

Оценивание траекторий подъема дымовых смесей от высотных труб по спутниковой информации

Р. А. АМИКИШИЕВА^{1,2}, В. Ф. РАПУТА^{1,*}, А. А. ЛЕЖЕНИН¹

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

²Сибирский центр ФГБУ “НИЦ “Планета”, 630099, Новосибирск, Россия

*Контактный автор: Рапута Владимир Федотович, e-mail: raputa@sscc.ru

Поступила 10 октября 2023 г., принята в печать 17 октября 2023 г.

Обсуждаются методы численного построения траекторий подъема дымовых шлейфов от высотных труб тепловых станций. При проведении исследования в качестве базовых приняты соотношения, вытекающие из соображений размерности и подобия, применительно к струям, поступающим в сносящий поток. Пространственное расположение точек на осях дымовых струй определяется с помощью спутниковых снимков, которые позволяют фиксировать направление сноса шлейфов и положение их теней на земной поверхности. Учитываются угловая высота и азимут солнца. Характеристики скорости ветра и температуры в нижней тропосфере устанавливаются на основе данных аэрологического зондирования. Апробация предложенного подхода по оцениванию траекторий подъема дымовых шлейфов выполнена на выбросах газоаэрозольных смесей от высотных труб Ново-Иркутской ТЭЦ и Гусинозерской ГРЭС. Для численного анализа использовались зимние спутниковые снимки территорий, на которых расположены эти объекты энергетики. С помощью соотношения, описывающего аналитическую связь между текущей высотой подъема дымовой струи и ее горизонтальным смещением в рамках “закона 2/3”, получены вполне удовлетворительные аппроксимации рассматриваемых траекторий. Выполнены оценки высот подъема и потоков плавучести дымовых шлейфов. Полученные результаты могут быть использованы для внешнего контроля режимов эксплуатации тепловых станций.

Ключевые слова: тепловая станция, загрязнение атмосферы, дымовой шлейф, траектория подъема, модель оценивания, спутниковые наблюдения.

Цитирование: Амикишиева Р.А., Рапута В.Ф., Леженин А.А. Оценивание траекторий подъема дымовых смесей от высотных труб по спутниковой информации. Вычислительные технологии. 2023; 28(6):6–16. DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.002.

Введение

Дымовые шлейфы от труб ТЭЦ позволяют изучать особенности их распространения в атмосфере и определять характеристики активной фазы подъема [1, 2]. Спутниковые наблюдения создают широкие возможности для проведения этих исследований [3–5]. По траекториям дымовых струй можно определить направление и скорость ветра. Их визуальная протяженность может достигать многих километров. Весьма эффективным методом исследования дымовых шлейфов является теория подобия и размерностей [6–8].

Исходя из физических соображений вводится величина потока плавучести, отражающего влияние перегрева дымовой смеси, скорости ее выхода и масштаба длины, связанного со скоростью ветра. Масштаб длины позволяет установить зависимость высоты подъема шлейфа от его смещения в поле горизонтального ветра. Она определяется как “закон $2/3$ ”, который может быть эффективно использован при оценивании характеристик активной фазы подъема шлейфов и определении оптимальных параметров при проектировании и эксплуатации дымовых труб [9, 10].

Моделирование процессов антропогенных поступлений через атмосферу загрязняющих примесей на акваторию оз. Байкал и прилегающие территории является актуальной проблемой. Крупные угольные тепловые станции относятся к значимым источникам таких поступлений. Трубы станций могут достигать нескольких сотен метров, и их выбросы оказывают негативное влияние на обширные территории [11, 12]. Для описания процессов атмосферного загрязнения необходима детальная информация о динамических и тепловых характеристиках этих источников, текущих метеорологических условиях [1, 13–16].

Целью работы является разработка методов оценивания траекторий подъема дымовых смесей от высотных труб ТЭЦ, расположенных на Байкальской природной территории (БПТ), с использованием соотношений теории размерности и подобия, данных спутниковой и аэрологической информации.

1. Объекты и методы

Объектами исследований являются дымовые шлейфы от высотных труб Ново-Иркутской ТЭЦ и Гусиноозерской ГРЭС — крупнейших электростанций, расположенных на БПТ, которые потребляют по несколько миллионов тонн угля в год [17–20]. Дымовые газы отводятся через трубы, достигающие нескольких сот метров, т. е. выбросы высокотемпературных газоздушных смесей происходят на высотах пограничного слоя атмосферы. Основные параметры источников приведены в табл. 1.

Оба рассматриваемых энергетических объекта находятся всего в нескольких десятках километрах от побережья оз. Байкал, и их выбросы в атмосферу оказывают значительное влияние на экологию озера и прилегающих к нему территорий.

На рис. 1 представлены фрагменты спутниковых снимков окрестностей Ново-Иркутской ТЭЦ и Гусиноозерской ГРЭС. Информация взята с сайта Сибирского центра ФГБУ “Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета” (<http://www.rcpod.ru>). Отчетливо просматриваются тени шлейфов на поверхности земли. На рис. 1, *a* видно, что дымовой шлейф сносится в юго-восточном направлении,

Т а б л и ц а 1. Характеристики высотных труб ТЭЦ
Table 1. Characteristics of high-rise pipes of thermal power plants

Название станции	Высота трубы, м	Диаметр устья трубы, м	Скорость выхода дымовых газов, м/с	Температура дымовой смеси, °С
Ново-Иркутская ТЭЦ	250	6.6	20.1	140
Гусиноозерская ГРЭС (труба 1)	330	12	4.2	156
Гусиноозерская ГРЭС (труба 2)	190	9	18.6	78

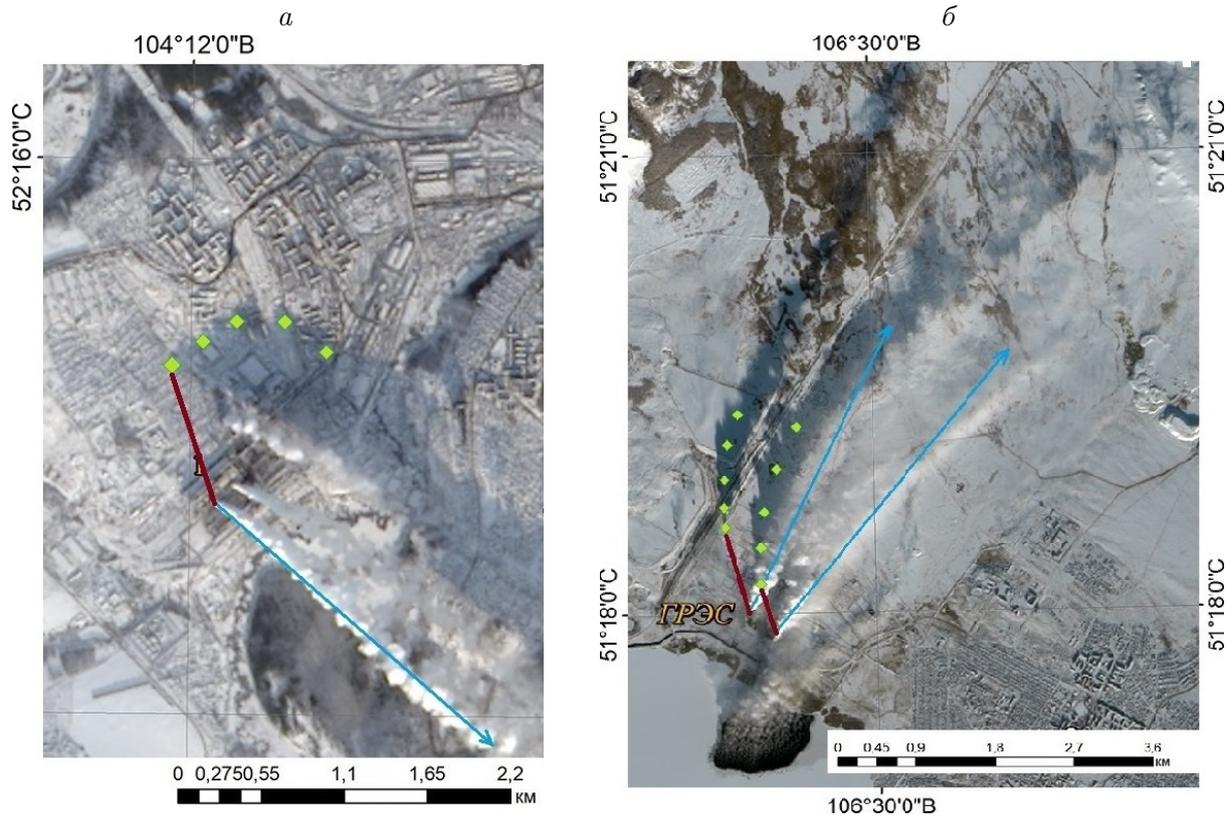


Рис. 1. Фрагменты снимков с искусственного спутника Земли Landsat-8 окрестностей Ново-Иркутской ТЭЦ 18.01.2019 г. 03:58 UTC (а) и Гусиноозерской ГРЭС 06.12.2019 г. 03:47 UTC (б)
 Fig. 1. Fragments of images from the Landsat-8 satellite of the vicinity in the Novo-Irkutsk Thermal Power Plant 01/18/2019 03:58 UTC (a) and Gusinoozerskaya State District Power Plant 12/06/2019 03:47 UTC (б)

Т а б л и ц а 2. Метеорологические характеристики в нижней атмосфере по данным аэрологических станций

Table 2. Meteorological characteristics in the lower atmosphere according to the data from aerological stations

Название станции, дата	Высота над уровнем моря, м	Атмосферное давление, hPa	Температура воздуха, °С	Направление ветра, град.	Скорость ветра, м/с
Ангарск, 18.01.2019 00 UTC	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	11
Чита, 06.12.2019 00 UTC	1519	850	-14.5	320	15
	671	946	-24.1	75	2
	779	932	-21.4	260	3
	833	925	-20.1	275	3
	1004	904	-16.7	315	5
	1180	883	-13.3	323	9
	1468	850	-13.7	335	15

на рис. 1, б шлейфы от труб Гусиноозерской ГРЭС уходят в северо-восточном направлении. Синие линии показывают направления пассивного переноса примесей. Зеленые ромбики трассируют проекции осей шлейфов на земную поверхность. Красными цветом помечены тени труб на поверхности земли. Следует отметить, что подъем дымовых смесей, обусловленный динамическим и тепловым импульсами, может достигать значительных высот.

Для проведения исследований наиболее целесообразно использовать спутниковые снимки, выполненные в зимний период времени, когда тени дымовых шлейфов визуализируются наиболее контрастно на заснеженной земной поверхности. Критериями выбора подходящих снимков являлись достаточная протяженность теней шлейфов и фиксация ими (тенями) активной фазы подъема.

В табл. 2 представлены данные с ближайших к рассматриваемым ТЭЦ аэрологических станций: “Ангарск” (индекс ВМО 30715) — для Ново-Иркутской ТЭЦ и “Чита” (индекс ВМО 30758) — для Гусиноозерской ГРЭС. Из таблицы следует, что на высотах распространения дымовых шлейфов скорость ветра может изменяться в диапазоне от 5 до 10 м/с. Температурная стратификация на этих высотах близка к нейтральной.

2. Модели оценивания

При моделировании процессов распространения дымовых смесей, поступающих в атмосферу из труб промышленных предприятий, необходимо учитывать эффекты их перегрева относительно окружающего воздуха. Наличие сил плавучести приводит к дополнительному подъему примесей над устьем трубы. В поле ветра подъем шлейфов происходит по определенным траекториям. В общей постановке для их расчета могут быть использованы гидродинамические модели, требующие привлечения больших объемов разнообразной информации [13, 21]. Также существуют подходы, основанные на применении методов теории подобия и размерности. В ряде случаев они позволяют получить весьма компактные соотношения для описания траекторий дымовых шлейфов и высот их подъема [7, 22, 23]. Эти соотношения обычно содержат относительно небольшое число неизвестных параметров, которые определяются с привлечением экспериментальных данных.

Исходя из соображений размерности, в [6, 7] показано, что высота подъема z дымового факела с горизонтальным переносом в направлении x связана соотношением

$$z = Cl^{1/3}x^{2/3}, \quad l = \frac{F}{u^3},$$

$$F = gw_s r^2 \left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right), \quad (1)$$

где l — масштаб длины, м; F — параметр силы плавучести, $\text{м}^4/\text{с}^3$; u — средняя скорость ветра в слое распространения примеси, м/с; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; w_s — скорость газовоздушной смеси на выходе из трубы, м/с; r — радиус трубы, м; T_c — температура смеси, К; T_a — температура окружающего воздуха, К; C — константа, определяемая по экспериментальным данным.

В случае, если для конкретного источника выбросов дымовых смесей неизвестно значение параметра плавучести F , целесообразно ввести обозначение $A = Cl^{1/3}$. Тогда соотношение удобнее представить в виде

$$z = Ax^{2/3}. \quad (2)$$

Неизвестный параметр A можно определить по наблюдениям траекторий дымовых шлейфов, например методом наименьших квадратов. Оценка неизвестного параметра A находится из условия минимума следующего функционала:

$$f(A) = \sum_{n=1}^N (z_n - Ax_n^{2/3})^2, \quad (3)$$

где x_n, z_n — измеренные координаты точек на оси дымового шлейфа, $n = 1, \dots, N$.

Для расчета дополнительной высоты подъема дымового шлейфа Δh при известных значениях F и скорости ветра могут быть использованы в достаточной степени апробированные модели и методы [7, 23]. В частности, при близкой к нейтральной стратификации температуры в слое распространения шлейфа применимо следующее соотношение [24, 25]:

$$\Delta h = 38.71F^{3/5}u^{-1}. \quad (4)$$

Выражение (4) следует использовать при значениях потоков плавучести F , превышающих $55 \text{ м}^4 \cdot \text{с}^{-3}$.

В работе [26] предложен метод определения Δh по спутниковой информации. Применение этого метода дает возможность выполнить оценку потока плавучести исходя из соотношения (4) по формуле

$$F = 2.258 \cdot 10^{-3}(u\Delta h)^{5/3}. \quad (5)$$

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 ромбиками показано положение осей шлейфов на спутниковых снимках. Они достаточно равномерно распределены по осям и в целом отражают пространственное расположение траекторий шлейфов. В табл. 3 представлены координаты помеченных на рис. 1 точек (ромбиков). При определении координат учитывались угол и азимут солнца [26]. Начала координат привязаны к устьям труб, ось X ориентирована по направлению ветра, ось Z направлена вертикально вверх.

С использованием соотношений (2), (3) и данных табл. 3 методом наименьших квадратов выполнены оценки параметра A для трех рассматриваемых шлейфов (рис. 1). Для шлейфа Ново-Иркутской ТЭЦ значение A составило 0.63. Для шлейфов Гусиноозерской ГРЭС значения A равны 0.62 (труба 330 м) и 0.73 (труба 190 м).

На рис. 2 и 3 представлены численно восстановленные по данным измерений траектории дымовых шлейфов от труб тепловых станций. Отмечено вполне удовлетворительное соответствие положения выбранных точек на осях шлейфов и траекторий, построенных на основе зависимости (2). Высота подъема шлейфа для Ново-Иркутской ТЭЦ достигла 280 м. Для труб Гусиноозерской ГРЭС значения высоты подъема заметно различаются. Для более высокой трубы она составила 180 м, а для трубы ниже высота подъема от устья достигла 270 м, что объясняется согласно данным табл. 1 существенной разницей в скоростях выхода дымовых смесей в атмосферу.

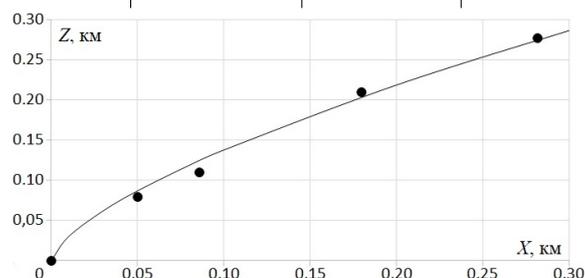
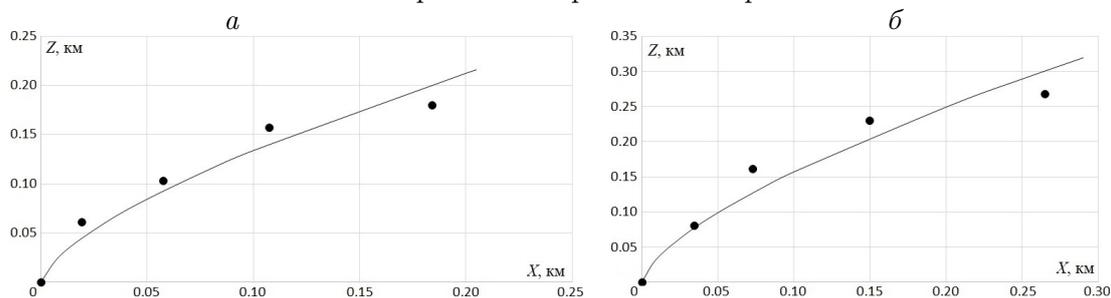
В табл. 4 приведены результаты прямых расчетов высот подъема и потоков плавучести дымовых шлейфов от рассматриваемых труб ТЭЦ. Оценки этих параметров выполнялись с использованием спутниковых снимков (см. рис. 1).

Вычисления F и Δh проводились по зависимостям (1), (4) и данным табл. 1 и 2. Оценивание параметров плавучести \hat{F} выполнялось с использованием соотношения (5).

Т а б л и ц а 3. Измеренные координаты точек на осях дымовых шлейфов

Table 3. Measured coordinates of points on the axes of smoke plumes

Ново-Иркутская ТЭЦ (труба 250 м)		Гусиноозерская ГРЭС (труба 330 м)		Гусиноозерская ГРЭС (труба 190 м)	
X , км	Z , км	X , км	Z , км	X , км	Z , км
0.05	0.08	0.02	0.06	0.03	0.08
0.09	0.11	0.06	0.10	0.07	0.16
0.18	0.26	0.11	0.16	0.15	0.23
0.28	0.28	0.18	0.18	0.26	0.27

Рис. 2. Численно восстановленная по зависимости (2) и спутниковому снимку от 18.01.2019 г. (см. рис. 1, *a*) траектория дымового шлейфа от 250-метровой трубы Ново-Иркутской ТЭЦ. ● — измеренные положения точек на оси шлейфаFig. 2. Numerically reconstructed from dependence (2) and a satellite image from January 18, 2019 (see Fig. 1, *a*) the trajectory of the smoke plume from the 250-meter pipe of the Novo-Irkutsk Thermal Power Plant. ● — measured positions of points at the plume axisРис. 3. Численно восстановленные по зависимости (2) и спутниковому снимку от 06.12.2019 г. (см. рис. 1, *б*) траектории дымовых шлейфов от 330-метровой (*a*) и 190-метровой (*б*) труб Гусиноозерской ГРЭСFig. 3. Numerically reconstructed from dependence (2) and a satellite image from December 6, 2019 (see Fig. 1, *б*) trajectories of smoke plumes from the 330-meter (*a*) and 190-meter (*б*) pipes of the Gusinoozerskaya GRES

Т а б л и ц а 4. Оценки параметров дымовых шлейфов от высотных труб ТЭЦ

Table 4. Estimation of parameters for smoke plumes from high-rise chimneys for thermal power plants

Название ТЭЦ, дата снимка	u , м/с	T_a , °C	Расчет Δh , м	Оценка $\overline{\Delta h}$, м	Расчет F , м ⁴ /с ³	Оценка \hat{F} , м ⁴ /с ³
Ново-Иркутская ТЭЦ (труба 250 м), 18.01.2019 г.	8	-11	264	280	784	866
Гусиноозерская ГРЭС (труба 330 м), 06.12.2019 г.	8	-15	223	180	591	415
Гусиноозерская ГРЭС (труба 190 м), 06.12.2019 г.	7	-16.5	348	270	994	652

Для определения высот подъема $\overline{\Delta h}$ привлекалась спутниковая информация (см. рис. 1). Высоты подъема дымовых смесей от труб рассчитывались с учетом азимута и зенитного угла Солнца, положения теней дымовых струй на земной поверхности [26]. Температура атмосферы и скорость ветра на высотах распространения дымовых шлейфов определялась по данным аэрологического зондирования (см. табл. 2).

Результаты, приведенные в табл. 4, показывают вполне удовлетворительное согласие полученных оценок дополнительных высот подъема и параметров плавучести с прямыми расчетами этих характеристик по формулам (1), (4). Следует отметить, что распространение дымовых шлейфов от труб ТЭЦ происходило при близких скоростях ветра. Это позволило исследовать непосредственное влияние величины плавучести на высоты подъема дымовых смесей.

Дымовые трубы тепловых станций являются дорогостоящим оборудованием. Нарушение режимов их эксплуатации приводит к значительному экологическому ущербу [9]. Возможность косвенного определения $\overline{\Delta h}$ с использованием спутниковой информации позволяет осуществлять контроль параметров плавучести дымовых смесей и принимать решения по оптимизации тепловых и динамических характеристик выбросов газоздушных смесей из труб тепловых станций.

Заключение

Предложенные методы оценивания по спутниковой информации траекторий и характеристик подъема дымовых смесей от высотных труб базируются на фундаментальном “законе 2/3”, который следует из теории размерности и подобия. Используемые соотношения позволяют получать вполне адекватные описания траекторий подъема дымовых струй для случаев температурной стратификации атмосферы, близкой к нейтральной в слое распространения выбросов. Обозначенное условие состояния атмосферы, как правило, выполняется для высотных труб.

Апробация предлагаемого подхода выполнена на примере крупных тепловых станций: Ново-Иркутской ТЭЦ, Гусинозерской ГРЭС, расположенных на территориях, прилегающих к оз. Байкал. В численном анализе существенно использовались спутниковые снимки дымовых шлейфов от рассматриваемых ТЭЦ и информация со станций аэрологического зондирования. Выполнено оценивание характеристик распространения дымовых шлейфов, а также сравнение с результатами нормативных расчетов высот подъема и потоков плавучести дымовых смесей от высотных труб рассматриваемых ТЭЦ.

Показана возможность построения траекторий дымовых шлейфов с использованием соотношений подобия и спутниковых снимков. При недостаточности информации об источниках выбросов предлагаемый подход позволяет осуществлять внешний контроль процессов распространения примесей от высотных труб промышленных предприятий.

Благодарности. Работа проведена 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 “Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории”).

Список литературы

- [1] Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат; 1975: 448.
- [2] Федосов А.А., Чичирова Н.Д., Шарифуллин А.Ш. Моделирование начального подъема выбросов тепловых электрических станций. 5. Совместный расчет динамического и теплового подъема. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003; (5–6):14–20.
- [3] 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):55–66. DOI:10.7868/S0205961414020031.
- [4] Sofiev M., Ermakova T., Vankevich R. Evaluation of the smoke-injection height from wild-land fires using remote-sensing data. Atmospheric Chemistry and Physics. 2012; (12):1995–2006. DOI:10.5194/acp-12-1995-2012.
- [5] Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения). Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017; 14(6):158–175. DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
- [6] Chanady G.T. Some observations on smoke plumes. International Journal of Air and Water Pollution. 1961; (4):47–51.
- [7] Briggs G.A. A plume rise model compared with observations. Journal of the Air Pollution Control Association. 1965; 15(9):433–438. DOI:10.1080/00022470.1965.10468404.
- [8] Nettierville D.D.J. Plume rise, entrainment and dispersion in turbulent winds. Atmospheric Environment. Part A, General Topics. 1990; 24(5):1061–1081. DOI:10.1016/0960-1686(90)90074-W.
- [9] Мирсалихов К.М., Грибков А.М., Чичирова Н.Д. Аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб. Проблемы энергетики. 2021; 23(1):131–145.
- [10] Грибков А.М., Зройчиков Н.А., Прохоров В.Б. Формирование траектории дымового факела при наличии самокутывания оголовка дымовой трубы. Теплоэнергетика. 2017; (10):51–59. DOI:10.1134/S0040363617100034.
- [11] Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Макухин В.Л., Ходжер Т.В., Чипанина Е.В. Дальний перенос шлейфов атмосферных выбросов региональных угольных ТЭЦ на акваторию Южного Байкала. Оптика атмосферы и океана. 2017; 30(1):60–65.
- [12] Obolkin V., Molozhnikova E., Shikhovtsev M., Netsvetaeva O., Khodzher T. Nitrogen oxides in the atmosphere of lake Baikal: sources, automatic monitoring, and environmental risks. Atmosphere. 2021; (12):1348. DOI:10.3390/atmos12101348.
- [13] Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. Под ред. Ф.Т.М. Ньистада и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеиздат; 1985: 351.
- [14] Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат; 1991: 278.
- [15] Tohidi A., Kaye N. Highly buoyant bent-over plumes in a boundary layer. Atmospheric Environment. 2016; (131):97–114.
- [16] Bhargava A. Effect of wind speed and stack height on plume rise using different equations. International Journal of Engineering Science and Computing. 2016; 6(4):3228–3234. DOI:10.4010/2016.748.

- [17] Государственные доклады “О состоянии и об охране окружающей среды в Иркутской области”. Адрес доступа: <https://irkobl.ru/region/ecology/doklad> (дата обращения 21.09.23).
- [18] **Аргучинцева А.В., Годвинская И.Г., Ахтиманкина А.В.** Загрязнение атмосферного воздуха предприятиями теплоэнергетики г. Иркутска. Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2011; 4(1):33–47.
- [19] **Верхозина Е.В., Сафаров А.С., Макухин В.Л., Верхозина В.А.** Влияние выбросов Ново-Иркутской ТЭЦ на загрязнение атмосферного воздуха г. Иркутска. Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2016; (1):50–55.
- [20] **Фадова А.А., Кучерик Г.В., Заблоцкая Е.В.** Оценка качества атмосферного воздуха района размещения основной площадки акционерного общества “Интер РАО — Электрогенерация”. Энергетические установки и технологии. 2020; 6(2):138–145.
- [21] **Алюян А.Е.** Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. М.: Наука; 2008: 405.
- [22] **Chanady G.T.** Some observations on smoke plumes. International Journal of Air and Water Pollution. 1961; (4):47–51.
- [23] **Иванов Е.А., Клепикова Н.В., Троянова Н.И., Фреймундт Г.Н.** Методы расчета подъема факела из вентиляционной трубы. Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ). 2014; (4):18–32.
- [24] **Рапута В.Ф., Леженин А.А., Амикишиева Р.А.** Оценки высоты подъема и потока плавучести дымовых шлейфов от высотных труб ТЭЦ по спутниковой информации. Оптика атмосферы и океана. 2023; 36(6):482–486. DOI:10.15372/AOO20230608.
- [25] **Ванкевич Р.Е., Ермакова Т.С., Софиев М.А.** Сравнение результатов вычисления высоты подъема струи дыма от лесных пожаров по полуэмпирическим формулам и одномерной модели BUOYANT. Ученые записки. 2011; (19):61–70.
- [26] **Рапута В.Ф., Леженин А.А.** Оценка высоты подъема дымового шлейфа по спутниковым снимкам. Оптика атмосферы и океана. 2020; 33(6):471–475. DOI:10.15372/AOO20200609.

Estimating the trajectories of rising smoke mixtures from high-altitude pipes using satellite information

R. A. AMIKISHIEVA^{1,2}, V. F. RAPUTA^{1,*}, A. A. LEZHENIN¹

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia

²Siberian Center FGBU “SRC “Planet”, 630099, Novosibirsk, Russia

*Corresponding author: Vladimir F. Raputa, e-mail: raputa@sscc.ru

Received October 10, 2023, accepted October 17, 2023.

Abstract

Methods for numerically constructing trajectories of rising smoke plumes from high-rise pipes of thermal power plants are discussed. When carrying out the study, the relations arising from dimension and similarity considerations are used as fundamentals for description of the jets entering

the drift flow. The spatial location of points at the axes of smoke plumes is determined using satellite images, which allows recording the direction of drift of plumes and the position of their shadows on the Earth's surface. This takes into account the angular altitude and azimuth of the sun. Characteristics of wind speed and temperature in the lower troposphere are established on the basis of upper-air sounding data. The proposed approach for assessing the ascent trajectories of smoke plumes was tested on emissions of gas-aerosol mixtures from the high-rise chimneys of the Novo-Irkutsk Thermal Power Plant and Gusinoozerskaya State District Power Plant. To carry out the numerical analysis, we use winter satellite images of the territories where these energy facilities are located. Using the relationship that describes the analytical relationship between the current height of the rise of the smoke jet and its horizontal displacement within the framework of the so-called "2/3 law", quite satisfactory approximations of the considered trajectories were obtained. Estimates for the heights and buoyancy flows of the ascending smoke plumes have been carried out. The obtained results can be used for external monitoring of operating modes of thermal power plants.

Keywords: thermal station, air pollution, smoke plume, ascent trajectory, assessment model, satellite observations.

Citation: Amikishieva R.A., Raputa V.F., Lezhenin A.A. Estimating the trajectories of rising smoke mixtures from high-altitude pipes using satellite information. Computational Technologies. 2023; 28(6):6–16. DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.002. (In Russ.)

Acknowledgements. The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the grant No. 075-15-2020-787 for implementation of Major scientific projects on priority areas of scientific and technological development (the project "Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory").

References

1. **Berlyand M.E.** Sovremennye problemy atmosfery diffuzii i zagryazneniya atmosfery [Modern problems of atmospheric diffusion and air pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1975: 448. (In Russ.)
2. **Fedosov A.A., Chichirova N.D., Sharifullin A.Sh.** Modelling the initial ascent of emissions from thermal power plants. 5. Joint calculation of dynamic and thermal ascent of emissions. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Problemy Energetiki. 2003; (5–6):14–20. (In Russ.)
3. **Balter B.M., Balter D.B., Egorov V.V., Stalnaya M.V.** Using Landsat satellite data to determine the concentration of pollutants in gas well blowdown plumes based on a source model. Issledovanie Zemli iz Kosmosa. 2014; (2):55–66. DOI:10.7868/S0205961414020031. (In Russ.)
4. **Sofiev M., Ermakova T., Vankevich R.** Evaluation of the smoke-injection height from wild-land fires using remote-sensing data. Atmospheric Chemistry and Physics. 2012; (12):1995–2006. DOI:10.5194/acp-12-1995-2012.
5. **Lupyan E.A., Bartalev S.A., Balashov I.V., Egorov V.A., Ershov D.V., Kobets D.A., Senko K.S., Stytsenko F.V., Sychugov I.G.** Satellite monitoring of forest fires in the 21st century on the territory of the Russian Federation (figures and facts based on active burning detection data). Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2017; 14(6):158–175. DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175. (In Russ.)
6. **Chanady G.T.** Some observations on smoke plumes. International Journal of Air and Water Pollution. 1961; (4):47–51.
7. **Briggs G.A.** A plume rise model compared with observations. Journal of the Air Pollution Control Association. 1965; 15(9):433–438. DOI:10.1080/00022470.1965.10468404.
8. **Netterville D.D.J.** Plume rise, entrainment and dispersion in turbulent winds. Atmospheric Environment. Part A, General Topics. 1990; 24(5):1061–1081. DOI:10.1016/0960-1686(90)90074-W.
9. **Mirsalikhov K.M., Gribkov A.M., Chichirova N.D.** Analytical review of methods for selecting optimal parameters of chimneys. Problemy Energetiki. 2021; 23(1):131–145. (In Russ.)
10. **Gribkov A.M., Zroychikov N.A., Prokhorov V.B.** Formation of the smoke plume trajectory in the presence of self-envelopment of the chimney head. Teploenergetika. 2017; (10):51–59. DOI:10.1134/S0040363617100034. (In Russ.)

11. **Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Khodzher T.V., Chipanina E.V.** Far transfer of trails, ejected by regional electric power stations to the South Baikal water area. *Optika Atmosfery i Okeana*. 2017; 30(1):60–65. (In Russ.)
12. **Obolkin V., Molozhnikova E., Shikhovtsev M., Netsvetaeva O., Khodzher T.** Nitrogen oxides in the atmosphere of lake Baikal: sources, automatic monitoring, and environmental risks. *Atmosphere*. 2021; (12):1348. DOI:10.3390/atmos12101348.
13. *Atmosfernaya turbulentnost' i modelirovanie rasprostraneniya primesey* [Atmospheric turbulence and modelling of pollutant propagation]. Ed. by F.T.M. Nystad and H. Van Dop. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985: 351. (In Russ.)
14. **Byzova N.L., Garger E.K., Ivanov V.N.** Eksperimental'nye issledovaniya atmosferno diffuzii i raschety rasseyaniya primesi [Experimental studies of atmospheric diffusion and calculations of impurity dispersion]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991: 278. (In Russ.)
15. **Tohidi A., Kaye N.** Highly buoyant bent-over plumes in a boundary layer. *Atmospheric Environment*. 2016; (131):97–114.
16. **Bhargava A.** Effect of wind speed and stack height on plume rise using different equations. *International Journal of Engineering Science and Computing*. 2016; 6(4):3228–3234. DOI:10.4010/2016.748.
17. Gosudarstvennye doklady “O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy v Irkutskoy oblasti” [State reports “On the state and protection of the environment in the Irkutsk region”]. Available at: <https://irkobl.ru/region/ecology/doklad> (accessed 09.21.23). (In Russ.)
18. **Arguchintseva A.V., Godvinskaya I.G., Akhtimankina A.V.** Atmospheric air pollution by thermal power plants in Irkutsk. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*. 2011; 4(1):33–47. (In Russ.)
19. **Verkhozina E.V., Safarov A.S., Makukhin V.L., Verkhozina V.A.** The influence of emissions from the Novo-Irkutsk thermal power plant on air pollution in Irkutsk. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2016; (1):50–55. (In Russ.)
20. **Fadova A.A., Kucherik G.V., Zablotskaya E.V.** Assessment of the quality of atmospheric air in the area where the main site of the joint-stock company “Inter RAO — Electric Power Plants” is located. *Power Plants and Technologies*. 2020; 6(2):138–145. (In Russ.)
21. **Aloyan A.E.** Modelirovanie dinamiki i kinetiki gazovykh primesey i aerorozley v atmosfere [Modelling the dynamics and kinetics of gaseous impurities and aerosols in the atmosphere]. Moscow: Nauka; 2008: 405. (In Russ.)
22. **Chanady G.T.** Some observations on smoke plumes. *International Journal of Air and Water Pollution*. 1961; (4):47–51.
23. **Ivanov E.A., Klepikova N.V., Troyanova N.I., Freimundt G.N.** Methods for calculating the rise of a torch from a ventilation pipe. *Apparatura i Novosti Radiacionnyh Izmerenij (ANRI)*. 2014; (4):18–32. (In Russ.)
24. **Raputa V.F., Lezhenin A.A., Amikishieva R.A.** Estimates of the rise height and buoyancy flow of smoke plumes from high-altitude chimneys of thermal power plants based on satellite information. *Optika Atmosfery i Okeana*. 2023; 36(6):482–486. DOI:10.15372/AOO20230608. (In Russ.)
25. **Vankevich P.E., Ermakova T.S., Sofiev M.A.** Comparison of the results of calculating the height of the rise of a plume of smoke from forest fires using semi-empirical formulas and the one-dimensional BUOYANT model. *Uchenye Zapiski*. 2011; (19):61–70. (In Russ.)
26. **Raputa V.F., Lezhenin A.A.** Estimating the height of the smoke plume from satellite images. *Optika Atmosfery i Okeana*. 2020; 33(6):471–475. DOI:10.15372/AOO20200609. (In Russ.)