Е.И. Морозова (Хорева), С.В. Мостаманди, Л. Ронту, К.П. Нильсен, А.А. Бакланов

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АЭРОЗОЛЕЙ В ОДНОМЕРНОЙ ВЕРСИИ РЕГИОНАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ENVIRO-HIRLAM

E.I. Morozova (Khoreva), S.V. Mostamandi, L. Rontu, K.P. Nielsen, A.A. Baklanov

STUDY OF RADIATION AEROSOL EFFECTS IN THE ONE-DIMENSIONAL VERSION OF REGIONAL METEOROLOGICAL MODEL ENVIRO-HIRLAM

Наиболее сильное радиационное воздействие аэрозолей – поглощение и рассеяние коротковолновой и длинноволновой радиации – наблюдается при повышенном содержании антропогенных аэрозолей в крупных городах. В данной статье приведены обновленные результаты расчета и анализа прямого воздействия фоновых и искусственно повышенных содержаний антропогенного аэрозоля (органического углерода, сажевого и сульфатного аэрозоля) в Соданкюля (Финляндия), полученные с помощью одномерной версии региональной метеорологической модели Enviro-HIRLAM с модифицированной радиационной, разработанной в Датском Метеорологическом Институте (ДМИ).

Ключевые слова: прямые эффекты аэрозолей, радиационный баланс, антропогенные аэрозоли.

The strongest radiative forcing of aerosols, absorption and scattering of short-wave and long-wave radiation, is observed at high contents of anthropogenic aerosols in large cities. This article presents the updated results of the calculation and analysis of the direct effects of background and artificially increased content of anthropogenic aerosols – organic carbon, soot and sulfate aerosols – in Sodankylä (Finland), obtained by a one-dimensional version of the regional meteorological model Enviro-HIRLAM with modified radiation scheme developed at the Danish Meteorological Institute.

Keywords: direct effects of aerosols, radiation balance, anthropogenic aerosols.

Введение

В 3-мерных климатических моделях при попытках расчета аэрозольных эффектов распределение аэрозолей по времени и в пространстве осредняется. Сложность корректного представления распределения аэрозоля в таких моделях и адекватного представления и описания атмосферной физики отражается в наличии больших расхождений в оценках радиационного аэрозольного форсинга различными моделями [4]. Более того, из-за грубого разрешения глобальные климатические модели не учитывают местные повышенные концентрации аэрозолей, например, в крупных городах. Это приводит к необходимости развития региональных объединенных метеорологических и химических моделей с детальным описанием жизненного цикла аэрозоля и влиянием аэрозолей на радиацию и облачность [5].

Радиационные свойства аэрозолей зависят от их оптических свойств, которые определяются многими факторами: размером, химическим составом, состоянием смешивания (или иначе – как компоненты аэрозолей смешаны друг с другом), гигроскопичностью. В данном эксперименте рассмотрены радиационные эффекты 3 основных антропогенных аэрозолей: органического углерода (ОУ), сульфатного и сажевого аэрозолей. К источникам антропогенных (промышленных) выбросов относят автотранспорт, тепловые электростанции, промышленные предприятия, сжигание мусора и обогрев помещений. Такие источники широко представлены в крупных городах, где повышенные концентрации выбросов, в том числе аэрозолей, приводят к ярко выраженному радиационному воздействию [1].

Данный эксперимент проводился с целью изучения прямых эффектов основных антропогенных аэрозолей с помощью одномерной версии метеорологической модели Enviro-HIRLAM. С предварительными результатами подобного эксперимента можно ознакомиться в [2]. Одномерная версия модели, в отличие от трехмерной, используется для проведения идеализированных экспериментов в целях изучения влияния новых модельных разработок. Используемая в эксперименте версия включает в себя основной пакет физических параметризаций HIRLAM версии 7.4 [11] вместе с прямыми и полупрямыми эффектами, но не включает всей газофазной химии и косвенных аэрозольных эффектов, что позволяет сосредоточиться на цели эксперимента. Также следует отметить, что начальные условия данного эксперимента задаются пользователем и не изменяются в ходе эксперимента, т.е. не учитывается влияние адвекции. Кроме того состояние поверхности также не меняется во времени. Претерпевают изменения лишь зависимые переменные, в данном случае – приходящая солнечная и длинноволновая радиация у поверхности земли. Из этого следует, что результаты не могут быть действительными по сравнению с наблюдениями, однако будут познавательными с точки зрения изучения чувствительности новой параметризации к изменениям входных параметров.

Исходные данные и методология

Учет прямых и полупрямых эффектов основан на схеме, недавно разработанной в ДМИ. Подпрограмма для расчета прямого аэрозольного эффекта сочетает в себе хорошую скорость вычисления и точность. Так как модель Enviro-HIRLAM в целом предназначена для очень быстрых вычислений излучения и включает только одну спектральную полосу в коротковолновом спектральном интервале и одну полосу в длинноволновой области спектра [12, 10], было бы излишним совмещать данную схему с высокой степенью детализации расчета аэрозольного радиационного воздействия. Таким образом, расчет прямого эффекта аэрозолей на коротковолновом участке спектра осуществляется стандартным 2-потоковым приближением для расчетов средних оптических свойств аэрозолей, взвешенных по всему участку солнечного спектра. Точность этого предположения была проверена путем расчета пропускания и отражения 30-потоковым приближением с более чем 2000 длинами волн в коротковолновом спектре и сопоставления результатов с дискретными расчетами. Было установлено, что разница между двумя методами расчета в большинстве случаев находится в пределах

нескольких процентов. Только при содержании сажи (или черного углерода) > 0,3 г/м^2 подпрограмма не воспроизводит расчеты радиационного переноса с должной точностью. Предположительно это происходит из-за неадекватности 2-потокового приближения в случае с оптически толстым слоем и низким альбедо однократного рассеяния [3]. Однако коэффициент пропускания таких слоев является очень низким, и эта ошибка не влияет на абсолютные значения коротковолнового радиационного воздействия. Расчеты длинноволнового радиационного переноса также выполняются в виде 2-потокового приближения, причем оптические свойства аэрозолей усреднялись только в длинноволновой области окна прозрачности. Таким образом, было сделано предположение о незначительном длинноволновом радиационном воздействии аэрозоля, так как в данной области спектра доминирует эффект парниковых газов. Это предположение также основано на исследованиях детальных расчетов радиационного переноса [7, 8].

Для осуществления данного эксперимента были использованы данные о вертикальном распределении удельной массы сажи, ОУ и сульфатного аэрозолей из аэрозольной климатической модели с разрешением 4° по долготе и 5° по широте [6], доступные на сайте Национального комитета по астронавтике и исследованию космического пространства (NASA). Оценки антропогенных выбросов аэрозолей произведены на основе статистики употребления топлива и включают в себя временные изменения в технологии использования ископаемых видов топлива [9]. Источники сажи и ОУ – использование ископаемого топлива и сжигание биомассы, включая сельскохозяйственные пожары, которые происходят, в основном, в тропиках, и лесные пожары в Азии и Северной Америки. Аэрозоли от использования биотоплива не учитывались. Глобальное распределение аэрозолей вычислено моделью переноса для 1850, 1875, 1900, 1925, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990 г., линейно интерполируется между этими датами и принимается постоянной после 1990 года.

На рис. .1 представлены данные об общем содержании антропогенных аэрозолей в столбе атмосферы над населенным пунктом Соданкюля (67°25'00" с.ш. 26°35'35" в.д.), расположенным в провинции Лапландия (Финляндия), с населением 8801 человек. Так как данный населенный пункт не является большим городом, можно предположить, что представленное содержание является фоновым и для оценки возможных аэрозольных эффектов мегаполисов следует увеличить его в N раз. Таким образом, моделирование осуществлено в несколько этапов: случай с нулевыми удельными массами аэрозолей на всех уровнях; случай с фоновым (предполагаемым типичным для данного пункта) содержанием антропогенных аэрозолей; случаи с 5-, 10- и 30- кратным увеличением содержания аэрозоля с целью исследования влияния на радиацию средних и повышенных выбросов, характерных для крупных городов. Также рассмотрены случаи с учетом увеличенного содержания каждого типа аэрозоля в отдельности. Для данного эксперимента был выбран летний день (1 июля 1990 г.) с отсутствием облачности. Моделирование производилось с 00 часов по UTC на период 24 ч.

На рис. 2*а*, *б*, в изображены вертикальные профили содержания аэрозолей, соответствующие разным месяцам согласно [6]. В большинстве случаев максимум содержания один и приходится на слои у поверхности земли, однако встречаются распределения с несколькими максимумами, один из которых приближен к земле.

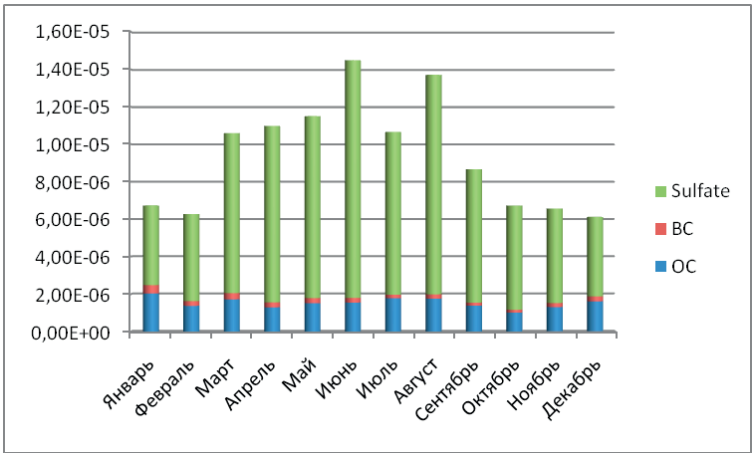
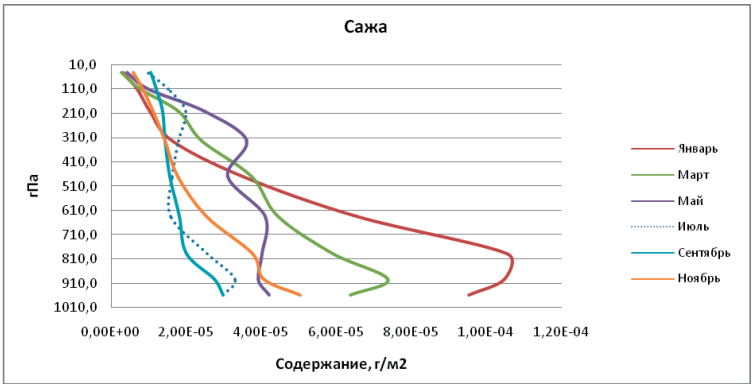
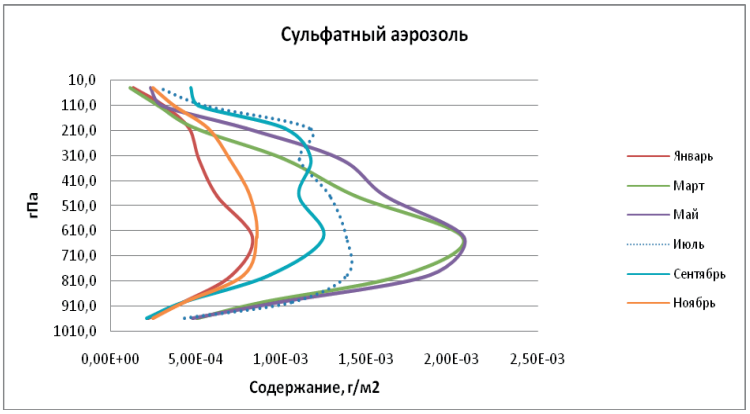


Рис. 1. Общее содержание антропогенных аэрозолей по месяцам на 1990 г. (сажи – BC, OУ – OC и Sulfate – сульфатный аэрозоль) в единицах кг/м^2.

а)



б)



в)

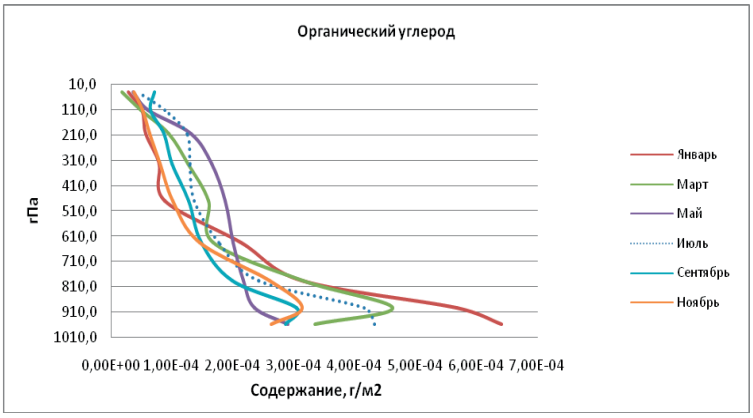


Рис. 2. Вертикальное распределение аэрозолей по месяцам за 1990 г. в Соданкюля:
а – сажевый; *б* – сульфатный; *в* – органический углерод
(месяц рассматриваемого эксперимента – июль, обозначен пунктирной линией).

Результаты

Как и следовало ожидать, при сравнении результатов моделирования первых двух случаев, а именно с нулевым содержанием аэрозолей и фоновым содержанием, не наблюдалось каких-либо радиационных эффектов из-за незначительности содержания взвешенных частиц за пределами крупных городов. На рисунке 3 и 4 приведены результаты моделирования случаев с искусственно увеличенным содержанием всех антропогенных аэрозолей в 5, 10 и 30 раз. Наибольшее влияние аэрозоли оказывают на баланс коротковолновой радиации у земной поверхности, количество которой тем меньше, чем больше содержание аэрозолей, что происходит за счет увеличения рассеяния и поглощения аэрозолями. На рис. 3 результаты расчетов показывают, что максимальное сокращение наблюдается в местный полдень и составляет порядка 80 Вт/м^2 при 30-кратном увеличении всех типов рассматриваемых аэрозолей. Эффект на длинноволновую радиацию, как и ожидалось, меньше и составляет до 27 Вт/м^2, что вызвано увеличением встречного излучения атмосферы (рис. 4).

На рис. 5 наглядно показано, что при учете прямого эффекта 3 типов антропогенных аэрозолей воздействие на коротковолновую радиацию примерно в 2 раза превосходит воздействие этих же аэрозолей на длинноволновую радиацию, причем в первом случае оно отрицательное, так как значительная часть солнечной радиации поглощается либо рассеивается аэрозолем, а во втором случае – положительное.

Далее рассмотрим случаи, когда учитывалось лишь увеличение содержания одного типа аэрозоля. Итак, на рис. 6 показано, что наименьший эффект наблюдается в случае увеличенного в 30 раз органического углерода, а наибольший - в случае увеличенного содержания сульфатного аэрозоля, а не одновременного увеличения всех типов аэрозолей.

Рис. 3. Суточный ход нисходящей коротковолновой радиации у поверхности при разном содержании антропогенных аэрозолей: фоновом (SodaS1), при увеличенном в 5 (SodaS5), в 10 (SodaS10) и 30 раз (SodaS30).

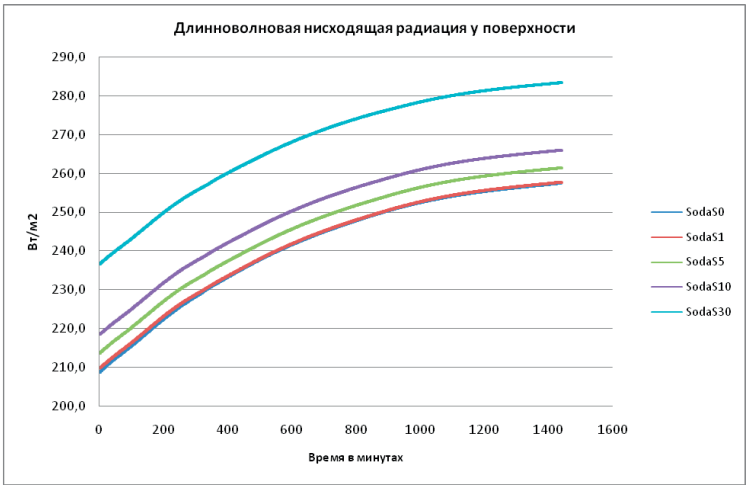


Рис. 4. Суточный ход нисходящей длинноволновой радиации у поверхности при разном содержании антропогенных аэрозолей: фоновом (SodaS1), при увеличенном в 5 (SodaS5), 10 (SodaS10) и 30 раз (SodaS30).

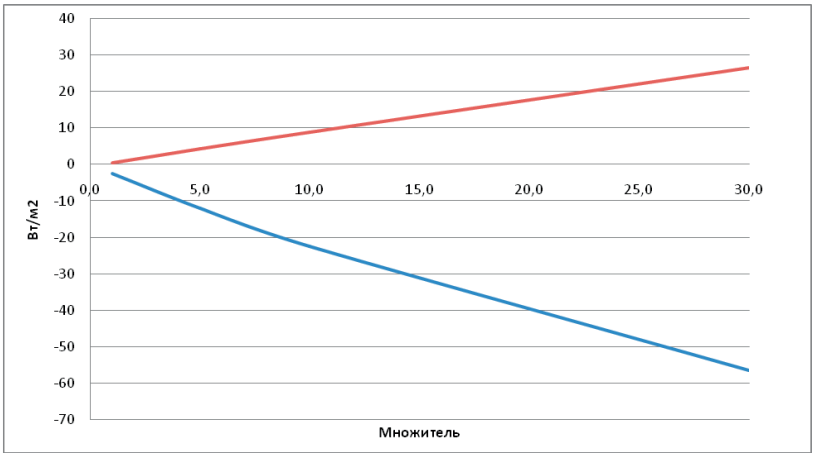


Рис. 5. Среднесуточная разница в приходящей коротковолновой (нижняя линия) и длинноволновой радиации (верхняя линия) у поверхности в зависимости от множителя, применимого к фоновой радиации – 0,1,5,10 или 30.

Рис. 6. Суточный ход приходящей коротковолновой радиации с разным содержанием антропогенных аэрозолей: нулевом (SodaS0), при увеличенном в 30 раз содержании сажевого (SodaS30BC) сульфатного (SodaS30Sulf) аэрозолей и ОУ (SodaS30OC), и одновременно всех рассмотренных выше аэрозолей (SodaS30).

При учете увеличенного в 30 раз сульфатного аэрозоля, согласно рис. 7, наблюдается эффект, сравнимый с эффектом, наблюдаемым при увеличении всех трех типов аэрозолей как на коротковолновую, так и на длинноволновую радиацию. При учете только сажевого аэрозоля наблюдается постепенная смена знака воздействия в течение дня: во второй половине дня количество приходящей длинноволновой чуть превышает то, что приходит к поверхности при отсутствии или при фоновом значении аэрозолей.

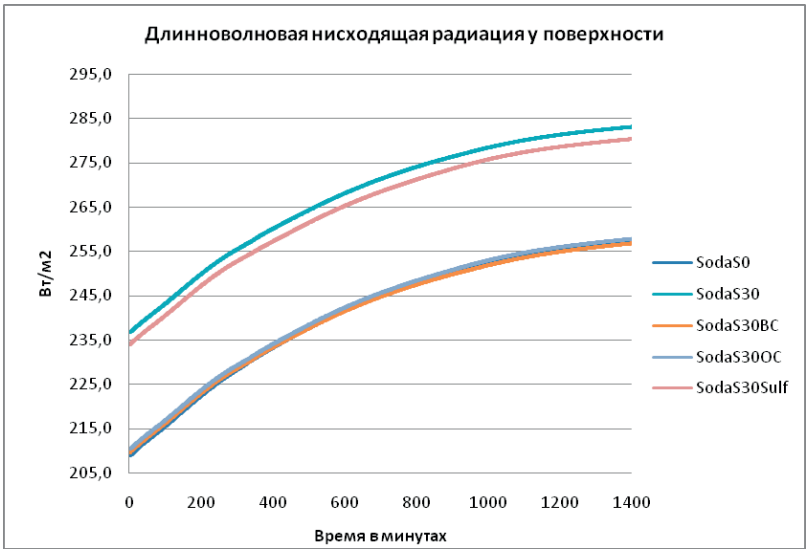


Рис. 7. Суточный ход приходящей длинноволновой радиации с разным содержанием антропогенных аэрозолей: нулевом (SodaS0), при увеличенном в 30 раз содержании сажевого (SodaS30BC) сульфатного (SodaS30Sulf) аэрозолей и ОУ (SodaS30OC), и одновременно всех рассмотренных выше аэрозолей (SodaS30).

На рис. 8 и 9 показано, что будет происходить с нисходящей длинноволновой и коротковолновой радиацией при одинаковом содержании каждого аэрозоля и равным 30-кратно увеличенному содержанию сульфатного аэрозоля. Как следует из рис. 8, при равных содержаниях, органический углерод и сульфатный аэрозоль одинаково уменьшают количество приходящей к земной поверхности коротковолновой радиации, в то время как эффект сажевого аэрозоля гораздо сильнее (поглощается практически вся нисходящая коротковолновая радиация).

Из рис. 9 следует, что наибольший эффект на нисходящую длинноволновую радиацию также оказывает сажевый аэрозоль, затем сульфатный аэрозоль и наименьший эффект – органический углерод.

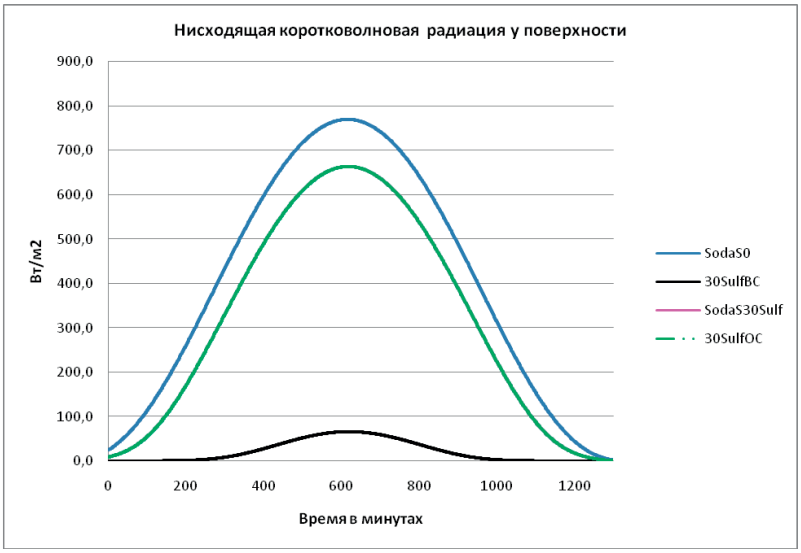


Рис. 8. Суточный ход приходящей коротковолновой радиации с одинаковым 30-кратным повышенным содержанием антропогенных аэрозолей: сажевого аэрозоля (30SulfBC), сульфатного аэрозоля (SodaS30Sulf) и ОУ (30SulfOC), и без аэрозоля (SodaS0).

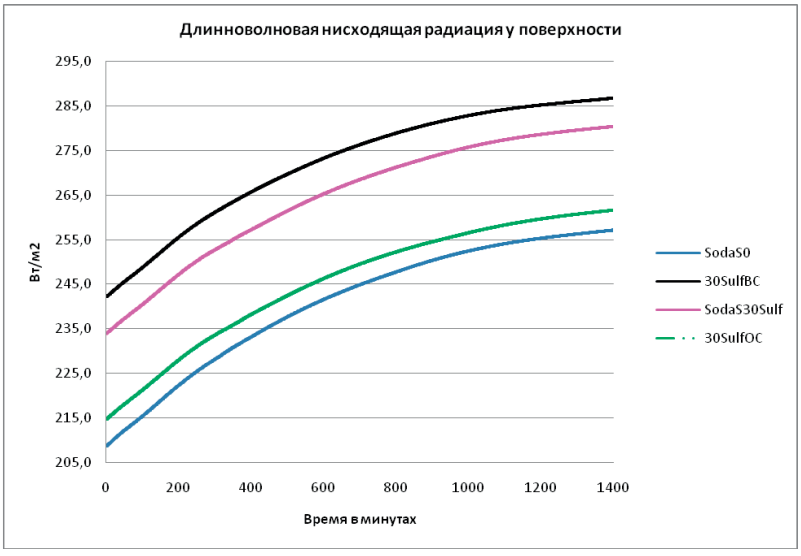


Рис. 9. Суточный ход приходящей длинноволновой радиации с одинаковым 30-кратным повышенным содержанием антропогенных аэрозолей: сажевого аэрозоля (30SulfBC), сульфатного аэрозоля (SodaS30Sulf) и ОУ (30SulfOC), и без аэрозоля (SodaS0).

Заключение

Проведенное исследование еще раз подтвердило наличие значимого прямого эффекта аэрозолей в атмосфере. Однако, при рассмотрении данных Соданкюля, чтобы увидеть эффект в численных экспериментах, необходимо было искусственно увеличить содержание антропогенных аэрозолей до значений, характерных для атмосферы мегаполисов, так как при фоновых концентрациях изменения нисходящей длинноволновой и коротковолновой радиации были минимальными.

При одновременном увеличении всех 3 типов аэрозолей наблюдалось сильное уменьшение коротковолновой радиации на уровне земли и менее заметное увеличение нисходящей длинноволновой радиации. Несмотря на выраженную способность сажевого аэрозоля поглощать радиацию, при 30-кратном увеличении, этот аэрозоль вызвал менее значительные эффекты, по сравнению с сульфатным аэрозолем. Возможно, это вызвано значительно большими концентрациями сульфатного аэрозоля. Не обнаружилось значительных эффектов также при отдельном увеличении содержания органического углерода. На данном этапе сложно говорить о достоверности результатов, так как условия данного эксперимента были далеки от реальности: начальные условия не менялись в течение дня, учитывался только лишь прямой аэрозольный эффект, рассматриваемые аэрозоли не взаимодействовали между собой, не учитывалась адвекция и осаждение и др.

Следует отметить, что работа над параметризацией прямого, а также полупрямого эффекта продолжается. Следующим шагом станет похожий эксперимент, но уже в одномерной версии, учитывающей помимо всего прочего газофазную химию, сухое осаждение и косвенные эффекты аэрозолей.

Работа выполнялась в Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ) при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках мероприятий Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение 14.B37.21.0880), гранта РФФИ 10-05-01083 и гранта Правительства РФ (Договор №11. G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых.

Литература

1. *Ландсберг Г.Е.* 1983: Климат города. Пер. с англ. Под ред. А.С. Дубова. – Л.: Гидрометеоиздат. – 247 с.
2. *Хорева Е.И., Мостаманди С.В., Ронту Л., Бакланов А.А.* Прямые аэрозольные эффекты в одномерной версии региональной метеорологической модели HIRLAM. // Ученые записки РГГМУ. 2011, № 22, с. 114-122.
3. *Chen, B.K. Stamnes and J.J.Stamnes*. 2001: Validity of the Diffusion Approximation in Bio-Optical Imaging, Appl.Opt., 40 (34), 6356-6366.
4. *Forster P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland.* 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007:The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

5. *Grell G. and A. Baklanov.* 2011: Integrated Modeling for Forecasting Weather and Air Quality: A Call for Fully Coupled Approaches. Atmospheric Environment, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.01.017.
6. *Koch D.* 2001: Transport and direct radiative forcing of carbonaceous and sulfate aerosols in the GISS GCM. J. Geophys. Res., 106, 20311-20332, doi:10.1029/2001JD900038.
7. *Korsholm U.S.* 2009: Integrated modeling of aerosol indirect effects – development and application of a chemical weather model. PhD thesis. DMI scientific report 01-09.
8. *Korsholm U.S., Mahura A., Nielsen K.P., Zakey A., Sass B.H.* 2011: Aerosol Direct and Semi-Direct Effects in a One Dimensional Version of Enviro-HIRLAM, Poster presentation on the Final MEGAPOLI Symposium, 26-28 Sep 2011; Paris, France (см.: http://megapoli.info).
9. *Novakov T., D.A. Hegg, and P.V. Hobbs.* 1997: Airborne measurements of carbonaceous aerosols on the East Coast of the United States, J. Geophys. Res., 102, 30023-30030.
10. *Savijarvi, H.* 1990: Fast radiation parameterization schemes for mesoscale and short-range forecast models. J. Appl. Meteor., 29, 437-447.
11. *Unden P., Rontu L., Jarvinen H., Lynch P., Calvo J., Cats G., Cuhart J., Eerola K. et al.* 2002. HIRLAM-5 Scientific Documentation. December 2002, HIRLAM-5 project report, SMHI, Norrkoping, Sweden.
12. *Wesely M.L.* 1989: Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. Atmos. Environ., 23,1293-1304.