ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ

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 рассматриваются вопросы, связанные с модификацией метода флюид-локации атмосферы (ФЛА), который позволяет моделировать трехмерную пространственную структуру распределения атмосферных примесей. Для решения трехмерных задач метод ФЛА был дополнен: включена модель процессов сухого осаждения аэрозольных частиц на подстилающую поверхность; рассчитаны трехмерные обратные траектории движения воздушных потоков для разных высот над поверхностью земли; концентрация примеси перераспределена по высоте; учтен рельеф подстилающей поверхности. Анализируются результаты, полученные с использованием различных вертикальных профилей атмосферного аэрозоля: равномерного распределения по высоте и распределения, построенного на основе эмпирической модели для региона Западной Сибири. В качестве примера приведены трехмерные средние эффективные поля объемных концентраций субмикронного аэрозоля, рассчитанные модифицированным методом ФЛА для региона Дальнего Востока на основе результатов спектральных фотометрических измерений на станции AERONET в г. Уссурийске за 2015 г.

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

Введение

Метод флюид-локации атмосферы (ФЛА) является развитием методов статистики обратных траекторий (СОТ) [1], которые позволяют на основе результатов измерений в одной или нескольких отдельных точках мониторинга делать оценку пространственного распределения измеряемого признака. В отличие от классических методов оценки пространственной структуры распределения атмосферных примесей, местоположения и характеристики источников их поступления в атмосферу являются неизвестными и определяются в ходе решения задачи восстановления концентрационных полей. Основное преимущество метода ФЛА перед методами СОТ заключается в том, что в его алгоритме объединяются статистический анализ и решение уравнений переноса примеси вдоль траекторий движения воздушных (лагранжевых) частиц. [2]

Алгоритмически метод ФЛА представляет собой решение системы слабонелинейных алгебраических уравнений [3], в результате которого определяется такое среднее эффективное поле концентраций атмосферной примеси, которое при заданных метеорологических условиях и при условии соблюдении закона сохранения признака, обеспечивает в моменты измерений в пункте мониторинга наблюдаемые концентрации.

Ранее метод ФЛА был использован для оценки квазидвумерного поля концентраций субмикронного аэрозоля над территорией России на основе результатов измерений 8 пунктов мониторинга сети AERONET [4], расположенных в различных географических регионах. [5] В настоящее время большое внимание уделяется развитию метода ФЛА для моделирования трехмерных полей концентрации примесей.

Модификация метода ФЛА

для восстановления трехмерных средних эффективных полей объемных концентраций субмикронного аэрозоля

Ранее, при решении квазидвумерной задачи методом ФЛА был сделан ряд существенных упрощений, основным из которых, является учет динамики атмосферы лишь на одном изобарическом уровне. При переходе от решения квазидвумерной задачи методом ФЛА к моделированию трехмерной структуры пространственных полей концентраций атмосферного аэрозоля необходима переработка алгоритма в нескольких направлениях.

1. Использование обратных траекторий движения воздуха на разных высотах.

Расчеты обратных траекторий проводились с помощью программного комплекса HYSPLIT [6].

В качестве входных метеоданных использовались данные базы реанализа NCEP/NCAR Reanalysis (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>) Для расчета обратных траекторий программой HYSPLIT необходимы двухмерные (2D) и трехмерные (3D) поля следующих параметров: давление на поверхности (Па); температура воздуха (К); зональная скорость (м/с); меридиональная скорость (м/с).

Были выполнены расчеты трехмерных обратных траекторий, продолжительностью 96 часов (четверо суток) каждая, с шагом по времени 15 минут, стартовых каждый час в точке расположения пункта мониторинга сети AERONET в Уссурийске на 6 уровнях (высоты старта траекторий над уровнем моря, м: 500, 1500, 2500, 3500, 4500, 5500). Таким образом, задача решалась для нижней части тропосферы на основе данных измерений одного пункта мониторинга, расположенного в г. Уссурийске.

2. Учет неоднородности рельефа и типов подстилающей поверхности.

Для учета высоты подстилающей поверхности над средним уровнем моря в трехмерном варианте метода ФЛА была использована глобальная цифровая модель рельефа GTOPO30 (<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>), разработанная Геологическим комитетом США (U.S. Geological Survey). Набор данных GTOPO30 представлен в международной системе координат WGS84 (World Geodetic System 1984) и охватывает весь земной шар, при этом имеет горизонтальное разрешение 30 угловых секунд.

В трехмерном варианте метода ФЛА неоднородность рельефа приводит к уменьшению объемов эйлеровых ячеек на нижнем расчетном уровне, а также изменению площадей боковых поверхностей расчетных ячеек, через которые идет ветровой перенос потоков аэрозоля.

3. Учет основных физико-химических процессов, происходящих с аэрозолем в атмосфере и приводящих к перераспределению аэрозоля в столбе атмосферы.

Сухое осаждение – это процесс перемещения частиц из атмосферы на подстилающую поверхность при отсутствии осадков. Большинство моделей сухого осаждения разрабатываются для решения конкретной задачи (контроль качества воздуха, радиационных рисков или распространение тяжелых металлов и др.). Некоторые модели применимы только для определенных диапазонов размеров частиц [7]. Другие моделируют скорости сухого осаждения частиц любой фракции, но на определенную подстилающую поверхность: растительный покров [8], хвойный лес [9], любую поверхность растительного происхождения [10].

В настоящей работе для учета процесса сухого осаждения в методе ФЛА была выбрана наиболее общая модель, применимая для частиц во всем диапазоне размеров и не ограниченная конкретными типами подстилающих поверхностей – модель сухого осаждения Занга [11], совмещенная с моделями безразмерных градиентных функций профилей температуры и импульса. В модели Занга для оценки скоростей сухого осаждения частиц на подстилающую учитываются процессы седиментации, турбулентности, броуновской диффузии, столкновения, захвата и отскока частиц от поверхности, а также процесс гигроскопического роста частиц в условиях повышенной влажности.

4. Перераспределение аэрозоля по высоте в момент выполнения измерения.

При решении задачи восстановления трехмерного среднего поля концентраций аэрозоля методом ФЛА в качестве признака, для которого решается уравнение сохранения, как и в случае двумерной задачи, использовалась объемная концентрация субмикронной фракции аэрозоля. В данной работе сравниваются два варианта распределения аэрозоля по высоте: эмпирическая модель и равномерный вертикальный профиль.

В качестве эмпирической модели профиля атмосферного аэрозоля была использована модель, полученная на основе данных долговременных самолетных измерений для региона Западной Сибири. [12] Фактором аэрозольного заполнения атмосферы V в работе [12] называется безразмерная величина, равная объемной концентрации аэрозоля, т. е. отношению объема аэрозольных частиц к объему воздуха в тех же единицах измерения. Интегрирование среднего профиля фактора заполнения V по высоте дает объем частиц аэрозоля V_s , $\text{мкм}^3/\text{мкм}^2$ в столбе воздуха единичного сечения. Если полученное значение объемной концентрации частиц в столбе воздуха поделить на высоту столба, получится фактор заполнения в предположении равномерного распределения аэрозоля по высоте V_{const} .

Таким образом, вид высотных профилей концентраций аэрозоля можно охарактеризовать посредством введения коэффициента k (табл. 1), равного отношению фактического фактора заполнения на данной высоте V к фактору заполнения, полученного в предположении равномерного высотного распределения аэрозоля V_{const} .

В итоге, для пересчета исходной объемной концентрации в столбе воздуха на фактор заполнения на определенной высоте согласно эмпирической модели, необходимо сначала рассчитать фактор заполнения в предположении равномерного распределения концентраций по высоте (V_{const}), а затем умножить его на

соответствующий сезону и высоте коэффициент из табл. 1. В таком случае интегральная концентрация в столбе воздуха равна концентрации, измеренной прибором в определенный момент времени, а вид вертикального профиля распределения аэрозоля соответствует эмпирической модели.

Таблица 1
Коэффициенты, характеризующие вид средних вертикальных профилей концентраций аэрозоля для различных сезонов

Н, км	$k_{зима}$	$k_{весна}$	$k_{лето}$	$k_{осень}$
0	18.1477	9.0641	5.2470	12.1566
0.5	5.5739	6.1557	4.7912	5.2332
1.0	3.2457	4.4312	4.1885	4.1942
1.5	1.9924	2.2948	3.4502	2.7453
2.0	1.1507	1.2024	2.3580	1.4500
3.0	0.6379	0.6898	1.4088	0.5413
4.0	0.3582	0.5462	0.4113	0.4349
5.0	0.2862	0.3498	0.2041	0.3656

В качестве исходной информации в данной работе использовались: а) фактор заполнения в предположении равномерного распределения концентраций по высоте; б) фактор заполнения согласно модельному вертикальному профилю распределения аэрозоля для региона Западной Сибири.

Результаты моделирования пространственного распределения субмикронного аэрозоля в регионе Дальнего Востока

Расчеты трехмерного поля концентраций субмикронного аэрозоля проводились на основе результатов спектральных фотометрических измерений на станции AERONET в г. Уссурийск в 2015 г. Область моделирования задавалась (120° – 140°) в. д. и (35° – 55°) с. ш., т.е. охватывает южную часть Дальнего Востока России. По высоте расчетная область ограничивалась 6 км. Размеры эйлеровых ячеек задавались $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ по горизонтали, и 1000 м по вертикали.

На рис. 1 и 2 представлены средние эффективные поля объемных концентраций субмикронного аэрозоля для различных высот от 500 м до 5.5 км, рассчитанные с учетом процесса сухого осаждения частиц на подстилающую поверхность. На рис. 1 представлены результаты моделирования, полученные для случая, когда в точке мониторинга задавалось равномерное распределение аэрозольных частиц по высоте, а на рис. 2 – рассчитанные на основе вертикального профиля, основанного на эмпирической модели для региона Западной Сиби-

ри. Звездочкой обозначен пункт мониторинга сети AERONET в Уссурийске. Двойной штриховкой обозначены 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.

Из рис. 1 и 2 видно, что на нижних уровнях в юго-западной части расчетной области наблюдаются концентрации аэрозоля, в разы превышающие концентрации в других областях. Данная особенность качественно сохраняется до высот 2–3 км. Стоит обратить внимание на тот факт, что заданные в точке измерения высотные профили аэрозоля сохраняются по всей расчетной области. Так при заданном равномерном профиле уровни концентраций мало изменяются с высотой. Напротив, в случае задания вертикального профиля на основе эмпирической модели (рис. 2), концентрации аэрозоля существенно снижаются и на высотах 4–5 км составляют примерно 1/20 часть от концентраций на нижних расчетных уровнях.

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. 3–4 приведены суммарные средние эффективные поля объемной концентрации субмикронного аэрозоля.

На рис. 4 выделяется довольно обширная область повышенных концентраций субмикронного аэрозоля над акваторией Желтого моря, которую можно связать с влиянием промышленных районов Восточного Китая. Также выделяется «пятно» высоких концентраций, расположенное на самой границе расчетной области к северо-западу от точки мониторинга. К сожалению, сложно идентифицировать причину его появления.

Из рисунков видно, что вид вертикального профиля аэрозоля сильно влияет на результат моделирования, а значит, достоверность оценки трехмерных полей концентраций аэрозоля во многом зависит от корректного задания высотного распределения аэрозоля в точке мониторинга. Используемая на данном этапе эмпирическая модель профиля атмосферного аэрозоля разработана для другого региона (Западной Сибири), и, следовательно, полученные с ее помощью результаты следует рассматривать как предварительные. В дальнейшем для восстановления трехмерных средних эффективных полей концентрации субмикронного аэрозоля необходимо использовать либо модель высотного распределения аэрозоля, разработанную для региона Дальнего Востока, либо непосредственно результаты измерений высотных распределений аэрозоля (например, полученные с помощью лидарных измерений).

Рис. 1. Средние эффективные поля объемных () концентраций субмикронного аэрозоля, рассчитанные на основе равномерного вертикального распределения аэрозоля в точке мониторинга, на высотах: а) 500 м, б) 1500 м, в) 2500 м, г) 3500 м, д) 4500 м, е) 5500 м

Рис. 2. Средние эффективные поля объемных () концентраций субмикронного аэрозоля, рассчитанные на основе эмпирической модели [12] вертикального распределения аэрозоля в точке мониторинга, на высотах: а) 500 м, б) 1500 м, в) 2500 м, г) 3500 м, д) 4500 м, е) 5500 м

Рис. 3. Поле объемной концентрации субмикронного аэрозоля в шестикилометровом столбе атмосферы ($\text{мкм}^3/\text{мкм}^2$), рассчитанное на основе равномерного вертикального распределения аэрозоля в точке мониторинга

Рис. 4. Поле объемной концентрации субмикронного аэрозоля в шестикилометровом столбе атмосферы ($\text{мкм}^3/\text{мкм}^2$), рассчитанное на основе эмпирического вертикального распределения аэрозоля [12] в точке мониторинга

Заключение

Переработанный метод флюид-локации атмосферы позволяет оценивать трехмерную структуру распределения атмосферного аэрозоля. При этом получаемые средние эффективные поля объемных концентраций субмикронного аэрозоля количественно и качественно существенно зависят от вида профиля вертикального распределения

аэрозоля в пункте мониторинга. Таким образом, возникает необходимость точного задания вертикального распределения аэрозоля по высоте для получения корректного решения с помощью метода ФЛА.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ соглашение № 14-50-00034.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Дубинкина Е.С., Поддубный В.А. Численная реализация метода флюид-локации атмосферы // *Математическое моделирование.* 2018. Т. 30. № 2. С. 33–47.
4. 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.
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. 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.
7. Aylor D.E. Modeling spore liberated in a Barley crop // *Agricultural Meteorology.* 1982. Vol. 26. P. 215–219.
8. Davidson C.I., Miller J.M., Pleskow M.A. The influence of surface structure on predicted particle dry deposition to natural grass canopies // *Water, Air and Soil Pollution.* 1982. Vol. 18. P. 25–44.
9. Peters K., Eiden R. Modelling the dry deposition velocity of aerosol particles to a spruce forest // *Atmos. Environ.* 1992. Vol. 26. P. 2555–2564.
10. Slinn W.G.N. Prediction for particle deposition to vegetative canopies // *Atmos. Environ.* 1982. Vol. 16. P. 1785–1794.
11. Zhang L., Gong S., Padro J., Barrie L. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module // *Atmos. Environ.* 2001. Vol. 35. P. 549–560.
12. Панченко М.В., Козлов В.С., Полькин 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.

INFLUENCE OF THE ATMOSPHERIC AEROSOL VERTICAL PROFILE ON THE RESULTS OF RECONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL CONCENTRATION FIELDS

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

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

Abstract. The main attention is paid to the issues related to the fluid-location of atmosphere (FLA) method modification, which allows simulating (estimating) the three-dimensional spatial distribution structure of atmospheric contaminants. To solve three-dimensional problems, the FLA method was completed as follows: a model of dry deposition of aerosol particles on the underlying surface was included; three-dimensional back trajectories of the air parcels for different heights above the ground are calculated; the change in contaminant concentrations with altitude is taken into account; the relief of the Earth is considered. The results obtained using various vertical profiles of atmospheric aerosol are analyzed: uniform height distribution and distribution, constructed following the empirical model for the Western Siberia region. As an example, three-dimensional average effective fields of submicron aerosol volumetric concentrations calculated by the modified FLA method for the Far East region based on the results of spectral photometric measurements at the station of the AERONET network in Ussuriisk in 2015 are presented.

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

References

1. 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)
2. Poddubny V.A., Dubinkina E.S. Zadacha o passivnoi lokacii 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)
3. Dubinkina E.S., Poddubny V.A., Chislennaya realizatsiya metoda flyuid-lokacii atmosferi, *Matematicheskoe modelirovanie*, 2018, Vol. 30, No. 2, pp. 33–47. (In Russian)
4. Holben B., Eck T., Slutsker I., Tanre D., Buis J., Setzer A., Vermote E., Reagan J., Kaufman Y., Nakajima I., Lavenue 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)
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. 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)
7. Aylor D.E. Modeling spore liberated in a Barley crop, *Agricultural Meteorology*, 1982, Vol. 26, pp. 215–219. (In English)
8. Davidson C.I. Miller J.M., Pleskow M.A. The influence of surface structure on predicted particle dry deposition to natural grass canopies, *Water, Air and Soil Pollution*, 1982, Vol. 18, pp. 25–44. (In English)
9. Peters K., Eiden R. Modelling the dry deposition velocity of aerosol particles to a spruce forest, *Atmos. Environ.*, 1992, Vol. 26, pp. 2555–2564. (In English)
10. Slinn W.G.N. Prediction for particle deposition to vegetative canopies, *Atmos. Environ.*, 1982, Vol. 16, pp. 1785–1794. (In English)
11. Zhang L., Gong S., Padro J., Barrie L. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module, *Atmos. Environ.*, 2001, Vol. 35, pp. 549–560. (In English)
12. Panchenko M.V., Kozlov V.S., Polkin V.V., Terpugova S.A., Tumakov A.G., Shmargunov V.P. Vosstanovlenie opticheskikh harakteristik troposfernogo aerolya Zapadnoi Sibiri na osnove obobschennoi empiricheskoi modeli, uchitivayuschei pogloshchayushchie i gigroskopicheskie svoystva chastic, *Optika atmosferi i okeana*, 2012, Vol. 25, No. 1, pp. 46–54. (In Russian)