

М.В. Черепова, С.П. Смышляев, С.В. Мостаманди

**ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ И ПРОГНОСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАД
ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

M.V. Cherepova, S.P. Smyshlyev, S.V. Mostamandi

**THE DIAGNOSTIC AND PROGNOSTIC SIMULATIONS TRASERS OVER THE
RUSSIAN FEDERATION**

Приводится описание разработанной численной модели химического состава нижней атмосферы Евразии. Модель позволяет осуществлять диагностические и прогностические расчеты изменчивости газового состава тропосферы и нижней стратосферы на основе задания потоков загрязняющих веществ с земной поверхности, метеорологических характеристик и скоростей химических реакций.

Ключевые слова: газовый состав атмосферы, Евразия, численная модель.

A chemical composition numerical model for the lower atmosphere of Eurasia is described. The model is developed at the Russian State Hydrometeorological University to solve diagnostic and prognostic problems of the gaseous composition variability in the troposphere and low stratosphere. The model is driven by the prescribed gases surface emissions, meteorological parameters and chemical reaction rates.

Key words: atmospheric gaseous composition, Eurasia, numerical modeling.

Введение

В течение последнего десятилетия интенсивно развивается новое направление атмосферного моделирования — прогноз качества воздуха и химической погоды [7], ориентированное на численные расчеты изменения газового и аэрозольного состава атмосферы в региональном масштабе. Вследствие этого большинство современных региональных моделей качества воздуха имеют достаточно высокое разрешение по горизонтали (несколько километров), но ограничиваются рассмотрением процессов в достаточно небольшом регионе. При этом не всегда достаточно хорошо описываются особенности трансграничного переноса атмосферных примесей и взаимодействия атмосферных газовых составляющих, имеющих источники в разных регионах.

В настоящее время существует множество глобальных моделей химического состава атмосферы, которые позволяют учитывать перераспределение атмосферных газов и аэрозольных частиц в глобальном масштабе [4]. Однако, ввиду большого шага сетки (сотни километров) по горизонтали, поля как метеорологических величин, так и концентраций сильно сглажены. В результате этого многие детали региональных и локальных особенностей трансформации химического состава атмосферы учитываются в глобальных моделях недостаточно подробно. Если же возникает необходимость одновременного учета и региональных особенностей изменчивости состава атмосферы

и взаимодействия процессов и источников в разных регионах, то уменьшение шага в глобальной модели или увеличение области определения в региональных моделях приводит к необходимости использования больших компьютерных ресурсов и сильному усложнению моделей.

Таким образом, для решения ряда задач назрела необходимость в использовании моделей промежуточного масштаба: больше регионального, но меньше глобального. Такой моделью может быть модель континентального масштаба, которая по пространственному разрешению и детальности почти не уступает региональным моделям, но позволяет учесть взаимодействие процессов в разных регионах в пределах континента. В настоящей работе описывается подобная модель, разработанная в Российском государственном гидрометеорологическом университете для Евразии.

Как известно, химически активные газы, попадающие в приземный слой атмосферы в зонах интенсивных выбросов токсичных загрязнителей, могут химически трансформироваться или переноситься в соседние регионы. Подверженность конкретного газа к локальной трансформации или трансграничному переносу определяется его химическими свойствами, т.е. сравнением химического времени жизни и постоянной времени атмосферного переноса [2]. Если химическое время жизни много меньше характерного времени переноса, то газ не успевает перенестись в другую точку пространства и химически трансформируется в месте выброса в атмосферу. Если, наоборот, химическое время жизни много больше характерного времени атмосферного переноса, то газ не успевает химически разрушиться и может переноситься в другие регионы [16]. Модели химической трансформации и переноса являются главным механизмом оценки изменчивости газовых загрязнителей в атмосфере [7].

Описание модели

Для прогнозирования концентраций атмосферных газов и аэрозолей и исследования вариаций газового состава атмосферы в зависимости от наблюдаемых метеорологических условий была разработана и использована континентальная трехмерная химико-прогностическая модель, осуществляющая моделирование эволюции и переноса малых газовых составляющих на территории Российской Федерации. Данная модель была разработана на основании ранее существующей химико-климатической модели атмосферы ССМ (Chemistry Climate Model), разработанной совместно институтом вычислительной математики РАН и Российским государственным гидрометеорологическим университетом [1]. Разработанная ранее модель ССМ была климатической и описывала изменения глобального состава, поэтому она имела грубое разрешение ($4^\circ \times 5^\circ$) и запускалась на годы или десятилетия.

Адаптированная модель является более чувствительной к изменению концентраций. Разрешение континентальной химико-прогностической модели составляет $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ с охватом по широте от 28° с.ш. до 80° с.ш. и долготе — от 8° з.д. до 180° в.д., она имеет 22 σ -уровня по вертикали, простирающихся от поверхности Земли до высоты около 10 гПа (примерно 33 км). Количество узлов в модели 377 по широте и 105 по долготе, моделирование осуществляется со 2-го по 376-й узел (количество узлов — 355) и со 2-го по 104-й узел (количество узлов — 103) соответственно. Химическая схема

модели обеспечивает распределение 74 атмосферных соединений, включающих озон (O_3), водородные соединения (OH , HO_2 , H_2O_2), азотные соединения (NO , NO_2 , NO_3), некоторые углеводороды CO и окисленные органические соединения, в 174 химических реакциях с учетом 51 процесса фотодиссоциации [3].

Количество газов, рассматриваемых в модели, а также количество реакций позволяет прогнозировать концентрации в моделируемой области в тропосфере и нижней части стратосферы. Более мелкий шаг сетки по пространству по сравнению с глобальной моделью [1] позволяет получить более подробное распределение концентраций газов и аэрозолей, а также позволяет учитывать мезомасштабные процессы и их особенности. Модель описывает поверхностные эмиссии, химические трансформации, сухое и влажное осаждение, реакции аэрозолей, а также учитывает грозовую деятельность.

В качестве входных метеорологических полей, в отличие от глобальной модели, в которой в качестве входных метеорологических данных использовались результаты расчета климатических параметров моделью общей циркуляции атмосферы, были использованы данные анализа и прогноза Global Forecast System (GFS) [8], которая является спектральной моделью с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ и имеет 64 σ -уровней по вертикали до высоты около 32 км. Результаты моделирования обновляются 4 раза в сутки (00, 06, 12, 18 ч UTC) с шагом по времени 3 ч с прогнозом до 180 ч. Данные GFS являются лишь одним из возможных вариантов входных метеорологических данных.

Начальные данные для химии были взяты из баз данных EDGAR, NASA, AEROCOM, GEIA, также существует возможность использовать и другие данные.

Верхние граничные условия для концентраций малых газов, как и боковые граничные условия, были взяты из глобальной модели [1].

Характерные особенности данной континентальной модели по сравнению с предыдущей глобальной версией модели следующие:

- а) модель имеет более высокое пространственное разрешение по сравнению с глобальной версией модели;
- б) в качестве входных данных используются метеорологические поля, полученные при помощи Global Forecast System с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$;
- в) моделирование осуществляется в пределах тропосферы и нижней части стратосферы;
- г) модель позволяет учитывать региональные особенности;
- д) модель может работать в одном из двух режимов — в прогностическом или в диагностическом;
- ж) моделирование осуществляется не глобально, а охватывает большую часть территории Евразии — от 28° с.ш. до 80° с.ш. и долготе — от 8° з.д. до 180° в.д.; преимущественно, прогноз концентраций малых газовых составляющих осуществляется для территории России. При решении иных задач, область моделирования может меняться и быть любой областью на территории земного шара;
- и) по вертикали моделирование осуществляется примерно до 10 гПа (около 33 км).

Достоинства данной континентальной модели по сравнению с глобальной следующие:

- 1) модель требует меньше компьютерных ресурсов, чем аналогичная глобальная модель (с таким же пространственным разрешением);

- 2) детальное моделирование осуществляется только в интересующей области;
- 3) по сравнению с предыдущей версией модели (глобальной) континентальная модель имеет более высокое пространственное разрешение;
- 4) отсутствуют особые точки — полюса.

Достоинства данной континентальной модели по сравнению с региональной:

- 1) территория, в которой осуществляется моделирование, охватывает большой район и, благодаря этому, ошибки, которые могут возникнуть при постановке граничных условий, будут оставаться далеко за пределами интересующей нас области;
- 2) при прогнозировании концентраций в течение трех дней ошибки будут накапливаться с меньшей скоростью, чем в аналогичной региональной модели;
- 3) континентальная модель имеет те же достоинства, что и региональная.

Трудности и недостатки:

- a) постановка граничных условий требует предварительного моделирования глобальной моделью;
- b) в качестве входных данных необходимо использовать данные распределения концентраций на сетке с малым шагом;
- в) верхние граничные условия, взятые из глобальной модели, могут вносить некоторые ошибки.

Результаты модельных экспериментов

Как было отмечено ранее, разработанная модель способна работать в двух режимах — в качестве прогностической модели, давая прогноз распределения концентраций малых газовых составляющих на три дня и в качестве диагностической модели, которая показывает, насколько точен прогноз модели и были ли какие-либо эмиссии от дополнительных источников или нет. При работе с моделью были проведены эксперименты в каждом из режимов; полученные результаты сравнивались с результатами, полученными от глобальной модели, а также со средними оценками концентраций.

Для данного эксперимента использовались данные прогноза и анализа метеорологических полей за май 2014 г. Периодичность обновления прогностических данных в разработанной модели составляет 12 ч, так как это время является оптимальным, чтобы осуществилась подстройка модели, и, вместе с тем, чтобы модель была чувствительной к изменениям погоды, прогноз дается на 72 ч. Модель отображает особенности распределения концентраций в течение нескольких дней. Ниже представлена визуализация полученных данных от модели. Представлено распределение концентраций у поверхности, а именно, CO, NO_y, N₂O, CH₄ с учетом реальных и прогнозируемых метеорологических полей.

На рис. 1 изображен поток N₂O с поверхности земли. На рисунке видно, что крупные источники расположены в Европе, а также на юго-востоке моделируемой области — азиатские источники; также видны локальные более слабые источники, расположенные на юге Европейской части России.

На рис. 2а изображены результаты первого дня моделирования для N_2O с учетом реальных метеорологических полей — диагностика. Виден крупный арктический источник, простирающийся внутрь Евразийского континента. Распределение N_2O преимущественно объясняется стратосферными источниками и стоками. Концентрации N_2O варьируются от 290 до 340 ppb. Среднее значение, полученное при оценках от различных измерений, а также значений, полученное другими моделями, составляет около 320 ppb для данной области.

На рис. 2б видно, что арктический источник стал заметно слабее и более вытянутым. Локальный очаг появился в районе Охотского моря, что, можно объяснить циркуляцией.

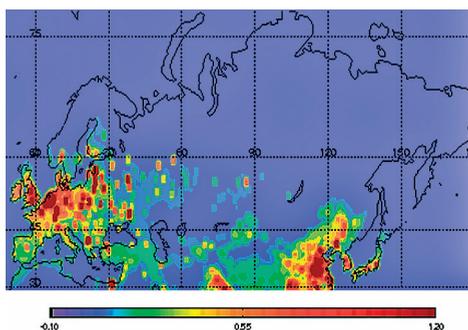


Рис. 1. Поток N_2O с поверхности

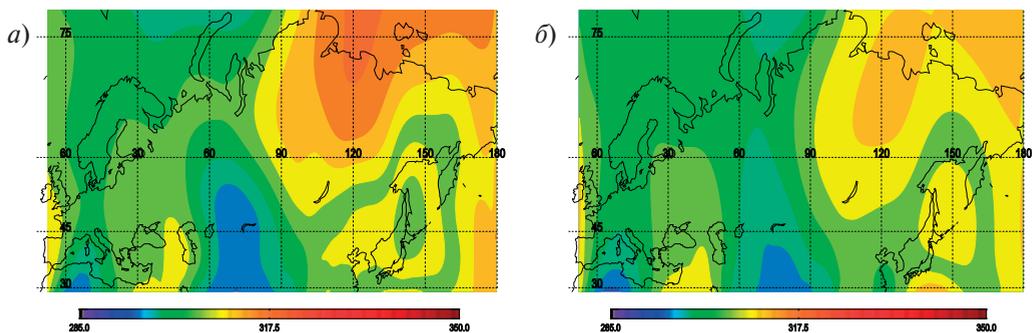


Рис. 2. Первый (а) и третий (б) дни моделирования концентрации N_2O (ppb)

Оксид углерода имеет как наземные, так и внутриагмосферные источники, главным из которых является окисление метана; эмиссия CO у поверхности составляет примерно 62 % от глобального источника. На рис. 3 изображен поток CO с поверхности земли, наблюдается мощный источник в восточной части Азии, а также более мелкие источники на территории Европы, а также в средней полосе России. В остальной области прослеживаются равные потоки с поверхности земли.

На рис. 4а изображено распределение концентраций CO в первый день моделирования — диагностика, хорошо прослеживается мощный азиатский источник, который

виден на рис. 3. На остальной территории распределение концентраций CO у земли довольно-таки равномерно. Средние оценки концентраций на территории Евразии составляют около 80 ppb.

На рис. 4б показаны результаты моделирования концентраций на третий день после запуска модели. Как видно из рис. 4а, по-прежнему сохраняется азиатский максимум концентраций CO.

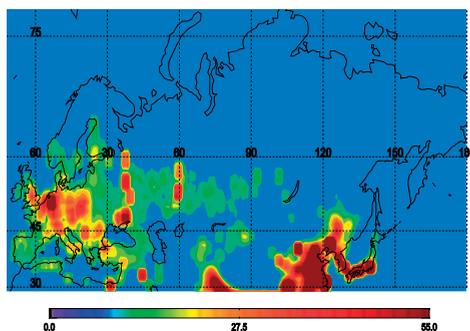


Рис. 3. Поток CO с поверхности

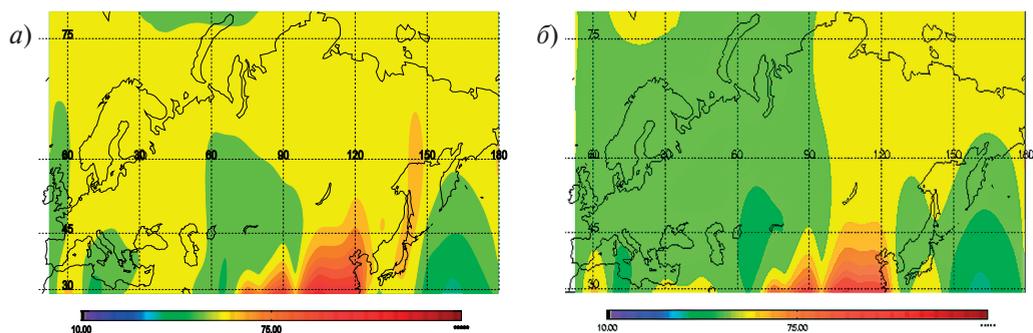


Рис. 4. Первый (а) и третий (б) дни моделирования концентрации CO (ppb)

На рис. 5, 6а и 6б показано распределение концентраций метана. Метан, как известно, не имеет внутреннего источника в атмосфере, поэтому его появление в атмосфере определяется потоками с земной поверхности. На рис. 5 видны три крупных источника: европейский, азиатский и среднесибирский источник. Из-за долгого времени жизни распределение метана в тропосфере почти однородно, и его сезонные изменения малы. Однако вблизи поверхности наблюдаются значительные колебания в концентрации.

На рис. 6а и 6б, показывающих распределение концентраций метана у поверхности, заметен крупный арктический источник метаногидратов, а также меньшие источники — южноазиатский и европейский. Средние оценки для концентраций метана на территории Евразии составляют порядка 1800 ppb или 1,8 ppm.

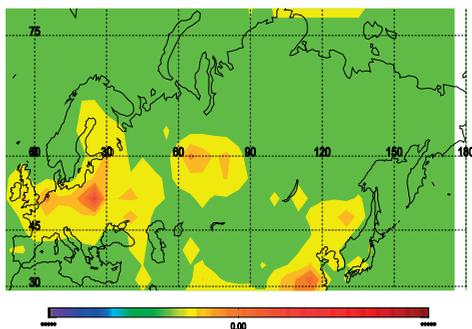


Рис. 5. Поток CH_4 с поверхности

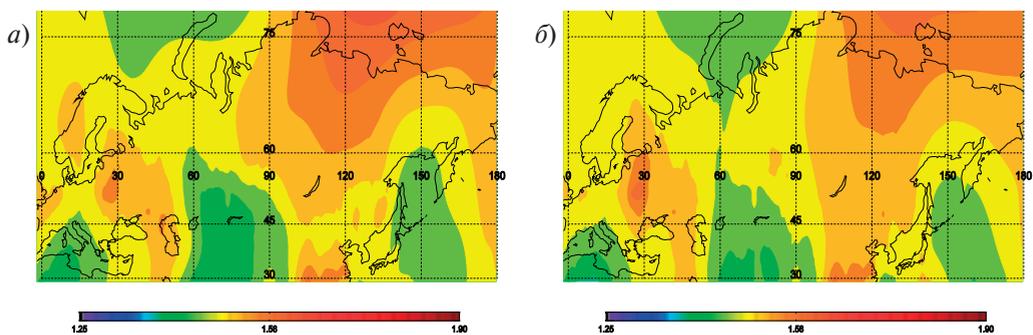
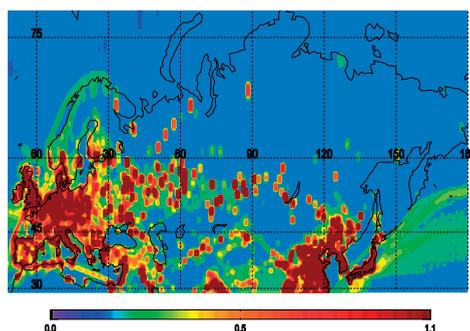
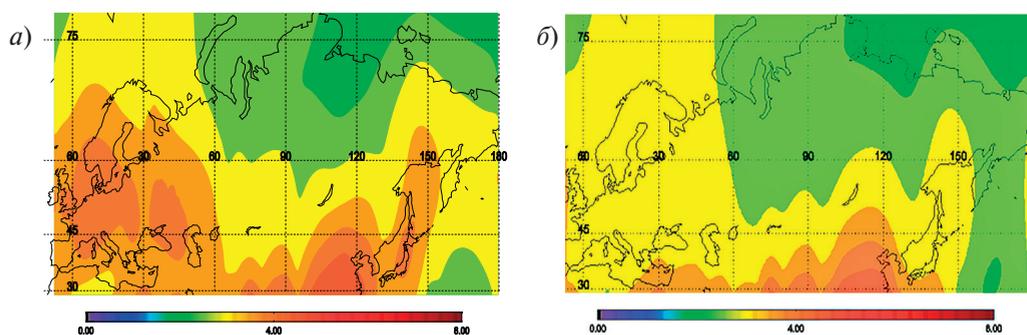


Рис. 6. Первый (а) и третий (б) дни моделирования концентрации CH_4 (ppm)

На рис. 7, 8а, 8б показано распределение концентраций NO_y . На рис. 7 показаны потоки с поверхности, южнее 60°с.ш. сосредоточены как локальные, так и крупные источники. Крупный очаг расположен на территории Западно-Восточной Европы, другой — на юго-западе Азии. В первый день моделирования отчетливо прослеживается наличие этих двух крупных очагов (см. рис. 8а). В третий день моделирования по-прежнему ясно прослеживается азиатский источник. Среднее значение по оценкам различных измерений концентраций у земли для NO_y составляет около 3 ppb. Как видно из рисунков, прослеживается связь мощности источников и концентраций у поверхности, что объясняется обилием NO_y у поверхности.

Заключение

Разработанная континентальная модель может осуществлять свою работу в одном из двух режимов: прогностическом или диагностическом. Модель химического состава нижней атмосферы адаптирована к усвоению метеорологических данных от модели GFS как к одному из возможных вариантов входных метеорологических данных. Также модель допускает использование различных входных данных для химии. Разработана методика прогнозирования и диагностики в континентальном масштабе. Следует

Рис. 7. Поток NO_y с поверхностиРис. 8. Первый (а) и третий (б) дни моделирования концентраций NO_y (ppb)

отметить, что область, где осуществляется моделирование, может меняться в зависимости от поставленной задачи и может быть выбран любой район земного шара. В данном случае интересующая территория, где осуществляется моделирование — это территория Российской Федерации. Создана глобальная база данных о потоках химических веществ с поверхности с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ и из нее можно вырезать нижние граничные условия для выбранной области моделирования.

Модель может использоваться прогностическими центрами Российской Федерации для моделирования газового состава атмосферы, а также может быть использована в качестве диагностического аппарата; работа представляет научно-исследовательский интерес.

Объективное сравнение результатов измерений и моделирования осуществлялось при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект 14-17-00096). Изучение влияния спектральных потоков солнечной радиации на состав атмосферы проводилось при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-05-00871-а). Используемая глобальная модель изменения состава атмосферы под воздействием динамических изменений в тропосфере и стратосфере разработана в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. *Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М.* Совместная химико-климатическая модель атмосферы. // Известия РАН. Сер. ФАО, 2007, т. 43, № 4, с. 437–452.
2. *Смышляев С.П.* Оценки времени нахождения в атмосфере химически активных антропогенных газов. // Учение записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 195–203.
3. *Dvortsov V.L., Zvenigorodsky S.G., Smyshlyaev S.P.* On the use of Isaksen-Luther method of computing photodissociation rates in photochemical models. // J. Geophys. Res., 1992, vol. 97, iss. D7, pp. 7593–7601.
4. *Eyring V., Lamarque J.-F.* Global chemistry-climate modeling and evaluation. // EOS, Transaction American Geophysical Union, 2012, vol. 93(51), pp. 539–539.
5. *Hausman E.D., McElroy M.B.* Role of Sea-Surface Temperature and Ocean Circulation Changes in the Reorganization of the Global Carbon Cycle at the Last Glacial Termination. // Global Biogeochem. Cycles., 1999, vol. 13, iss. 2, pp. 371–381.
6. *Kaminski T., Knorr W., Rayner P.J., Heimann M.* Assimilating atmospheric data into a terrestrial biosphere model: A case study of the seasonal cycle. // Global Biogeochem. Cycles, 2002, vol. 16, iss. 4. — DOI: 10.1029/2001GB001463.
7. *Kukkonen J., Olsson T., Schultz D.M., Baklanov A., Klein T., Miranda A.I., Monteiro A., Hirtl M., Tarvainen V., Boy M., Peuch V.-H., Poupkou A., Kioutsioukis I., Finardi S., Sofiev M., Sokhi R., Lehtinen K.E.J., Karatzas K., San José R., Astitha M., Kallos G., Schaap M., Reimer E., Jakobs H., Eben K.* A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe. // Atmos. Chem. Phys., 2012, vol. 12, pp. 1–87. — DOI: 10.5194/acp-12-1-2012.
8. *Saha S.* The NCEP Climate Forecast System. // J. Climate, 2006, vol. 19, pp. 3483–3517.
9. *Schmidt M.W.I., Skjemstad J.O., Czimeczik C.I., Glaser B., Prentice K.M., Gelinás Y., Kuhlbusch T.A.J.* Comparative Analysis of Black Carbon in Soils. // Global Biogeochem. Cycles, 2001, vol. 15, iss. 1, pp. 163–167.