

## ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 502.3+528.854.2+551.511

# Оценка динамических и тепловых характеристик подъема дымового шлейфа по спутниковой информации

В.Ф. Рапута, А.А. Леженин\*

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

Поступила в редакцию 20.01.2021 г.

Разработана численная модель восстановления характеристик активной фазы подъема дымового шлейфа по данным наблюдений. Базовыми условиями в модели оценивания являются решения уравнений гидротермодинамики атмосферы. С использованием спутниковой информации проведено численное восстановление изменения температуры и скорости подъема газозвушной смеси от высотной трубы Гусиноозерской ГРЭС (Забайкалье). Показана эффективность использования предложенного подхода в зимние месяцы, для которых характерны большие объемы выбросов дымовых смесей и за счет снежного покрова обеспечивается высокая контрастность теней шлейфов на земную поверхность.

*Ключевые слова:* спутниковые снимки, дымовой шлейф, поток плавучести, атмосфера, уравнения гидротермодинамики, высота подъема примеси; *satellite images, smoke plume, buoyancy flux, atmosphere, equations of hydrothermodynamics, height of impurity rise.*

### Введение

Достаточно полная картина распространения дыма от труб крупных промышленных предприятий и ТЭЦ фиксируется на снимках из космоса [1–3]. Они позволяют детально проследить активную фазу подъема дымовых шлейфов и их дальнейший пассивный перенос в атмосфере [4, 5]. Траектории шлейфов зависят от скорости и направления ветра. При определенных метеорологических условиях их протяженность может достигать нескольких десятков километров.

Методы численного решения уравнений гидротермодинамики атмосферы дают возможность описать процессы распространения дымовых смесей в локальном и региональном масштабах [4, 6–8]. Но для этого необходимо использование больших объемов информации, включающей сведения о текущих метеорологических условиях и характеристиках источников выбросов примеси [2, 6, 9, 10]. Как правило, часть параметров источников либо отсутствует, либо требует существенного уточнения. К ним, в частности, следует отнести высоту подъема дымового шлейфа и интенсивность эмиссии источника. Необходимо также детальная информация о высотном профиле ветра.

Цель настоящей работы – разработка моделей и методов оценивания характеристик подъема дымовых выбросов примесей с использованием решений уравнений гидротермодинамики атмосферы и пере-

носа примеси [7, 8, 11, 12.], а также информации, получаемой со спутниковых снимков, аэрологических и метеорологических станций.

### 1. Объекты и методы исследования

Материалами исследований послужили зимние спутниковые снимки района расположения Гусиноозерской ГРЭС, которая является крупнейшей в Забайкалье конденсационной электростанцией. Станция обеспечивает электроэнергией потребителей Бурятии и соседних регионов, а также тепловой энергией – г. Гусиноозерск. Озеро Гусиное является естественным водоемом-охладителем с оборотной системой водообмена [13, 14]. Основное топливо для станции – бурый уголь Окино-Ключевского разреза и Гусиноозерского месторождения. Станция потребляет ежегодно до 3 млн т угля. Отвод дымовых газов осуществляется двумя трубами. Высота первой трубы – 190 м, диаметр устья – 9 м, высота второй (основной) трубы – 330 м, диаметр устья – 12 м. Высота станции над уровнем моря составляет 561 м [15].

На рис. 1 приведен снимок территории Гусиноозерской ГРЭС и ее окрестностей с ИСЗ «Канопус-В» 13 января 2020 г. Информация получена в Сибирском центре ФГБУ «НИЦ «ПЛАНЕТА»» (<http://www.rcpod.ru>).

На снимке отчетливо прослеживаются траектории дымовых выбросов от труб Гусиноозерской ГРЭС. Дымовые шлейфы сносятся в северо-восточном направлении. При этом видно, что траектории шлейфов от разновысоких труб станции пересекаются.

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

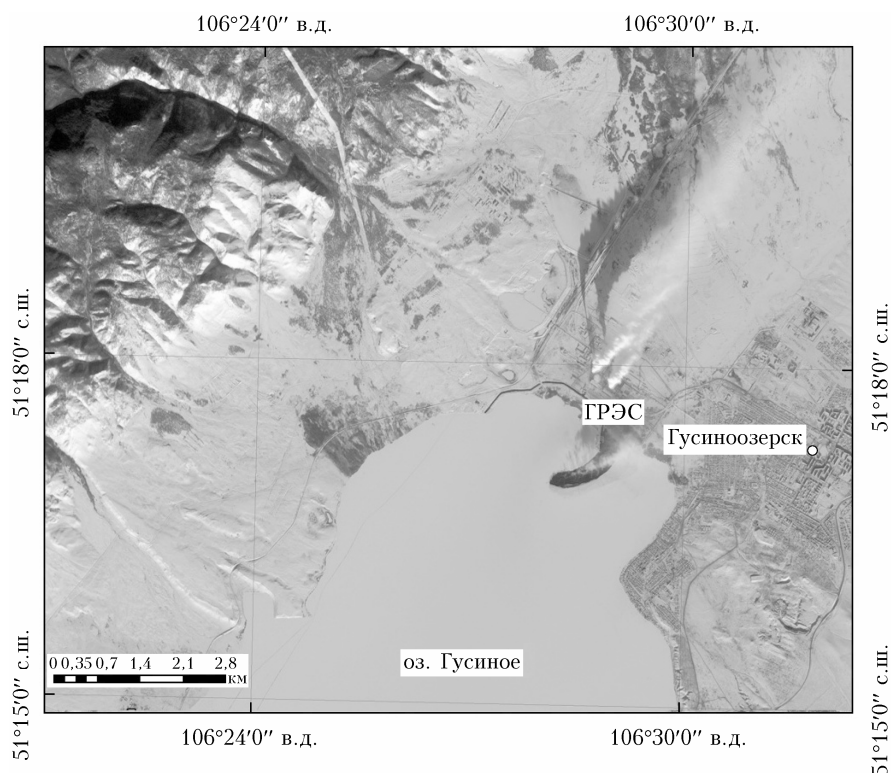


Рис. 1. Спутниковый снимок г. Гусиноозерска с ИСЗ «Канопус-В» 13 января 2020 г. в 12:22 по местному времени

Это обусловлено наличием правого поворота ветра с высотой в пограничном слое атмосферы. На рисунке фиксируются положения теней шлейфов на земной поверхности и наблюдается активная стадия подъема дымовой смеси, обусловленная потоком плавучести и начальным динамическим импульсом, а также стадия пассивного переноса примеси ветровыми потоками. Дымовые струи достигают высот зимнего пограничного слоя атмосферы. Такая ситуация, как правило, возникает при слабых ветрах в нижней атмосфере.

Для анализа метеорологических условий 13 января 2020 г. использованы данные аэрологической станции Красный Чикой, расположенной на 180 км

юго-восточнее Гусиноозерска. Высота станции – 771 м над ур. м. В табл. 1 представлены распределения по высоте основных метеорологических величин в рассматриваемый день: давления, температуры, направления и скорости ветра в 08:00 и 20:00 по местному времени (соответствует 00:00 и 12:00 UTC).

Из табл. 1 следует, что в представленные сроки наблюдений на высотах 771–1113 и 771–876 м регистрировались температурные инверсии и скорости ветра от 0 до 2 м/с. Выше, на высотах 1327–1525 (00:00 UTC) и 1298–1524 м (12:00 UTC) фиксировались ветры юго-западного направления со скоростью 5–10 м/с, температурная стратификация была

Таблица 1

Метеорологические параметры в нижней атмосфере по данным аэрологической станции Красный Чикой (индекс ВМО 30935) 13 января 2020 г.

Время UTC	Высота над ур. м., м	Давление, гПа	Температура, °С	Направление ветра, град.	Скорость ветра, м/с
00:00	771	933	-36,1	штиль	0
	830	925	-34,1	штиль	0
	961	908	-31,1	54	1
	1113	889	-28,5	115	2
	1327	863	-24,8	205	6
	1437	850	-22,9	220	9
	1525	840	-21,4	235	11
12:00	771	931	-27,9	штиль	0
	813	925	-26,1	340	1
	876	917	-24,7	324	1
	1298	866	-17,5	215	5
	1435	850	-15,1	230	8
	1444	849	-14,7	231	8
	1524	840	-15,0	240	9

близка к нейтральной. По данным метеорологической станции Новоселенгинск (индекс ВМО 30829), находящейся в 20 км от Гусиноозерской ГРЭС, 13 января 2020 г. наблюдались слабые ветры (0–1 м/с), температура воздуха изменялась от –25 до –35 °С.

Выполнен расчет дополнительных высот подъема шлейфов, которые определяются как разница между высотой подъема шлейфов и высотой соответствующей трубы. Для этого использовались спутниковый снимок, представленный на рис. 1, и алгоритм расчета, приведенный в [16]. По углу высоты Солнца над горизонтом, его азимуту и измеренным проекциям дымового шлейфа от трубы на поверхность земли были определены высоты подъема дымовой смеси. В рассматриваемом случае высота Солнца над горизонтом достигала 16,5°, азимут – 169,7°. В табл. 2 приведены параметры дымовых шлейфов от труб станции, рассчитанные с использованием спутникового снимка (см. рис. 1).

Таблица 2  
Высоты дымовых шлейфов от труб Гусиноозерской ГРЭС 13 января 2020 г.

Высота трубы, м	Высота шлейфа, м	Дополнительная высота, м
330	560	230
190	440	250

Значительная высота подъема связана с особенностями метеорологических условий в нижней атмосфере, а также с динамическими и тепловыми параметрами источников выбросов.

## 2. Модель оценивания скорости подъема и температуры дымовой смеси

Для оценивания высоты подъема дымовых шлейфов можно использовать разные методы [6, 17–20]. В ряде случаев они приводят к значительным погрешностям моделирования поля концентрации. Более надежны методы оценивания распространения дымовой струи, основанные на интегрировании уравнений движения и притока тепла [3, 8, 11, 17]. Для случая нейтральной стратификации атмосферы интегрирование этих уравнений в осесимметричном приближении позволяет представить вертикальную скорость подъема  $w$  и температуру перегрева  $\upsilon$  в явном виде [11, 17]:

$$w(z, r) = w_m(z)f(\alpha), \quad \upsilon(z, r) = \upsilon_m(z)f(\alpha), \quad (1)$$

где  $z$  – расстояние от источника в вертикальном направлении;  $r$  – расстояние от оси дымовой струи;

$$w_m(z) = \left( \frac{A}{z} + \frac{B}{z^3} \right)^{1/3}; \quad (2)$$

$$\upsilon_m(z) = \frac{G}{z^2} \left( \frac{A}{z} + \frac{B}{z^3} \right)^{-1/3}; \quad (3)$$

$$f(\alpha) = e^{-\alpha^2/2}; \quad \alpha = r/R;$$

$A, B, G$  – некоторые постоянные;  $R$  – эффективный радиус струи.

Согласно [11] расширение дымовой струи на активной фазе подъема описывается соотношением

$$r = cz, \quad (4)$$

где параметр  $c$  определяется по данным наблюдений конуса дымового шлейфа.

## 3. Результаты и обсуждение

Спутниковый снимок, приведенный на рис. 1, позволяет провести изучение активной фазы подъема дымовых шлейфов от труб Гусиноозерской ГРЭС. Существенная информация была получена на основе анализа теней шлейфов на поверхности земли. По углу высоты Солнца и измеренным проекциям дымовых шлейфов от труб ГРЭС были определены высоты подъема примеси (см. табл. 2).

Оценка скорости подъема и температуры дымовой смеси может быть получена с применением соотношений (1)–(4). Для этого необходимо определить значения  $A, B, G$  по данным наблюдений за дымовыми шлейфами.

Учитывая, что скорость выхода газозвдушной смеси из трубы равна  $w_0$ , а на заключительной стадии подъема стремится к нулю, с помощью соотношения (2) приходим к следующей системе уравнений для нахождения  $A, B$ :

$$\frac{A}{z_0} + \frac{B}{z_0^3} = w_0^3; \quad (5)$$

$$\frac{A}{h+z_0} + \frac{B}{(h+z_0)^3} = \varepsilon^3 w_0^3. \quad (6)$$

Здесь  $z_0$  – дополнительная высота подъема шлейфа, которая определяется соотношением (4) по внутреннему радиусу устья трубы  $r_0$ ;  $h$  – высота подъема шлейфа;  $\varepsilon$  – величина, близкая к нулю, характеризующая степень снижения  $w_0$  на верхнем участке подъема дымовой струи.

Решение системы уравнений (5), (6) имеет вид

$$A = w_0^3 \frac{\varepsilon^3 (h+z_0)^3 - z_0^3}{(h+z_0)^2 - z_0^2}, \quad (7)$$

$$B = w_0^3 z_0^2 (h+z_0)^2 \frac{z_0 - \varepsilon^3 (h+z_0)}{(h+z_0)^2 - z_0^2}.$$

Оценку параметра  $G$  получаем из соотношений (3), (5):

$$G = \Delta T z_0^2 \left( \frac{A}{z_0} + \frac{B}{z_0^3} \right)^{1/3} = \Delta T z_0^2 w_0. \quad (8)$$

С использованием рис. 1 и соотношения (4) приходим к оценке параметра  $c$ , равной 0,098, для дымового шлейфа от высотной трубы (330 м) Гусиноозерской ГРЭС. Отсюда с учетом  $r_0 = 6$  м получим

$z_0 = 60,9$  м. Согласно табл. 2 дополнительная высота подъема дымового шлейфа составила 230 м. С учетом полученных значений  $z_0$ ,  $h$  параметры  $A$ ,  $B$ ,  $G$  вычислялись по формулам (7), (8). На рис. 2 представлены расчеты  $w_m(z)$  дымовой смеси для случаев  $w_0 = 6$  и  $10$  м/с.

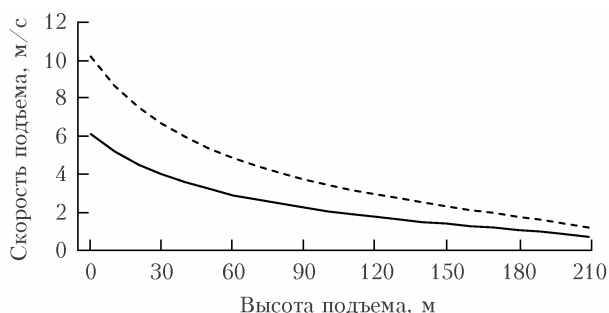


Рис. 2. Оценка скорости подъема дымового шлейфа от высотной трубы Гусиноозерской ГРЭС для  $w_0 = 6$  (сплошная кривая) и  $10$  м/с (пунктирная кривая)

Анализ рис. 2 показывает, что на начальной стадии активной фазы подъема (80–100 м от устья трубы) скорость подъема шлейфа довольно быстро падает, далее снижается более плавно. На рис. 3 показано изменение температуры с высотой по оси шлейфа, вычисленное по формулам (3), (8). При этом разность между температурами исходящей из трубы газовоздушной смеси и окружающим воздухом полагалась равной  $220$  °С.

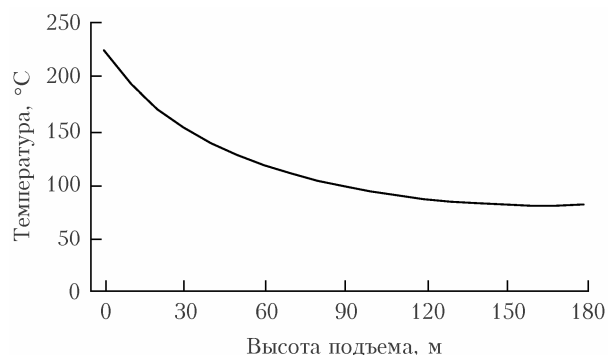


Рис. 3. Изменение температуры по оси шлейфа

Ход изменения с высотой температуры шлейфа на рис. 3 аналогичен изменению скорости его подъема (рис. 2). Тем не менее темп падения температуры газовоздушной смеси на участке выше  $100$  м более медленный. В результате температура смеси при приближении к верхней части шлейфа заметно выше температуры окружающего воздуха. По данным спутниковых наблюдений (см. рис. 1), температура шлейфа в верхней фазе подъема должна приближаться к температуре воздуха в атмосфере. Это расхождение является следствием предположения о постоянстве количества тепла в шлейфе при выводе формул (1)–(3) [11, 17]. Для построения более адекватных моделей оценивания параметров дымовых шлейфов необходимо использовать дополнительные описания гидродинамических процессов.

## Заключение

С использованием решений уравнений гидротермодинамики атмосферы предложена модель оценивания подъема газовоздушной смеси от источника под воздействием динамических и тепловых факторов. Применение аналитического решения системы уравнений движения и притока тепла для нейтрально стратифицированной атмосферы позволило получить оценки параметров модели в явном виде. На основе зимнего спутникового снимка проведен численный анализ активной фазы подъема дымового шлейфа от 330-метровой трубы Гусиноозерской ГРЭС. Получены соотношения для расчета вертикальной скорости подъема и изменения температуры дымовой струи в нижней атмосфере.

Предлагаемый подход наиболее эффективен в зимний период. На спутниковых снимках благодаря снежному покрову обеспечивается цветовая однородность земной поверхности. При таких условиях наблюдается наиболее высокая контрастность тени шлейфов на поверхности. Использование спутниковых наблюдений позволяет получить объективную оценку высоты подъема дымового факела. Для развития методов оценивания характеристик подъема дымовых шлейфов при устойчивой и неустойчивой стратификации атмосферы требуется численное решение уравнений гидротермодинамики атмосферы.

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

1. Кондратьев К.Я., Григорьев Ал.А., Покровский О.М., Шалина Е.В. Космическое дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 216 с.
2. Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Стальная М.В. Использование данных ИСЗ Landsat для определения концентрации загрязнителей в шлейфах от продукки газовых скважин на основании модели источника // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 2. С. 55–66.
3. 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.
4. Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Chiparina 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. Stud. 2014. V. 71, N 3. P. 391–397.
5. Tohidi A., Kaye N.B. Highly buoyant bent-over plumes in a boundary layer // Atmos. Environ. 2016. V. 131. P. 97–114.
6. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 278 с.
7. Зилитинкевич С.С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои. М.: Физматлит, 2013. 252 с.

8. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей* / Ф.Т.М. Ныстад, Х. ван Доп (ред.). Л.: Гидрометеониздат, 1985. 351 с.
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. *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 атмосфер. и океана*. 2020. Т. 33, № 10. С. 818–823. DOI: 10.15372/AOO20201011.
11. *Priestley С.Н.В., Ball F.К.* Continuous convection from an isolated source of heat // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 1956. V. 81. P. 144–157.
12. *Тихонов Н.А., Захарова С.А., Давыдова М.А.* Моделирование динамики образования шлейфа NO<sub>2</sub> от точечного источника // *Оптика атмосфер. и океана*. 2020. Т. 33, № 9. С. 722–727; *Tikhonov N.A., Zakharova S.A., Davydova M.A.* Simulation of the dynamics of an NO<sub>2</sub> plume from a point source // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 1. P. 45–49. DOI: 10.15372/AOO20200909.
13. *Борисенко И.М., Пронин Н.М., Шайбонов Б.Б.* Экология озера Гусиное. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1994. 199 с.
14. *Цыдытов Б.З., Андреев С.Г., Ауржанаев А.А., Содномов Б.В., Гуржанов Б.О., Батоцыренов Э.А., Павлов И.А., Ширеторова В.Г., Ульзетуева И.Д., Габеева Д.А., Раднаева Л.Д., Гармаев Е.Ж.* Влияние сбросов Гусиноозерской ГРЭС на термический и гидромический режим озера Гусиное // *Изв. Иркутского гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле»*. 2017. Т. 22. С. 135–150.
15. *Фадова А.А., Кучерик Г.В., Заблоцкая Е.В.* Оценка качества атмосферного воздуха района размещения основной площадки акционерного общества «ИнтерРАО – Электрогенерация» // *Энергетические установки и технологии*. 2020. Т. 6, № 2. С. 138–145.
16. *Рапута В.Ф., Леженин А.А.* Оценка высоты подъема дымового шлейфа по спутниковым снимкам // *Оптика атмосфер. и океана*. 2020. Т. 33, № 6. С. 471–475; *Raputa V.F., Lezhenin A.A.* Estimation of the altitude of smoke plumes from satellite images // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 5. P. 539–544. DOI: 10.15372/AOO20200609.
17. *Берлянд М.Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1975. 448 с.
18. *Грибков А.М., Зройчиков Н.А., Прохоров В.Б.* Формирование траектории дымового факела при наличии самоокучивания оголовка дымовой трубы // *Теплоэнергетика*. 2017. № 10. С. 51–59.
19. *Метеорология и атомная энергия* / под ред. Д. Слейда. Л.: Гидрометеониздат, 1971. 647 с.
20. *Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе*. Утверждены приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201708110012>.

***V.F. Raputa, A.A. Lezhenin. Estimation of the dynamic and thermal characteristics of the rise of a smoke plume from satellite information.***

A numerical model has been developed for retrieving characteristics of the active phase of the rise of a smoke plume based on observation data. The basic conditions in the estimation model are the solution of the equations of hydrothermodynamics of the atmosphere. Using satellite information, the temperature variation and the rate of rise of the smoke plume from the high-rise pipe of the Gusinoozyorskaya GRES were numerically retrieved. The efficiency of the approach proposed in winter time, which is characterized by large volumes of emissions of smoke mixtures and high contrast of the shadows of the plumes on the earth's surface, is shown.