

## Оценки высоты подъема и потока плавучести дымовых шлейфов от высотных труб ТЭЦ по спутниковой информации

В.Ф. Рапута<sup>✉1</sup>, А.А. Леженин<sup>1</sup>, Р.А. Амикишиева<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6

<sup>2</sup>Новосибирский филиал НИЦ «Планета»

630099, г. Новосибирск, ул. Советская, 30

Поступила в редакцию 15.02.2023 г.;

после доработки 21.03.2023 г.;

принята к печати 15.04.2023 г.

Предложены методы оценивания основных характеристик подъема газоаerosольных примесей от высотных труб, основанные на спутниковых снимках дымовых шлейфов и их теней на земной поверхности. Они базируются на так называемом фундаментальном «законе 2/3», вытекающем из теории подобия и размерности и позволяющем описать связь между высотами подъема дымового шлейфа и его горизонтальным переносом относительно источника примеси. Проведена апробация предлагаемого подхода для трех крупных тепловых станций Сибири: Ново-Иркутской ТЭЦ, Барнаульской ТЭЦ-3, Омской ТЭЦ-5. В численном анализе использовались спутниковые снимки дымовых выбросов этих станций и данные аэрологического зондирования атмосферы. Выполнены оценки высот подъема и потоков плавучести шлейфов и проведено сравнение с результатами расчетов с использованием нормативных динамических и тепловых характеристик выбрасываемых дымовых смесей от высотных труб ТЭЦ.

**Ключевые слова:** атмосфера, дымовой шлейф, высота подъема, поток плавучести, спутниковые снимки; atmosphere, smoke plume, ascent height, buoyancy flow, satellite imagery.

### Введение

Крупными источниками загрязнения атмосферы являются природные пожары, действующие вулканы, промышленные предприятия, объекты теплоэнергетики. Дымовые выбросы от них визуализируют процессы атмосферного переноса и диффузии примесей, что позволяет изучать особенности распространения и определять характеристики дымовых шлейфов [1–6]. Спутниковые наблюдения открывают широкие возможности для исследований конфигурации шлейфов, активной фазы подъема дымовых выбросов и их дальнейшего переноса в поле ветра [7–11]. Траектории дымовых струй показывают направление и скорость ветра; их визуальная протяженность может достигать десятков километров.

К настоящему времени разработано значительное количество теоретических и эмпирических моделей для расчета характеристик подъема шлейфов [4, 9, 12–16], однако они не обладают достаточной универсальностью. Гидродинамическое моделирование

обеспечивает общность описания процессов распространения дымовых смесей, но для этого требуется привлечение больших объемов не всегда доступной входной информации [17–19].

Весьма эффективный подход, позволяющий преодолеть возникающие трудности, состоит в применении методов теории подобия и размерностей [20–22]. При его реализации используются величина потока плавучести, характеризующая влияние скорости выхода дымовой смеси и ее перегрева относительно окружающего атмосферного воздуха, а также масштаб длины, определяемый отношением потока плавучести к величине куба скорости ветра. Введение масштаба длины позволяет связать высоту подъема шлейфа с его горизонтальным смещением в поле ветра. Эта связь описывается относительно простым соотношением и определяется как «закон 2/3» и может эффективно использоваться как при расчетах характеристик активной фазы подъема шлейфов [23–25], так и при оценивании потоков плавучести [26, 27] и определении оптимальных параметров при проектировании и эксплуатации дымовых труб [28].

Цель статьи – разработка и апробация методов оценивания потоков плавучести и подъема дымовых выбросов примесей применительно к высотным трубам ТЭЦ на основе соотношений, полученных

\* Владимир Федотович Рапута (raputa@sscc.ru); Анатолий Александрович Леженин (lezhenin@ommfao.sccc.ru); Руслана Александровна Амикишиева (ruslana215w@mail.ru).

из соображений размерности и подобия [20, 21], а также с привлечением спутниковой и аэрологической информации.

### Объекты и материалы исследования

Объектами исследований являются дымовые выбросы крупных тепловых станций Западной и Восточной Сибири: Ново-Иркутской ТЭЦ, Барнаульской ТЭЦ-3, Омской ТЭЦ-5. Выбросы примесей от их основных дымовых труб, превышающих 200 м, происходят на высотах пограничного слоя атмосферы. В табл. 1 приведены геометрические, тепловые и динамические характеристики источников выбросов для рассматриваемых тепловых станций.

Таблица 1

Характеристики высотных труб ТЭЦ и их выбросов

Станция	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
Барнаульская ТЭЦ-3	230	7,2	9,6	120
Омская ТЭЦ-5	275	8,4	13,6	135

Зимние спутниковые снимки дымовых шлейфов и их теней на земной поверхности — основа для проведения исследований. Необходимыми условиями при выборе подходящих снимков были достаточная протяженность и фиксация активной фазы подъема дымовых струй. Следует отметить, что при наличии снежного покрова обеспечивается цветовая однородность земной поверхности и высокая контрастность теней шлейфов.

На рис. 1 представлены фрагменты спутниковых снимков рассматриваемых ТЭЦ. Снимки взяты с сайта Сибирского центра ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА»» (<http://www.rcpod.ru>). Разрешение снимков искусственного спутника Земли (ИСЗ) «Landsat-8» — 15 м, ИСЗ «Ресурс-П» — 12 м, ИСЗ «Sentinel-2В» — 10 м.

Следует отметить, что на рис. 1, а от основной трубы ТЭЦ четко видны длинный дымовый шлейф и его тени. На рис. 1, б и в картина несколько иная. Траектории дымовых выбросов на снимках существенно короче, чем их тени на земной поверхности.

Для анализа метеорологических условий привлекались данные ближайших к ТЭЦ аэрологических станций (АС): АС Ангарск (индекс ВМО 30715) для Ново-Иркутской ТЭЦ, АС Барнаул (индекс ВМО 29839) для ТЭЦ-3 г. Барнаула, АС Барабинск (индекс ВМО 29612) для ТЭЦ-5 г. Омска. По регламенту зондирование атмосферы на АС производится два раза в сутки: в 00:00 и 12:00 UTC. В табл. 2 представлены распределения по высоте основных метеорологических параметров в нижней атмосфере для моментов времени, наиболее близких к временам спутниковой съемки тепловых станций (приведены в подписи к рис. 1).

Из табл. 2 следует, что во время наблюдений на рассматриваемых АЭС в слоях атмосферы, где происходит перенос дымовых выбросов из труб ТЭЦ, температурная стратификация была близка к нейтральной. Скорость ветра на высотах распространения дымовых шлейфов составляла для АС Ангарск 8 м/с, АС Барнаул — 4 м/с, АС Барабинск — 16 м/с.

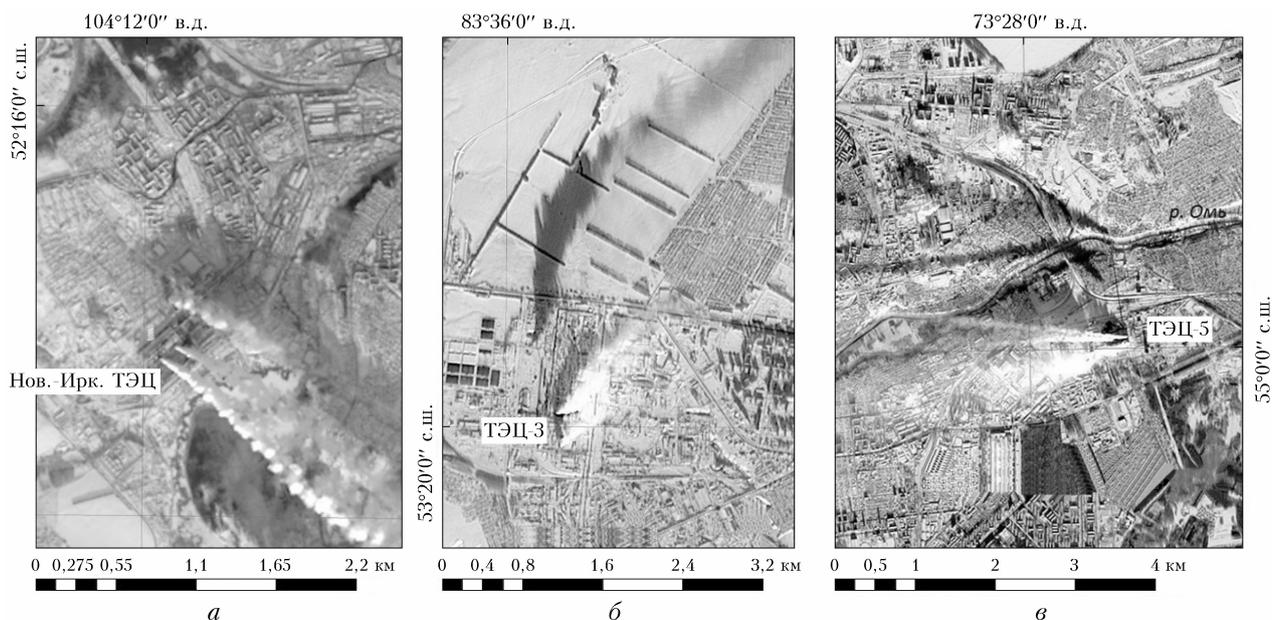


Рис. 1. Фрагменты снимков: Ново-Иркутской ТЭЦ, 18.01.2019 г., 03:58 UTC с ИСЗ «Landsat-8» (а); Барнаульская ТЭЦ-3, 2.12.2018 г., 04:07 UTC с ИСЗ «Ресурс-П» (б); Омская ТЭЦ-5, 24.12.2018 г., 07:42 UTC с ИСЗ «Sentinel-2В» (в)

Таблица 2

## Метеорологические характеристики в нижней атмосфере по данным аэрологических станций

Станция, дата, время	Высота н.у.м., м	Атмосферное давление, гПа	Температура воздуха, °С	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
Ангарск, 18.01.2019 г. 00:00 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
Барнаул, 2.12.2018 г. 00:00 UTC	1519	850	-14,5	320	15
	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
Барабинск, 24.12.2018 г. 12:00 UTC	691	942	-10,1	237	4
	831	925	-10,7	245	4
	120	1032	-30,7	30	5
	260	1012	-28,9	58	12
	347	1000	-22,3	75	16
	384	995	-19,7	80	17
	452	986	-19,2	85	16
659	959	-17,5	83	15	
906	928	-17,5	80	13	
930	925	-17,5	80	13	

### Модели для оценивания параметров подъема шлейфа

Исходя из соображений размерности, в [16, 20, 21] показано, что высота  $z$  подъема дымового факела связана с его горизонтальным смещением  $x$  в поле ветра относительно устья трубы:

$$z = Cl^{1/3}x^{2/3}, \quad (1)$$

$$l = F/u^3, \quad (2)$$

$$F = g\omega_s r^2(1 - T_a/T_c), \quad (3)$$

где  $l$  – масштаб длины, м;  $F$  – поток плавучести,  $m^4/c^3$ ;  $u$  – средняя скорость ветра в слое распространения примеси, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\omega_s$  – скорость газоздушной смеси на выходе из трубы, м/с;  $r$  – радиус трубы, м;  $T_c$  – температура смеси, К;  $T_a$  – температура окружающего воздуха, К. Постоянная  $C$  определяется по наблюдениям траекторий дымовых шлейфов. По данным [16, 20], величина  $C$  может варьироваться от 1,7 до 2,2.

Из формулы (1) следует, что высота подъема шлейфа прямо пропорциональна расстоянию от трубы в степени 2/3. Это соотношение определяется как «закон 2/3». При выводе формулы (1) в качестве значимых факторов были приняты: скорость ветра, разность плотностей исходящей дымовой смеси и атмосферного воздуха, радиус трубы и скорость выхода из нее дымовых газов. Также учитывалось соотношение между силами инерции и плавучести, что в конечном итоге обеспечивает универсальность полученной зависимости [20].

В работах [12, 21–23] представлены формулы расчета высот подъема дымового шлейфа. Они получены на основании «закона 2/3» и обработки

экспериментальных данных наблюдений параметров шлейфов. Для случая нейтральной температурной стратификации атмосферы высота подъема выбросов от устья трубы, м, вычисляется по соотношениям [12, 22]:

$$\Delta h = 1,6F^{1/3}(3,5X)^{2/3}u^{-1}, \quad (4)$$

$$X = 14F^{5/8}, \text{ когда } F < 55 \text{ м}^4 \cdot \text{с}^{-3}, \quad (5)$$

$$X = 34F^{2/5}, \text{ когда } F \geq 55 \text{ м}^4 \cdot \text{с}^{-3}, \quad (6)$$

где  $X$  – расстояние, на котором дымовой шлейф переходит в стадию пассивного переноса горизонтальным ветром, м.

### Результаты и обсуждение

Используя данные табл. 1, 2 и формулу (3), рассчитаем величину потока плавучести  $F$ , существенно превышающую  $55 \text{ м}^4 \cdot \text{с}^{-3}$  для всех трех рассматриваемых ТЭЦ. В этом случае из формул (4), (6) вытекает, что

$$\Delta h = aF^{3/5}u^{-1} \approx 38,71F^{3/5}u^{-1}, \quad (7)$$

где  $a = 1,6 \cdot 119^{2/3}$ .

Отсюда следует, что

$$F = a^{-5/3}(u\Delta h)^{5/3} \approx 2,258 \cdot 10^{-3}(u\Delta h)^{5/3}. \quad (8)$$

При известных  $u$  и  $\Delta h$  определение потоков плавучести дымовых шлейфов на активной стадии подъема для рассматриваемых ТЭЦ можно выполнить с помощью (8).

В табл. 3 представлены результаты оценивания высот подъема и потоков плавучести шлейфов дыма.

Для определения средней скорости ветра и температуры воздуха на высотах подъема дымовых смесей были использованы данные аэрологических

Оценки параметров дымовых шлейфов от высотных труб ТЭЦ

ТЭЦ, дата снимка	$u$ , м/с	$T_a$ , °С	Расчет $\Delta h$ , м	Оценка $\Delta \hat{h}$ , м	Расчет $F$ , $\text{М}^4/\text{с}^3$	Оценка $\hat{F}$ , $\text{М}^4/\text{с}^3$
Ново-Иркутская ТЭЦ, 18.01.2019 г.	8	-11	264	230	784	624
Барнаульская ТЭЦ-3, 2.12.2018 г.	4	-10	355	350	403	395
Омская ТЭЦ-5, 24.12.2018 г.	16	-19	134	110	887	641

наблюдений, приведенные в табл. 2. Расчет  $\Delta h$  и  $F$  проводился по формулам (3), (7) и данным табл. 1, 2. Оценки потоков плавучести  $\hat{F}$  выполнялись на основе соотношения (8). Дополнительные высоты подъема  $\Delta \hat{h}$  определялись по спутниковым снимкам, приведенным на рис. 1. Предельный подъем шлейфов ТЭЦ устанавливался на основе взаимного расположения дымовых струй и их теней на земной поверхности на спутниковых снимках. Расчеты проводились с учетом азимута и зенитного угла Солнца [11], положения и протяженности теней труб на поверхности Земли.

Анализ табл. 3 показывает, что оценки потоков плавучести и дополнительных высот подъема по снимкам вполне согласуются с результатами их расчетов по формулам (7), (8). Отметим, что изучение распространения дымовых шлейфов проводилось для различных ветровых режимов. В случае сравнительно небольшой скорости ветра уровень соответствия между рассчитанными и оцениваемыми характеристиками получился достаточно высоким. По мере же увеличения скорости ветрового потока уровень их относительного согласия снижается, что может быть связано с формированием более полных траекторий распространения дымовых шлейфов и, как следствие, возникающими неопределенностями при обработке спутниковых снимков.

Следует отметить, что дымовые трубы являются одними из самых дорогостоящих элементов вспомогательного оборудования тепловых электрических станций. Ошибки при их проектировании и эксплуатации могут привести к серьезному финансовому и экологическому ущербу [28].

## Заключение

Разработаны методы оценивания потоков плавучести и высот подъема атмосферных выбросов примесей от высотных источников. Они основаны на применении универсальных соотношений, вытекающих из теории подобия и размерности для дымовых струй. В качестве дополнительной информации привлекаются данные аэрологического зондирования и спутниковые снимки шлейфов и их теней на земной поверхности. Предложенные методы применимы для случаев температурной стратификации атмосферы, близкой к нейтральной, в слое распространения дымовых смесей.

Апробация предложенного подхода к оценке параметров подъема дымовых шлейфов выполнена

для трех крупных тепловых станций Сибири. Установлено удовлетворительное согласие полученных результатов с нормативными характеристиками потоков плавучести для рассматриваемых дымовых труб.

Результаты проведенных исследований показали возможность определения по спутниковым снимкам дополнительной высоты подъема шлейфа и потоков плавучести. Эти оценки могут быть использованы для контроля режимов эксплуатации высотных труб, а также, исходя из технико-экономического анализа, для оптимизации параметров источников, динамических и тепловых характеристик выбросов в атмосферу дымовых смесей. Кроме того, предлагаемый подход позволяет осуществлять внешний мониторинг процессов распространения примесей от высотных труб промышленных предприятий.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант № 075-15-2020-787).

## Список литературы

1. Кондратьев К.Я., Григорьев Ал.А., Покровский О.М., Шалина Е.В. Космическое дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 216 с.
2. Нагорский П.М., Пустовалов К.Н., Смирнов С.В. Дымовые шлейфы от природных пожаров и электрическое состояние приземного слоя атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 2. С. 155–161; Nagorskiy P.M., Pustovalov K.N., Smirnov S.V. Smoke plumes from wildfires and the electrical state of the surface air layer // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 4. P. 387–393.
3. 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 атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 10. С. 818–823. DOI: 10.15372/AOO20201011.
4. McNeal J.S., Freedland G., Mastin L.G., Cal R.B., Solovitz S.A. Investigating the accuracy of one-dimensional volcanic plume models using laboratory experiments and field data // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2019. V. 124, N 11. P. 11290–11304. DOI: 10.1029/2018JB017224.

5. Lamb O.D., De Angelis S., Lavallée Y. Using infrasound to constrain ash plume rise // *J. Appl. Volcanology*. 2015. V. 4, N 20. DOI: 10.1186/s13617-015-0038-6.
6. Gordon M., Makar P.A., Staebler R.M., Zhang J., Akin-gunola A., Gong W., Li S.M. A comparison of plume rise algorithms to stack plume measurements in the Athabasca oil sands // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 14695–14714. DOI: 10.5194/acp-18-14695-2018.
7. Лупян Е.А., Бартаев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Еришов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыцено 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. Т. 14, № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
8. 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*. № 2. С. 55–66. DOI: 10.7868/S0205961414020031.
9. Sofiev M., Ermakova T., Vankevich R. Evaluation of the smoke-injection height from wild-land fires using remote-sensing data // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 1995–2006. DOI: 10.5194/acp-12-1995-2012.
10. Алексеева М.Н., Пустовалов К.Н., Головацкая Е.А., Яценко И.Г. Расчет аэрозольных выбросов от пожаров Томской области на основе дистанционных данных // *Оптика атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 9. С. 742–747; *Alekseeva M.N., Pustovalov K.N., Golovatskaya E.A., Yaschenko I.G.* Calculation of aerosol emissions from fires in the Tomsk region based on remote sensing data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 1. P. 68–73.
11. Рапута В.Ф., Леженин А.А. Оценка высоты подъема дымового шлейфа по спутниковым снимкам // *Оптика атмосф. 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.
12. 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. С. 61–70.
13. Bhargava A. Effect of wind speed and stack height on plume rise using different equations // *Int. J. Engin. Sci. Comput.* 2016. V. 6, N 4. P. 3228–3234. DOI: 10.4010/2016.748.
14. Netterville D.D.J. Plume rise, entrainment and dispersion in turbulent winds // *Atmos. Environ. Part A, General Topics*. 1990. V. 24, N 5. P. 1061–1081. DOI: 10.1016/0960-1686(90)90074-W.
15. Тихонов Н.А., Захарова С.А., Давыдова М.А. Моделирование динамики образования шлейфа NO<sub>2</sub> от точечного источника // *Оптика атмосф. 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.
16. Briggs G.A. A plume rise model compared with observations // *J. Air Pollut. Control Assoc.* 1965. V. 15, N 9. P. 433–438. DOI: 10.1080/00022470.1965.10468404.
17. Priestley C.H.B., Ball F.K. Continuous convection from an isolated source of heat // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1955. V. 81. P. 144–157. DOI: 10.1002/qj.49708134803.
18. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.
19. Федосов А.А., Чичирова Н.Д., Шарифуллин А.Ш. Моделирование начального подъема выбросов тепловых электрических станций. 5. Совместный расчет динамического и теплового подъема // *Изв. вузов. Проблемы энергетики*. 2003. № 5–6. С. 14–20.
20. Chanady G.T. Some observations on smoke plumes // *Int. J. Air Water Poll.* 1961. V. 4. P. 47–51.
21. Briggs G.A. Plume rise // *Atomic Energy Commission Critical Review Series*. 1969. N 2507581.
22. Sofiev M., Vankevich R., Ermakova T., Hakkarainen J. Global mapping of maximum emission heights and resulting vertical profiles of wildfire emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 7039–7052. DOI: 10.5194/acp-13-7039-2013.
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. С. 18–32.
24. Ермакова Т.С., Ванкевич Р.Е., Колесников И.А. Численное моделирование распространения дымовых аэрозолей за пределы пограничного слоя атмосферы // *Ученые записки*. 2013. № 31. С. 37–48.
25. Грибков А.М., Зройчиков Н.А., Прохоров В.Б. Формирование траектории дымового факела при наличии самоукрывания оголовка дымовой трубы // *Теплоэнергетика*. 2017. № 10. С. 51–59. DOI: 10.1134/S0040363617100034.
26. Tohidi A., Kaye N.B. Highly buoyant bent-over plumes in a boundary layer // *Atmos. Environ.* 2016. V. 131. P. 97–114. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.01.046.
27. Tory K. Models of Buoyant Plume Rise. Report No. 451. Melbourne: Bushfire and Natural Hazards CRC, 2018. 26 p.
28. Мирсалихов К.М., Грибков А.М., Чичирова Н.Д. Аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб // *Проблемы энергетики*. 2021. Т. 23, № 1. С. 131–145. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145.

**V.F. Raputa, A.A. Lezhenin, R.A. Amikishieva. Estimates of the height of rise and buoyancy of smoke plumes from high chimneys of thermal power plants from satellite information.**

Methods for estimating the buoyancy and rise characteristics of atmospheric pollutant emissions from high sources are discussed. They are based on the application of the relations of the theory of similarity and dimension for smoke plumes. Aerological sounding data and satellite images of plumes and their shadows on the earth's surface are used as additional information. The proposed approach to assessment of the buoyancy flows of smoke plumes and the height of their rise was tested for three large thermal power plants in Siberia. A satisfactory agreement between the results and the normative characteristics of buoyancy flow for the chimneys under consideration has been established.