Оценка характеристик дымовых шлейфов от труб тепловых станций по спутниковым снимкам

В. Ф. Рапута, А. А. Леженин, Р. А. Кузьминых

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: raputa@sscc.ru

Уровень загрязнения приземного слоя атмосферы существенно зависит от высоты подъёма дымового шлейфа, которая определяется динамическими и тепловыми характеристиками исходящих из труб смесей и метеорологическими условиями. Снимки из космоса позволяют в достаточно полной мере наблюдать движения в атмосфере дымовых шлейфов и их теневых изображений на земной поверхности. В работе на основе спутниковой информации и методов математического моделирования изучаются процессы распространения дымовых шлейфов от труб тепловых станций. Рассмотрены задачи оценивания их траекторий, предельных высот подъёма, динамических характеристик исходящих из труб дымовых смесей. В качестве базовых соотношений применяются зависимости, вытекающие из анализа размерности и подобия. С использованием зимних спутниковых снимков, данных аэрологического зондирования проведена апробация предложенных моделей и методов на дымовых шлейфах Ново-Иркутской ТЭЦ и Барнаульской ТЭЦ-3. Численно восстановлены траектории, высоты подъёма дымовых смесей, выполнены оценки начальных скоростей их выхода из высотных труб рассматриваемых тепловых станций. Результаты проведённых исследований на базе спутниковой информации позволяют осуществлять внешний контроль основных характеристик дымовых выбросов от тепловых станций и могут быть использованы для численного моделирования процессов распространения вредных примесей и при принятии решений по обеспечению качества атмосферного воздуха.

Ключевые слова: атмосфера, тепловая станция, спутниковые снимки, дымовой шлейф, высота подъёма, скорость выхода дымовых смесей, траектория, модель, аэрологические данные

Одобрена к печати: 30.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-88-100

Введение

Образование в атмосфере масштабных шлейфов выбросов загрязняющих веществ происходит при лесных пожарах, вулканических извержениях, пыльных бурях (Лупян и др., 2017; Walter et al., 2016; Woods, 2010). Они могут распространяться на десятки и сотни километров. Дымовые шлейфы наблюдаются при выбросах примесей из труб промышленных предприятий. К ним, в первую очередь, следует отнести теплоэнергетические объекты, на которых происходит сжигание больших объёмов органического топлива. К основным параметрам, требующим оптимизации, относятся перегрев и скорость выхода дымовых газов из устьев труб. Они, наряду с метеорологическими условиями, определяют траектории распространения дымовых шлейфов, обеспечивающих допустимый уровень приземной концентрации вредных примесей (Зройчиков и др., 2020; СП..., 2018). Для исключения эффектов самооокутывания оголовка трубы необходима достаточно высокая скорость истечения дымовых газов по отношению к скорости ветра (Грибков и др., 2017).

В работах (Амикишиева и др., 2023; Балтер и др., 2014; Грибков и др., 2024; Koushafar et al., 2023) совместное использование математических моделей и спутниковой информации позволяет численно восстанавливать характеристики распространения шлейфов. Подъём в атмосфере дымовых выбросов из труб промышленных предприятий происходит под воздействием динамического импульса и эффектов плавучести шлейфа, возникающих за счёт перегрева исходящих газоаэрозольных смесей. Универсальным способом описания характеристик динамического и теплового подъёма дымовых смесей из труб теплоэлектроцентрали (ТЭЦ)

считаются уравнения гидротермодинамики (Берлянд, 1975; Ashrafi et al., 2017; Hunt, 2011; Tory, 2018; Warren et al., 2022).

При определённых условиях имеется возможность упростить получение решений уравнений гидротермодинамики дымовой струи. Поиск этих решений в осесимметричном приближении позволяет существенно снизить пространственную размерность исходной задачи. В частности, при нейтральной стратификации атмосферы имеет место компактное представление решений в аналитической форме (Берлянд, 1975; Priestley, Ball, 1955). Их использование позволяет дополнить и расширить возможности исследований, основанных, в свою очередь, на методах построения траекторий и оценивания скоростей подъёма дымовых струй.

Эффективным способом изучения дымовых выбросов является теория размерности и подобия (Иванов и др., 2014; Briggs, 1965; Shalkouhi, 2023). Если ввести из физических соображений масштаб длины, связанный с потоком плавучести и величиной скорости ветра, то через него устанавливается зависимость высоты подъёма шлейфа с его горизонтальным смещением в поле ветра. Эта связь выражается так называемым законом 2/3, который может быть использован для оценивания траекторий и скоростей подъёма шлейфов, а также оптимизации параметров выбросов при проектировании и эксплуатации дымовых труб (Мирсалихов и др., 2021).

Цель исследования — оценка начальной скорости выхода дымовых смесей из высотных труб тепловых электростанций и траекторий подъёма шлейфов с применением спутниковой информации, моделей и методов теории подобия и размерности, данных аэрологических наблюдений.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования — дымовые шлейфы от высотных труб Ново-Иркутской ТЭЦ и Барнаульской ТЭЦ-3, относящихся к крупным теплоэнергетическим объектам Сибири. В *табл. 1* приведены геометрические характеристики труб, динамические и тепловые параметры исходящих из них дымовых выбросов (Аргучинцева, Бегаева, 2013; Загородских, 2006). Основные трубы рассматриваемых ТЭЦ имеют высоту более 200 м. Температура исходящих дымовых газов превышает 120 °С. Следует отметить, что при значительных скоростях ветра (15–20 м/с) начальная скорость выхода дымовых смесей из трубы Барнаульской ТЭЦ-3 может оказаться недостаточной для исключения эффекта самоокутывания оголовка трубы (Грибков и др., 2017).

Таблица 1. Характеристики труб ТЭЦ и параметры дымовых выбросов

Название станции	Высота трубы, м	Диаметр устья трубы, м	Скорость выхода дымовых газов, м/с	Температура дымовой смеси, °С
Ново-Иркутская ТЭЦ	250	6,5	33	137
	180	6,0	27	121
Барнаульская ТЭЦ-3	230	7,2	9,6	120

Дымовые шлейфы от труб тепловых станций весьма своеобразно проявляют себя на спутниковых снимках территорий городов. С одной стороны, они создают определённые помехи при анализе изображений, но с другой — могут быть использованы как дополнительный источник информации о процессах переноса загрязняющих веществ в атмосфере города. Подъём дымовых смесей от труб ТЭЦ происходит за счёт сил плавучести и динамического импульса. При отсутствии облачности на спутниковых снимках обычно фиксируется как дымовой шлейф, так и положение его тени на поверхности земли.

На *рис. 1* приведён космический снимок территории г. Барнаула за 02.12.2018.



Рис. 1. Снимок г. Барнаула с ИСЗ «Ресурс-П» № 1 за 02.12.2018, 04:07 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time)

Информация получена с сайта Сибирского центра ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА» (http://www.rcpod.ru). Анализ *рис. 1* показывает различные уровни запылённости снежного покрова территории города за счёт выбросов промышленных предприятий, тепловых станций, автономных источников теплоснабжения, автотранспорта. Степень загрязнения территорий города вполне согласуется с цветовым тоном снежного покрова. Согласно снимку, заметному загрязнению подвержена значительная часть города. Отметим, что затемнённость некоторых территорий обусловлена тенями, связанными с особенностями рельефа местности, наличием участков леса, открытой водной поверхностью.

Дымовые смеси от труб ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 сносятся ветром в северо-восточном направлении. При этом достаточно контрастно прослеживается на заснеженной поверхности тень шлейфа от трубы ТЭЦ-3, что позволяет фиксировать предельную высоту и активную стадию его подъёма, фазу пассивного переноса в поле ветра.

Удобным способом описания траекторий подъёма дымовых шлейфов считается метод, основанный на применении соотношений теории подобия и размерности, что позволяет выявить функциональные связи между рассматриваемыми физическими величинами. Эти зависимости, как правило, включают небольшое число параметров, которые определяются по экспериментальным данным.

Рассмотрим прямоугольную систему координат (x, z). Пусть ось x совпадает с направлением ветра, ось z направлена вертикально вверх, начало координат расположено в устье трубы. Введём масштаб длины (Метеорология..., 1971; Briggs, 1965):

$$L = \frac{F}{u^3}, \qquad (1)$$

где $F = g\, w_0\, R^2 \left(1 - \dfrac{T_a}{T_c}\right)$; u — средняя скорость ветра в слое распространения примеси (в м/с); g — ускорение свободного падения (в м/с^2); w_0 — скорость выхода из трубы дымовой смеси (в м/с); R — радиус устья трубы (в м); T_c — температура смеси (в K); T_a — температура окружающего воздуха (в K).

Тогда, исходя из соображений размерности, имеет место соотношение, позволяющее связать высоту промежуточного подъёма z шлейфа с его горизонтальным перемещением x под воздействием ветра (Метеорология..., 1971):

$$z = B\, x^{2/3}, \tag{2}$$

где $B = 2\dfrac{F^{1/3}}{u}$.

Модели оценивания

С использованием соотношения (2) и информации о динамических и тепловых характеристиках исходящих дымовых газов, скорости ветра и температуре атмосферы можно рассчитать траекторию подъёма шлейфа. Спутниковые снимки дымовых шлейфов и их теней на земной поверхности также позволяют численно восстанавливать траектории их подъёма. В этом случае необходима информация об азимуте и угловом положении солнца на момент выполнения съёмки (Амикишиева и др., 2023).

Определение траектории подъёма шлейфа по спутниковому снимку

Пусть точки (x_n, z_n) расположены на оси дымового шлейфа, где x_n — измеренное на снимке расстояние от устья трубы по оси x, z_n — расстояние по вертикали относительно устья трубы, $n = 1, \ldots, N$. Тогда их азимутальные проекции на теневое изображение шлейфа представляются в виде (x_n, l_n), где l_n — измеренное на спутниковом снимке расстояние между точками (x_n, 0) и (x_n, l_n). В этом случае

$$z_n = \left(l_n - h_t\right) \mathrm{tg}\alpha, \tag{3}$$

где h_t — длина тени трубы; α — угловое положение солнца.

С учётом уравнения (3) оценку параметра B можно провести на основе уравнения (2) и положения опорных точек (x_n, z_n) на оси шлейфа методом наименьших квадратов. Значение параметра B определяется исходя из условия минимума следующего функционала:

$$f\left(B\right) = \sum_{n=1}^{N} \left[z_n - B\, x_n^{2/3}\right]^2. \tag{4}$$

Вычисление скорости подъёма

Использование результатов определения параметра B по соотношениям (2), (4) и информации о скорости ветра u в слое распространения дымового шлейфа позволяет оценить вертикальную скорость подъёма шлейфа w, исходя из соотношения

$$w = u\, \mathrm{tg}\beta, \tag{5}$$

где β — угол между касательной к траектории и осью x.

Дифференцируя формулу (2) по x, получим

$$\mathrm{tg}\beta = \frac{2}{3} B x^{-1/3}. \tag{6}$$

Тогда, с учётом уравнений (5), (6), приходим к выражению для оценивания вертикальной составляющей скорости переноса дымовых газов по мере их удаления от устья трубы:

$$w(x) = \frac{2}{3} u\, B x^{-1/3}. \tag{7}$$

Следует отметить, что соотношение (7) считается прямым следствием формулы Бриггса (2), описывающей промежуточный подъём шлейфа, и его следует использовать для оценивания скорости w на некоторых удалениях от устья трубы.

Оценка начальной скорости выхода дымовых газов

Согласно формуле (2), значение силы плавучести F можно найти при наличии оценки B и средней скорости ветра u в слое распространения дымового шлейфа. Тогда с учётом уравнений (1), (2) и при известных значениях температуры атмосферного воздуха T_a и дымовых газов T_c скорость их истечения из трубы определяется соотношением

$$w_0 = \left(\frac{Bu}{2}\right)^3 g^{-1} R^{-2} \Big/ \left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right). \tag{8}$$

Следует отметить, что при большой скорости ветра обеспечение необходимой величины параметра w_0 имеет существенное значение для предотвращения задымления верхней части трубы (Грибков и др., 2017; Мирсалихов и др., 2021). Возникновение флагообразной дымовой струи снижает эффективность эксплуатации высотных труб промышленных предприятий.

Результаты и обсуждения

В этом разделе приводятся результаты численного исследования характеристик дымовых шлейфов от основных труб Ново-Иркутской ТЭЦ и Барнаульской ТЭЦ-3 с использованием зимних спутниковых снимков. Скорости ветра и температура атмосферы в слоях распространения дымовых смесей определялись, исходя из данных измерений с ближайших аэрологических станций.

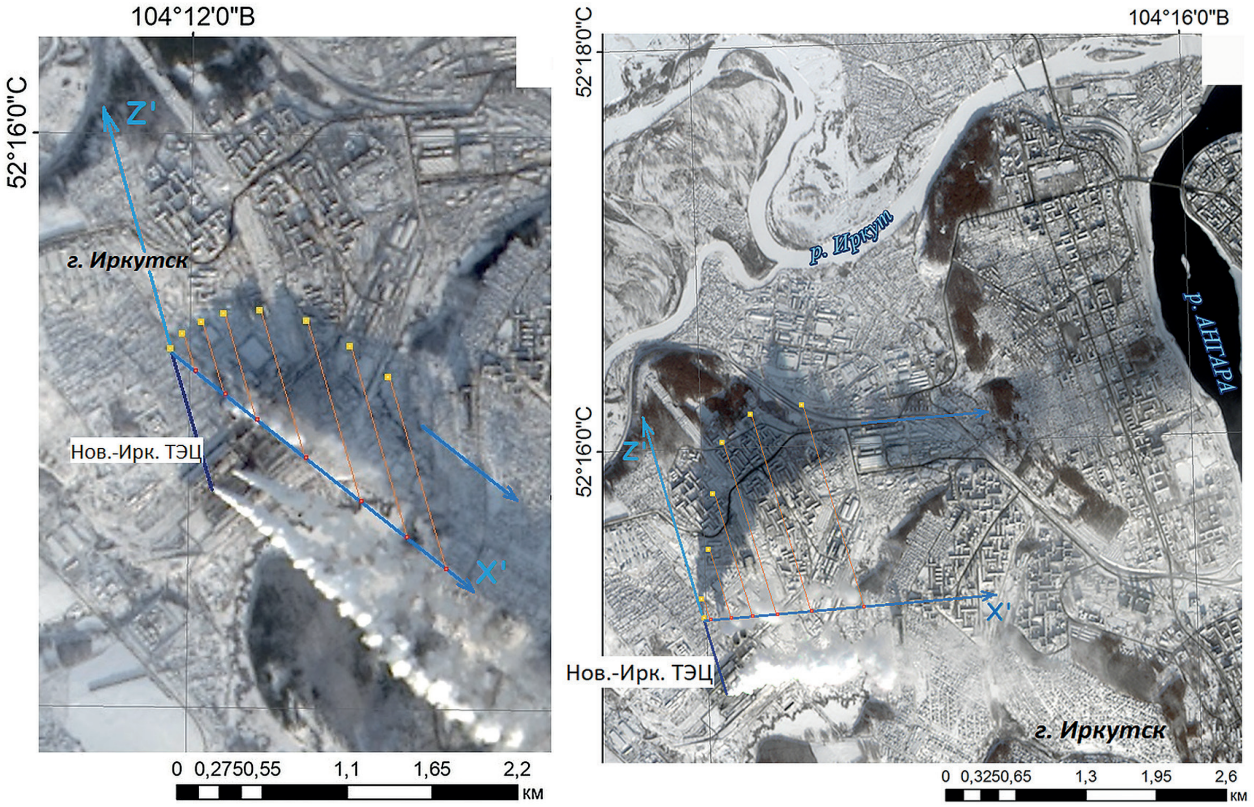
А. Оценка высот дымовых шлейфов от Ново-Иркутской ТЭЦ. На *рис. 2* представлены фрагменты спутниковых снимков (http://www.rcpod.ru) окрестностей Ново-Иркутской ТЭЦ 18 и 29 января 2019 г.

На снимках визуализируются дымовые шлейфы и их тени на покрытой снегом земной поверхности. Тени шлейфов вполне отчётливо фиксируют активные стадии подъёма струй. Из *рис. 2а* и *табл. 2* следует, что дымовые смеси переносятся в юго-восточном направлении в условиях умеренного ветра. Тень основной трубы, помеченная отрезком синего цвета, позволяет определить угловое положение солнца. Вспомогательная координатная линия (ось x'), привязанная к вершине тени трубы, ориентирована по направлению ветра. Жёлтыми кружочками трассировано теневое положение траектории подъёма шлейфа. Проекции кружочков на ось x' позволяют определить расстояния от них до тени вершины трубы по горизонтали. С учётом склонения солнца по длине этих проекций с использованием формулы (3) восстанавливается пространственное расположение траектории дымового шлейфа. На другом снимке представлен перенос дымовых шлейфов от труб Ново-Иркутской ТЭЦ под воздействием слабого ветра (*табл. 2*). В этом случае дополнительная высота подъёма шлейфов оказалась весьма значительной, что согласно данным *табл. 1* было обусловлено высокими начальными скоростями выхода и перегревом дымовых смесей.

В *табл. 2* приведены результаты аэрологического зондирования характеристик атмосферы на 18 и 29 января 2019 г., полученные на станции Ангарск, включённой в реестр Всемирной метеорологической организации (ВМО) (*англ.* World Meteorological Organization) с индексом 30715.

Анализ *табл. 2* показывает, что 18 января 2019 г. в слое распространения шлейфа температура воздуха составляла −10...−11°, ветер имел северо-западное направление и его скорость

достигала 9 м/с. Согласно данным аэрологического зондирования 29 января 2019 г. на высотах распространения дымовых смесей преобладал ветер западного направления со скоростью около 3 м/с. Стратификация температуры атмосферы была близка к нейтральной.



а *б*

Рис. 2. Фрагменты спутниковых снимков Ново-Иркутской ТЭЦ с ИСЗ Landsat-8 от 18.01.2019, 03:58 UTC (*а*), и ИСЗ Sentinel-2A от 29.01.2019, 04:20 UTC (*б*)

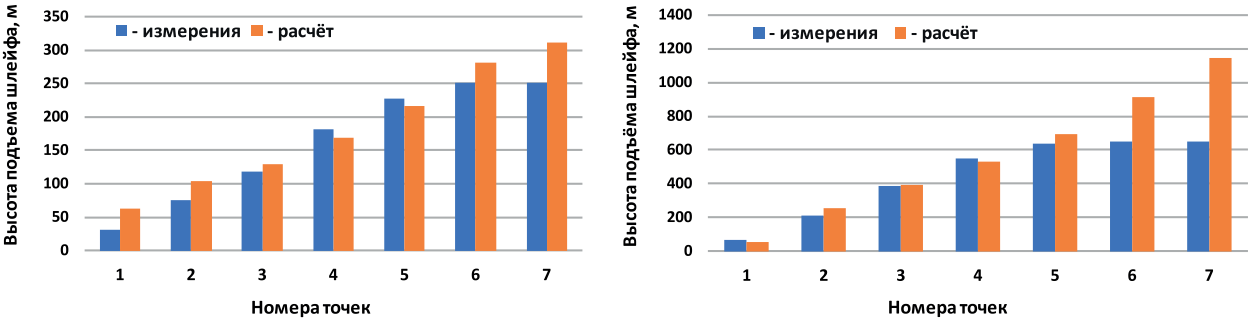
Таблица 2. Метеорологические характеристики в нижней атмосфере по данным аэрологической станции Ангарск (https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.shtml)

Станция Ангарск, дата, время UTC	Высота над уровнем моря, м	Атмосферное давление, гПа	Температура воздуха, °C	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
18.01.2019, 12:00	437	981	–10,3	250	1,0
	658	954	–8,9	295	5,2
	809	936	–10,1	325	8,0
	903	925	–10,9	325	9,0
29.01.2019, 12:00	437	980	–17,1	75	1,0
	635	955	–15,5	345	2,1
	789	936	–16,1	275	3,0
	880	925	–16,5	280	5,0

На *рис. 3* представлены рассчитанные по формуле (2) и полученные в результате обработки спутниковых снимков (см. *рис. 2*) высоты подъёма дымовых шлейфов от 250-метровой трубы Ново-Иркутской ТЭЦ.

Для расчётов по формуле (2) привлекалась приведённая в *табл. 1* информация о скоростях и температуре исходящих дымовых смесей. На *рис. 3а* расстояния по горизонтали

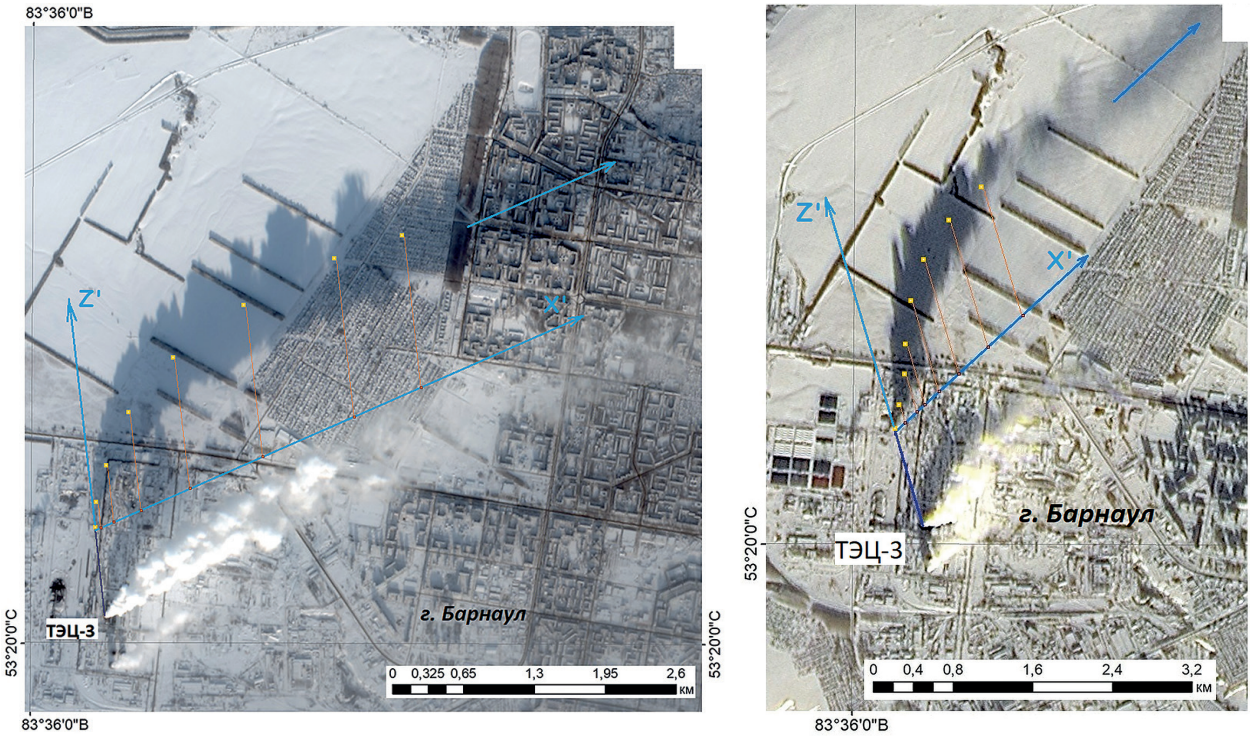
от устья трубы до точек с номерами 1–7 по мере удаления соответствуют: 133 м, 289, 400, 600, 867, 1289, 1500 м. Для случая *рис. 3б* точки с номерами 1–7 соответствуют расстояниям: 21 м, 210, 398, 629, 944, 1426, 2000 м. Анализ *рис. 3* показывает вполне удовлетворительный уровень согласия расчётов высот по формуле (2) промежуточного подъёма Бриггса с восстановленными их значениями по спутниковым снимкам в точках с номерами 1–5. В точках 6, 7 между расчётами и наблюдениями имеют место систематические расхождения, характеризующие стадию пассивного переноса дымовых смесей. Для случая *рис. 3а* при умеренном ветре (9 м/с) предельная высота подъёма шлейфа достигала 250 м. Согласно *рис. 3б* в условиях слабого ветра (3 м/с) высота подъёма составила более 600 м.



а *б*

Рис. 3. Измеренные и рассчитанные по формуле (2) высоты подъёма шлейфов от основной трубы Ново-Иркутской ТЭЦ для 18 января (*а*) и 29 января (*б*) 2019 г.

Б. Численное восстановление траекторий дымовых шлейфов от Барнаульской ТЭЦ-3. На *рис. 4* приведены фрагменты спутниковых снимков (http://www.rcpod.ru) окрестностей Барнаульской ТЭЦ-3 от 19 ноября и 2 декабря 2018 г.



а *б*

Рис. 4. Фрагменты спутниковых снимков Барнаульской ТЭЦ-3 с ИСЗ Sentinel-2B от 19.11.2018, 05:41 UTC (*а*), и ИСЗ «Ресурс-П» № 1 за 02.12.2018, 04:07 UTC (*б*)

На спутниковых снимках окрестностей Барнаульской ТЭЦ-3, представленных на *рис. 4а* и *б*, отчётливо прослеживаются дымовые шлейфы, исходящие из 230-метровой трубы тепловой станции. Тени шлейфов контрастно отображаются на однородной заснеженной поверхности земли. По ним достаточно надёжно фиксируются как стадии активного подъёма дымовых смесей, так и их пассивного переноса в поле ветра. В отличие от снимков, приведённых на *рис. 2*, в данном случае определение теневого положения траекторий не представляется затруднительным. Следует отметить, что на рассматриваемых снимках угол между азимутом солнца и направлением ветра составляет почти 60°, что в значительной степени способствует точности пространственного восстановления траекторий подъёма дымовых струй.В *табл. 3* представлены результаты аэрологического зондирования характеристик атмосферы на 19 ноября и 2 декабря 2018 г., полученные на станции Барнаул (https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.shtml).

Таблица 3. Метеорологические характеристики в нижней атмосфере по данным аэрологической станции Барнаул (индекс ВМО 29839)

Станция Барнаул, дата, время UTC	Высота над уровнем моря, м	Атмосферное давление, гПа	Температура воздуха, °С	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
19.11.2018, 00:00	159	1012	–20,1	220	1,0
	232	1000	–16,1	225	1,0
	355	984	–10,1	232	1,9
	497	966	–10,1	240	3,0
	658	946	–10,1	235	4,0
	831	925	–10,7	245	4,0
02.12.2018, 00:00	159	1019	–19,9	190	1,0
	305	997	–17,3	195	3,1
	434	980	–16,9	195	4,0
	511	970	–16,7	211	5,6
	620	956	–16,7	235	8,0

Данные *табл. 3* показывают, что 19 ноября 2018 г. распространение шлейфа происходило в слое изотермии (–10,1 °С), ветер имел практически юго-западное направление и его скорость достигала 4 м/с. Согласно данным аэрологического зондирования 2 декабря 2018 г. в слое распространения примесей наблюдался ветер юго-юго-западного направления со скоростью 4–8 м/с. Стратификация температуры атмосферы была близка к изотермическому распределению (–16,7 °С).

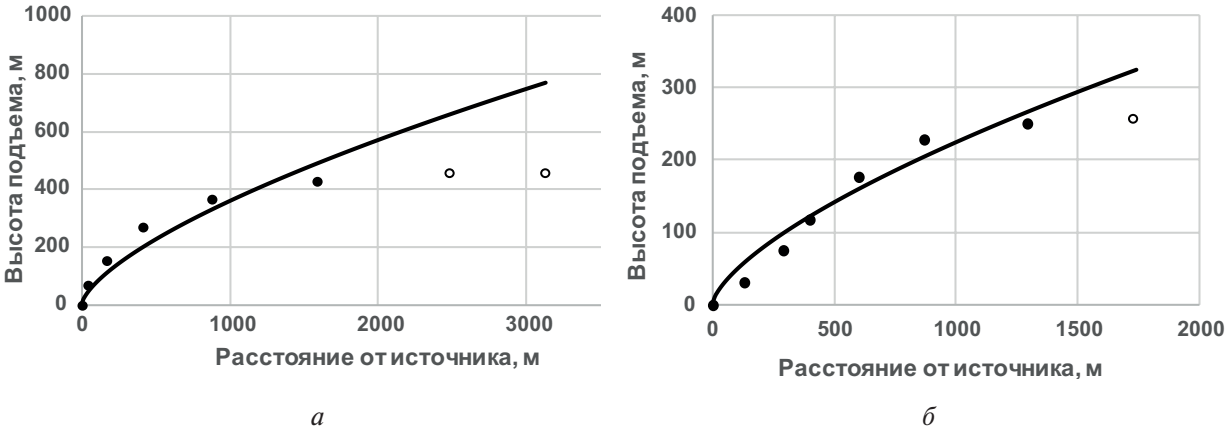
Таблица 4. Численно восстановленные по спутниковым снимкам координаты опорных точек на осях дымовых шлейфов от трубы Барнаульской ТЭЦ-3

Спутниковый снимок от 19.11.2018		Спутниковый снимок от 02.12.2018	
x, м	z, м	x, м	z, м
40	70	130	30
170	150	290	70
410	270	400	120
880	370	600	180
1590	430	870	230
2480	460	1290	250
3130	460	1730	260

В *табл. 4* приведены положения опорных точек, расположенных на осях шлейфов, в системе координат (x', z').

С использованием соотношений (2), (4) и данных *табл. 4* по методу наименьших квадратов были выполнены оценки параметра B для двух рассматриваемых эпизодов переноса шлейфов от Барнаульской ТЭЦ-3 (см. *рис. 4*). Для случая *рис. 4а* значение параметра B составило 3,6. В случае *рис. 4б* оно равно 2,3.

На *рис. 5* приведены численно восстановленные по формуле (2) и данным *табл. 4* траектории подъёма дымовых шлейфов от высотной трубы ТЭЦ.



а *б*

Рис. 5. Численно восстановленные траектории подъёма дымовых смесей от основной трубы Барнаульской ТЭЦ-3 по формуле (2) и спутниковым снимкам от 19 ноября (*а*) и 2 декабря (*б*) 2018 г.

Рисунок 5 показывает в рамках «закона двух третей» вполне удовлетворительную аппроксимацию осевых точек (тёмные кружки) на стадии промежуточного подъёма для удалений от трубы порядка 1,5 км. Светлые кружки на *рис. 5* указывают положение оси шлейфа на пассивной стадии переноса. Для случая *рис. 5а* высота подъёма шлейфа (ветер 4 м/с) составила около 460 м, в случае *рис. 5б* она достигала 260 м (ветер 6 м/с).

В. Оценка начальных скоростей выхода дымовых смесей из труб ТЭЦ. Скорость выхода дымовых смесей w_0 из труб считается наиболее значимой характеристикой в обеспечении нормальных режимов работы тепловых станций (Мирсалихов и др., 2021). Возможность численного восстановления траекторий подъёма по спутниковым снимкам позволяет выполнить оценку w_0 с использованием соотношения (8). Для этого необходимо располагать сведениями о температуре смеси, скорости ветра и температуре воздуха в слое распространения шлейфа, радиусе устья трубы. Информация о температуре исходящих смесей и радиусах труб Ново-Иркутской ТЭЦ и Барнаульской ТЭЦ содержится в *табл. 1.* Необходимые сведения о метеорологических параметрах представлены в *табл. 2*, *3.*

Таблица 5. Оценки скоростей выхода и дополнительных высот подъёма дымовых струй из труб Ново-Иркутской ТЭЦ и Барнаульской ТЭЦ-3

Название ТЭЦ	Время спутникового снимка, UTC	Скорость ветра, м/с	Дополнительная высота подъёма шлейфа, м	Оценка параметра B, $м^{1/3}$	Оценка скорости выхода дымовой струи, м/с	Нормативная скорость выхода струи, м/с
Ново-Иркутская ТЭЦ	18.01.2019, 03:58	9	250	2,4	31,9	33
	29.01.2019, 04:20	3	>600	6,9	25,1	33
Барнаульская ТЭЦ-3	19.11.2018, 05:41	4	460	3,6	12,2	9,6
	02.12.2018, 04:07	6	260	2,3	8,2	9,6

В *табл. 5* приведены результаты оценивания с использованием спутниковых снимков дополнительных высот подъёма шлейфов и начальных скоростей выхода w_0 дымовых смесей из высотных труб Ново-Иркутской ТЭЦ и Барнаульской ТЭЦ-3. Оценки значений параметра w_0 выполнены на основе соотношения (8) с учётом температуры исходящих смесей и аэрологических данных.

Анализ *табл. 5* показывает, что при относительно слабых ветрах (3–4 м/с) высоты подъёма дымовых смесей от труб рассматриваемых ТЭЦ весьма значительны. С увеличением скорости ветра происходит заметное снижение высот подъёма дымового шлейфа. В условиях слабых ветров отклонения оценок w_0 от нормативных значений достигают 27 %. Ситуация становится более благоприятной для случаев умеренных скоростей ветра (6, 9 м/с). Оценки начальных скоростей выхода дымовых газов из труб по отношению к нормативным значениям w_0 оказались достаточно близкими.

Заключение

С использованием спутниковых снимков дымовых шлейфов, их теневых отображений на земной поверхности предложены модели и методы численного анализа процессов активной стадии подъёма примесей и их дальнейшего переноса в поле ветра. Рассмотрение пассивной стадии переноса позволяет определить дополнительную высоту подъёма дымовых смесей от труб тепловых станций. На основе соотношений, вытекающих из теории подобия и размерностей, данных аэрологического зондирования разработаны методы численного восстановления траекторий шлейфов, оценивания начальной скорости выхода из труб дымовых смесей.

Применительно к дымовым шлейфам от высотных труб Ново-Иркутской ТЭЦ и Барнаульской ТЭЦ-3 выполнена апробация предложенных методов и подходов. Для проведения исследований использовались зимние спутниковые снимки, обеспечивающие достаточно высокую контрастность теней шлейфов на снежном покрове. В слое распространения примесей температура, направление и скорость ветра определены по результатам измерений на аэрологических станциях, близкорасположенных к ТЭЦ. Для рассматриваемых снимков выявлены конкретные диапазоны расстояний от устья труб, допускающих вполне адекватное применение формулы Бриггса (закона двух третей) на активной стадии промежуточного подъёма шлейфов. На основе построенных траекторий и аэрологических данных выполнены оценки начальных скоростей выхода дымовых смесей из устьев труб. Для умеренных скоростей ветра установлено удовлетворительное согласие оценок скоростей истечения из труб дымовых газов с их нормативными характеристиками.

Высотные трубы относятся к дорогостоящему оборудованию, которое необходимо эксплуатировать в оптимальных режимах с учётом метеорологических условий, экономических и технологических ограничений. Предложенный подход, базирующийся на использовании спутниковой информации, позволяет контролировать основные характеристики дымовых выбросов ТЭЦ, выполнять численный анализ процессов загрязнения атмосферы и планировать мероприятия по улучшению качества воздуха.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН FWNM-2025-0003.

Литература

1. *Амикишиева Р. А.*, *Рапута В. Ф.*, *Леженин А. А.* Оценивание траекторий подъема дымовых смесей от высотных труб по спутниковой информации // Вычисл. технологии. 2023. Т. 28. № 6. С. 6–16. DOI: 10.25743/ICT.2023.28.6.002.
2. *Аргучинцева А. В.*, *Бегаева Д. А.* Прогноз загрязнения атмосферы г. Иркутска от предполагаемых источников отопления планируемого мусороперерабатывающего комплекса // Изв. Иркутского гос. ун-та. Сер.: Науки о Земле. 2013. Т. 6. № 2. С. 57–64.

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 // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 2. С. 55–66. DOI: 10.7868/S0205961414020031.
4. *Берлянд М. Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.
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. DOI: 10.1134/S0040363617100034.
6. *Грибков А. М.*, *Чичирова Н. Д.*, *Мирсалихов К. М.* Определение траектории дымового факела с использованием спутниковых снимков // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. № 3. С. 132–145. DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-132-145.
7. *Загородских И. А.* Исследование характеристик горения в кипящем слое и снижение загрязнения атмосферы теплоэнергетическими установками: на примере ТЭЦ-3 г. Барнаула: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2006. 162 с.
8. *Зройчиков Н. А.*, *Грибков А. М.*, *Сапаров М. И.*, *Мирсалихов К. М.* Универсальная методика определения оптимальной скорости газов в газоотводящих стволах дымовых труб ТЭС // Теплоэнергетика. 2020. № 3. С. 15–23. DOI: 10.1134/S0040363620030066.
9. *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.
10. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Балашов И. В. и др.* 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.
11. Метеорология и атомная энергия: пер. с англ. / под ред. Н.Л. Бызовой, К.П. Махонько. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 648 с.
12. *Мирсалихов К. М.*, *Грибков А. М.*, *Чичирова Н. Д.* Аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. С. 131–145. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145.
13. СП 375.1325800.2017. Трубы промышленные дымовые. Правила проектирования. М.: Изд-во стандартов, 2018. 45 с.
14. *Ashrafi K.*, *Orkomi A. A.*, *Motlagh M. S.* Direct effect of atmospheric turbulence on plume rise in a neutral atmosphere // Atmospheric Pollution Research. 2017. V. 8. Iss. 4. P. 640–651. DOI: 10.1016/j.apr.2017.01.001.
15. *Briggs G. A.* A plume rise model compared with observations // J. Air Pollution Control Association. 1965. V. 15. Iss. 9. P. 433–438. DOI: 10.1080/00022470.1965.10468404.
16. *Hunt G. R.* Classical plume theory: 1937–2010 and beyond // IMA J. Applied Mathematics. 2011. V. 76. P. 424–448. DOI: 10.1093/imamat/hxq056.
17. *Koushafar M.*, *Sohn G.*, *Gordon M.* Deep convolutional neural network for plume rise measurements in industrial environments // Remote Sensing. 2023. V. 15. Iss. 12. Article 3083. DOI: 10.3390/rs15123083.
18. *Priestley C. H.B.*, *Ball F. K.* Continuous convection from an isolated source of heat // Quarterly J. Royal Meteorological Soc. 1955. V. 81. P. 144–157. DOI: 10.1002/qj.49708134803.
19. *Shalkouhi P. J.* Prediction of stack plume rise // Ecological Engineering and Environment Protection. 2023. № 2. P. 29–33. DOI: 10.32006/eeep.2023.2.2933.
20. *Tory K.* Models of buoyant plume rise. Report No. 451.2018. Melbourne: Bushfire and Natural Hazards CRC, 2018. 26 p.
21. *Walter C.*, *Freitas S. R.*, *Kottmeier C. et al.* The importance of plume rise on the concentrations and atmospheric impacts of biomass burning aerosol // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. V. 16. P. 9201–9219. DOI: 10.5194/acp-16-9201-2016.
22. *Warren C. J.*, *Paine R. J.*, *Connors J. A. et al.* Evaluation of a revised AERMOD treatment of plume dispersion in the daytime elevated stable layer // J. Air and Waste Management Association. 2022. V. 72. Iss. 9. P. 1040–1052. DOI: 10.1080/10962247.2022.2094031.
23. *Woods A. W.* Turbulent plumes in nature // Annual Review of Fluid Mechanics. 2010. V. 42. P. 391–412. DOI: 10.1146/annurev-fluid-121108-145430.

Assessing the characteristics of smoke plumes from thermal power plant stacks using satellite images

V. F. Raputa, A. A. Lezhenin, R. A. Kuzminykh

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
Novosibirsk 630090, Russia
E-mail: raputa@sscc.ru

The level of pollution of the ground layer of the atmosphere depends significantly on the height of the smoke plume that is determined by the dynamic and thermal characteristics of the mixtures emanating from the pipes and meteorological conditions. Satellite images allow for a fairly comprehensive observation of smoke plume propagation in the atmosphere and their shadow images on the Earth's surface. The paper uses satellite data and mathematical modeling methods to study smoke plume propagation from thermal power plant stacks. The problems of estimating their trajectories, maximum rise heights, and dynamic characteristics of smoke mixtures emanating from the stacks are considered. Dependencies derived from dimensionality and similarity analysis are used as the underlying relationships. Using winter satellite images and aerological data, the proposed models and methods were tested on smoke plumes from Novo-Irkutsk Thermal Power Plant and Barnaul Thermal Power Plant-3. The trajectories and ascent heights of smoke mixtures were numerically reconstructed, and their initial exit velocities from the high-rise stacks of the thermal power plants under consideration were estimated. The results of these studies, based on satellite data, allow for external monitoring of key characteristics of smoke emissions from thermal power plants and can be used for numerical modeling of harmful pollutant propagation processes and decision-making to ensure atmospheric air quality.

Keywords: atmosphere, thermal power station, satellite images, smoke plume, rise height, smoke mixture exit velocity, trajectory, model, aerological data

Accepted: 30.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-88-100

References

1. Amikishieva R. A., Raputa V. F., Lezhenin A. A., Estimation of smoke mixture ascent trajectories from high-rise chimneys using satellite data, *J. Computational Technologies*, 2023, V. 28, No. 6, pp. 6–16 (in Russian), DOI: 10.25743/ICT.2023.28.6.002.
2. Arguchintseva A. V., Begaeva D. A., Forecast of atmospheric pollution in Irkutsk from the proposed heating sources of the planned waste processing complex, *The Bull. Irkutsk State University. Ser. Earth Sciences*, 2013, V. 6, No. 2, pp. 57–64 (in Russian).
3. Balter B. M., Balter D. B., Egorov V. V., Stalnaya M. V., Using Landsat satellite data to determine the concentration of pollutants in plumes from gas well blowdowns based on a source model, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 2, pp. 55–66 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961414020031.
4. Berlyand M. E., *Sovremennye problemy atmosfernoi diffuzii i zagryazneniya atmosfery* (Modern problems of atmospheric diffusion and atmospheric pollution), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, 448 p. (in Russian).
5. Gribkov A. M., Zroichikov N. A., Prokhorov V. B., Plume trajectory formation under stack tip self-enveloping, *Thermal Engineering*, 2017, V. 64, No. 10, pp. 745–752, DOI: 10.1134/S0040601517100032.
6. Gribkov A. M., Chichirova N. D., Mirsalikhov K. M., Determining the trajectory of a smoke plume using satellite images, *Power Engineering: Research*, *Equipment*, *Technology*, 2024, V. 26, No. 3, pp. 132–145 (in Russian), DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-132-145.
7. Zagorodskikh I. A., *Issledovanie harakteristik goreniya v kipyashchem sloe i snizhenie zagryazneniya atmosfery teploehnergeticheskimi ustanovkami: Na primere TEhTs-3 g. Barnaula: Diss. kand. tekhn. nauk* (Study of combustion characteristics in a fluidized bed and reduction of atmospheric pollution by thermal power plants: Using the example of TPP-3 in Barnaul, Cand. tekhn. sci. thesis), Barnaul, 2006, 162 p. (in Russian).
8. Zroichikov N. A., Gribkov A. M., Saparov M. I., Mirsalikhov K. M., A general-purpose procedure for the calculation of the optimum gas velocity in gas exhaust ducts of stacks at thermal power stations, *Thermal Engineering*, 2020, V. 67, No. 3, pp. 157–164, DOI: 10.1134/S0040601520030064.

9. Ivanov E. A., Klepikova N. V., Troyanova N. I., Freimundt G. N., Methods for calculating the rise of a flare from a ventilation stack, *ANRI* (*Apparatura i novosti radiatsionnykh izmerenii*), 2014, No. 4, pp. 18–32 (in Russian).
10. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V. et al., Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
11. *Meteorology and Nuclear Energy*, Slade D. H. (eds.), Report No. TID-24190, U. S. Atomic Energy Commission, 1968, 445 p., DOI: 10.2172/4492043.
12. Mirsalikhov K. M., Gribkov A. M., Chichirova N. D., Analytical review of methods for selecting optimal parameters of chimneys, *Power Engineering: Research*, *Equipment*, *Technology*, 2021, V. 23, No. 1, pp. 131–145 (in Russian), DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145.
13. *SP 375.1325800.2017. Truby promyshlennye dymovye. Pravila proektirovaniya* (SP 375.1325800.2017. Industrial chimneys. Design rules), Moscow: Izd. standartov, 2018, 45 p. (in Russian).
14. Ashrafi K., Orkomi A. A., Motlagh M. S., Direct effect of atmospheric turbulence on plume rise in a neutral atmosphere, *Atmospheric Pollution Research*, 2017, V. 8, Iss. 4, pp. 640–651, DOI: 10.1016/j.apr.2017.01.001.
15. Briggs G. A., A plume rise model compared with observations, *J. Air Pollution Control Association*, 1965, V. 15, Iss. 9, pp. 433–438, DOI: 10.1080/00022470.1965.10468404.
16. Hunt G. R., Classical plume theory: 1937–2010 and beyond, *IMA J. Applied Mathematics*, 2011, V. 76, pp. 424–448, DOI: 10.1093/imamat/hxq056.
17. Koushafar M., Sohn G., Gordon M., Deep convolutional neural network for plume rise measurements in industrial environments, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, Iss. 12, Article 3083, DOI: 10.3390/rs15123083.
18. Priestley C. H. B., Ball F. K., Continuous convection from an isolated source of heat, *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.*, 1955, V. 81, pp. 144–157, DOI: 10.1002/qj.49708134803.
19. Shalkouhi P. J., Prediction of stack plume rise, *Ecological Engineering and Environment Protection*, 2023, No. 2, pp. 29–33, DOI: 10.32006/eeep.2023.2.2933.
20. Tory K., *Models of buoyant plume rise*, Report No. 451.2018, Melbourne: Bushfire and Natural Hazards CRC, 2018, 26 p.
21. Walter C., Freitas S. R., Kottmeier C. et al., The importance of plume rise on the concentrations and atmospheric impacts of biomass burning aerosol, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, V. 16, pp. 9201–9219, DOI: 10.5194/acp-16-9201-2016.
22. Warren C.J, Paine R. J., Connors J. A. et al., Evaluation of a revised AERMOD treatment of plume dispersion in the daytime elevated stable layer, *J. Air and Waste Management Association*, 2022, V. 72, Iss. 9, pp. 1040–1052, DOI: 10.1080/10962247.2022.2094031.
23. Woods A. W., Turbulent plumes in nature, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2010, V. 42, pp. 391–412, DOI: 10.1146/annurev-fluid-121108-145430.