

МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Анатолий Александрович Леженин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-64-50, e-mail: lezhenin@ommfao.sccc.ru

Татьяна Владимировна Ярославцева

ФБУН Новосибирский НИИ гигиены Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Владимир Федотович Рапута

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Изложен способ вычисления профилей ветра и коэффициента вертикального турбулентного обмена в нижней атмосфере. Метод базируется на использовании данных метеорологических наблюдений и спутниковых снимков дымовых шлейфов от высотных труб промышленных предприятий. Модель оценивания основана на решениях уравнений экмановского пограничного слоя. Применительно к г. Барнаулу проведен анализ распространения дымового факела ТЭЦ-3 и представлены расчеты составляющих скорости ветра в пограничном слое атмосферы. Показана возможность применения предложенного подхода для исследования загрязнения атмосферы города.

Ключевые слова: метеорологические наблюдения, дымовой шлейф, спутниковые снимки, параметр, модель оценивания.

MODEL OF ESTIMATION OF PARAMETERS OF THE LOWER ATMOSPHERE BASED ON SATELLITE IMAGES AND GROUND-BASED

Anatoly A. Lezhenin

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-64-50, e-mail: lezhenin@ommfao.sccc.ru

Tatyana V. Yaroslavtseva

FBSI «Novosibirsk scientific research institute of hygiene» of Rospotrebnadzor, 7, Parhomenko St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Vladimir F. Raputa

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

A method of calculation of wind profiles and coefficients of vertical turbulent exchange in the lower atmosphere is presented. The method is based on meteorological observations and satellite images of smoke plumes from high altitude chimneys of industrial plants. The method is used in a model of estimation based on solutions of the equations of the Ekman's a boundary layer. An analysis of distribution of the smoke plume of a power plant is given for the city of Barnaul. The results of calculations of wind velocity components in the boundary layer of the atmosphere are presented. A possibility of using this approach for urban air pollution research is shown.

Key words: meteorological observations, smoke plume, satellite images, parameter, estimation model.

Введение

Спутниковые наблюдения дают возможность детально проследить распространение в нижней атмосфере дымовых шлейфов от высотных труб ТЭЦ и промышленных предприятий [1–2]. При определенных условиях на снимках из космоса отчетливо фиксируется активная фаза подъема дымового факела и его перенос в поле ветра. Траектории дымовых шлейфов соответствуют направлениям ветра на высотах выбросов. Следует отметить, что возможности наземных наблюдений весьма ограничены и не позволяют представить полномасштабную картину распространения дымовых струй. С помощью спутниковых снимков можно оперативно получать картину распространения шлейфов дыма. Дымовые струи от труб крупных ТЭЦ могут проследиваться на значительных расстояниях от источников. В зависимости от метеорологических условий поперечные размеры шлейфов примеси могут варьироваться в широком диапазоне [3–6].

Использование методов численного моделирования позволяет анализировать процессы распространения примесей в атмосфере [7–13]. На основе постановок обратных задач оценивались текущие параметры атмосферы и источников примесей [2, 6, 9, 14–16]. Для моделирования процессов распространения примесей представляет интерес задача оценивания дополнительных высот подъема дымовых факелов над трубами за счет динамических факторов и температуры выбросов газо-воздушной смеси в условиях реальной атмосферы [17, 18].

Целью исследования является построение моделей оценивания компонентов скорости ветра по наземной и спутниковой информации.

Объекты и материалы исследования

Зимние спутниковые снимки территории г. Барнаула послужили материалами исследований. На снимках хорошо прослеживаются траектории дымовых шлейфов от труб ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3. Высота труб варьируется от 100 и 230 м. На рис. 1 представлен снимок г. Барнаула с ИСЗ «Ресурс-П» № 1 за 2 декабря 2018 г., взятый с сайта Сибирского центра ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА» (<http://www.rcpod.ru>).



Рис. 1. Спутниковый снимок г. Барнаула за 2 декабря 2018 года на 11 часов местного времени с ИСЗ «Ресурс-П» № 1 (1-ТЭЦ-2, 2-ТЭЦ-3)

Данные метеорологической станции г. Барнаула за 1-3 декабря 2018 г. (рис. 1) показывают, что в течение 2 декабря в приземном слое атмосферы наблюдались слабые ветра (1-2 м/с) южного, юго-западного направлений.

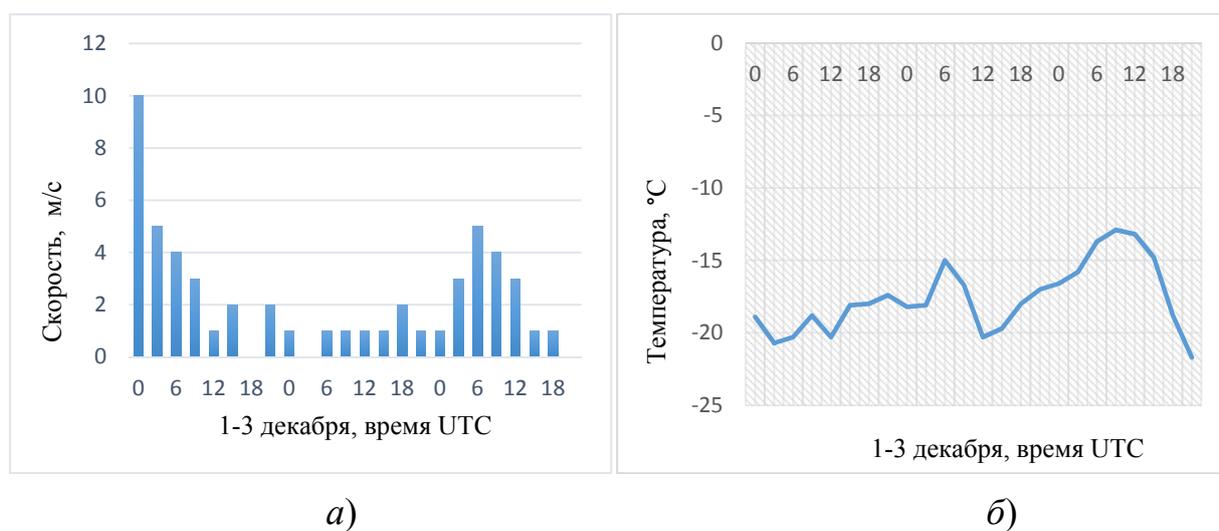


Рис. 2. Суточный ход скорости ветра (а) и температуры воздуха (б) 1-3 декабря 2018 г. на метеостанции г. Барнаула

В табл. 1, 2 приведены распределения по высоте основных метеорологических параметров в нижней атмосфере на рассматриваемый день: давление, температура, направление и скорость ветра в 7 и 19 часов местного времени, полученные на аэрологической станции. Видно, что в этот период наблюдались слабые ветра и температурная стратификация, близкая к нейтральной.

Таблица 1

Метеорологические параметры в нижней атмосфере по данным аэрологической станции г. Барнаула на 07 часов местного времени (00 UTC) 2 декабря 2018 г.

Высота над уровнем моря, м	Давление, hPa	Температура, °C	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
159	1019	- 19,9	190	1
283	1000	- 17,7	195	3
305	997	- 17,3	195	3
434	980	- 16,9	195	4
511	970	- 16,7	211	5
620	956	- 16,7	235	7
715	944	- 17,2	255	9
779	936	- 17,6	260	10
827	930	- 17,9	260	9
867	925	- 18,1	255	8

Таблица 2

Метеорологические параметры в нижней атмосфере по данным аэрологической станции г. Барнаула на 19 часов местного времени (12 UTC) 2 декабря 2018 г.

Высота над уровнем моря, м	Давление, hPa	Температура, °C	Направление ветра, град.	Скорость ветра, м/с
159	1023	- 20,7	220	2
303	1002	- 16,9	235	4
317	1000	- 16,5	235	5
332	998	- 16,1	236	5
561	968	- 16,7	255	5
821	935	- 17,3	240	6
902	925	- 17,5	250	6

Модель оценивания вертикального профиля ветра

Модель оценивания основана на уравнениях экмановского пограничного слоя атмосферы [19–21], которые для постоянного по высоте коэффициента

вертикального турбулентного обмена имеют аналитическое решение. Если ось x совпадает с направлением приземного ветра, а ось z направлена вертикально вверх, то аналитическое решение этих уравнений приобретает следующий вид [19, 20]

$$\begin{aligned} u(z) &= F(z, u_g, v_g, a) \equiv u_g - e^{-az} [u_g \cos(az) + v_g \sin(az)] \\ v(z) &= P(z, u_g, v_g, a) \equiv v_g - e^{-az} [v_g \cos(az) - u_g \sin(az)], \end{aligned} \quad (1)$$

где u_g, v_g – горизонтальные составляющие скорости геострофического ветра в направлении осей x, y соответственно, $a = \sqrt{\omega_z/k}$, ω_z – угловая скорость вращения Земли, k – коэффициент вертикального турбулентного обмена.

Если скорость ветра измеряется на высоте $z = H$, а β – угол между компонентами скорости ветра на высоте $z = h$, то для определения параметров u_g, v_g, a необходимо решить следующую систему уравнений

$$\begin{aligned} F(H, u_g, v_g, a) &= c_1; \\ P(H, u_g, v_g, a) &= c_2; \\ \frac{P(h, u_g, v_g, a)}{F(h, u_g, v_g, a)} &= \operatorname{tg}(\beta), \end{aligned} \quad (2)$$

где c_1, c_2 – составляющие скорости ветра на высоте $z = H$.

Из первых двух уравнений системы (2) следует, что

$$u_g = \frac{A}{D}, \quad v_g = \frac{B}{D}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} A(a, H) &= c_1 [1 - e^{-aH} \cos(aH)] + c_2 e^{-aH} \sin(aH); \\ B(a, H) &= -c_1 e^{-aH} \sin(aH) + c_2 [1 - e^{-aH} \cos(aH)]; \\ D(a, H) &= 1 - 2e^{-aH} \cos(aH) + e^{-2aH}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя выражения (3), (4) в третье уравнение системы (2), получим следующее уравнение для определения параметра a

$$\frac{B(a, H) - e^{-ah} [B(a, H) \cos(ah) - A(a, H) \sin(ah)]}{A(a, H) - e^{-ah} [A(a, H) \cos(ah) + B(a, H) \sin(ah)]} = \operatorname{tg}(\beta), \quad (5)$$

Результаты и обсуждения

Соотношение (5) позволяет получить оценку параметра a по измерениям составляющих скорости ветра на высоте $z = H$ и по измеренному значению угла β на высоте $z = h$. Подставляя значение параметра a в выражения (1), можно рассчитать вертикальные профили скорости ветра во всём пограничном слое атмосферы.

На рис.1 видно, что направления выносов примеси от ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 существенно различаются. Дымовые шлейфы от труб ТЭЦ-2 находятся в пределах приземного слоя, а выбросы ТЭЦ-3 достигают высот пограничного слоя атмосферы. Эффективная высота подъема газоаэрозольной смеси от труб ТЭЦ-3 составляет несколько сот метров. Как известно [19–21], на таких высотах происходит правый поворот ветра, что и подтверждается рис. 1. Относительно направления приземного ветра угол поворота дымового факела от ТЭЦ-3 примерно составляет 35 градусов.

Апробация предложенного метода осуществлялась на данных аэрологических (табл. 1 – 2), метеорологических наблюдений и спутникового снимка (рис. 1). Высота h приравнивалась к эффективной высоте подъема дымового факела от трубы ТЭЦ-3. Определение этой высоты проводилось по способу, предложенному в [18]. При оценивании высоты подъема использовалась информация об угловой высоте Солнца и положении тени дымового шлейфа от трубы ТЭЦ-3 на поверхности земли (рис. 1).

На рис. 3 приведены результаты расчета составляющих скорости ветра в нижней атмосфере г. Барнаула на 11 часов местного времени 2 декабря 2018 г..

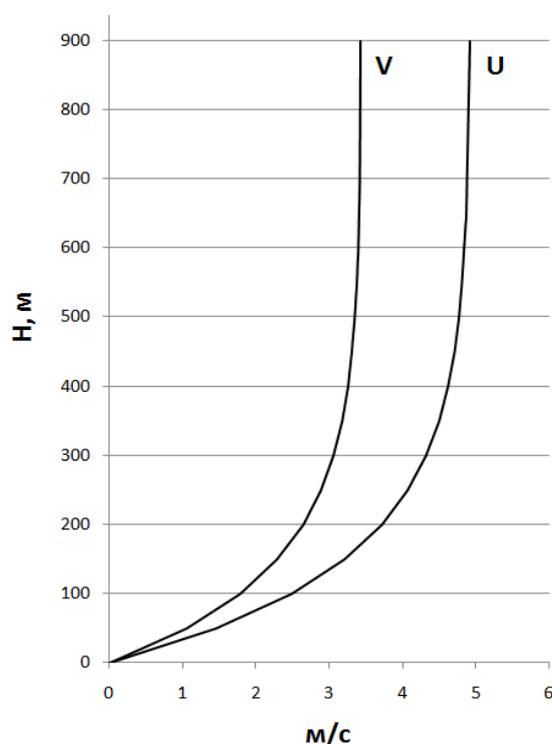


Рис. 3. Восстановленные с помощью модели (1) - (5) компоненты скорости ветра $u(z)$, $v(z)$

Рис. 3 показывает, что рассчитанный ветер качественно согласуется с типичным распределением ветра с высотой в нижней атмосфере в условиях нейтральной стратификации. Скорость ветра приближается к значению геострофического ветра на высотах 700-800 метров от поверхности земли.

Заключение

Разработана модель оценивания вертикальных профилей компонентов скорости ветра и коэффициента турбулентного обмена в пограничном слое атмосфере. Метод основан на использовании данных аэрологических, метеорологических наблюдений и спутниковой информации о дымовых выбросах примеси, поступающих в атмосферу от высотных труб промышленных предприятий. В качестве базовых соотношений применяются уравнения экмановского пограничного слоя. В рамках предложенного подхода проведен анализ распространения дымового шлейфа от трубы ТЭЦ-3 г. Барнаула и выполнены расчеты составляющих скорости ветра в нижней атмосфере.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания (№ 0315-2019-0004), программы президиума РАН № 51 «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» (№ 0315-2018-0016), финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-47-540008.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Космическое дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля : монография / К. Я. Кондратьев, Ал. А. Григорьев, О. М. Покровский, Е. В. Шалина. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 216 с.
2. Использование данных ИСЗ Landsat для определения концентрации загрязнителей в шлейфах от продувки газовых скважин на основании модели источника / Б. М. Балтер, Д. Б. Балтер, В. В. Егоров, М. В. Стальная // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 2. – С. 55–66.
3. Low-level atmospheric jets as main mechanism of long-range transport of power plant plumes in the Lake Baikal Region / V. A. Obolkin, V. L. Potemkin, V. L. Makukhin, Y. V. Chipanina, I. I. Marinayte // Int. J. Environ. Studies. – 2014. – Vol. 71 (3). – P. 391–397.
4. Smoke dispersion modeling over complex terrain using high resolution meteorological data and satellite observations – The FireHub platform / S. Solomos, V. Amiridis, P. Zanis, E. Gerasopoulos, F. I. Sofiou, T. Herekakis, J. Brioude, A. Stohl, R. A. Kahn, C. Kontoes // Atmos. Environ. – 2015. – Vol. 119. – P. 348–361.
5. Tohidi A., Kaye N. B. Highly buoyant bent-over plumes in a boundary layer // Atmos. Environ. – 2016. – Vol. 131. – P. 97–114.
6. Balter B. M., Faminskaya M. V. Irregularly emitting air pollution sources: acute health risk assessment using aermol and the Monte Carlo approach to emission rate // Air Quality, Atmosphere and Health. – 2017. – Vol. 10 (4). – P. 401–409.
7. Sokhi R., Baklanov A., Schluenzen H. (Eds.) Air Pollution and Meteorological Modelling for Atmospheric Research and Policy Applications, Anthem Press, 2017 – 260 p.

8. Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications / A. Baklanov, K. U. Smith, R. Nuterman, A. Mahura, K. P. Nielsen, B. H. Sass, A. Rasmussen, A. Zakey, E. Kaas, A. Kurganskiy, B. Sørensen, and I. González-Aparicio // *Geosci. Model Dev.* – 2017. – Vol. 10. – P. 2971–2999.
9. Lezhenin A. A., Raputa V. F., Yaroslavtseva T. V. Numerical Analysis of Atmospheric Circulation and Pollution Transfer in the Environs of Norilsk Industrial Region // *Atmospheric and Oceanic Optics.* – 2016. – Vol. 29 (6). – P. 565–569.
10. High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse/ Z.Gao, R.Bresson, Y.Qu, M.Milliez, C.Munck, B. Carissimo // *Urban Climate.* – 2018. – Vol. 23. – P. 114–130.
11. Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China / A. J. Ding, X. Huang, W. Nie, J. N. Sun, V. -M. Kerminen, T. Petaja, H. Su, Y. F. Cheng, X. -Q. Yang, M. H. Wang, X. G. Chi, J. P. Wang, A. Virkkula, W. D. Guo, J. Yuan, S. Y. Wang, R. J. Zhang, Y. F. Wu, Y. Song, T. Zhu, S. Zilitinkevich, M. Kulmala, C. B. Fu // *Geophysical Research Letters.* – 2016. – Vol.43 (6). – P. 2873–2879.
12. Li H., Cui G., Zhang Z. A New Scheme for the Simulation of Microscale Flow and Dispersion in Urban Areas by Coupling Large-Eddy Simulation with Mesoscale Models // *Boundary-Layer Meteorol.* – 2018. – Vol. 167. – P. 145–170.
13. Fallah-Shorshani M., Shekarrizfard M., Hatzopoulou M. Evaluation of regional and local atmospheric dispersion models for the analysis of traffic-related air pollution in urban areas // *Atmos. Environ.* – 2017. – Vol. 167. – P. 270–282.
14. Численный анализ данных аэрозольных выпадений примесей от высотного источника / В. Ф. Рапута, В. А. Шлычков, А. А. Леженин, А. Н. Романов, Т. В. Ярославцева // *Оптика атмосферы и океана.* – 2014. – Т. 27. – № 8. – С. 713–718.
15. Леженин А. А., Ярославцева Т. В., Рапута В. Ф. Использование спутниковой информации о траекториях дымовых факелов для расчета полей ветра // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.).* – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 63–67.
16. Islam M. A., Roy G. D. A mathematical model in locating an unknown emission source // *Water, Air, and Solid Pollut.* – 2002. – Vol. 136. – N 1/4. – P. 331–345.
17. Бызова Н. Л., Гаргер Е. К., Иванов В. Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси : монография. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 278 с.
18. Рапута В. Ф., Леженин А. А., Ярославцева Т. В. Оценка параметров выбросов Новосибирских ТЭЦ с использованием спутниковой информации // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23 – 27 апреля 2018 г.).* – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 1. – С. 137–146.
19. *Динамическая метеорология : учеб. пособие.* / Под ред. Д. Л. Лайхмана. – Л : Гидрометеиздат, 1976. – 608 с.
20. Браун Р. А. Аналитические методы моделирования планетарного пограничного слоя : монография. – Л : Гидрометеиздат, 1978. – 151 с.
21. Зилитинкевич С. С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои : монография. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 252 с.

© А. А. Леженин, Т. В. Ярославцева, В. Ф. Рапута, 2019