

## Оценка высоты подъема дымового шлейфа по спутниковым снимкам

В.Ф. Рапута, А.А. Леженин\*

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6*

Поступила в редакцию 10.02.2020 г.

Предложен метод определения высоты подъема дымовых шлейфов от труб промышленных предприятий с использованием спутниковой информации. На примере крупной ТЭЦ г. Новосибирска проведена его апробация. Выполнено сравнение полученных значений высоты подъема с результатами расчетов по общепринятым методикам. Обсуждаются возможности применения рассматриваемого подхода для различных метеорологических условий и характеристик подстилающей поверхности.

*Ключевые слова:* атмосфера, примесь, источники выброса, поток плавучести, спутниковая информация; *atmosphere, pollution, emission sources, buoyancy flow, satellite information.*

### Введение

Дымовые шлейфы от природных и антропогенных источников наглядно демонстрируют процессы атмосферного загрязнения [1–5]. По ним можно определить направление ветра, высоту подъема выбрасываемой в атмосферу газовоздушной смеси. В зависимости от интенсивности выбросов и метеорологических условий протяженность дымовых шлейфов может достигать нескольких десятков километров.

Для применения методов численного моделирования переноса примеси в атмосфере требуется задание значительных объемов входной информации, включающей сведения о метеорологических условиях и параметрах источников выбросов [6–10]. К основным характеристикам источника относятся: высота трубы, интенсивность выброса, температура и скорость исходящей газовоздушной смеси. Поле приземной концентрации примеси существенно зависит от высоты подъема дымового шлейфа, которая, в свою очередь, связана с текущими метеорологическими условиями, динамическими и тепловыми параметрами источника. При проведении таких расчетов необходимо также учитывать вертикальное распределение с высотой температуры, влажности воздуха и скорости ветра [8, 9, 11–13]. Для определения высоты подъема выбросов могут быть использованы визуальные наблюдения дымовых шлейфов, расчетные методики, гидродинамические модели [8, 14–19]. Однако в настоящее время ограничены возможности проведения наблюдений за переносом дымовых шлейфов с помощью наземных средств.

Для наблюдения за дымовыми шлейфами при отсутствии облачности можно использовать косми-

ческие снимки, которые позволяют получить полномасштабную картину процессов распространения примеси [1, 4, 20]. Наиболее целесообразно применение спутниковой информации в условиях слабых ветров и температурных инверсий, при которых на снимках отчетливо прослеживаются траектории дымовых выбросов. Расчеты по стандартным методикам [8, 14, 17] для слабых ветров дают большой разброс в оценках высоты подъема выбрасываемой из трубы газовоздушной смеси.

Проекция дымового шлейфа (тень) на поверхность земли — также информативная характеристика при определении высоты подъема примеси. Контрастность тени зависит от прозрачности атмосферы и степени однородности подстилающей поверхности.

Цель настоящей работы — оценивание высоты подъема дымовых струй от труб промышленных предприятий с использованием спутниковой информации о траекториях шлейфов и положении их тени на земной поверхности.

### Объекты и методы исследования

Материалами исследования служили зимние спутниковые снимки территории г. Новосибирска. На рис. 1 приведен снимок левобережной части г. Новосибирска с ИСЗ «Канопус-В» № 4 за 1 февраля 2019 г. в 12:10 по местному времени, полученный в Сибирском центре ФГБУ «НИЦ «ПЛАНЕТА»» (<http://www.rcpod.ru>). На снимке отчетливо прослеживаются траектории дымовых выбросов от труб ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, высота которых составляет 120 м, а диаметр — 8,2 м.

Анализ снимка показывает однотипный характер направления выносов примеси от труб рассматриваемых ТЭЦ. Дымовые шлейфы от труб ТЭЦ-2, ТЭЦ-3 сносятся в южном направлении. Судя

\* Владимир Федотович Рапута (raputa@sscc.ru); Анатолий Александрович Леженин (lezhenin@ommfao.sccc.ru).

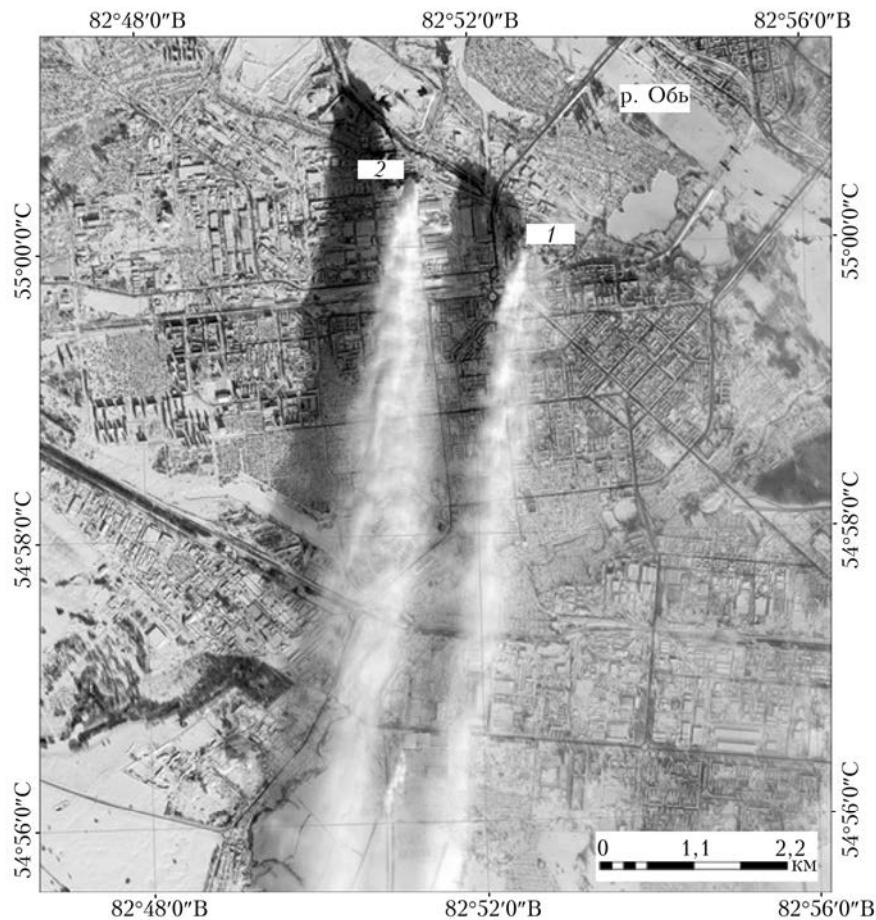


Рис. 1. Спутниковый снимок г. Новосибирска от 1 февраля 2019 г. с ИСЗ «Канопус-В» № 4: 1 – ТЭЦ-2, 2 – ТЭЦ-3

по положению теней, подъем газозвушной смеси, выбрасываемой из труб, довольно значителен. На снимке контрастно фиксируется активная стадия распространения примеси, обусловленная начальным динамическим импульсом и потоком плавучести, и стадия пассивного ее переноса ветровыми потоками. Дымовые струи достигают высот зимнего пограничного слоя атмосферы. Такая ситуация, как правило, наблюдается при слабых ветрах в нижней атмосфере.

Как показал анализ синоптических карт, 1 февраля 2019 г. погоду в Западной Сибири определял малоподвижный антициклон с низкими температурами воздуха. Новосибирск находился на юго-восточной периферии антициклона в зоне слабых северных ветров.

На рис. 2 и 3 показаны распределения температуры и скорости ветра с высотой по данным аэрологической станции г. Новосибирска (индекс ВМО 29634) на 1 февраля 2019 г. в 00:00 и 12:00 UTC, что соответствует 07:00 и 19:00 местного времени. Аэрологическая станция расположена на высоте 143 м н.у.м.

Из рис. 2 следует, что в 00:00 UTC в слое выше труб ТЭЦ температурная стратификация была близка к нейтральной, а у поверхности земли наблюдалось инверсионное распределение температу-

ры. В 12:00 UTC до высоты ~200 м от поверхности земли сохранялась слабая неустойчивость атмосферы, а выше – инверсия температуры.

В табл. 1 представлены результаты измерений направления, скорости ветра и температуры воздуха на метеорологической станции Огурцово, расположенной вблизи г. Новосибирска.

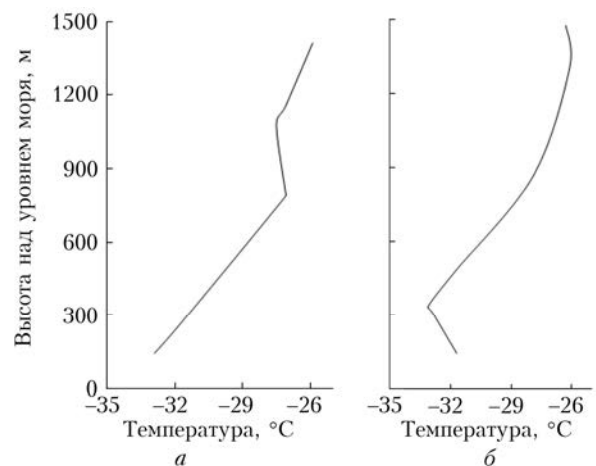


Рис. 2. Изменение температуры с высотой 1 февраля 2019 г. по данным аэрологической станции г. Новосибирска в 00:00 (а) и 12:00 UTC (б)

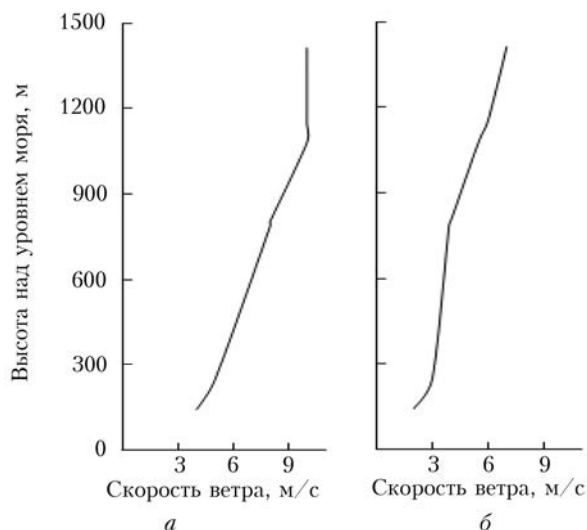


Рис. 3. Распределение скорости ветра с высотой 1 февраля 2019 г. по данным аэрологической станции г. Новосибирска в 00:00 (а) и 12:00 UTC (б)

Таблица 1  
Данные метеостанции Огурцово (индекс 29638)  
на 1 февраля 2019 г.

Время, UTC	Направление ветра	Скорость ветра, м/с	Температура, °С
00:00	С	2	-33,3
03:00	С	2	-34,5
06:00	Ю	1	-32,5
09:00	З	3	-31,9
12:00	З	1	-34,3
15:00	Ю	2	-36,8
18:00	Ю	1	-39,2
21:00	Ю	1	-38,5

Видно, что в течение рассматриваемых суток наблюдались слабые ветра разных направлений и низкие температуры воздуха со слабовыраженным суточным ходом. Анализ аэрологической информации показал, что на высотах пограничного слоя атмосферы преобладали слабые ветра северного направления.

## Методики оценки высоты подъема дымового шлейфа

Существует ряд подходов для определения высоты подъема дымового шлейфа. В инженерных приложениях применяются методики, основанные на упрощенных формулах [8, 17–19, 21]. Более универсальный подход базируется на совместном решении уравнений гидротермодинамики атмосферы и уравнения переноса и диффузии примеси [14, 15, 22].

Эффективная высота подъема дымового шлейфа определяется как сумма двух слагаемых [8, 14, 17, 23]:

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

где  $h_{\text{тр}}$  – высота трубы;  $\Delta h$  – дополнительная высота подъема газозвушной смеси над устьем трубы за счет динамического импульса и теплового потока плавучести.

При температурной стратификации атмосферы, близкой к нейтральной,  $\Delta h$  вычисляется по формуле [8, 23]:

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

где  $g$  – ускорение силы тяжести;  $w_0$  – скорость выхода газозвушной смеси из трубы;  $U$  – скорость ветра;  $D_0$  – внутренний диаметр трубы;  $F$  – поток плавучести;  $\Delta T$  – разность между температурой исходящих газов и температурой атмосферы  $T_a$ .

Согласно [8, 23],  $a = 1,9$ ,  $b = 4,95$  при измерении скорости ветра на уровне флюгера;  $a = 1,5$ ,  $b = 400$  при измерении ветра на высоте источника ( $> 50$  м).

Для определения высоты подъема дымовых шлейфов по спутниковым снимкам желательно, чтобы в это время отсутствовала облачность, поверхность земли была достаточно однородной для обеспечения контрастности тени шлейфа, а направление ветра не совпадало с азимутом Солнца. Наиболее предпочтительны снимки зимнего периода, когда достаточную однородность поверхности земли обеспечивает снежный покров. Также в этот период существенно возрастает интенсивность выбросов объектов теплоэнергетики. Особое внимание следует уделять ситуациям со слабыми ветрами. В этих случаях расчеты высоты подъема по формулам (1), (2) характеризуются значительным разбросом.

Определение высоты подъема дымового шлейфа по спутниковому снимку проводится в несколько этапов.

1. Устанавливается участок пассивного переноса шлейфа по направлению ветра, определяемый по расположению тени дымового шлейфа на поверхности земли.

2. На пассивном участке траектории дымовой струи по азимуту Солнца измеряется расстояние от выбранной точки верхней части шлейфа до дальней кромки его тени. По сечению в этой точке оценивается радиус дымовой струи.

3. По этому расстоянию с использованием угловой высоты Солнца вычисляется высота верхней кромки факела, а по ней, с вычетом радиуса дымовой струи, – эффективная высота подъема шлейфа.

*Замечание.* Информация о параметрах источников  $w_0$  и  $\Delta T$  носит, как правило, усредненный характер. Они могут существенно изменяться во времени. Соотношения (2) позволяют уточнить значение  $w_0$  или  $\Delta T$  на момент снимка при известном  $\Delta h$ , которое может быть определено с использованием описанной процедуры. При этом необходима информация о скорости ветра и температуре атмосферы.

## Результаты

Расчет дополнительной высоты подъема дымового шлейфа от трубы ТЭЦ-3 г. Новосибирска проводился двумя способами. В первом случае использовался спутниковый снимок (см. рис. 1) и процедура 1–3. По углу высоты Солнца над горизонтом, его азимуту и измеренным проекциям дымового шлейфа от трубы ТЭЦ-3 на поверхность земли была определена высота подъема дымовой смеси. В рассматриваемом случае высота Солнца над горизонтом достигала  $15^\circ$ , его азимут был равен  $157^\circ$ . Расстояние от шлейфа ТЭЦ-3 до верхней кромки тени составило 2200 м. Рассчитанная по этим значениям эффективная высота подъема дымовой струи – 310 м. С учетом геометрической высоты трубы дополнительная высота подъема шлейфа составила 190 м. Значительный подъем примеси связан с особенностями метеорологических условий в нижней атмосфере города и тепловыми характеристиками источника.

Во втором случае оценки дополнительной высоты подъема дымового шлейфа от трубы ТЭЦ-3 выполнены по формулам (1), (2), согласно которым при расчете  $\Delta h$  существенную роль играет точность задания скорости ветра. При слабых ветрах для оценок  $\Delta h$  характерен большой разброс значений. В табл. 2 приведены результаты расчетов  $\Delta h$  с заданием скоростей ветра как на высоте флюгера, так и на высоте источника. Вычисления проводились для  $\omega_0 = 6$  м/с и температуры исходящей газовой смеси  $120^\circ\text{C}$ . Согласно аэрологическим данным (рис. 2)  $\Delta T = 150^\circ\text{C}$ . Рассчитанный для этих условий поток плавучести равен  $610 \text{ м}^4/\text{с}^3$ .

Таблица 2

Высоты подъема дымового шлейфа от трубы ТЭЦ-3, вычисленные по формулам (2)

Скорость ветра на флюгере, м/с	2	3	4
Дополнительная высота, м	424	143	71
Скорость ветра на высоте источника, м/с	6	8	10
Дополнительная высота, м	1142	486	251

При расчетах  $\Delta h$  скорость ветра задавалась с учетом имеющихся данных метеорологических и аэрологических наблюдений, приведенных в табл. 1 и на рис. 3. Анализ табл. 2 показывает, что при слабых ветрах ( $< 2$  м/с на флюгере и  $< 6$  м/с на высоте источника) полученные значения дополнительной высоты подъема дымового шлейфа существенно отличаются от наблюдаемой. Более реалистичные высоты подъема шлейфа получаются при скоростях ветра на флюгере  $> 2$  м/с.

При небольших скоростях ветра результаты расчетов высот подъема дымового шлейфа по формуле (2) характеризуются значительной неопределенностью. В конкретные моменты времени параметры источника ( $\omega_0$ ,  $\Delta T$ ) могут заметно отличаться

от средних значений и, как следствие, приводить к дополнительным погрешностям определения  $\Delta h$ . В то же время оценка эффективной высоты источника по космоснимку является более объективной.

## Заключение

Предложен метод оценивания дополнительной высоты подъема шлейфа, основанный на использовании спутниковой информации. Наиболее целесообразно применение этого метода при слабых ветрах, устойчивой или нейтральной температурной стратификации в нижней атмосфере. В таких условиях видимая часть траекторий дымовых шлейфов от источников выбросов достаточно протяженная и при отсутствии облачности возникают благоприятные возможности для ее визуализации на космических снимках. Однородность подстилающей поверхности обеспечивает контрастность проекции шлейфа.

Проведена апробация предложенного подхода на примере крупной ТЭЦ г. Новосибирска. Выполнено сравнение с результатами расчетов дополнительной высоты подъема шлейфа с использованием общепринятых методик. При неполной информации об источнике примеси имеется возможность оценить динамические и тепловые характеристики выбросов на основе спутниковых наблюдений. Подобная ситуация может возникнуть при аварийных выбросах. Отметим, что апробация метода проводилась для зимних условий. Наличие снежного покрова обеспечило достаточную контрастность тени шлейфа на земной поверхности.

Многочисленные примеры фиксации на космических снимках дымовых выбросов в атмосферу от антропогенных и природных источников указывают на возможности широкого использования этих наблюдений для исследования распространения примесей. Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного использования различных видов информации и расчетных методов для повышения контроля процессов загрязнения атмосферы.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ и Правительства Новосибирской области (№ 19-47-540008), Госзадания ИВМиМГ СО РАН № 0315-2019-0004.

1. 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 // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 2. С. 55–66.
2. Ермакова Т.С., Ванкевич Р.Е., Рудакова Ю.Л. Оценка трехмерного пространственного распределения полей аэрозоля в районах интенсивного задымления от лесных пожаров на основе данных дистанционного зондирования из космоса // Уч. зап. РГГМУ. 2013. № 31. С. 49–56.
3. Кондратьев К.Я., Григорьев Ал.А., Покровский О.М., Шалина Е.В. Космическое дистанционное зондиро-

- ние атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 216 с.
4. *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.
  5. *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.
  6. *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 атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 1. С. 60–65; *Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Khodzher T.V., Chipanina E.V.* Long-range transport of plumes of atmospheric emissions from regional coal power plants to the South Baikal water basin // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 4. P. 360–365.
  7. *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. V. 119. P. 348–361.
  8. *Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н.* Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 278 с.
  9. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей* / Ф.Т.М. Ньистад, Х. Ван Доп (ред.). Л.: Гидрометеониздат, 1985. 351 с.
  10. *Алексеева М.Н., Яценко И.Г.* Алгоритм детектирования факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа и оценка объемов выбросов вредных веществ // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 6. С. 490–494.
  11. *Зилитинкевич С.С.* Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои. М.: Физматлит, 2013. 252 с.
  12. *Baas P., van de Wiel B.J.H., van der Linden S.J.A., Bosveld F.C.* From near-neutral to strongly stratified: adequately modelling the clear-sky nocturnal boundary layer at Cabauw // *Bound.-Layer Meteorol.* 2018. V. 166. P. 217–238.
  13. *Одинцов С.Л.* Развитие и применение акустических средств диагностики атмосферного пограничного слоя // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 9. С. 786–791; *Odintsov S.L.* Development and use of acoustic tools for diagnostics of the atmospheric boundary layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 1. P. 104–108.
  14. *Берлянд М.Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1975. 448 с.
  15. *Priestley C.H.B., Ball F.K.* Continuous convection from an isolated source of heat // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 1955. V. 81. P. 144–157.
  16. *Tohidi A., Kaye N.B.* Highly buoyant bent-over plumes in a boundary layer // *Atmos. Environ.* 2016. V. 131. P. 97–114.
  17. *Об утверждении методов* расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе // *Приказ Минприроды России от 6.06.2017 № 273.*
  18. *Грибков А.М., Тюклин Д.С.* Подъем дымовых газов при отсутствии ветра // *Электрические станции*. 2009. № 10. С. 23–27.
  19. *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 // *Уч. зап. РГГМУ*. 2011. № 19. С. 61–70.
  20. *Тарасенков М.В., Кирос И.В., Белов В.В.* Наблюдение земной поверхности из космоса через просвет в облачном поле // *Оптика атмосф. и океана*. 2016. Т. 29, № 9. С. 767–771; *Tarasenkov M.V., Kirnos I.V., Belov V.V.* Observation of the Earth's surface from the space through a gap in a cloud field // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 1. P. 39–43.
  21. *Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Прохоров В.Б., Фадеев С.А.* Исследование подъема дымового факела из газотводящих труб ТЭС // *Теплоэнергетика*. 1984. № 1. С. 57–59.
  22. *Ермакова Т.С., Ванкевич Р.Е., Колесников И.А.* Численное моделирование распространения дымовых аэрозолей за пределы пограничного слоя атмосферы // *Уч. зап. РГГМУ*. 2013. № 31. С. 37–48.
  23. *Метеорология и атомная энергия* / Д. Слейд (ред.). Л.: Гидрометеониздат, 1971. 647 с.

**V.F. Raputa, A.A. Lezhenin. Estimation of the height of smoke plumes from satellite imagery.**

A method for determining the height of smoke plumes from pipes of industrial enterprises from satellite imagery is suggested. It is tested on the example of the thermal power station in Novosibirsk. The results are compared with the results of calculations by conventional methods. Possibilities of application of this approach to different meteorological conditions and characteristics of underlying surface are discussed.