

# USE OF SATELLITE INFORMATION IN THE STUDY OF PROCESSES OF POLLUTION TRANSPORT IN THE BOUNDARY LAYER OF THE ATMOSPHERE

Anatoliy A. Lezhenin<sup>(1)</sup>, Vladimir F. Raputa<sup>(1)</sup>, Tatiana V. Yaroslavtseva<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Novosibirsk

<sup>(2)</sup> Scientific Research Institute of Hygiene of Rospotrebnadzor, Novosibirsk

**Abstract:** Issues of the use of satellite data in models of the parameter estimation of pollution sources are discussed. Methods of determination of a height of smoke plume are proposed. According to the winter satellite images, an effective height of raising plume of smoke from large combined heat and power plant of the city of Barnaul is estimated. The accuracy of the estimation obtained of an additional height of rising of a smoke plume based on the standard ratios has been carried out using conventional approaches.

*Keywords: satellite images pictures, lower atmosphere, plume of smoke, effective height of a source, buoyancy stream, assessment, parameter*

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Леженин А.А.<sup>(1)</sup>, Рапута В.Ф.<sup>(1)</sup>, Ярославцева Т.В.<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
г. Новосибирск

<sup>(2)</sup> Новосибирский институт гигиены Роспотребнадзора, г. Новосибирск

Обсуждаются вопросы использования спутниковых данных в моделях оценивания параметров источников примесей. Предложены методы определения высоты дымовых шлейфов. По зимним спутниковым снимкам г. Барнаула выполнены оценки эффективной высоты подъема факелов для крупной ТЭЦ города. Точность оценивания дополнительной высоты подъема дымового факела проведена на основе общепринятых соотношений, включающих в себя тепловой поток плавучести и динамический импульс выброса.

*Ключевые слова:* спутниковые снимки, нижняя атмосфера, дымовой шлейф, эффективная высота источника, поток плавучести, динамический импульс, оценка, параметр.

**Введение.** Для решения проблем окружающей среды важную роль играют как экспериментальные, так и теоретические исследования загрязнения атмосферы. Они позволяют определять уровни воздействия на биосферу и климатическую систему, также проводить оценки риска здоровья населения [1 - 3].

Дымовые шлейфы выбросов от труб промышленных предприятий и крупных ТЭЦ хорошо прослеживаются на спутниковых снимках [4, 5]. Направления и скорости ветра на высотах выбросов визуализируются траекториями дымовых факелов. Снимки из космоса дают возможность отслеживать шлейфы дыма на большие расстояния. Такая картина наиболее характерна для зимних условий [2].

Модели оценивания высот подъёма дымовых шлейфов базируются на уравнениях гидротермодинамики атмосферы [6 - 8]. Для получения оценок высоты необходимо привлечение информации о метеорологических условиях и параметрах источников выбросов примеси [9 - 11]. Отметим, что интенсивность выброса и эффективная высота подъема дымового шлейфа требуют большей точности определения. Важное значение имеет информация о вертикальном профиле ветра. Она может быть получена с использованием как расчетных методов, так и данных спутниковых, аэрологических и метеорологических наблюдений. Для решения поставленных задач необходима разработка математических моделей оценивания параметров с привлечением информации с различных систем наблюдений состояния атмосферы и модельных описаний процессов переноса и диффузии примеси [12]. В конечном итоге это приведет к повышению точности определения полей атмосферного загрязнения.

Целью работы является разработка методов оценки параметров источников дымовых выбросов с использованием спутниковой информации.

**Материалы и методы исследований.** Зимние спутниковые снимки территории г. Барнаула послужили базой для проведения исследований. На них хорошо фиксируются выбросы от основных источников атмосферных примесей, включая ТЭЦ-2, ТЭЦ-3.

На рис. 1 представлен спутниковый снимок г. Барнаула, полученный в Сибирском центре ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА» (<http://www.rcpod.ru>).

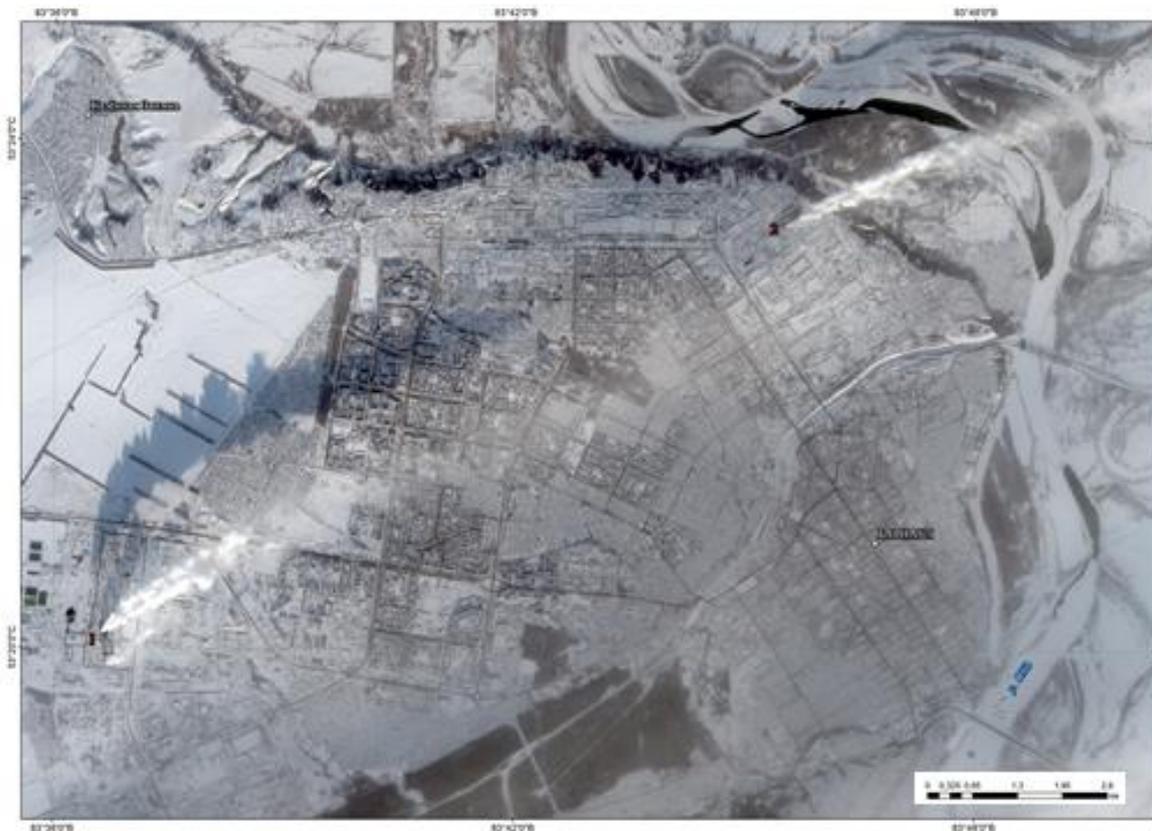


Рис. 1. Спутниковый снимок г. Барнаула за 19 ноября 2018 года на 12 часов 41 мин. местного времени с ИСЗ «Sentinel-2В» № 1 (1-ТЭЦ-3, 2-ТЭЦ-2)

Предварительный анализ показывает, что направления выносов примеси от труб ТЭЦ-2, ТЭЦ-3 совпадают, несмотря на существенное различие в высоте источников. Перенос дымовых шлейфов происходит в северо-восточном направлении. Тени шлейфов на земную поверхность значительно смещены от их траекторий. Это указывает на наличие слабого ветра в атмосферном пограничном слое, что приводит к значительной высоте подъема газозвушной смеси, достигающей нескольких сотен метров. Таким образом, дымовые струи находятся на высотах зимнего пограничного слоя атмосферы.

На рис. 2 приведен спутниковый снимок г. Барнаула за 2 декабря 2018 года (ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА», <http://www.rcpod.ru>).



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

Анализ рис. 2 показывает схожий характер переноса примеси, изображенном на рис. 1. В то же время, наблюдается заметное различие в направлениях выноса выбросов от разновысоких труб ТЭЦ-2, ТЭЦ-3. Это объясняется правым поворотом ветра с высотой в пограничном слое атмосферы [13]. Угол между траекториями шлейфов составляет 30 - 35 градусов. Тени шлейфов на земную поверхность также значительно удалены от их траекторий.

Для анализа метеорологических условий в течение 19 ноября и 2 декабря 2018 г. использованы данные аэрологической станции г. Барнаула. Станция расположена на высоте 159 м над уровнем моря. В табл. 1, 2 представлены распределения по высоте основных метеорологических величин: давления, температуры, направления и скорости ветра в 07 и 19 часов местного времени (00 и 12 UTC).

Таблица 1. Параметры нижней атмосферы по данным аэрологической станции г. Барнаула на 19 ноября 2018 г.

Время, UTC	Высота над уровнем моря, м	Давление, hPa	Температура, °C	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
00	159	1012	- 20,1	220	1
	232	1000	- 16,1	225	1
	355	984	- 10,1	232	2
	497	966	- 10,1	240	3
	658	946	- 10,1	235	4
	691	942	- 10,7	237	4
	831	925	- 11,1	245	4
	159	1017	- 11,7	230	1
	275	1000	- 10,1	225	3
	376	987	- 9,3	220	4

<b>12</b>	702	946	- 10,6	250	7
	784	936	- 10,9	250	8
	834	930	- 11,1	250	8
	975	925	- 10,9	250	8

Таблица 2. Параметры нижней атмосферы по данным аэрологической станции г. Барнаула на 2 декабря 2018 г.

Время, UTC	Высота над уровнем моря, м	Давление, hPa	Температура, °C	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
<b>00</b>	159	1019	- 19,9	190	1
	283	1000	- 17,7	195	3
	434	980	- 16,9	195	4
	511	970	- 16,7	211	5
	620	956	- 16,7	235	7
	779	936	- 17,6	260	10
	867	925	- 18,1	255	8
<b>12</b>	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

Из табл.1, 2 следует, что в течение дня в пограничном слое атмосферы температурная стратификация была близка к нейтральной и наблюдались слабые ветра юго-западного направления, в то же время, в приземном слое прослеживалась температурная инверсия. В табл. 3 приведены основные данные метеостанции г. Барнаула за 19 ноября 2018 г.

Таблица 3. Данные метеорологической станции г. Барнаула (индекс ВМО 29838) за 19 ноября 2018 г.

Время UTC	Давление, hPa	Температура, °C	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
<b>00</b>	1032,0	-14,7	штиль	0
<b>03</b>	1033,5	-14,4	штиль	0
<b>06</b>	1035,0	-12,3	штиль	0
<b>09</b>	1035,5	-11,0	штиль	0
<b>12</b>	1036,8	-12,9	180	1
<b>15</b>	1037,0	-12,1	180	1
<b>18</b>	1036,3	-10,2	штиль	0
<b>21</b>	1034,3	-8,4	180	1

Из табл. 3 следует, что в течение суток наблюдались слабые ветра и штилевые условия. Суточный ход атмосферного давления и температуры был слабо выражен. Аналогичная ситуация наблюдалась 2-го декабря 2018 г.

Для моделирования полей атмосферного загрязнения требуется задание характеристик источников примесей и информация о метеорологических условиях [9, 13]. Основными параметрами источника являются геометрическая высота, диаметр трубы, мощность эмиссии, температура и скорость выбрасываемой газо- воздушной смеси. Большое влияние на процес-

сы переноса и диффузии примеси оказывают метеорологические условия: скорость ветра, температурная и влажностная стратификация атмосферы [3, 9, 10].

Существует множество подходов для определения эффективной высоты источника [9, 14, 15]. Фактической высотой источника выброса является его эффективная высота

$$h_{эф} = h_{тр} + \Delta h \quad , \quad (1)$$

где  $h_{тр}$  – высота трубы,  $\Delta h$  – добавка, обусловленная скоростью выброса примеси и тепловым потоком плавучести.

При нейтральной стратификации вычисление  $\Delta h$  производится по формуле [9]

$$\Delta h = a \frac{w_0}{U} D_0 + b \frac{\Phi}{U^3} \quad , \quad \Phi = g w_0 \frac{D_0^2 \Delta T}{4 T_a} \quad , \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $w_0$  – скорость выброса примеси в атмосферу,  $U$  – скорость ветра,  $D_0$  – диаметр трубы,  $\Phi$  – поток плавучести,  $\Delta T$  – разность между температурой исходящих газов и температурой атмосферы  $T_a$ .

При измерении скорости ветра на уровне флюгера:  $a = 1,9$  ,  $b = 4,95$  . При измерении скорости ветра на высоте источника:  $a = 1,5$  ,  $b = 400$  [9].

**Результаты и обсуждения.** В табл. 4 приведены результаты оценивания высот подъёма дымового шлейфа, выполненные на основе спутниковой информации, представленной на рис. 1, 2. Эффективная высота источника рассчитывается по высоте солнца над горизонтом и положением тени дымовой струи на спутниковом снимке.

Таблица 4. Оценки по спутниковым снимкам высот подъёма дымовой струи от высотной трубы ТЭЦ – 3 г. Барнаула

Время снимка	Угловая высота Солнца, град	Расстояние до верхней кромки тени струи, км	Оценка высоты подъёма струи, м
19.11.2018 г. 5:41 UTC	17.2	2.44	745
02.12.2018 г. 4:07 UTC	9.88	2.65	467

Анализ табл. 4 показывает, что угловая высота Солнца в рассматриваемые моменты времени была относительно небольшой. В следствие этого измеренные проекции дымовых шлейфов на земную поверхность превышали 2 км. По ним были вычислены высоты подъёма шлейфов.

Расчёт дополнительных высот подъёма выбросов ТЭЦ проводился также по формулам (1) -(2). Параметры выбросов в атмосферу от высотной трубы ТЭЦ-3 г. Барнаула взяты из тома ПДВ. Высота источника составляет 230 м., диаметр трубы равен 7,2 м, объем выходящей газо-воздушной смеси – 392,3 м<sup>3</sup>/с, температура смеси – 120°С. Рассчитанная по этим данным скорость исходящих газов из трубы  $w_0 = 9,6$  м/с. Результаты расчетов высоты подъёма дымового шлейфа представлены в табл. 5.

Таблица 5. Оценки высот подъёма дымовых шлейфов ТЭЦ-3, выполненные по формулам (1) - (2)

Скорость ветра, м/с	Дополнительная высота, м	Эффективная высота, м
1	3276	3506
2	459	685
3	160	390
4	82	312

Исходя из данных о метеорологических условиях, приведенных в табл. 1, 2 величина  $\Delta T$  была задана 135 °С. Расчеты выполнены для значений скоростей ветра 1, 2, 3, 4 м/с, которые типичны для зимних метеоусловий г. Барнаула.

Совместный анализ табл. 4, 5 показывает, что приемлемые значения дополнительных высот подъема шлейфа получаются лишь при скоростях ветра больше 2 м/с.

**Заключение.** Проведённое исследование показало возможность использования спутниковой информации о дымовых шлейфах для анализа процессов распространения примесей в атмосфере. Предложен косвенный метод определения эффективной высоты подъема примесей от дымовых труб. Использование этого метода не предполагает наличия информации о текущих внутренних характеристиках источника: динамического импульса и температуры исходящей из трубы газо-воздушной смеси. На ряде примеров показано, что в условиях слабых ветров предпочтительно применение предложенного метода оценивания, поскольку расчёты по общепринятым методикам дают явно нереальные оценки высот подъема и не могут быть полезны при проведении моделировании процессов распространения примесей в атмосфере. Следует также отметить наибольшую эффективность метода применительно к зимним условиям. В этот период времени предприятия теплоэнергетики работают с максимальной нагрузкой, а наличие снежного покрова повышает контрастность проекции шлейфа на поверхность земли.

Для более полного использования спутниковой информации о дымовых шлейфах необходимо проведение дальнейших исследований по численному анализу процессов на участках активного подъема дымовых смесей. В итоге это позволит уточнить внутренние параметры источников выбросов и повысить эффективность моделирования процессов антропогенного загрязнения атмосферы.

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.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *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.
- [2] *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.
- [3] *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.

- [4] *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.
- [5] *Кондратьев К.Я., Григорьев Ал.А., Покровский О.М., Шалина Е.В.* Космическое дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 216 с.
- [6] *Gao Z., Bresson R., Qu Y., Milliez M., Munck C., Carissimo B.* High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse // *Urban Climate.* 2018. Vol. 23. P. 114–130.
- [7] *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.
- [8] *Fallah-Shorshani M., Shekarizfard 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.
- [9] *Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н.* Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 278 с.
- [10] *Mikhailuta S.V., Lezhenin A.A., Pitt A., Taseiko O.V.* Urban wind fields: Phenomena in transformation // *Urban Climate.* 2017. Vol. 19. P. 122–140.
- [11] *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.
- [12] *Рапута В.Ф., Шлычков В.А., Леженин А.А., Романов А.Н., Ярославцева Т.В.* Численный анализ данных аэрозольных выпадений примесей от высотного источника // *Оптика атмосферы и океана.* 2014. Т. 27. № 8. С. 713–718.
- [13] *Зилитинкевич С.С.* Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 252 с.
- [14] Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе // Утверждены приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273.
- [15] *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.