

Модели оценивания параметров дымовых выбросов от высотных труб ТЭЦ по спутниковой информации

В. Ф. Рапута^{1}, А. А. Леженин¹*

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: raputa@sscc.ru

Аннотация. Обсуждается проблема оценивания характеристик подъёма дымовых шлейфов от труб промышленных предприятий. Для этих целей привлекаются данные наземных и спутниковых наблюдений, информация о динамических и тепловых параметрах источников эмиссии. В качестве базовых соотношений используются решения уравнений гидротермодинамики атмосферы. Проведён анализ характеристик подъёма газоздушных смесей от высотных труб Ново-Иркутской ТЭЦ на основе спутниковых снимков и данных аэрологического зондирования. Для конкретных метеорологических условий определена дополнительная высота подъёма дымового шлейфа и получены оценки допустимых верхней и нижней границ вертикальных скоростей дымовых смесей от высотных труб. Предложенный подход целесообразно применять в условиях малооблачной погоды и при наличии цветовой однородности земной поверхности, обеспечивающей высокую контрастность теней дымовых шлейфов.

Ключевые слова: спутниковая информация, атмосфера, дымовой шлейф, эффективная высота источника, уравнения гидротермодинамики

Models for Estimating the Parameters of Smoke Emissions from Thermal Power Plants from Satellite Information

V. F. Raputa^{1}, A. A. Lezhenin¹*

¹ Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation
* e-mail: raputa@sscc.ru

Abstract. The problem of estimating the characteristics of the rise of smoke plumes from pipes of industrial enterprises is discussed. For these purposes, data from ground-based and satellite observations, information about the dynamic and thermal parameters of emission sources are used. Solutions of the equations of atmospheric hydrothermodynamics are used as basic relations. The analysis of the characteristics of the rise of smoke mixtures from the high-altitude stacks of the Novo-Irkutsk thermal power plant was carried out on the basis of satellite images and aerological sounding data. For specific meteorological conditions, an additional rise height of the smoke plume was determined and estimates of the permissible upper and lower limits of the vertical velocities of smoke mixtures from high-altitude stacks were obtained. It is expedient to apply the proposed approach in conditions of cloudless weather and in the presence of color uniformity of the earth's surface, which ensures high contrast of smoke plume shadows.

Keywords: satellite information, atmosphere, smoke plume, effective source height, equations of hydrothermodynamics

Введение

Дымовые шлейфы от высотных труб ТЭЦ и крупных промышленных предприятий наблюдаются на космических снимках [1-6]. На них фиксируется как активная фаза подъёма дымовых смесей, так и дальнейший перенос в атмосфере [7-10]. Динамика распространения шлейфов показывает направление и скорость ветра. Протяжённость дымовых струй может достигать десятков километров. Для описания атмосферного переноса примесей от труб промышленных предприятий используются модели гидротермодинамики различной степени детализации [11-15]. Существенным требованием для их применения является наличие необходимой входной информации. В этом случае расчёты по моделям дают возможность получить вполне реальную картину атмосферного загрязнения.

В ряде случаев информация о параметрах источников выбросов и текущих метеорологических условиях отсутствует, что приводит к необходимости использовать подходы, базирующиеся на данных наблюдений и модельных описаниях процессов переноса примесей в рамках постановок обратных задач [12, 16]. Для этого требуется проведение дополнительных исследований, связанных с разработкой стилизованных описаний процессов загрязнения.

Целью работы является создание моделей оценивания параметров подъёма дымовых смесей на основе решений уравнений гидротермодинамики атмосферы [17-20], а также спутниковой информации, данных аэрологических и метеорологических станций.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований являлась Ново-Иркутская тепловая электростанция. Для анализа процессов загрязнения от труб ТЭЦ использовались спутниковые снимки г. Иркутска и информация с метеорологической и аэрологической станций.

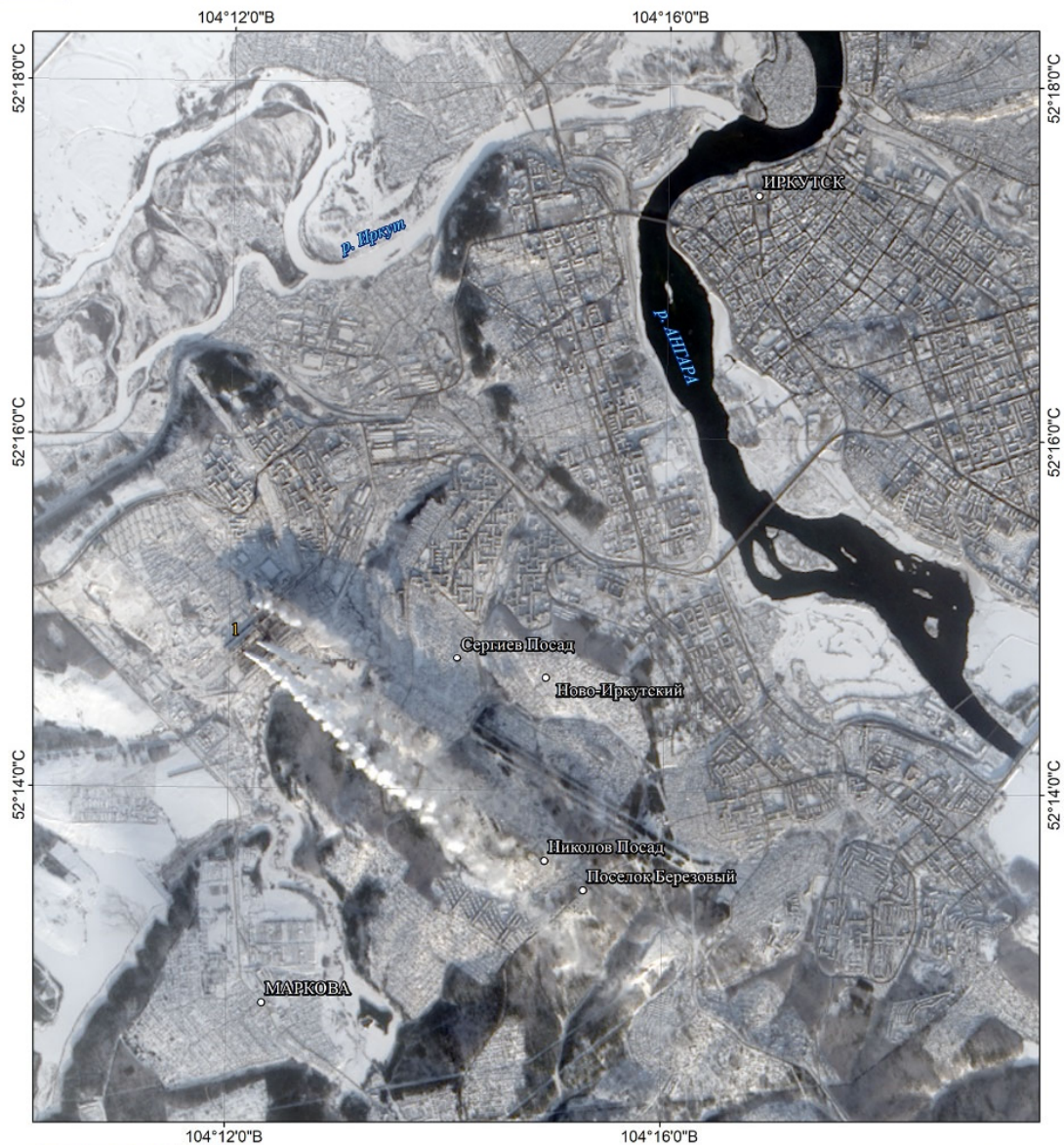
Ново-Иркутская ТЭЦ расположена на юго-западе города Иркутска, входит в состав ОАО «Иркутскэнерго». Установленная мощность ТЭЦ составляет 708 МВт. В табл. 1 приведена информация об основных параметрах ТЭЦ.

Таблица 1

Характеристики Ново-Иркутской ТЭЦ

Труба			Уходящие газы		
№	Высота, м	Диаметр, м	Температура, °К	Скорость, м/с	Интенсивность выброса, м ³ /мин
1	250	6,6	413	20,1	40088
2	180	6	388	23,3	39555

На рис. 1 приведен снимок территории г. Иркутска с ИСЗ «Landsat-8». Видно, что при синоптических условиях, протекающих 18 января 2019 г., дымовые факелы направлены на юго-восток и при этом отчётливо визуализируются протяженные шлейфы от обеих труб Ново-Иркутской ТЭЦ и их тени на поверхность земли.



Сибирский центр
ФГБУ «НИЦ «ПЛАНЕТА»
Россия, 630099, г. Новосибирск
ул. Советская, 30
Тел. (383) 363-46-05
Факс (383) 363-46-05
E-mail: avn@rcpod.ru
http://www.rcpod.ru

Мониторинг загрязнения окружающей среды промышленными объектами

Иркутская область

1 - Ново-Иркутская ТЭЦ

18.01.2019 03:58 UTC

0 0,2750,55 1,1 1,65 2,2
KM



ИСЗ "Landsat-8"

Разрешение 15 м
Спектральные каналы

RGB
0,84 - 0,87 мкм
0,53 - 0,59 мкм
0,45 - 0,51 мкм



Рис. 1. Спутниковый снимок г. Иркутска за 18 января 2019 г.
на 11 ч. 58 мин. местного времени

В табл. 2 представлены данные аэрологического зондирования параметров нижней атмосферы на станции г. Ангарска, находящейся на расстоянии около 30 км от ТЭЦ.

Таблица 2

Метеорологические параметры в нижней атмосфере по данным аэрологической станции г. Ангарск (индекс ВМО 30715) на 18 января 2019 г.

Время, UTC	Высота над уровнем моря, м	Давление, hPa	Температура, °C	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
00	437	978	-19,3	ШТИЛЬ	0
	574	961	-17,0	275	4
	873	925	-11,9	295	7
	956	915	-10,7	300	8
	1368	867	-13,5	325	10
	1519	850	-14,5	320	15
	1779	821	-16,1	315	17
12	437	981	-10,3	250	1
	658	954	-8,9	295	5
	809	936	-10,1	325	8
	903	925	-10,9	325	9
	1548	850	-15,3	315	13
	1557	849	-15,5	315	13
	1664	837	-15,9	310	14

На высотах пограничного слоя атмосферы температурная стратификация довольно часто близка к нейтральной. В этих условиях для расчётов скорости подъёма дымовых смесей от высотных труб вполне применима следующая формула, вытекающая из полученного аналитического решения уравнений гидротермодинамики [17, 18]

$$w_m^3(z) = \frac{w_0^3 h^3}{z^3} + \frac{3g Q_T}{2\pi T_a c^2} \left(\frac{1}{z} - \frac{h^2}{z^3} \right), \quad (1)$$

где w_0 – начальная скорость подъёма дымовой смеси, h – фиктивное положение точки выброса примеси относительно устья трубы, g – ускорение свободного падения, c – тангенс угла раствора дымового конуса, T_a – температура атмосферы, $Q_T = \pi R_0^2 w_0 \Delta T$, R_0 – радиус устья трубы, ΔT – разность температур дымовой смеси и атмосферы.

Из (1) следует, что для сравнительно холодной струи вертикальная скорость $w_m(z) \sim z^{-1}$, а для нагретой струи скорость подъёма $w_m(z) \sim z^{-1/3}$.

При увеличении высоты скорость подъёма сначала быстро убывает, а потом меняется сравнительно медленно, что является следствием предположения сохранения постоянства количества тепла с высотой. Однако с высотой возрастает влияние горизонтального сноса и атмосферной турбулентности, что приводит к более ускоренному убыванию $w_m(z)$. Пределы применимости формулы (1) могут быть скорректированы с использованием спутниковой информации.

Результаты и обсуждения

Анализ изображений дымовых струй на рис. 1 позволяет оценить их дополнительную высоту подъема с использованием процедуры, описанной в работе [21]. Для этого необходима информация о взаимном расположении шлейфов и их теней на земную поверхность

На рис. 2 приведен фрагмент спутникового снимка (рис. 1) окрестностей Ново-Иркутской ТЭЦ. На нём представлена схема определения основных характеристик подъема дымовых шлейфов от высотных труб ТЭЦ.

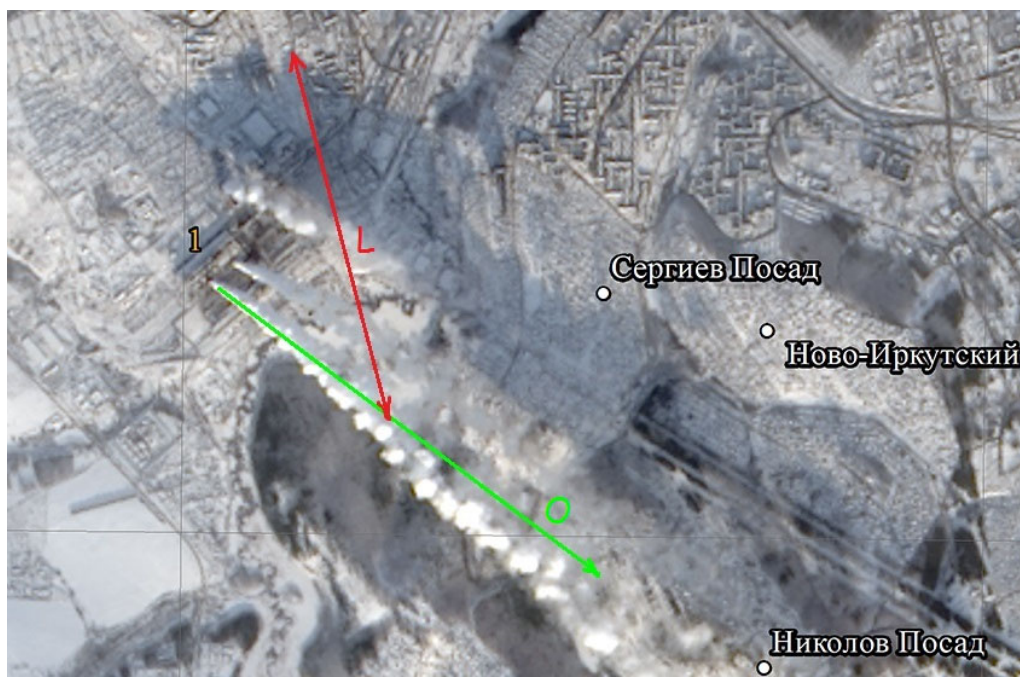


Рис. 2. Схема определения высоты подъема и оси конуса шлейфа по видимым очертаниям дымовой струи и её тени на поверхности земли для спутникового снимка Ново-Иркутской ТЭЦ 18 января 2019 г.

L – отрезок, ориентированный в направлении азимута солнца и соединяющий верхнюю точку пассивной части шлейфа с дальней кромкой его тени, O – линия, фиксирующая положение оси шлейфа на активной стадии подъема струи

На момент проведения съемки угол высоты солнца над горизонтом составлял $15,26^\circ$, азимут солнца – $161,8^\circ$. С учетом этих сведений и космоснимка была выполнена оценка дополнительной высоты подъема дымовых струй по методу, предложенному в [21]. Она оказалась довольно значительной и составила 260 м. Это обусловлено, как значительной начальной скоростью выхода из трубы дымовых газов, так и их более высокой температурой по сравнению с температурой атмосферы, а также наблюдаемым умеренным ветрам в нижней атмосфере (табл. 2).

Из табл. 2 следует, что на высотах распространения дымовых шлейфов скорость ветра составляла 5 – 9 м/с. Наличие умеренного ветра ограничивает при-

менение соотношения (1) для оценивания вертикальной скорости подъёма дымового шлейфа. Тем не менее оно может быть использовано для определения допустимых верхних и нижних границ скоростей подъёма дымовых смесей. На рис. 3 представлены результаты расчёта этих характеристик.

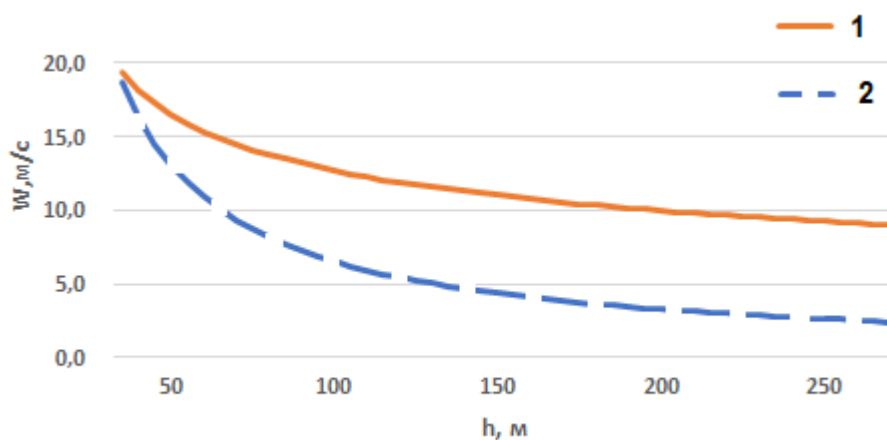


Рис. 3. Оценки максимально (1) и минимально (2) допустимых скоростей подъёма дымового шлейфа от устья основной трубы Ново-Иркутской ТЭЦ

Расчёт кривой 1, приведённой на рис. 3, выполнен по зависимости (1) для значения $c = 0,1$. Эта оценка получена с использованием спутникового снимка (рис. 2). Следует отметить, что величина c совпадает со значением, рекомендованном в статье [17]. Кривая 2 также рассчитана по зависимости (1) для случая $\Delta T=0$ (холодная струя).

Заключение

Решения уравнений гидротермодинамики позволяют получить оценки скоростей подъёма газозадушной смеси под воздействием динамических и тепловых факторов. С использованием зимнего спутникового снимка Ново-Иркутской ТЭЦ определена дополнительная высота подъёма дымового шлейфа. Выполнены оценки верхней и нижней границ вертикальных скоростей дымовых смесей от высотных труб.

Предложенный подход целесообразно применять для зимних условий. Снежный покров обеспечивает цветовую однородность земной поверхности и достаточно высокую контрастность теней шлейфов. Использование спутниковых снимков при малооблачной погоде позволяет объективно оценить высоты и скорости подъёма дымовых факелов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундамен-

тальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Solomos S., Amiridis V., Zanis P., Gerasopoulos E., Sofiou F. I., Herekakis T., Brioude J., Stohl A, Kahn R. A., Kontoes C. Smoke dispersion modeling over complex terrain using high resolution meteorological data and satellite observations – The FireHub platform // *Atmos. Environ.* – 2015. – Vol. 119. – P. 348–361.
2. Tohidi A., Kaye N. B. Highly buoyant bent-over plumes in a boundary layer // *Atmos. Environ.* – 2016. – Vol. 131. – P. 97–114.
3. Obolkin V. A., Potemkin V. L., Makukhin V. L., Chipanina Y. V., Marinayte I. I. Low-level atmospheric jets as main mechanism of long-range transport of power plant plumes in the Lake Baikal Region // *Int. J. Environ. Studies.* – 2014. – Vol. 71 (3). – P. 391–397.
4. Кондратьев К. Я., Григорьев Ал. А., Покровский О. М., Шалина Е. В. Космическое дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 216 с.
5. Балтер Б. М., Балтер Д. Б., Егоров В. В., Стальная М. В. Использование данных ИСЗ Landsat для определения концентрации загрязнителей в шлейфах от продувки газовых скважин на основании модели источника // *Исследование Земли из космоса.* – 2014. – № 2. – С. 55–66.
6. Прокачева В. Г., Усачев В. Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения в сфере влияния городов и дорог. // *Метеорология и гидрология.* – 2013. – № 3. – С. 94-106.
7. Грибков А. М., Зройчиков Н. А., Прохоров В. Б. Формирование траектории дымового факела при наличии самоокутывания оголовка дымовой трубы // *Теплоэнергетика.* – 2017. – № 10. – С. 51-59.
8. Лобода Е. Л., Касымов Д. П., Агафонцев М. В., Рейно В. В., Гордеев Е. В., Тарканова В. А., Мартынов П. С., Орлов К. Е., Савин К. В., Дутов А. И., Лобода Ю. А. Влияние малых природных пожаров на характеристики атмосферы вблизи очага горения // *Оптика атмосферы и океана.* – 2020. – Т. 33. – № 10. – С. 818–823. DOI: 10.15372/AOO20201011.
9. Рапута В. Ф., Леженин А. А., Ярославцева Т. В. Оценка параметров выбросов Новосибирских ТЭЦ с использованием спутниковой информации // *Интерэкспо Гео-Сибирь.* – 2018. – Т. 1. – № 4. – С. 137-146.
10. Тихонов Н. А., Захарова С. А., Давыдова М. А. Моделирование динамики образования шлейфа NO₂ от точечного источника // *Оптика атмосферы и океана.* – 2020. – Т. 33. – № 09. – С. 722–727. DOI: 10.15372/AOO20200909.
11. Бызова Н. Л., Гаргер Е. К., Иванов В. Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 278 с.
12. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
13. Алоян А. Е. Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. – М.: Наука, 2008. – 405 с.
14. Зилитинкевич С. С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 252 с.
15. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Ф. Т. М. Ньистад, Х. Ван Доп (ред.). – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 351 с.
16. Бортникова С. Б., Рапута В. Ф., Девятова А. Ю., Юдахин Ф. Н. Методы анализа данных загрязнения снегового покрова в зонах влияния промышленных предприятий // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.* – 2009. – № 5. – С. 447-457.
17. Priestley C. H. B., Ball F. K. Continuous convection from an isolated source of heat // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* – 1956. – V. 81. – P. 144–157.

18. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с
19. Raputa V. F., Lezhenin A. A. Estimation of the Dynamic and Thermal Characteristics of the Rise of a Smoke Plume from Satellite Information. // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2021. – Vol. 34. – No. 5. – P. 433–437. DOI: 10.1134/S1024856021050171
20. Метеорология и атомная энергия / Под ред. Д. Слейда. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 647 с.
21. Рапуга В. Ф., Леженин А. А. Оценка высоты подъёма дымового факела по спутниковым снимкам // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33. – № 06. – С. 471–475. DOI: 10.15372/AOO20200609

© В. Ф. Рапуга, А. А. Леженин, 2022