

*Т.В. Суходолов, С.П. Смышляев*

**МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ НА ГАЗОВЫЙ СОСТАВ  
И ТЕМПЕРАТУРУ АТМОСФЕРЫ**

*T.V. Sukhodolov, S.P. Smyshlyev*

**A MODEL STUDY OF THE LIGHTNING SPACIAL DISTRIBUTION  
IMPACT ON THE ATMOSPHERIC COMPOSITION  
AND TEMPERATURE**

*В данной работе рассмотрены методы учета молниевых источников окислов азота в глобальных моделях и проведено модельное исследование влияния горизонтального и вертикального распределения грозовых вспышек на газовый состав и температуру атмосферы. Результаты моделирования показали ощутимый отклик атмосферы к вариациям распределения, что свидетельствует о важности правильного учета молниевых окислов азота в глобальных моделях и необходимости исследования обратной связи между изменением климата и молниевой активностью.*

*Ключевые слова: молниевая активность, горизонтальное и вертикальное распределение грозовых вспышек, окислы азота, озон, температура.*

*In this work the methods of accounting lightning source of nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) in global models are discussed. The modeling study of the effect of horizontal and vertical distribution of lightning flashes at the gas composition and temperature of the atmosphere was conducted. The simulation results show significant response of atmosphere to distribution variations, which shows the importance of correct accounting of lightning  $\text{NO}_x$  in global models and the need to study the feedback between climate change and lightning activity.*

*Key words: lightning activity, horizontal and vertical distribution of lightning flashes, nitrogen oxides, ozone, temperature.*

## **Введение**

Грозовая активность, включающая в себя частоту повторяемости гроз и количество образовавшихся молниевых разрядов, является одной из характеристик атмосферных процессов, представляющих особую важность для жизни и деятельности человека: удары молнии бывают причиной пожаров и разрушений построек, повреждений линий электропередач, а также гибели людей, встреча с грозой опасна для самолета. Молниевые разряды являются одним из основных источников лесных пожаров. По данным Всемирной метеорологической организации, материальный ущерб, причиняемый молниями только за один год по всему земному шару, составляет более 100 млн долларов [1]. В ряде исследований отмечается, что ожидается увеличение количества молниевых вспышек на 4–60% на каждый градус потепления [2].

Помимо этого, грозы непосредственно оказывают влияние на газовый состав воздуха как в региональном масштабе, так и в глобальном, с чем связано все возрастающее внимание к этому явлению как к источнику окислов азота ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ) [2]. В раскаленных до огромных температур каналах молнии молекулы кислорода и азота диссоциируют и при дальнейшем охлаждении канала объединяются в молекулы окислов азота. Окислы азота имеют высокую химическую активность и являются очень важными газами для атмосферной химии, поскольку они оказывают непосредственное влияние на содержание озона – в тропосфере за счет увеличения окислительной способности атмосферы они способствуют образованию озона, а в стратосфере они ответственны за разрушение озона в азотных каталитических циклах (около 70 %). В тропосфере озон обнаруживает токсичные и парниковые свойства, а в стратосфере защищает биосферу от жесткого ультрафиолетового излучения Солнца [3]. Таким образом, окислы азота при увеличении их концентраций в тропосфере и стратосфере ухудшают экологическую ситуацию, связанную с атмосферным содержанием озона.

Молниевая продукция ( $\text{LNO}_x$ ) является одним из основных источников окислов азота в атмосфере ( $5 \pm 3$  Тг/год) и единственным крупным источником, удаленным от поверхности [4]. С высотой увеличивается время жизни  $\text{NO}_x$  и, следовательно, влияние, оказываемое ими на химию атмосферы.

Грозовая продукция окислов азота имеет наибольшую неопределенность среди всех остальных источников [4], которая обусловлена тем, что в зависимости от локальных метеорологических условий может образовываться разное количество  $\text{NO}_x$ . Целью настоящей работы является исследование влияния вариации распределения  $\text{LNO}_x$  на газовый состав и температуру атмосферы.

### **Методика исследования**

Важность  $\text{LNO}_x$  для химии как тропосферы, так и стратосферы, заставляет учитывать этот источник при моделировании распределения озона и других химически активных газов атмосферы с использованием фотохимических и химико-климатических моделей. Однако, поскольку молниевые эффекты являются подсчетными процессами даже для региональных моделей и не могут быть явно описаны, используются косвенные методы их учета. Долгое время в моделях фотохимии использовались климатологические оценки, т.е. осредненные за длительный период данные [5]. Однако молниевая активность может существенно меняться в зависимости от региональных и глобальных условий как в пространстве, так и во времени. В связи с чем начали появляться физические параметризации, позволяющие учесть условия формирования молниевых разрядов.

Задача параметризации молниевых источников  $\text{NO}_x$  разделяется на три части: параметризация горизонтального распределения молниевых разрядов, определение количества образовавшихся в этих разрядах  $\text{LNO}_x$  и его распределение по вертикали. С каждой из трех частей связан ряд неопределенностей и допущений.

Для моделирования горизонтального распределения грозовой деятельности в последние десятилетия был создан ряд параметризаций на основе связи числа молниевых разрядов в кучево-дождевом облаке с величинами, характеризующими его мощность, такими, как высота верхней границы облака, конвективные осадки, темпы восходящих потоков массы, энергия неустойчивости и другими. Стоит отметить, что успешность параметризаций существенно отличается в различных моделях, что связано с особенностями моделей и в первую очередь с тем, как в модели описывается конвекция.

С химико-климатической моделью, разработанной в РГГМУ и ИВМ РАН, для выбора подходящей схемы были проведены расчеты с тремя параметризациями: на основе высоты верхней границы облака [6], конвективных осадков [7] и толщины слоя холодного облака [8]. Модель имеет следующие характеристики: 39 уровней по вертикали (0–90 км, 14 в тропосфере), 72 узла по долготе, 45 узлов по широте. Фотохимический блок включает в себя 74 газа, 174 химических реакции, 51 процесс фотодиссоциации, 29 гетерогенных реакций. Конвекция в модели рассчитывается раз в час [9].

Результаты моделирования частоты молниевых вспышек в сравнении со спутниковыми данными приборов OTD и LIS [10] приведены на рис. 1. Из результатов видно, что во всех трех случаях отмечаются схожие расхождения со спутниковыми данными в распределении интенсивности трех основных мировых центров грозовой активности (Африка, Юго-Восточная Азия, Южная Америка) и недооценка разрядов средних широт. Также параметризации по конвективным осадкам и толщине холодного облака значительно завышают молнии над океанами.

Выявленные недостатки связаны с рядом причин: во-первых, с тем, что, как уже отмечалось, параметризация молний использует выходные параметры конвективной схемы, ошибки в которой могут существенно сказываться на результатах, а во-вторых, с несовершенством самих молниевых параметризаций, которые были получены на основании измерений в определенных областях и могут не отражать особенности других областей.

Для дальнейшей работы была выбрана параметризация на основе верхней границы облака, показавшая наименьшие недостатки. Для лучшего соответствия данным измерений был предложен механизм корректировки модельных оценок.

Для каждого узла модельной сетки было рассчитано отношение модельных молний к спутниковым в каждый момент времени и проведено осреднение по месяцам. В случаях, когда модельные значения были равны нулю, коэффициент принимался равным спутниковому значению. Таким образом, были получены коэффициенты для каждой модельной точки, которые должны корректировать результаты параметризации. Данный подход позволил, хоть и в статистической форме, но учесть особенности каждого региона, и сохранить при этом обратную связь с изменением локальной погоды и климата.

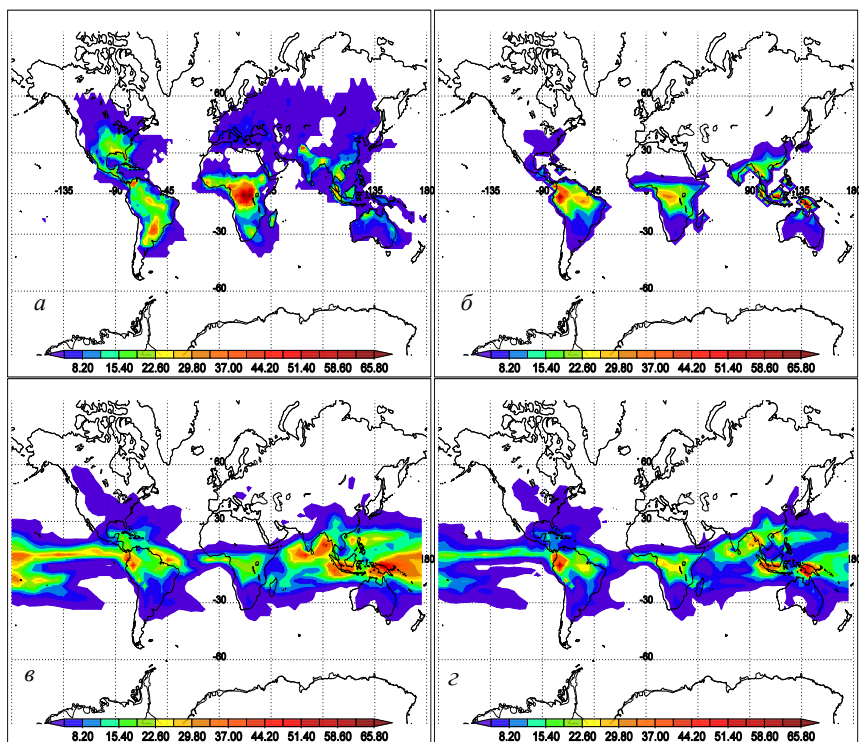


Рис. 1. Средняя частота молниеобразования (количество вспышек/км²/с). Спутниковые данные (а), результаты моделирования с параметризацией на основе высоты верхней границы облака (б), на основе толщины слоя холодного облака (в), на основе конвективных осадков (з)

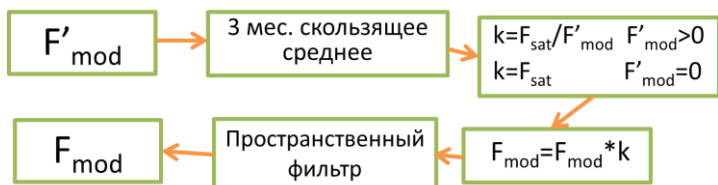


Рис. 2. Механизм корректировки модельной грозовой активности с помощью спутниковых данных

Даже после достаточно точного определения горизонтального распределения молний, связанная с  $\text{NO}_x$  неопределенность остается, поскольку количество  $\text{NO}_x$  производимое за вспышку не является постоянным. Оно зависит от силы, протяженности, разветвленности, типа и других характеристик вспышки. Широкий диапазон параметров связан как с разнообразием физических условий грозы в атмосфере, так и все еще с недостаточным пониманием физики явления.

В первую очередь, для тропосферных разрядов остается не вполне ясным вопрос об энергетике диссипации молниевых каналов и о роли ударной волны, в связи с чем, и пространственно-временная картина генерации окислов азота

является гипотетической. Во-вторых, остается неясным вклад процессов, протекающих в более холодной (по сравнению с плазмой канала молнии) неравновесной плазме многочисленных стримеров молнии. Наконец, в последнее время возникли новые вопросы, обусловленные открытием разрядов в средней атмосфере [11]. Поэтому в глобальных моделях, как правило, делается предположение, что все вспышки на земном шаре делятся всего на два типа: внутриоблачные (ВО) и вспышки облако–земля (ОЗ).

Имеющиеся в литературе расчеты количества окислов азота, генерируемых при молниевых вспышках, опираются на оценки скорости продукции окиси азота одной вспышкой, основанные на теоретических расчетах, лабораторных измерениях или натурных измерениях. Результаты этих расчетов имеют достаточно широкий диапазон; они обсуждаются в ряде обзоров, из которых наиболее полным является обзор [2], где подробно освещены и теоретические, и экспериментальные работы по проблеме генерации окислов азота молниевыми разрядами. В итоге приводится наилучшая оценка в 250 (33– 660) моль  $\text{NO}_x$  за вспышку.

Что касается отношения продуктивности ВО вспышек ( $P_{\text{IC}}$ ) к ОЗ ( $P_{\text{CG}}$ ), то множество работ было основано на ранних оценках, что ВО вспышки являются менее мощными, чем ОЗ и, соответственно, производят меньше  $\text{NO}_x$ . Однако более поздние работы показывают, что величина  $P_{\text{IC}}$  может быть близка к  $P_{\text{CG}}$  и даже превышать ее [12]. Следовательно, не потребовалось деления по типу молнии, что несколько упростило задачу, поскольку отпадает необходимость использования дополнительной параметризации для определения количества ВО вспышек.

Также результатом нескольких работ стало предположение, что среднеширотные вспышки могут быть в 4 раза продуктивнее экваториальных, что связано с большим максимальным током [2].

Разрешающая способность глобальных моделей не позволяет описывать форму отдельных молний, поэтому для вертикального распределения  $\text{LNO}_x$  в глобальных моделях используются вертикальные профили, представляющие собой общую модель результирующей продукции  $\text{LNO}_x$  в облаке. До настоящего времени использовались различные формы профилей. В ранних работах образовавшееся количество  $\text{LNO}_x$  распределялось по высоте однородно, позднее было показано, что вертикальное распределение сильно зависит от характеристик отдельных гроз, и поэтому для определенных типов гроз должны использоваться определенные профили [11]. Профили строятся с помощью облако-разрешающих моделей, для того, чтобы учесть перенос  $\text{LNO}_x$  внутри облака [12].

Таким образом, было выделено три горизонтальных распределения  $\text{LNO}_x$  и три вертикальных (рис. 3, 4). Для оценки влияния вариации распределения  $\text{LNO}_x$  с моделью были проведены расчеты для каждого случая на 25 лет с 1979 по 2003 г.

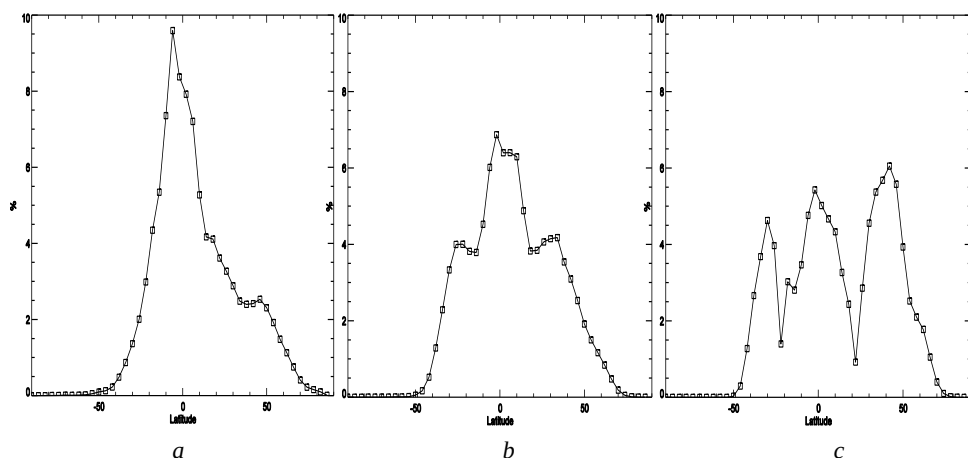


Рис. 3.  $LNO_x$  в зависимости от широты ( $\%/4^\circ$  от общего количества).  
Распределение, ранее использовавшееся в модели (a), новое распределение (b),  
распределение при условии, что среднеширотные вспышки продуктивнее экваториальных (c)

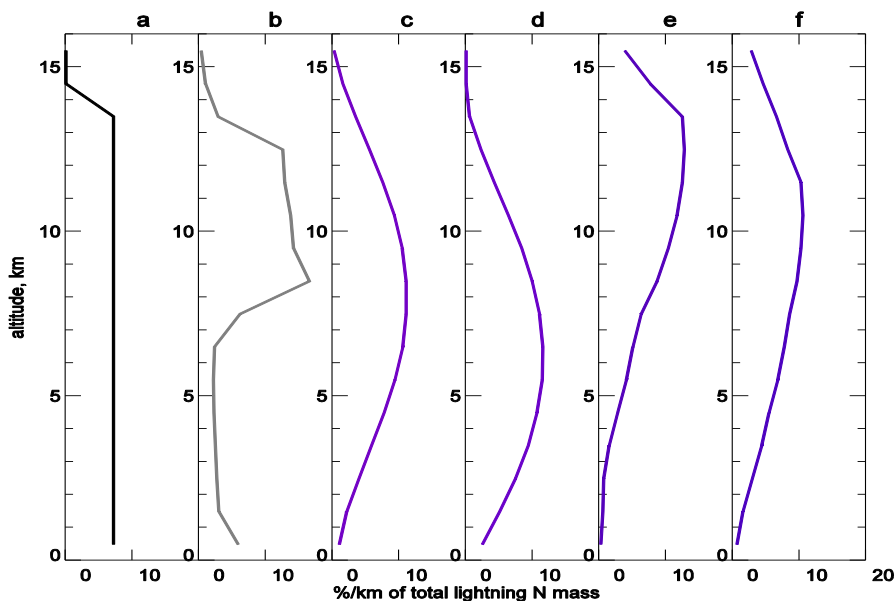


Рис. 4. Вертикальные профили результирующей продукции  $LNO_x$ : монопрофиль (a),  
С-образный профиль (b), более поздние профили для различных широтных диапазонов (c–f)

### Результаты модельных расчетов

В качестве примера на рис. 5, 6 и 7 приведены результаты одного из проведенных экспериментов. Показана реакция газового состава и температуры атмосферы на изменение горизонтального распределения с варианта, приведенного на рис. 3, a, на вариант 3, c.

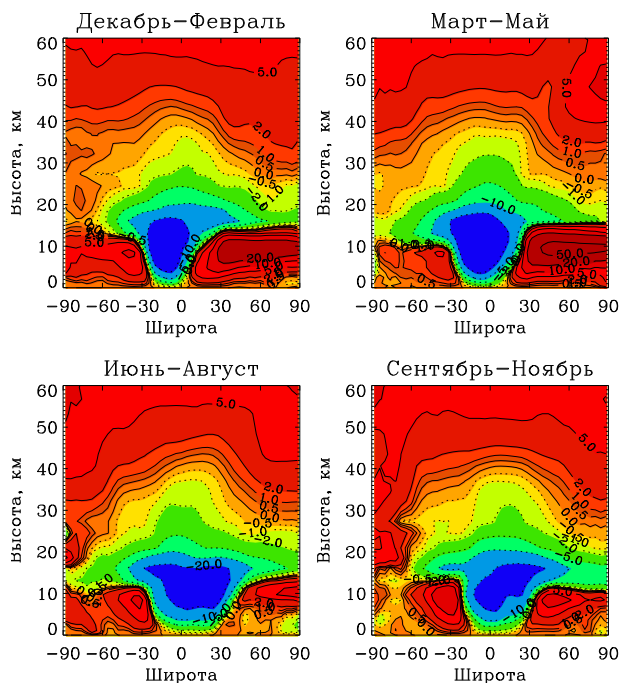


Рис. 5. Процентное изменение концентрации  $\text{NO}_x$  при изменении распределения с 3, а на 3, с

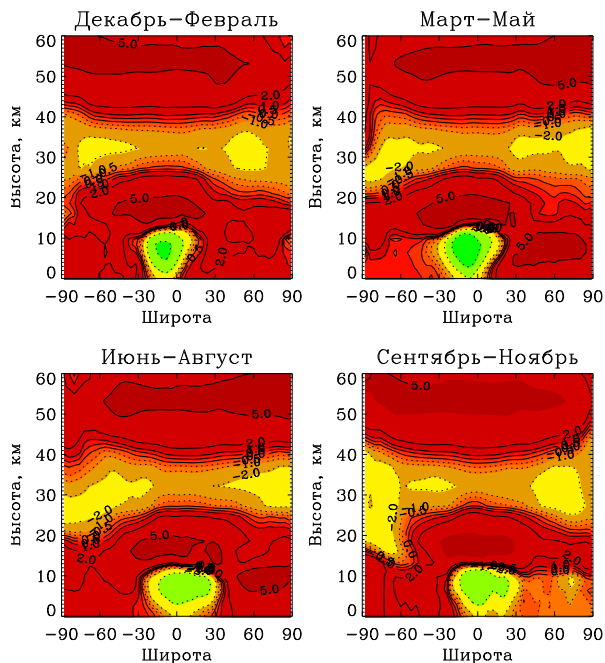


Рис. 6. Процентное изменение концентрации озона при изменении распределения с 3, а на 3, с

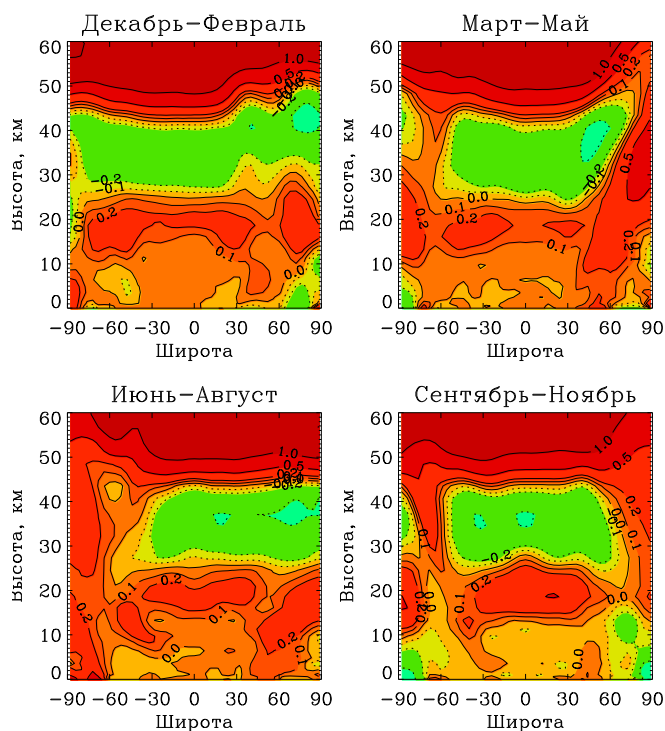


Рис. 7. Изменение температуры при изменении распределения  $\text{LNO}_x$  с 3, а на 3, с

Выполненные расчеты показали высокую чувствительность атмосферы к молниевому источнику окислов азота. Показано, что изменения в концентрации  $\text{NO}_x$  вследствие вариации горизонтального и вертикального распределения  $\text{LNO}_x$  могут достигать 50 % в тропосфере и до 15 % в нижней стратосфере, что приводит к изменению содержания озона на несколько процентов на высотах максимума его содержания и до 5 % в тропосфере и верхней стратосфере. Изменения концентрации гидроксильного радикала  $\text{OH}$  достигали 20 %, что может сказаться на очистительной способности атмосферы.

Изменение поля озона влечет за собой изменение нагрева и охлаждения, вследствие чего меняются потоки тепла и массы, которые, в конечном счете, приводят к изменению температуры [13, 14]. Вариации температуры в среднем за период отмечаются до 0,5 °C в стратосфере и до 0,2 °C в тропосфере. Стоит отметить, что атмосфера наиболее чувствительна к  $\text{LNO}_x$  в полярных областях стратосферы, а именно в полярных областях наблюдаются тревожные изменения в концентрации озона, называемые озоновыми дырами. Также полученного изменения в температуре может быть достаточно для изменения глобальных и локальных условий формирования грозных облаков, и таким образом может образоваться обратная связь между изменением температуры и газового состава атмосферы за счет  $\text{LNO}_x$  и изменением самой молниевой активности.

## Заключение

Проведено модельное исследование влияния горизонтального и вертикального распределения молниевых вспышек на содержание озона и температуру атмосферы. Результаты моделирования показали ощутимый отклик атмосферы к вариациям распределения  $\text{LNO}_x$ , что свидетельствует о важности правильного учета  $\text{LNO}_x$  в глобальных моделях и необходимости исследования обратной связи между изменением климата и молниевой активностью.

## Литература

1. Горбатенко В.П. Влияние географических факторов климата и синоптических процессов на грозовую активность: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. – СПб., 2003. – 39 с.
2. Schumann U., Huntrieser H. The global lightning-induced nitrogen oxides source // Atmos. Chem. Phys. 2007. Vol. 7. № 14. P. 3823–3907.
3. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change. New York: John Wiley and Sons, 1998. 1203 p.
4. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change 2001: The Scientific Basis: Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs et al. Cambridge: Cambridge University Press. 2001. 881 p.
5. Price C., Penner J., Prather M.  $\text{NO}_x$  from lightning, 2, Constraints from the global atmospheric electric circuit // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. № D5. P. 5943–5951.
6. Price, C., Rind, D.: A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions. J. Geophys. Res. 97, 9919–9933 (1992). doi:10.1029/92JD00719.
7. Allen, D.J., Pickering, K.E.: Evaluation of lightning flash rate parameterizations for use in a global chemical transport model. J. Geophys. Res. 107, 4711 (2002). doi:10.1029/2002JD002066.
8. Fulyan, J.M., Del Genio, A.D.: Relationships between lightning and properties of convective cloud clusters. Geophys. Res. Lett. 34, L15705 (2007). doi:10.1029/2007GL030227.
9. Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М. Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана, 2007, т. 43, № 4, с. 437–452.
10. Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Boccippio, D. J., et al.: Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector, J. Geophys. Res., 108, 4005, doi:10.1029/2002JD002347, 2003.
11. Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я. Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана, 2010, т. 46, № 4, с. 487–504.
12. Ott L, Pickering K, Stenichkov G, Allen D, DeCaria A, Ridley B, Lin R, Lang S, Tao W. Production of lightning  $\text{NO}_x$  and its vertical distribution calculated from three-dimensional cloud-scale chemical transport model simulations. J. Geophys. Res.-Atmos. 2010;115 19.
13. Суходолов Т.В., Блакитная П.А., Боровская О.П., Смышляев С.П. Модельное исследование одновременных изменений содержания озона и температуры стратосферы // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 22, с. 90-103.
14. Хорева Е.И., Мостаманди С.В., Ронту Л., Бакланов А.А. Прямые аэрозольные эффекты в одномерной версии региональной метеорологической модели HIRLAM // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 22, с. 114-122.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках гранта Правительства РФ (Договор №11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых, а также в рамках мероприятий Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.