

Е.И. Хорева, С.В. Мостаманди, Л. Ронту, А.А. Бакланов

ПРЯМЫЕ АЭРОЗОЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ОДНОМЕРНОЙ ВЕРСИИ РЕГИОНАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ HIRLAM

E.I. Khoreva, S.V. Mostamandi, L. Rontu, A.A. Baklanov

DIRECT AEROSOL EFFECTS IN THE ONE-DIMENSIONAL REGIONAL METEOROLOGICAL MODEL HIRLAM

Повышенные содержания антропогенных аэрозолей в крупных городах приводят к прямому воздействию на радиационный баланс путем поглощения и рассеяния коротковолновой и длинноволновой радиации. С помощью одномерной версии региональной метеорологической модели HIRLAM с модифицированной радиационной схемой для учета прямых аэрозольных эффектов, разработанной в Датском Метеорологическом Институте, был произведен расчет и анализ прямого воздействия при фоновых и повышенных содержаниях антропогенных аэрозолей - органического углерода, сажевого и сульфатного аэрозоля - в Соданкюля (Финляндия).

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

The high contents of anthropogenic aerosols in the megacities impact directly on the radiative balance via absorption and scattering of shortwave and longwave radiation. Direct effects in the background and increased levels of anthropogenic aerosols - organic carbon, soot and sulfate aerosols - in Sodankyl (Finland) was calculated and analysis by a one-dimensional regional meteorological model HIRLAM with modified radiation scheme developed at the Danish Meteorological Institute,

Key words: direct effects of aerosols, radiation balance, anthropogenic aerosols.

Введение

Для надежной оценки возможных изменений климата необходимо обеспечить достаточно точный учет в моделях климата основных факторов, определяющих радиационный теплообмен в атмосфере. В безоблачных условиях важной составляющей атмосферы, формирующей радиационный режим наряду с поглощающими атмосферными газами, как в глобальном, так и в региональном масштабе, является аэрозоль [1,2,3]. Под прямыми аэрозольными эффектами подразумевается прямое влияние аэрозолей на радиационный баланс системы «земная поверхность — атмосфера» посредством перераспределения коротковолнового солнечного и теплового излучений в этой системе за счет рассеяния и поглощения на аэрозольных частицах, неравномерно распределенных в земной атмосфере. Косвенные и полупрямые эффекты, связанные с фазовыми переходами воды в атмосфере, в частности при облако- и осадкообразовании, в данном эксперименте рассматриваться не будут. Считается, что в глобальном масштабе воздействие антропогенных аэрозолей на коротковолновую радиацию (поглощение) компенсирует часть нагрева, вызванного парниковыми газами. В региональном масштабе, особенно вблизи мегаполи-

сов, существует некоторая неопределенность, связанная с аэрозольными эффектами [1,4]. Эта неопределенность объясняется большей временной изменчивостью, неоднородностью распределения аэрозолей, по сравнению с парниковыми газами, а также существованием обратных связей между химическими процессами в атмосфере и приповерхностном слое подстилающей поверхности [2].

Радиационные свойства аэрозолей зависят от многих факторов — от размера, химического состава, от состояния смешивания (или иначе — как компоненты аэрозолей смешаны друг с другом), от гигроскопичности. В данном эксперименте рассмотрены радиационные эффекты трех основных антропогенных аэрозолей — органический углерод (ОУ), сульфатный и сажевый аэрозоль. К источникам антропогенных (промышленных) выбросов относят автотранспорт, тепловые электростанции, промышленные предприятия, сжигание мусора и обогрев помещений [5]. Данные виды источников широко представлены в крупных городах, где повышенные концентрации выбросов, в том числе аэрозолей, приводят к ярко выраженному радиационному воздействию.

Целью данного исследования является изучение прямых эффектов основных антропогенных аэрозолей с помощью одномерной версии метеорологической модели HIRLAM [6,7]. Одномерная версия модели, в отличие от трехмерной, используется для проведения идеализированных экспериментов и новых модельных разработок. Используемая в эксперименте версия включает в себя основной пакет физики HIRLAM вместе с прямыми и полупрямыми эффектами, но не включает всей газофазной химии и косвенных аэрозольных эффектов, что позволяет сосредоточиться на цели эксперимента.

Методика и данные

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 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 [8,9], 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-потокowym приближением для расчетов средних оптических свойств аэрозолей, взвешенных по всему участку солнечного спектра. Точность этого предположения была проверена путем расчета пропускания и отражения 30-потокowym 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/м² подпрограмма не воспроизводит расчеты радиационного переноса с должной точностью. Предположительно это происходит из-за неадекватности 2-потокowego приближения в случае с оптически толстым слоем и низким альбедо однократного рассеяния [10]. 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-поточкового приближения, причем оптические свойства аэрозолей взвешены 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.

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 [11], 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 [12]. Источники сажи и ОУ - использование ископаемого топлива и сжигание биомассы, включая сельскохозяйственные пожары, которые происходят в основном в тропиках, и лесные пожары, которые в Азии и Северной Америки. Аэрозоли от биотоплива не включены. Глобальное распределение аэрозолей вычислены моделью переноса для 1850, 1875, 1900, 1925, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990 годов, линейно интерполируются между этими датами, и принимается постоянной после 1990 года.

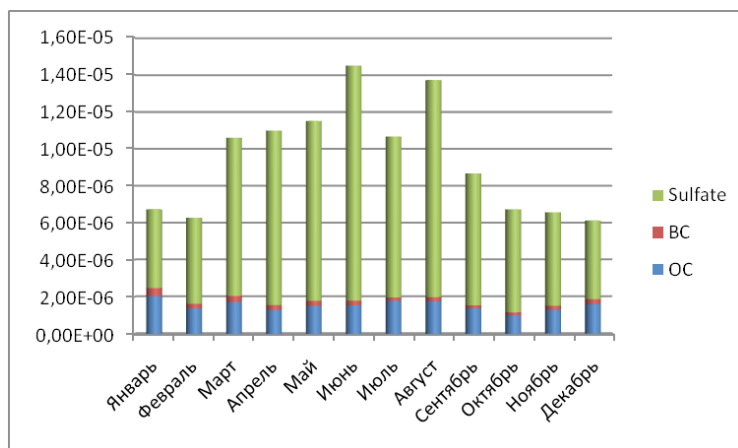


Рис. 1 – Общее содержание антропогенных аэрозолей по месяцам на 1990 год (сажи – BC, ОУ – OC и Sulfate – сульфатный аэрозоль) в единицах кг/м²

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 площадью— 12 415 км² и населением 8801 чел. Так как данный населенный пункт не является мегаполисом, можно предположить, что представленное содержание является фоновым и для расчета аэрозольных эффектов необходимо увеличить его в n раз. Таким образом, моделирование осуществлено в несколько этапов: случай с нулевыми удельными массами аэрозолей

на всех уровнях; случай с фоновым (типичными 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, свойственных крупным городам. Также рассмотрены случаи с учетом каждого типа аэрозоля в отдельности. Для данного эксперимента был выбран летний период с отсутствием облачности. Моделирование производилось с 00 часов по UTC на период 24 часа. Органический углерод и сульфатный аэрозоль в данной радиационной схеме объединяются в единый тип — растворимых в воде аэрозолей. На рис. 2 и 3 изображены вертикальные профили содержания аэрозолей, соответствующие разным месяцам. В большинстве случаев максимум содержания один и приходится на слои у земли, однако, встречаются распределения с несколькими максимумами, один из которых приближен к земле.

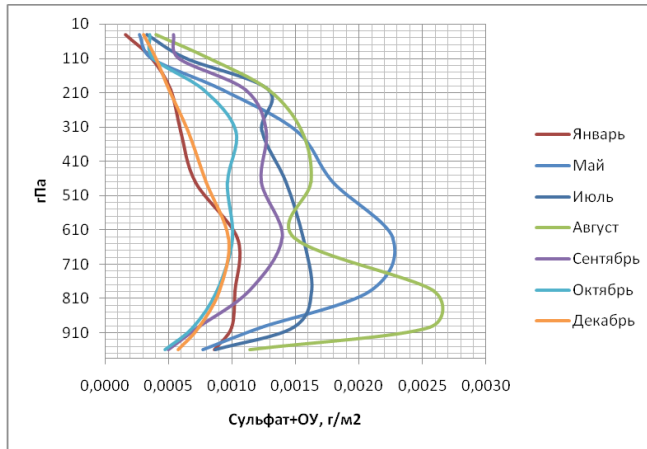


Рис. 2 — Вертикальное распределение растворимых аэрозолей по месяцам за 1990 г.

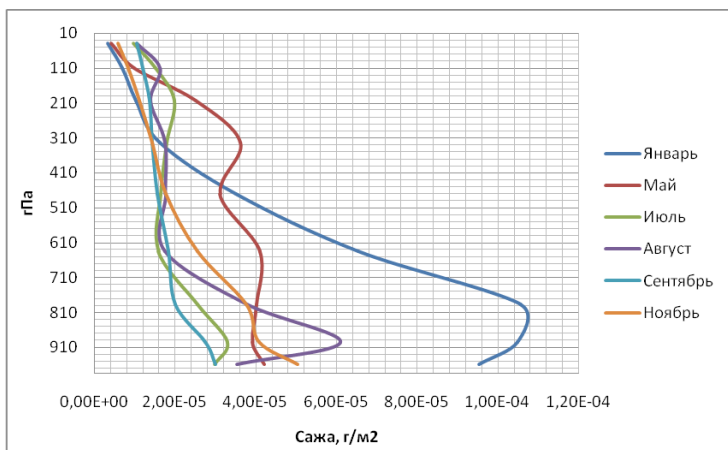


Рис. 3 — Вертикальное распределение сажевого аэрозоля по месяцам

Основные результаты

Как и следовало ожидать, при сравнении результатов моделирования первых двух случаев (с нулевым содержанием аэрозолей и фоновым содержанием) не наблюдалось каких-либо радиационных эффектов из-за незначительности содержания взвешенных частиц за пределами крупных городов. На рис. 4 и 5 приведены результаты моделирования случаев с увеличенным содержанием всех антропогенных аэрозолей в 10 и 30 раз. Наибольшее влияние аэрозоли оказывают на коротковолновую радиацию, количество которой тем меньше чем больше содержание аэрозолей, что происходит за счет увеличения рассеяния и поглощения аэрозолями. Максимальное сокращение наблюдается в местный полдень и составляет порядка 100 Вт/м^2 (рис. 4). Эффект на длинноволновую радиацию, как и ожидалось, меньше и составляет до 8 Вт/м^2 , что вызвано небольшим увеличением встречного излучения атмосферы (рис. 4).

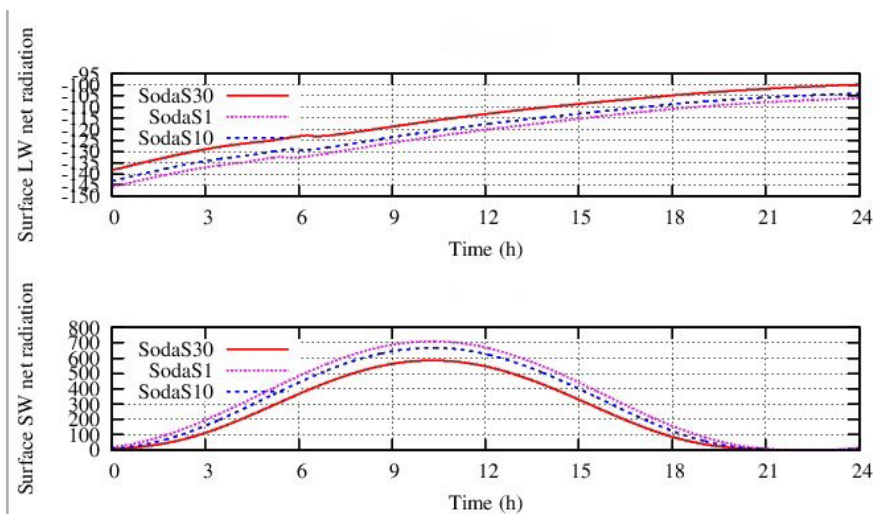


Рис. 4 — Суточный ход баланса длинноволновой (LW) и коротковолновой (SW) радиации у поверхности с разным содержанием антропогенных аэрозолей: фоновом содержании сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), при увеличенном в 10 (SodaS10) и 30 раз (SodaS30)

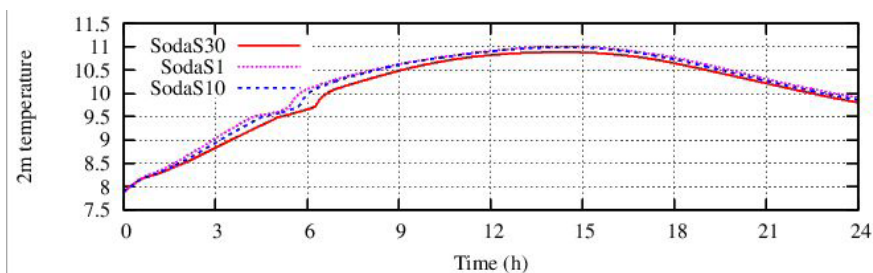


Рис. 5 — Суточный ход температуры на высоте 2 м с разным содержанием антропогенных аэрозолей в атмосфере: фоновое содержание сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), увеличенное в 10 раз (SodaS10) и в 30 раз (SodaS30)

Температура воздуха на 2 м также чувствительна к увеличению концентрации антропогенных аэрозолей — наблюдается небольшое охлаждение порядка $0,1^{\circ}\text{C}$ при максимально заданном увеличении содержания антропогенных аэрозолей (рис.5).

Далее рассмотрим случаи, когда учитывалось лишь увеличение содержания одного типа аэрозоля. Итак, при увеличенном в 30 раз содержании сажевого аэрозоля наблюдается намного меньший эффект на коротковолновую радиацию (порядка 20 Вт/м^2) и не наблюдается воздействия на длинноволновую область спектра излучения (рис.6).

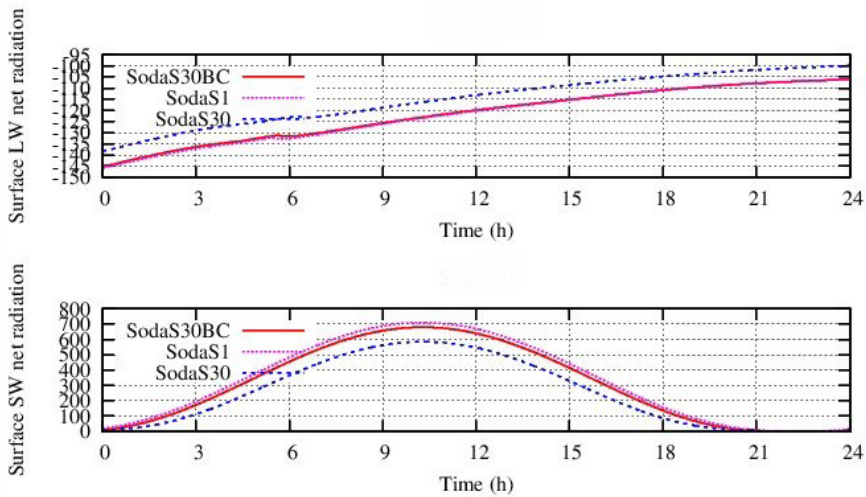


Рис. 6 – Суточный ход баланса длинноволновой (LW) и коротковолновой (SW) радиации у поверхности с разным содержанием антропогенных аэрозолей: фоновом содержании сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), при увеличенном в 30 раз (SodaS30) и увеличенным в 30 раз содержанием сажевого аэрозоля (SodaS30BC)

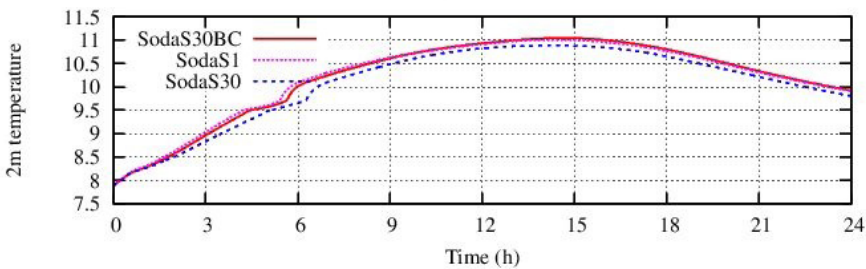


Рис. 7 – Суточных ход температуры на высоте 2 м с разным содержанием антропогенных аэрозолей в атмосфере: фоновое содержание сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), увеличенное в 30 раз (SodaS30) увеличенным в 30 раз содержанием сажевого аэрозоля (SodaS30BC)

Сажевый аэрозоль с увеличенным в 30 раз фоновым значением в данном эксперименте не оказывает заметного воздействия на температуру (рис. 7).

При учете увеличенного в 30 раз сульфатного аэрозоля наблюдается эффект, сравнимый с эффектом, наблюдаемым при увеличении всех 3 типов аэрозолей, как на коротковолновую, так и на длинноволновую радиацию.

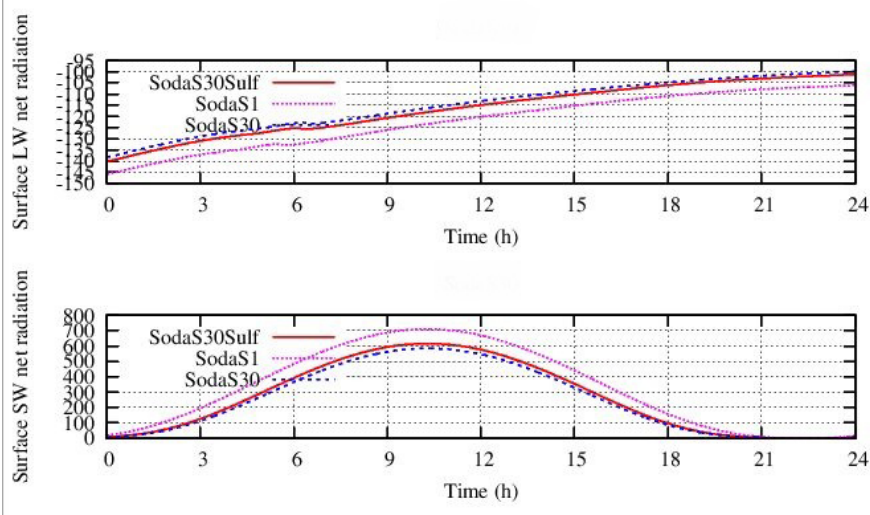


Рис. 8 – Суточный ход баланса длинноволновой (LW) и коротковолновой (SW) радиации у поверхности с разным содержанием антропогенных аэрозолей: фоновом содержании сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), при увеличенном в 30 раз (SodaS30) и увеличенным в 30 раз содержанием сульфатного аэрозоля (SodaS30Sulf)

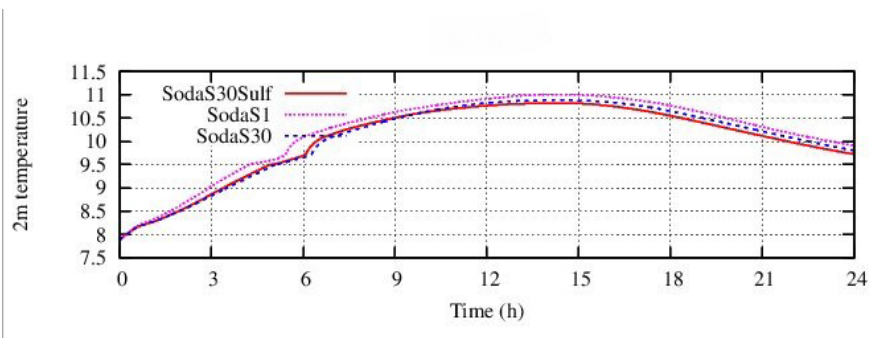


Рис. 9 – Суточных ход температуры на высоте 2 м с разным содержанием антропогенных аэрозолей в атмосфере: фоновое содержание сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), увеличенное в 30 раз (SodaS30) увеличенным в 30 раз содержанием сульфатного аэрозоля (SodaS30Sulf)

При учете только сульфатного аэрозоля, наблюдается более сильный охлаждающий эффект, чем при учете всех трех рассматриваемых антропогенных аэрозолей. Вероятно, сажевые аэрозоли сглаживают вызываемое сульфатными частицами уменьшение температуры.

Отдельно взятый органический углерод оказывает очень слабый эффект как на длинноволновую, так и на коротковолновую радиацию (рис. 10), и, следовательно, на температуру (рис. 11)

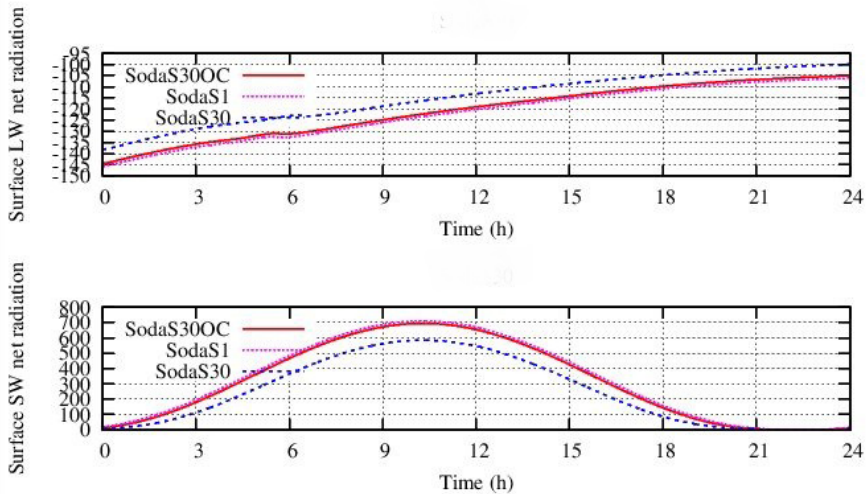


Рис. 10 – Суточный ход баланса длинноволновой (LW) и коротковолновой (SW) радиации у поверхности с разным содержанием антропогенных аэрозолей: фоновом содержании сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), при увеличенном в 30 раз (SodaS30) и увеличенным в 30 раз содержанием ОУ (SodaS30BC)

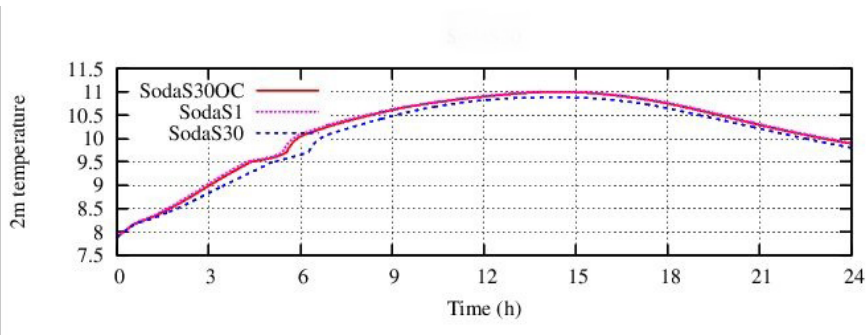


Рис. 11 – Суточных ход температуры на высоте 2 м с разным содержанием антропогенных аэрозолей в атмосфере: фоновое содержание сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), увеличенное в 30 раз (SodaS30) и увеличенным в 30 раз содержанием ОУ (SodaS30OC)

Заключение

Данный эксперимент подтвердил наличие прямого эффекта в атмосфере, однако, для этого необходимо было значительно увеличить содержание антропогенных аэрозолей. При одновременном увеличении всех трех типов аэрозолей наблюдалось линейное уменьшение общей коротковолновой радиации на уровне земли. Несмотря

на выраженную способность сажевого аэрозоля поглощать радиацию, при 30 увеличении этот аэрозоль не вызвал значительных эффектов, по сравнению с сульфатным аэрозолем. Не обнаружилось значительных эффектов при отдельном увеличении содержания органического углерода.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках участия в Федеральной Целевой Программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 02.740.11.5199 от 09 ноября 2009 г.), в рамках реализации мероприятия «Проведение научных исследований коллективами под руководством приглашенных исследователей в области наук о Земле, экологии и рационального природопользования».

Литература

1. *Jacobson M.Z.* "Atmospheric Pollution: history, science, regulation"/ Mark Z. Jacobson. - Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2002. — 399
2. *Seinfeld, J.H., and Pandis, S.N.*: Atmospheric Chemistry and Physics, From Air Pollution to Climate Change. John Wiley and Sons, Inc., NY, 1998.
3. *Baltensperger, U., Nyeki, S., Kalberer, M.* Atmospheric Particulate Matter, Hewitt C.N. and Jackson, A. The Handbook of Atmospheric Sciences, Blackwell, 228-254 (2003).
4. *Flagan, Richard C. and Seinfeld, John H.* (1988) Fundamentals of air pollution engineering. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. ISBN 0-13-332537-7
5. *Ландсберг Г.Е.* Климат города / пер. с англ. Под ред. А.С. Дубова. Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 247 с.
6. *Baklanov A.* (2008): Integrated Meteorological and Atmospheric Chemical Transport Modelling: Perspectives and Strategy for HIRLAM/HARMONIE. HIRLAM Newsletter, 53: 68-78
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. *Savijarvi, H.* (1990): Fast radiation parameterization schemes for mesoscale and short-range forecast models. J. Appl. Meteor., 29, 437-447.
9. *Wesely, M. L.* (1989): Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. Atmos. Environ., 23, 1293-1304
10. *Chen, B.K. Stamnes and J.J. Stamnes* (2001): Validity of the Diffusion Approximation in Bio-Optical Imaging, Appl. Opt., 40 (34), 6356-6366.
11. *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.
12. *Novakov, T., D.A. Hegg, and P.V. Hobbs*, Airborne measurements of carbonaceous aerosols on the East Coast of the United States, J. Geophys. Res., 102, 30023-30030, 1997