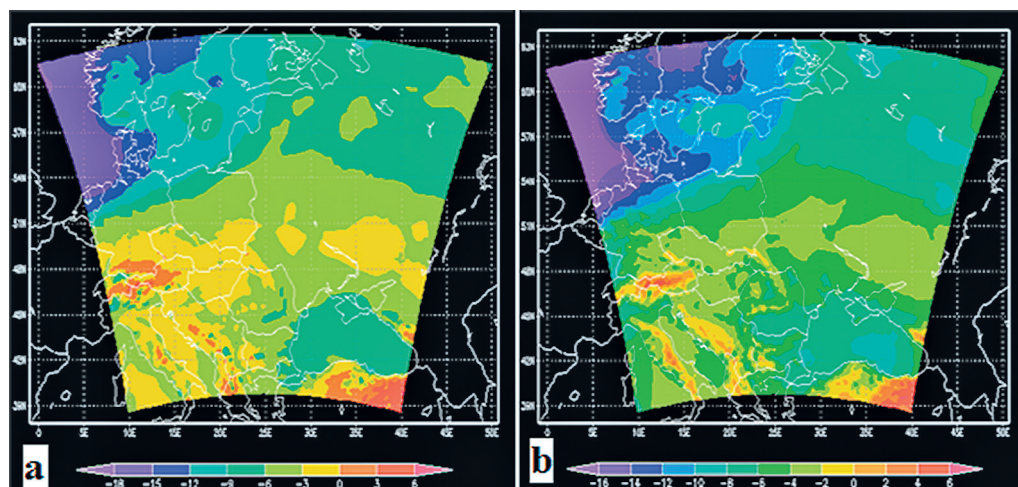


Рис. 9. Модельный расчет потенциальной температуры 2013-06-11 00:00:00 UT на уровне 250 гПа:

a - потенциальная температура без окислов азота грозового происхождения;

b - потенциальная температура с учетом окислов азота, генерируемых молниевыми вспышками

Данные экспериментов сравнивались с данными чувствительных тестов LNO_x параметризации J. Wong, M.C. Barth [Wong, 2012], результаты верификации модели показывают, что для лучшей работы модели необходимо параметры a и b (уравнение (4)) умножить на коэффициент 5 (что было сделано для итогового чувствительного теста RESULT), а так же уравнение (1) лучше записывать в форме для максимальной скорости:

$$f_c(w_{\max}) = 5 \times 10^{-6} z_{\text{top}}^4 54. \quad (5)$$

Это уравнение должно вводиться с поправочным коэффициентом равным 0,19–0,16.

Заключение

В настоящей работе проведены расчеты чувствительности модели WRF-Chem к грозовой активности. Было получено, что в рамках мезо-масштабной модели наиболее оптимальным выбором продолжительности эксперимента является 72 часа. Были проанализированы концентрации атмосферных газов, температура верхней тропосферы и нижней стратосферы при включении в модель параметризации окислов азота, генерируемых молниевыми вспышками. Проведенные оценки показали, что в результате изменчивости грозовой продукции окислов азота их концентрация в верхней тропосфере и нижней стратосфере может меняться в широких пределах. Это, в свою очередь, создает потенциал для изменчивости газового состава атмосферы.

Расчет концентрации озона так же отражает высокую чувствительность к изменению общей концентрации NO на разных высотах атмосферы. Важным является то, что при включении в модель дополнительных выбросов NO, генерируемых молниями, наблюдается положительная тенденция изменения озона.

Изменения полей температуры на уровне 10–12 км при дополнительном источнике LNO_x подчеркивают наличие обратной связи между концентрацией окислов азота и конвекцией. Заметное повышение температуры на уровне 200–150 гПа объясняется удалением грозовых вспышек от поверхности земли.

Проведенные расчеты демонстрируют актуальность окислов азота грозового происхождения для баланса таких газов, как озон и гидроксильные радикалы. В связи с этим, использование теоретических параметризаций является обоснованным и важным методом определения скорости формирования окислов азота, их концентраций и влияния на изменения погоды и климата. Учет локальных особенностей протекания грозовых разрядов позволяет уменьшить неопределенность, связанную с природной неопределенностью скорости грозового образования окислов азота

Литература

1. Суходолов Т.В., Смышляев С.П. Модельное исследование влияния пространственного распределения молниевой активности на газовый состав и температуру атмосферы. // Ученые записки РГГМУ, 2013, № 26, с. 101–109.
Sukhodolov T.V., Smyshlyaev S.P. Model'noe issledovanie vliyaniya prostranstvennogo raspredeleniya molnievoy aktivnosti na gazovyy sostav i temperaturu atmosfery. // Uchenye zapiski RGGMU, 2013, № 26, s. 101–109.
2. Jacob J.D. Introduction to atmospheric chemistry. — Princeton University Press, 1999. — 264 p.

3. *Price C., Rind D.* Modeling global lightning distributions in a general circulation model. // *Mon. Weather Rev.*, 1994, vol. 122, iss. 8, pp. 1930–1939.
4. *Allen D.J., Pickering K.E.* Evaluation of lightning flash rate parameterizations for use in a global chemical transport model. // *J. Geophys. Res.*, 2002, vol. 107, iss. D23, doi:10.1029/2002JD002066.
5. *Barthe C., Barth M.T.* Evaluation of a new lightning-produced NO_x parameterization for cloud resolving models and its associated uncertainties. // *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, vol. 8, pp. 4691–4710, doi:10.5194/acp-8-4691-2008.
6. *Pickering K., Wang E.Y., Tao W.K. et al.* Vertical distribution of lightning NO_x for use in regional and global chemical transport models. // *J. Geophys. Res.*, 1998, vol. 103, iss. D23, pp. 31203–31216, doi:10.1029/98JD02651.
7. *Barthe C., Deierling W., Barth M. C.* Estimation of total lightning from various storm parameters: a cloud-resolving model study. // *J. Geophys. Res.*, 2010, vol. 115, iss. D24202, doi:10.1029/2010JD014405.
8. *Barth M.C., Lee J., Hodzic A., Pfister G., Skamarock W.C., Worden J., Wong, J., Noone D.* Thunderstorms and upper troposphere chemistry during the early stages of the 2006 North American Monsoon. // *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, vol. 12, iss. 7, pp. 16407–16455, doi:10.5194/acpd-12-16407-2012.
9. *Grell G.A., Peckham S.E., Schmitz R., McKeen S.A., Frost G., Skamarock W.C., Eder B.* Fully coupled «online» chemistry within the WRF model. // *Atmospheric Environment*, 2005, vol. 39, iss. 37, pp. 6957–6975, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.04.027.
10. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G.* A description of the Advanced Research WRF Version 3. // NCAR Tech. Note, 2008, NCAR/TN-475+STR, doi:10.5065/D68S4MVH.
11. *Smyshlyaev S.P., Geller M.A., Yudin V.A.* Sensitivity of model assessments of high-speed civil transport effects on stratospheric ozone resulting from uncertainties in the NO_x production from lightning. // *J. Geophys. Res.*, 1999, vol. 104, iss. D21, pp. 26401–26417, doi:10.1029/1999JD900820.
12. *Flatoy F., Hov O.* NO_x from lightning and the calculated chemical composition of the free troposphere. // *J. Geophys. Res.*, 1997, vol. 102, iss. D17, pp. 21373–21381, doi:10.1029/97JD01308.
13. *Schumann U., Huntrieser H.* The global lightning-induced nitrogen oxides source. // *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, vol. 7, pp. 3823–3907, doi:10.5194/acp-7-3823-2007.
14. *Vonnegut B.* Some facts and speculation concerning the origin and role of thunderstorm electricity, in: *Severe Local Storms, Meteor. Monogr.*, 27, American Meteorological Society, 15 224–241, 1963.
15. *Yoshida S., Morimoto T., Ushio T., Kawasaki Z.* A fifth-power relationship for lightning activity from tropical rainfall measuring mission satellite observations. // *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, iss. D09104, doi:10.1029/2008JD010370.
16. *Zhao C., Wang Y., Choi Y., Zeng T.* Summertime impact of convective transport and lightning NO_x production over North America: modeling dependence on meteorological simulations. // *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, vol. 9, pp. 4315–4327, doi:10.5194/acp-9-4315-2009.
17. *Wong J., Barth M., Noone T.* Evaluating a lightning parameterization based on cloud-top height for mesoscale numerical model simulations. // *Geosci. Model Dev.*, 2013, vol. 6, pp. 429–443, doi:10.5194/gmd-6-429-2013.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках госзадания Министерства образования и науки и в рамках договора № 14.B25.31.0023 для поддержки исследований под руководством ведущих ученых, а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 14-05-00871-а, 13-05-91154-ГФЕН_а, 12-05-33071). Авторы выражают благодарность С.В. Мостаманди, О.Г. Анискиной, М.В. Моцакову за полезные замечания и помощь в установке и реализации модели WRF-Chem.