МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ СУБМИКРОННОГО АЭРОЗОЛЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА СРЕДНЕМ УРАЛЕ

Е.С. Дубинкина^{1,2,3}, В.А. Поддубный¹

¹Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург

²Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

³Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ekaterinan@ecko.uran.ru, Vassily.Poddubny@gmail.com

Аннотация. В работе приводятся результаты моделирования трехмерного среднего эффективного поля объемных концентраций субмикронного аэрозоля, полученные с помощью метода флюид-локации атмосферы (ФЛА) на основе фотометрических измерений на Среднем Урале в 2016 г. Нетипичная для данного региона синоптическая ситуация в 2016 г. позволила провести оценку аэрозольного распределения в пространстве не только к западу от пункта мониторинга, но также охватить значительную область к северо-востоку. С целью верификации полученных результатов выполнено качественное сравнение с полем средней массовой концентрации сажи в столбе воздуха, восстановленным с помощью модели MERRA-2.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, математическое моделирование, мониторинг атмосферы, солнечная фотометрия, статистика обратных траекторий.

Введение

Траекторный анализ – перспективное направление исследования атмосферных процессов. Благодаря современным моделям динамики атмосферы, появляется возможность реконструирования прямых и обратных траекторий движения воздушных элементарных частиц для любого момента времени и любой точки пространства. Таким образом, результаты измерения какой-либо атмосферной характеристики можно объяснить, последив путь воздушных потоков до их прихода в пункт мониторинга, анализируя обратные траектории движения лагранжевой частицы [1]. Другая стратегия заключается в моделировании последующего распространения примеси, с привлечением к анализу прямых траекторий движения воздуха и дисперсионные модели [2].

Наряду с простым визуальным траекторным анализом существуют другие методы, которые предполагают анализ траекторий движения атмосферного воздуха статистическими методами. В качестве примера можно привести методы кластерного анализа траекторий [3] или более специфичные методы статистики обратных траекторий (COT) [4].

Рассматриваемый в работе метод флюид-локации атмосферы (ФЛА) является развитием методов COT [5, 6]. Он сочетает в себе статистические подходы методов COT и решение уравнений сохранения атмосферной примеси в представлении Эйлера и Лагранжа [7].

Исходные данные для моделирования средних полей концентраций аэрозоля

В качестве исходной для моделирования методом ФЛА информации использовались результаты фотометрических измерений на станции глобальной сети AERONET [8] на Среднем Урале. Стоит отметить, что пункт мониторинга расположен на базе Коуровской астрономической обсерватории (КАО), примерно в 65 км западнее Екатеринбурга. Однако в сети AERONET данный пункт мониторинга обозначен как «Екатеринбург».

В качестве признака, характеризующего содержание аэрозоля в атмосфере, использовался фактор аэрозольного заполнения [9] – безразмерная величина, равная отношению объема аэрозольных частиц к объему воздуха в тех же единицах измерения. Фактор аэрозольного заполнения V рассчитывался на основе объемной концентрации субмикронного аэрозоля в столбе воздуха. Для учета неоднородности атмосферного аэрозоля по высоте фактор заполнения пересчитывался согласно эмпирической модели вертикального профиля распределения аэрозоля для региона Западной Сибири [9]. В свою очередь объемная концентрация субмикронного аэрозоля в столбе воздуха есть результат численного интегрирования функции распределения аэрозольных частиц по размерам, восстанавливаемой по данным фотометрических измерений и доступной на сайте AERONET.

Обратные траектории движения воздушных частиц рассчитывались с помощью программного комплекса HYSPLIT [10]. Были выполнены расчеты трехмерных обратных траекторий, продолжительностью 96 часов (четыре суток) каждая, с шагом по

времени 15 минут, стартующих каждый час в точке расположения пункта мониторинга сети AERONET на 6 уровнях (высоты старта траекторий над уровнем моря, м: 500, 1500, 2500, 3500, 4500, 5500). Таким образом, задача восстановления трехмерного среднего эффективного поля объемной концентрации аэрозоля решалась для нижней части тропосферы на основе данных измерений одного пункта мониторинга, расположенного в КАО.

Результаты моделирования пространственного распределения субмикронного аэрозоля

Расчеты трехмерного поля концентраций субмикронного аэрозоля для регионов Среднего Урала и Западной Сибири проводились в области

(50°–90°) в. д. и (50°–70°) с. ш. По высоте расчетная область ограничивалась 6 км. Размеры эйлеровых ячеек задавались 1°x1° по горизонтали, и 1000 м по вертикали.

На рис. 1 представлены средние эффективные поля объемных концентраций субмикронного аэрозоля для различных высот от 500 м до 5.5 км. Звездочкой обозначен пункт мониторинга сети AERONET. Двойной штриховкой обозначены области, которые расположены вне зоны влияния измерительного прибора, т.е. области, из которых не пришло ни одной траектории движения воздушных частиц за анализируемый период. Также для удобства анализа результатов на карту нанесены границы государств и береговая линия.

Рис. 1. Средние эффективные поля объемных (V) концентраций субмикронного аэрозоля, на высотах: а) 500 м, б) 1500 м, в) 2500 м, г) 3500 м, д) 4500 м, е) 5500 м

Из рис. 1 видно, что уровни концентраций субмикронного аэрозоля существенно снижаются с высотой. Для демонстрации этой закономерности масштабы концентраций на рис. 1 установлены так, чтобы они попарно были одинаковыми для высот 500 и 1500 м, 2500 и 3500 м, 4500 и 5500 м, соответственно. Так же стоит отметить, что зона влияния

на измерительный прибор не значительно меняется в зависимости от высоты.

На всех высотах средние поля концентраций аэрозоля хорошо коррелируют между собой и прослеживается схожий характер распределения аэрозоля по пространству. Область повышенных концентраций располагается от севера Западной Сибири

до Среднего Урала. При этом для областей, расположенных западнее точки мониторинга характерны существенно меньшие уровни концентраций. Таким образом, область повышенного содержания субмикронного аэрозоля сохраняется до высот 5–6 км, хотя с ростом высоты абсолютные значения концентраций аэрозоля существенно снижаются.

Интегрирование по высоте полей содержания аэрозоля ($\text{мкм}^3/\text{мкм}^3$) дает объемную концентрацию аэрозоля в столбе воздуха ($\text{мкм}^3/\text{мкм}^2$). На рис. 2 приведено суммарное среднее эффективное поле объемной концентрации субмикронного аэрозоля.

Рис. 2. Поле объемной концентрации субмикронного аэрозоля в шестикилометровом столбе атмосферы ($\text{мкм}^3/\text{мкм}^2$)

Следует отметить, что в 2016 г. на Среднем Урале наблюдалась нетипичная для данного географического региона синоптическая ситуация. Из-за существенного преобладания западного переноса воздушных масс, обычно зона влияния располагается преимущественно к западу от точки мониторинга. В летний период 2016 г. много обратных траекторий движения воздушных частиц пришло в пункт мониторинга с северо-востока, что позволило провести оценку средних эффективных полей концентрации субмикронного аэрозоля для данного региона.

Для верификации полученных результатов, на рис. 3а представлено поле средней массовой концентрации сажи в столбе воздуха ($\text{кг}/\text{м}^2$) восстановленное с помощью модели MERRA-2 [11] для той области, в которой оценивалось трехмерное среднее эффективное поле концентрации субмикронного аэрозоля методом ФЛА. MERRA-2 – глобальный атмосферный реанализ, который в качестве входной информации использует результаты наземных и спутниковых наблюдений. Среднее поле построено для периода с марта по октябрь 2016 г., который совпадает с периодом проведения фотометрических измерений на Среднем Урале в 2016 г. Сопоставляя рис. 2 и 3а видно, что качественно наблюдается хорошее согласие резуль-

Рис. 3. Поле средней массовой концентрации сажи в столбе воздуха ($\text{кг}/\text{м}^2$) восстановленное с помощью модели MERRA-2 [11]

татов двух моделей. Для выявления возможных причин появления повышенных концентраций аэрозоля в данной области на рис. 3б представлены результаты модели MERRA-2 для большего географического охвата. Вероятнее всего, повышенные концентрации субмикронного атмосферного аэрозоля вызваны пожарами в летний период в регионе Восточной Сибири.

полей объемной концентрации субмикронного аэрозоля на основе фотометрических измерений, проводимых на Среднем Урале. Сопоставление полученных результатов с пространственным распределением массовой концентрацией сажи, восстановленным с помощью модели MERRA-2, продемонстрировало хорошее качественное согласие.

Заключение

С помощью метода флюид-локации атмосферы восстановлено трехмерное среднее эффективное

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-31-00170).

Список литературы

1. Нерода А.С., Мишуков В.Ф., Горячев В.А. Атмосферный перенос искусственных радионуклидов в Дальневосточном регионе Азии после аварии на АЭС «Фукусима-1» // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 09. С. 749–753.
2. Perrone M.R., De Tomasi F., Stohl A., Kristiansen N.I. Integration of measurements and model simulations to characterize Eyjafjallajökull volcanic aerosols over south-eastern Italy // Atmos. Chem. Phys. 2012. Vol. 12. N 20. P. 10001–10013.
3. Hafner W.D., Solorazano N.N., Jaffe D.A. Analysis of rainfall and fine aerosol data using clustered trajectory analysis for National Park sites in the Western U.S. // Atmos. Environ. 2007. Vol. 41. P. 3071–3081.
4. Stohl A. Trajectory statistics – a new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe // Atmos. Environ. 1996. Vol. 30. N 4. P. 579–587.
5. Поддубный В.А., Наговицына Е.С. Восстановление пространственного поля концентрации атмосферного аэрозоля по данным локальных измерений: модификация метода статистики обратных траекторий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 4. С. 439–446.
6. Дубинкина Е.С., Поддубный В.А. Численная реализация метода флюид-локации атмосферы // Математическое моделирование. 2018. Т. 30. № 2. С. 33–47.
7. Поддубный В.А., Дубинкина Е.С. Задача о пассивной локации атмосферы ветровыми потоками для оценки полей концентрации и определения источников примеси. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 10. С. 862–870.
8. Holben B., Eck T., Slutsker I., Tanre D., Buis J., Setzer A., Vermote E., Reagan J., Kaufman Y., Nakajima I., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. Aeronet – a federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1998. Vol. 66. P. 1–16.
9. Панченко М.В., Козлов В.С., Польшин В.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.
10. Draxler R., Hess G. An overview of the hysplit-4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition // Australian Meteorol. Mag. 1998. Vol. 47. P. 295–308.
11. Gelaro R., Mccarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., Da Silva A.M., Gu W., Kim G.K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // Journal of Climate. 2017. Vol. 30. N 14. P. 5419–5454.

SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL SUBMICRON AEROSOL CONCENTRATION FIELDS BASED ON THE RESULTS OF PHOTOMETRIC MEASUREMENTS IN THE MIDDLE URALS

E.S. Dubinkina^{1,2,3}, V.A. Poddubny¹

¹Institute of Industrial Ecology, Ural Branch RAS, Yekaterinburg

²Ural Federal University, 19 Mira Str., Yekaterinburg,

³Far Eastern Federal University, Vladivostok,

Ekaterrinan@ecko.uran.ru, Vassily.Poddubny@gmail.com

Abstract. The simulation results of the three-dimensional average effective field of submicron aerosol volume concentrations obtained by the method of fluid-location of the atmosphere (FLA) based on photometric measurements in the Middle Urals in 2016 are present. Unusual for this region in 2016 synoptic situation made it possible to estimate the aerosol spatial distribution not only to the west of the monitoring site, but also to cover a significant area to the northeast. In order to verify the results obtained, a qualitative comparison was made with the field of average mass concentration of black carbon in the air column, reconstructed using the MERRA-2 model.

Keywords: atmospheric aerosol, simulation, atmospheric monitoring, solar photometry, statistics of back trajectories.

References

1. Neroda A. S., Mishukov V. F., Goryachev V. A. Atmosfernii perenos iskusstvennih radionuklidov v Dalnevostochnom regione Azii posle avarii na AES «Fukusima-1», Optika atmosferi i okeana, 2013, Vol. 26, No. 9, pp. 749–753. (In Russian).
2. Perrone M.R., De Tomasi F., Stohl A., Kristiansen N.I. Integration of measurements and model simulations to characterize Eyjafjallajökull volcanic aerosols over south-eastern Italy, Atmos. Chem. Phys., 2012, Vol. 12, No. 20, pp. 10001–10013. (In English).
3. Hafner W.D., Solorazano N.N., Jaffe D.A. Analysis of rainfall and fine aerosol data using clustered trajectory analysis for National Park sites in the Western U.S., Atmos. Environ., 2007, Vol. 41, pp. 3071–3081. (In English).
4. Stohl A. Trajectory statistics – a new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe, Atmos. Environ., 1996, Vol. 30, No. 4, pp. 579–587. (In English).
5. Poddubny V.A., Nagovitsyna E.S. Retrieval of spatial field of atmospheric aerosol concentration according to data from local measurements: a modification of the method of back trajectory statistics, Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 2013, Vol. 49, No. 4, pp. 404–410. (In English).
6. Dubinkina E.S., Poddubny V.A. Chislennaya realizatsiya metoda flyuid-lokatsii atmosferi, Matematicheskoe modelirovanie, 2018, Vol. 30, No. 2, pp. 33–47. (In Russian).
7. Poddubny V.A., Dubinkina E.S. Zadacha o passivnoi lokatsii atmosferi vetrovimi potokami dlya ocenki polei koncentracii i opredeleniya istochnikov primesi, Optika atmosferi i okeana, 2017, Vol. 30, No. 10, pp. 862–870. (In Russian).
8. Holben B., Eck T., Slutsker I., Tanre D., Buis J., Setzer A., Vermote E., Reagan J., Kaufman Y., Nakajima I., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. Aeronet – a federated instrument network and data archive for aerosol characterization, Remote Sens. Environ., 1998, Vol. 66, pp. 1–16. (In English).
9. Panchenko M.V., Kozlov V.S., Polkin V.V., Terpigova S.A., Tumakov A.G., Shmargunov V.P. Vosstanovlenie opticheskikh harakteristik troposfernogo aerolya Zapadnoi Sibiri na osnove obobschennoi empiricheskoi modeli, uchitivayuschei pogloshchayuschie i gigroskopicheskie svoystva chastic, Optika atmosferi i okeana, 2012, Vol. 25, No. 1, pp. 46–54. (In Russian).
10. Draxler R., Hess G. An overview of the hysplit-4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition, Australian Meteorol. Mag., 1998, Vol. 47, pp. 295–308. (In English).
11. Gelaro R., Mccarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., Da Silva A.M., Gu W., Kim G.K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), Journal of Climate, 2017, Vol. 30, No. 14, pp. 5419–5454. (In English).