

Н.Н. Безуглова, В.И. Букатый, Ю.А. Суковатов,
К.Ю. Суковатов, И.А. Суторихин

Восстановление поля концентраций аэрозоля, выпавшего на снег за зимний период в окрестностях ТЭЦ-2 г. Барнаула

*Институт водных и экологических проблем СО РАН,
Алтайский государственный университет, г. Барнаул*

Поступила в редакцию 20.04.2006 г.

Представлены результаты расчетов концентраций аэрозоля, выпадающего на снег за зимний период от ТЭЦ-2 г. Барнаула, и сравнение их с результатами измерений. Приведена схема распределения выпавшей за зиму золы угля на территории жилых кварталов и промзоны г. Барнаула и его северо-восточной окрестности (включая р. Обь), в граммах на метр квадратный. Используется простая универсальная трехмерная нестационарная модель для расчета переноса аэрозоля в атмосфере и выпадения его на подстилающую поверхность. Модель основана на решении полуэмпирического уравнения адвекции и диффузии примеси с учетом взаимодействия ее с подстилающей поверхностью. Получены концентрация примеси в атмосфере и количество частиц (или масса), выпавших на единицу площади подстилающей поверхности за расчетный период. Показано, что расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 24%.

Введение

Характер распространения загрязняющих веществ в атмосфере и их выпадение на подстилающую поверхность представляют в настоящее время большой интерес [1, 2]. Процесс распространения аэрозоля в атмосфере происходит за счет его адвективного переноса воздушными массами и диффузии, обусловленной турбулентными пульсациями воздуха. Если аэрозоль состоит из крупных частиц, то частицы под действием силы тяжести начинают оседать с определенной постоянной скоростью по закону Стокса. Естественно, что почти все примеси в конечном итоге седиментируют на поверхность земли, причем тяжелые осаждаются в основном под действием гравитационного поля, а легкие — в результате диффузионного процесса.

Наряду с мелкомасштабной диффузией, размывающей факелы примеси, большое значение в теории распространения загрязнений имеют флуктуации скорости и направления ветра за длительный период времени. За этот период воздушные массы, подхватывающие примеси от источника, многократно меняют направление и скорость. Статистически такие многолетние изменения описываются специальной диаграммой, называемой розой ветров, в которой величина вектора скорости пропорциональна числу повторяющихся событий, связанных с движением воздушных масс, распространяющихся в данном направлении. Таким образом, максимумы диаграммы розы ветров соответствуют господствующим в данном районе ветрам [3].

В настоящей статье предлагается простая универсальная трехмерная нестационарная модель для расчета переноса аэрозоля в атмосфере и выпадения его на подстилающую поверхность. Модель основана на решении полуэмпирического уравнения адвекции и диффузии примеси с учетом взаимодействия ее с подстилающей поверхностью. Результатом расчета являются концентрация примеси в атмосфере и количество частиц, или масса, выпавших на единицу площади подстилающей поверхности за расчетный период [1]:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial s}{\partial z} + bs - \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial s}{\partial z} - \mu_x \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \mu_y \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = s_0(r, t), \quad (1)$$

где s — концентрация аэрозоля; u, v, w — компоненты скорости; w_g — скорость гравитационного оседания примеси; b — коэффициент поглощения примеси; k — вертикальный коэффициент турбулентной диффузии; μ_x, μ_y — горизонтальные коэффициенты турбулентной диффузии; $s_0(r, t)$ — источник загрязняющих веществ. Граничные условия для примеси следующие [1]:

$$z = h, \quad k \frac{\partial s}{\partial z} = 0;$$

$$x, y = d; \quad \mu_x \frac{\partial s}{\partial x} = 0, \quad \mu_y \frac{\partial s}{\partial y} = 0.$$

Здесь h — высота области распространения примеси; d — ее горизонтальный размер. Нижнее граничное условие для примесей имеет вид [1]:

$$z = z_1, \quad k \frac{\partial s}{\partial z} + w_g s = \beta s,$$

где z_1 — параметр шероховатости; β — величина, имеющая размерность скорости и характеризующая взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью. Чем больше β , тем больше примеси оседает на подстилающую поверхность. В литературе встречаются значения $\beta = 0,05 \div 1$ м/с для суши, $\beta = 1$ м/с для водной поверхности [1]. Значения скоростей гравитационного оседания для разных типов аэрозолей приведены в работе [4].

На основе рассмотренной модели в ИВЭП СО РАН созданы программы, позволяющие рассчитывать характер распространения загрязняющих веществ в атмосфере и их выпадения на подстилающую поверхность.

1. Результаты тестирования программ

В работе [5] приведена монотонная одномерная схема с направленными разностями второго порядка аппроксимации для расчета членов с 1-й производной в дифференциальных уравнениях. По аналогии с этой схемой была составлена и протестирована трехмерная разностная схема 2-го порядка аппроксимации для расчета адвективных членов в уравнении переноса примеси. С целью тестирования этой схемы проводились расчеты распределения загрязняющих веществ для случая симметричной розы ветров, когда повторяемость числа случаев направлений ветра по каждому из 8 румбов одинакова. В результате получалось симметричное распределение изолиний концентрации примеси в виде правильного восьмиугольника. Кроме этой схемы в расчетах использовалась также схема с центральными разностями 2-го порядка аппроксимации, монотонная при малых шагах. Проведена оптимизация программ по времени счета. В рассматриваемой модели значения компонент скорости ветра и коэффициента вертикальной диффузии могут быть рассчитаны с помощью модели пограничного слоя атмосферы [6]. Можно также задать значения скорости ветра и коэффициента вертикальной диффузии постоянными в пределах расчетного слоя.

Осуществлено тестирование программ для расчета выпадения в снег загрязняющих веществ путем численного моделирования.

В литературе имеются данные по выпадению в снег за зимний период соединений железа от крупного металлургического комбината, а также летучей золы от тепловой электростанции, являющихся основными источниками загрязнения в районах их расположения [3]. При этом приведены данные о параметрах источников загрязнения и о повторяемости направлений ветра в зимний период для рассматриваемых районов.

Максимальная высота труб металлургического комбината 100–120 м. Размеры частиц больше 1 мкм.

В районе расположения металлургического комбината преобладают ветры южного и юго-западного, западного направлений. В период накопления снега повторяемость ветров указанных направлений составляет 75%. Средняя скорость ветра 5 м/с. Устойчивый снежный покров сохранялся 120 сут. Территория для отбора проб была избрана в соответствии с учетом преобладающих направлений ветров в зимний период. Отбор проб был проведен на площади 50×30 км. По результатам анализа удалось выяснить, что в выбросах металлургического завода в наибольших количествах присутствует железо. Были выявлены четкие зоны загрязнения снежного покрова, вытянутые в направлении преобладающих ветров до расстояния 35–40 км.

Расчетная область составила 50×25 км по горизонтали и 300 м по вертикали. Программа производит расчет выпадения примеси в снег за весь зимний период (120 дней). В соответствии с розой ветров определялось число дней за зимний период с определенным направлением ветра. Далее направление ветра менялось автоматически в соответствии с розой ветров. Для области, размеры которой указаны выше, расчет выпадения аэрозоля в снег за 4 мес занимает меньше 1 мин, что позволяет проводить многократные расчеты.

В процессе расчетов определялось, при каких значениях коэффициента горизонтальной диффузии μ , параметра взаимодействия с подстилающей поверхностью β результаты расчетов лучше всего совпадают с результатами измерений, представленными в работе [3]. Для сравнения результатов рассчитывалась корреляция измеренных и рассчитанных данных о выпадении примеси в снег вдоль господствующего направления ветра, в рассматриваемом случае это юго-западное направление. Наилучшие результаты соответствуют следующим значениям коэффициентов: $\mu = 2000$ м²/с, $\beta = 0,05$ м/с (коэффициент корреляции 0,99).

Высота труб тепловой электростанции равняется 150–250 м. Размеры частиц больше 1 мкм. В районе расположения тепловой электростанции преобладают ветры юго-западного и западного (26%), восточного (30%) направлений. Остальные направления характеризуются повторяемостью 3–9%. Средняя скорость ветра 5 м/с. Территория для отбора проб была избрана в соответствии с учетом преобладающих направлений ветров в зимний период. Отбор проб снежного покрова был проведен по системе маршрутов, радиально расходящихся от станции по восьми направлениям. В выбросах тепловой электростанции в наибольших количествах присутствует летучая зола. Ежедневно в атмосферу выбрасывается около 100 т летучей золы. Расчетная область составила 50×25 км по горизонтали и 300 м по вертикали. Для области, размеры которой указаны выше, расчет выпадения аэрозоля в снег за 4 мес занимает меньше 1 мин, что позволяет проводить многократные расчеты.

Расчеты показали, что для тепловой электростанции, работающей на угле, наилучшие результаты соответствуют следующим значениям коэффициентов: $\mu = 1000$ м²/с, $\beta = 0,1$ м/с.

Проведенные численные расчеты по нашей модели (рис. 1) показали хорошее соответствие с имеющимися в литературе экспериментальными данными.

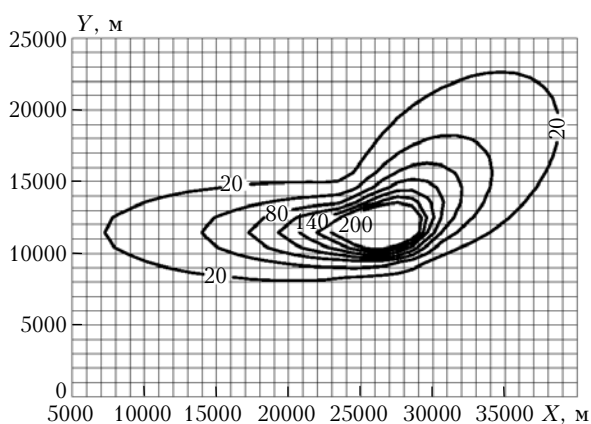


Рис. 1. Изолинии выпавшего в снег загрязняющего вещества (летучей золы, т/км²) за зимний период

Ореол рассеяния вытянут в северо-восточном и западном направлениях, что соответствует преобладающим направлениям ветра. Расчетные площади следа, соответствующие определенным значениям запаса пыли, отличаются от экспериментальных не более чем на 17% (табл. 1).

Таблица 1
Площади следа, соответствующие определенным значениям запаса пыли

Контур ореола, т/км ²	Площадь, км ² (экспериментальные данные)	Площадь, км ² (расчетные данные)
> 160	18	15
> 80	61	54
> 40	140	130
> 20	350	300

2. Расчет поля концентраций для золы угля (ТЭЦ-2, г. Барнаул)

С помощью программ, созданных на основе рассмотренной модели в ИВЭП СО РАН, были проведены расчеты выпадения загрязняющего вещества (золы угля) в снег за зимний период 11.2004–03.2005 от ТЭЦ-2 г. Барнаула. ТЭЦ-2 находится в северо-восточной части города в пределах городской застройки. Параметры источников выбросов загрязняющих веществ определены по данным инвентаризации предприятия. На ТЭЦ-2 используются кузнецкие и кемеровские угли, в дисперсном составе золы которых преобладают частицы размером 10–20 мкм [7]. Как показано в работе [4], скорость гравитационного оседания w_g для частиц таких размеров составляет 0,003–0,012 м/с. Для наших расчетов мы приняли значение w_g равным 0,007 м/с.

По данным метеостанции г. Барнаула рассчитана роза ветров за рассматриваемый период. Преобладающими оказались ветры южного (25%), юго-за-

падного (24%), западного (12%) направлений, остальные направления характеризуются повторяемостью 1–9% (северное – 1%, северо-восточное – 2%, северо-западное – 4%, восточное – 9%, юго-восточное – 8%). Средняя скорость ветра за рассматриваемый период 2,1 м/с. В течение расчетного периода в 90% случаев преобладал тип погоды, определяемый периферией Сибирского антициклона либо малоградиентным полем пониженного давления. В таких случаях вертикальная составляющая скорости ветра не превышает сантиметров в секунду или долей сантиметра в секунду [8]. В наших расчетах значение вертикальной скорости w составляет 0,005 м/с.

Уравнение (1) дискретизировалось по пространственным переменным и решалось методом прямых. Для интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений применялся метод Рунге–Кутты второго порядка аппроксимации. Для расчета адвективных членов в уравнении переноса использовалась монотонная трехмерная схема «направленных разностей» 2-го порядка аппроксимации. Расчетная область составила 8×12 км по горизонтали и 360 м по вертикали. Программа производит расчет выпадения примеси в снег за весь зимний период (150 дней). В соответствии с розой ветров находилось число дней за зимний период с определенным направлением ветра. Далее направление ветра менялось автоматически в соответствии с розой ветров. Для области, размеры которой указаны выше, расчет выпадения аэрозоля в снег за 5 мес занимает не более 3 мин, что позволяет проводить многократные расчеты. В процессе расчетов определялось, при каких значениях коэффициента горизонтальной диффузии μ , параметра взаимодействия с подстилающей поверхностью β результаты расчетов лучше всего совпадают с результатами измерений. Результатом расчета является масса примеси, выпавшая на единицу площади подстилающей поверхности за время расчета. Путем сравнения расчетов с экспериментальными данными подобраны значения эмпирических коэффициентов модели. Наилучшие результаты соответствуют следующим значениям коэффициентов: $\mu = 150 \text{ м}^2/\text{с}$, $\beta = 0,1 \text{ м}/\text{с}$.

На рис. 2 приведены соответствующие рассчитанные изолинии концентраций выпавшего в снег загрязняющего вещества (золы угля в г/м²) за зимний период от ТЭЦ-2 в г. Барнауле.

Как видно из рис. 2, основная часть золы угля выпала в непосредственной близости от предприятия (500–750 г/м²). На территорию промзоны, р. Обь и ее прибрежные районы пришлось 100–400 г/м². На жилые кварталы, расположенные в северо-восточной части города, наибольшее влияние выбросы ТЭЦ-2 оказывают при ветрах восточной четверти, которые отмечались в 19% всех случаев, и штилях – 15%. На территорию жилых кварталов выпало 50–300 г/м².

В табл. 2 приведены экспериментальные и рассчитанные значения концентраций аэрозоля на различных расстояниях от источника.

Отбор проб производился в конце зимнего сезона 2004/05 г. (5–12 марта 2005 г.). Маршруты отбора

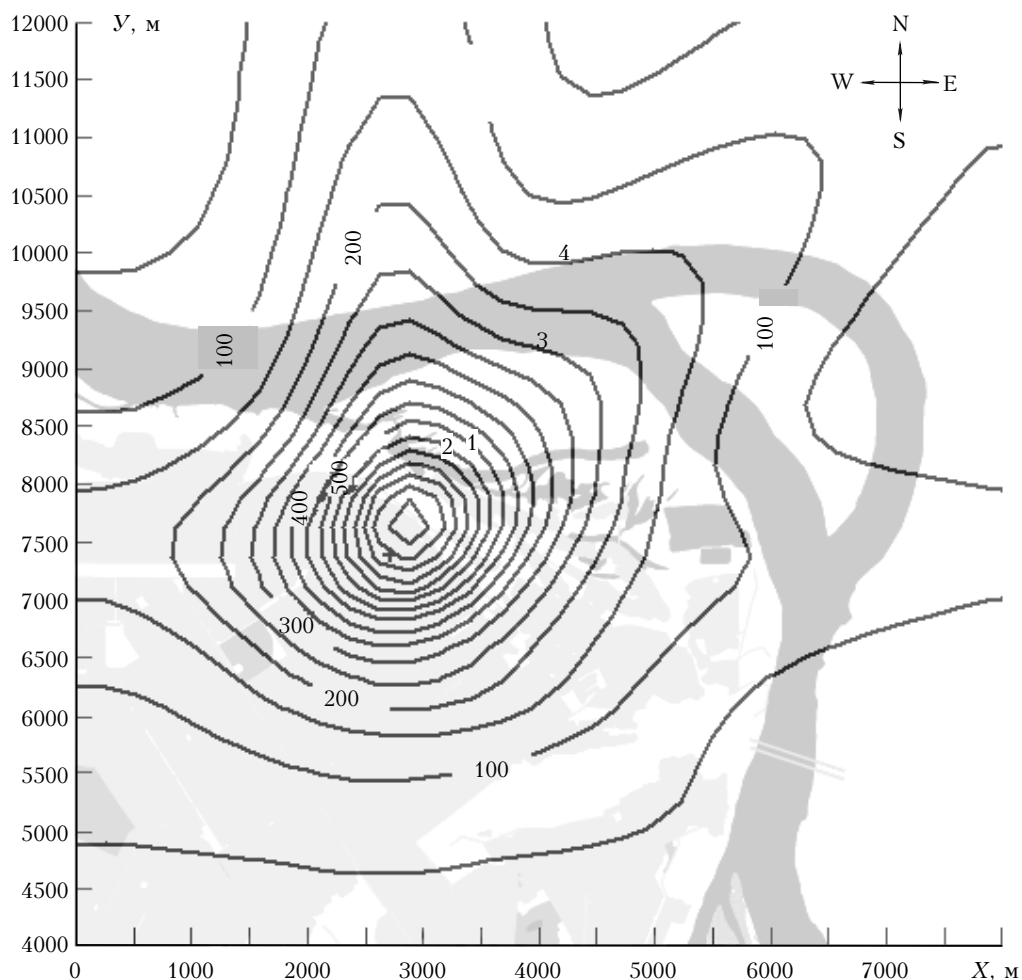


Рис. 2. Схема рассчитанного распределения содержания золы угля (координаты источника 2700; 7400)

Таблица 2

№ точки отбора пробы	Расстояние от источника, км	Измеренная масса аэрозоля на единицу площади, г/м ²	Расчетная масса аэрозоля на единицу площади, г/м ²	Относительная погрешность, %
1	1(ЗСЗ)	500	500	0
2	1(ССЗ)	653	550	23,4
3	2(ССЗ)	255	250	1,9
4	3(ССЗ)	123	125	1,6

проб находились с подветренной стороны в соответствии с преобладающим направлением ветра. Значение концентрации в точке 1 получилось при усреднении проб, взятых в 7 точках на расстоянии 1 км от источника на удалении не более 70 м от основного маршрута в направлении ЗСЗ. Пробы снега в этих точках отбирались в виде кернов с площадью основания 20×20 см на всю глубину снежного покрова, и в каждой точке отбора забирались 3–4 образца. Глубина снежного покрова варьировала в пределах 50–70 см. Для повышения надежности результатов в радиусе 3–5 м от выбранной точки проводились дополнительные отборы проб, данные потом усреднялись. Каждая проба помещалась в химически неактивную тару и хранилась до анализа при температуре от –5 до –20° С. Оттаивание снега проводи-

лось при комнатной температуре в стеклянной емкости. Для получения сухого остатка использовался метод фильтрации. Снеговую воду пропускали через бумажный фильтр, диаметр пор 2 мкм. Фильтр с осадком высушивался естественным путем. Для получения массовой концентрации аэрозоля измерялась масса фильтра до и после фильтрации с помощью аналитических весов с точностью взвешивания $\approx 10^{-8}$ г.

Значения концентрации в точках 2, 3, 4 получались следующим образом. Керны снега площадью 20×20 см отбирались по методу «конверта» на всю глубину снежного слоя. Нижний, прилегающий к почве, слой образца толщиной 1,5–2 см отсекался. Образцы в лабораторных условиях помещались на предварительно взвешенные сухие фильтры марки

«Ф» в воронки Бюхнера. Процессы растапливания снега и фильтрации образующейся воды протекали, по сути, одновременно, что в существенной мере уменьшало потери некоторых элементов в аэрозолях в процессе их растворения. Такие потери могут быть особенно значимы, если частицы аэрозоля долго пребывают в подкисленной воде [9]. После сушки нерастворимый осадок (не менее 85% массы высушенной пробы) счищался в стеклянные бюксы. Путем взвешивания проб и экспонированных фильтров определялась концентрация выпавшего на снег вещества ($\text{г}/\text{м}^2$).

Точка 1 соответствует направлению запад-северо-запад, точки 2, 3, 4 – северо-северо-западному направлению ветра.

Заклучение

Используемая методика позволяет восстановить поле концентраций аэрозоля, выпадающего на снег от одиночного источника, и определить коэффициенты диффузии и взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью.

Проведенные численные расчеты показали хорошее соответствие с имеющимися экспериментальными данными (см. табл. 2). Ореол рассеяния соответствует преобладающим направлениям ветра. Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 24%. Точка 2 находится непосредственно под берегом Оби высотой 40 м, условия осаждения примеси в этой точке отличаются от условий в других точках. Возможно, поэтому погрешность здесь наибольшая.

N.N. Bezuglova, V.I. Bukatyi, Yu.A. Sukovatov, K.Yu. Sukovatov, I.A. Sutorikhin. Retrieval of the concentration field of aerosol having fallen on snow in winter period near Heat Power Station-2 of Barnaul.

The results of calculations of concentration of aerosol falling on the snow during winter period from Heat Power Station of Barnaul and comparison with the experimental data are presented. The scheme of distribution of coal ash having fallen during winter at the territories of residential settlements and industrial estate of Barnaul and its vicinities including river Ob ($\text{г}/\text{м}^2$) is presented. It is used simple universal three-dimensional time-dependent model for calculating of aerosol distribution and its sedimentation at the surface. Model is based on solution of equation of aerosol advection-diffusion admixture accounting for its interaction with surface. The concentration of aerosol in the atmosphere and quality of particles or mass of impurity having fallen at the unit of area during winter are calculated. It is shown that difference between theoretical and experimental data is no more than 24%.

Авторы выражают благодарность А.П. Бочкару за помощь в получении части экспериментальных данных.

1. *Пененко В.В., Алоян А.Е.* Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 254 с.
2. *Рапута В.Ф., Коковкин В.В., Садовский А.П., Олькин С.Е., Резникова И.К., Морозов С.В., Кузнецова И.И., Чирков В.А.* Анализ аэрозольных выпадений в окрестностях ТЭЦ г. Новосибирска // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 546–551.
3. *Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 179 с.
4. *Теверовский Е.Н., Дмитриев Е.С.* Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками. М.: Энергоатомиздат, 1988. 159 с.
5. *Самарский А.А., Гулин А.В.* Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.
6. *Суковатов Ю.А., Безуглова Н.Н., Суковатов К.Ю.* Использование улучшенного способа замыкания уравнений турбулентности для расчетов горизонтально-неоднородного пограничного слоя атмосферы // Ползуновский вестн. № 2. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2004. С. 103–105.
7. *Рихтер Л.А.* Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций. М.: Энергоиздат, 1981. 281 с.
8. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеониздат, 1977. 711 с.
9. *Роева Н.Н., Исправникова В.В., Новиков М.М., Кошаров А.Н., Ощиров В.В.* Исследование форм загрязняющих элементов в аэрозольных частицах атмосферного воздуха // Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. М.: Наука, 2004. С. 229–240.