

УДК 551.511.61

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
И ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ
НА МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ОСАЖДЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЫЛИ**

А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин

**THE INFLUENCE OF VARIABILITY OF METEOROLOGICAL DATA FREQUENCY
AND AIR EMISSIONS PARTICLE SIZE DISTRIBUTIONS
ON MODEL ESTIMATES OF INDUSTRIAL DUST DEPOSITION**

A. A. Bykov, E. L. Schastlivtsev, S. G. Pushkin

Рассматривается влияние изменчивости входных данных на результаты разработанной авторами локальной модели расчета осаждения промышленной пыли. Для этого использованы реальные распределения метеопараметров за три года и возможные распределения промышленных пылевых выбросов по размерам частиц.

The paper deals with the influence of initial data variability on the results of long-term dust deposition model that has been elaborated by the authors for ecological expertise purposes. Real meteo data season distributions and industrial emissions particle size distributions are considered.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, выпадение пылевых частиц, долгосрочное моделирование, роза ветров, дисперсный состав выброса.

Keywords: air pollution, dust deposition, long-term modeling, wind rose, wind speed, particle size distribution.

Введение

Одной из составляющих частей мониторинга промышленных выбросов и загрязнения воздуха являются модельные оценки распространения загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосфере [10]. Известно, что для этого существует целый ряд моделей, различных по научной основе, пространственным и временным характеристикам. Однако в России, как и в каждой стране, существует единая инженерная (регуляторная) модель ОНД-86 [12] для государственного управления выбросами промышленных предприятий в атмосферу. Она обязана обеспечивать воспроизводимость и сопоставимость проектных расчетов, поэтому базируется на однозначных трактуемых инструкциях и зависимостях и использует стандартизированные исходные данные.

Модель [12] предназначена для вычисления максимальных разовых (осредненных за 20 минут) концентраций ЗВ в приземном слое. Именно они не должны превышать разовые предельно допустимые концентрации (ПДК) при определении допустимости воздействия предприятия на атмосферный воздух. Другие модели и другие показатели не являлись нормативными и не влияли до 01.03.2008 г. на принятие решений о допустимости строительства предприятий, определения размеров их санитарно-защитных зон (СЗЗ) и установлении предельно-допустимых выбросов. Однако 01.03.2008 г. вышел новый документ [14], где

появилось требование о том, что при установлении СЗЗ для предприятий 1-го и 2-го классов опасности необходима оценка рисков здоровью населения, которые в плане загрязнения атмосферы базируются на среднегодовых концентрациях [13]. Для этой цели в ГГО им. А. И. Воейкова разработана в качестве дополнения к ОНД-86 нормативная модель расчета концентраций, осредненных за длительный период [8, с. 11 – 31; 11]. Рассмотренные выше документы относятся только к концентрациям ЗВ в атмосфере и не рассматривают вопросы поступления ЗВ из атмосферы в объекты, расположенные на земной поверхности.

Выбросы такого крупного угледобывающего промышленного региона, как Кузбасс, характерны тем, что содержат большой процент пылевых частиц разнообразного химического состава, обладающих эффектом оседания на подстилающую поверхность. При этом не исключена ситуация, когда промышленные выбросы, будучи допустимыми с точки зрения максимального разового загрязнения атмосферы, могут привести к весьма существенному накоплению вредных веществ на поверхности. Многолетнее оседание из атмосферы и накопление в почве техногенной пыли может снизить урожайность земель и повысить содержание ЗВ в сельскохозяйственной продукции до величин, превосходящих допустимые нормы. Загрязнение снегового покрова в течение зимнего периода с последующим стоком талых вод в водоемы может значительно ухудшить качество воды. Таким образом, изучение процессов вторичного поступления ЗВ из атмосферы в почву, воду и продукты питания требует самого пристального внимания.

Модель расчета выпадения

Для проведения количественной оценки осаждения твердых частиц на заданную территорию авторами разработана и доведена до практического использования модель расчета потока пылевых частиц промышленного происхождения на подстилающую поверхность. Модель базируется на работах [6, с. 3 – 15; 9] и дает возможность по данным о параметрах ИЗА, фракционному составу выбрасываемой пыли и климатическим параметрам территории оценить среднегодовую приземную концентрацию q , мокрый поток на подстилающую поверхность (вымывание) P_m , сухой поток (осаждение) P_c и полный поток P , представляющий собой сумму двух названных составляющих $P = P_m + P_c$.

Расчет среднегодового мокрого потока P_m , г/(м²год) загрязняющих веществ, выбрасываемых единственным точечным источником загрязнения атмосферы (ИЗА) на подстилающую поверхность в заданной точке, осуществляется по формуле [9]:

$$P_m = \frac{(1+b)M}{2\pi u r L_0} \left[a L_{\text{л}} t_{\text{вл}} \sum_{i=1}^K m_i y_i \exp\left(-\frac{a y_i r}{u}\right) + L_{\text{з}} t_{\text{вз}} \sum_{i=1}^K m_i y_i \exp\left(-\frac{y_i r}{u}\right) \right], \quad (1)$$

где b – относительный вклад смешанных атмосферных осадков в их общее количество; M – масса твердых ЗВ, выбрасываемых ИЗА в течение года, г/год; u – среднегодовая средняя скорость ветра в слое распространения примесей, м/сек; r – расстояние от ИЗА, м; L_0 – повторяемость направления ветра данного румба для круговой розы ветров; a – эмпирическая поправка на отличие в интенсивности вымывания жидкими и твердыми осадками; $L_{\text{л}}$, $L_{\text{з}}$ – повторяемости направлений ветра данного румба для летней и зимней розы ветров соответственно; $t_{\text{вл}}$, $t_{\text{вз}}$ – относительные (в долях года) продолжительности выпадения жидких и твердых осадков; K – число рассматриваемых фракций частиц; m_i – доля общей массы выброса, приходящейся на i -ю фракцию частиц; y_i – постоянная вымывания i -й фракции, с⁻¹.

Среднегодовой сухой поток частиц P_c , г/(м²год), оценивается в виде суммы [9]:

$$P_c = \sum_{i=1}^K (V_{\text{из}} t_{\text{цз}} + V_{\text{ил}} t_{\text{цл}}) q_i(m_i M, r, \phi), \quad (2)$$

где r и ϕ – полярные координаты расчетной точки относительно источника и направления на север; $V_{\text{из}}$, $V_{\text{ил}}$ – скорости осаждения i -ой фракции частиц в зимний и летний периоды, м/сек; $t_{\text{цз}}$ – продолжительность периода залегания снежного покрова за вычетом времени выпадения осадков в этот период, сек; $t_{\text{цл}}$ – продолжительность периода отсутствия снежного покрова за вычетом времени выпадения осадков, сек; q_i – среднегодовая приземная концентрация i -ой фракции, г/м³. Расчет производится в каждой интересующей точке отдельно по фракциям частиц с различными параметрами осаждения, после чего результаты

складываются для получения суммарного P_c для данного ИЗА. Для множества источников осаждение в расчетной точке есть сумма по отдельным ИЗА.

Соотношения (1) и (2) показывают, что в рамках принятой модели можно легко оценить сезонное выпадение. В частности, для расчета осаждения в снеговой покров (зимний период) достаточно положить $t_{вл} = t_{сл} = 0$ и использовать суммарный выброс M для каждого ИЗА только за зимний период. При расчете среднегодовых концентраций q_i следует, естественно, использовать только зимнюю розу ветров L_z и другие необходимые метеопараметры и их распределения за зимний период.

Возможные причины погрешностей моделирования

Все упомянутые выше расчетные схемы программно реализованы в составе широко используемого для проектных и управленческих работ в Сибирском регионе программного комплекса “ЭРА” [5, с. 74 – 82] (подробнее см. <http://www.logos-plus.ru/>). Это позволяет использовать накопленные в форматах данного комплекса исходные данные для научных исследований, не входящих в состав регламентированных нормативными документами проектных работ.

Результаты опытной эксплуатации модели и ее сопоставление с данными натурных наблюдений рассматривались в статьях авторов [2, с. 80 – 83; 4, 209 – 21]. Проведенные там практические расчеты для промышленных объектов Кемеровской области, показывают, что построенная модель, несмотря на простоту, достаточно хорошо отражает тенденции осаждения частиц по исследуемой территории. Что касается количественного сопоставления, то расчетные оценки, как правило, существенно превосходят результаты натурных наблюдений (в нормативных базах выбросы источников указаны на максимальную производительность предприятий). Тем не менее, обычно удается подобрать единый для всех экспериментальных точек множитель, после которого общий ход расчетных и измеренных величин совпадает так, что его вряд ли можно назвать случайным.

Причинами расхождения расчетных и измеренных величин могут быть погрешности модели, неточности исходных данных, погрешности проведения самих замеров и т. д. Для выяснения вопроса о том, что в наибольшей степени влияет на результат моделирования, рассмотрим влияние модельных соотношений и основных исходных данных.

Вымывание P_m определяется в первую очередь интенсивностью осадков, их способностью захватывать частицы примеси и скоростью ветра в слое распространения примесей. Как показывают численные эксперименты, характер кривой убывания по расстоянию от источника в формуле (1) слабо влияет на конечный результат при осреднении за год или сезон. Поэтому влияние мокрого осаждения определяется не столько видом зависимости (1), сколько обоснованностью задания входящих в эту зависимость параметров. Кроме того, как отмечается в [6, с. 3 – 15], вымывание дает заметный вклад только вблизи источника.

Результат расчета сухого осаждения зависит главным образом от качества модели расчета среднегодовых (среднесезонных) концентраций q_i , входящих в выражение (2). Известно, что построение таких моделей в большинстве случаев основано на расчете концентраций при заданных метеоусловиях с последующим осреднением с известными распределениями мощностей выбросов и метеоусловий в течение года (сезона).

Основное соотношение, используемое в [11] для вычисления средней за заданный период времени концентрации $q(M_o, r, \phi)$ в полярных координатах r, ϕ имеет вид:

$$q(M_o, r, \phi) = \frac{p_1(\phi)M_o}{r} \int_0^\infty du \int_0^\infty d\lambda p_2(u) p_3(\lambda) q_o(r, u, \phi, \lambda, H_e). \quad (3)$$

Расшифровка обозначений, формулы для подынтегральной функции q_o и эффективной высоты источника H_e представлены в [6, с. 3 – 15], M_o – средний выброс примеси из источника за период осреднения.

Для практического использования соотношения (3), в дополнение к стандартным данным, необходимо задать для интересующего периода осреднения плотности распределения трех метеорологических параметров: направления ветра $p_1(\phi)$; скорости ветра $p_2(u)$ и интенсивности турбулентного перемешивания $p_3(\lambda)$. Здесь: $\lambda = 1.15 K_1 / u_2$; K_1 – значение коэффициента турбулентности на уровне 1 м, определенное согласно Наставлению по наблюдениям на теплобалансовых станциях; u_2 – измеренное в рассматриваемый срок значение скорости ветра на уровне 2 м. Метод перехода от стандартной 8-и румбовой розы ветров, которая представлена в выражении (1) как L_n и L_z , к функции $p_1(\phi)$, описан в [11], а рекомендуемый вид распределений $p_2(u)$ и $p_3(\lambda)$ приведен в [8].

В предыдущих методических указаниях [9] предлагалась модель расчета осредненных за длительный период концентраций с упрощенной технологией вычислений, где вместо интегралов используются средние значения скорости ветра \bar{u} (как в формуле (1)) и показателя стратификации атмосферы A , установленного для различных районов РФ с целью единообразного использования нормативной методики ОНД-86. Сами же приближенные формулы, представленные в [9], дают возможность пересчитать аналог функции q_0 через параметры источника, предназначенные для расчета максимального разового загрязнения атмосферы.

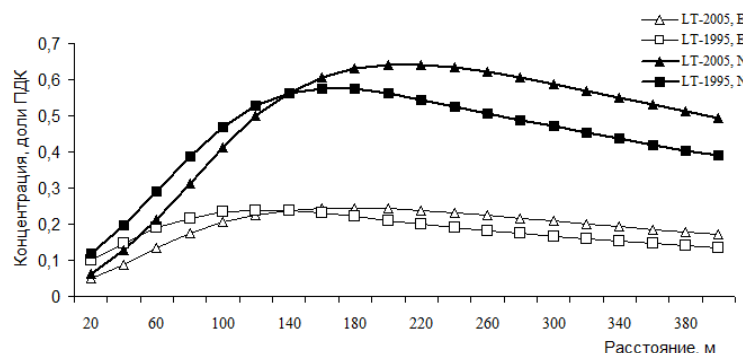


Рис. 1. Сравнение среднегодовой концентрации (в долях ПДК) газообразной примеси, рассчитанной по модели [11] (LT-2005) и модели [9] (LT-1995). Верхняя пара кривых (жирные линии) соответствует северному (N) направлению ветра, а нижняя – западному (E)

Обе модели реализованы в программном комплексе ЭРА, причем расчетный модуль для модели [11] протестирован и согласован экспертами ГГО им. А. И. Воейкова для использования в проектных работах. Обе модели используют единые входные данные по источникам и процедуру сглаживания розы ветров. Один из примеров сравнения результатов расчетов с использованием этих моделей представлен на рисунке 1. Эти расчеты были проведены для неорганизованного площадного пылящего источника с высотой 12 метров и горизонтальными размерами 60 x 100 метров. Такой источник является характерным (размеры, конечно, могут быть различные) для угольной промышленности и является в нормативных базах приближением угольных складов или отвалов породы. Метеорологические данные соответствуют метеостанции г. Белово за зимний сезон 2009 – 2010 годов. Эта станция является представительной для большей части Ерунаковского угледобывающего района Кузбасса, который весьма интенсивно разрабатывается в настоящее время.

Рисунок 1 показывает, что использование различных моделей для расчета концентрации, скорее всего, не может являться причиной больших ошибок при расчете сухого осаждения. Это также согласуется с выводом С. Ханна [1] о том, что долгосрочные модели атмосферной диффузии дают результаты с погрешностью не более 20 %. Таким образом, упрощенная модель [9] может быть применима для быстрых оценочных расчетов, поскольку вычисление интегралов с погрешностью не более 2 – 3 % в полной формуле (3) занимает на порядок больше времени.

Оценка влияния изменчивости метеопараметров и дисперсного состава

Как правило, при нормативных расчетах среднегодовых концентраций [11] и базирующихся на них хронических и канцерогенных рисков для здоровья населения [13] используются климатические повторяемости $p_1(\varphi)$, $p_2(u)$ и $p_3(\lambda)$ метеорологических параметров. Они могут быть запрошены для территории расположения города или промышленного предприятия в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. Однако, при сопоставлении с натурными наблюдениями (например, с данными снеговых проб) представляется интересным знать распределения метеопараметров для конкретного года или сезона. С целью определения влияния изменчивости метеопараметров от года к году мы обработали данные стандартных метеорологических наблюдений для района г. Белово за три года (данные взяты с сайта www.gr5.ru).

Влияние реальной для данной территории изменчивости распределения $p_3(\lambda)$, климатический вид которого рассчитывается в ГГО им. А. И. Воейкова, оценить пока не представляется возможным, поскольку данные теплобалансовых станций отсутствуют (как и сами станции), а метод расчетной оценки [7] предполагает знание температуры почвы, которая не приводится в составе стандартных 8-и срочных наблюдений. Построение конкретных распределений $p_3(\lambda)$ станет возможным в ближайшее время, по мере накопления данных с приобретенного в 2012 году ультразвукового метеорологического комплекса

АМК-03, разработанного в ИМКЭС СОРАН и позволяющего определять характеристики турбулентности, в том числе и K_z .

Изменчивость распределения скорости ветра $p_2(u)$ и ее влияние на расчет средних концентраций при круговой розе ветров показаны на рисунке 2. Из трех обработанных зимних сезонов оставлены только два с максимальными отклонениями, поскольку распределение $p_2(u)$ для зимы 2010 – 2011 годов практически полностью повторяет таковое за зиму 2009 – 2010 годов.

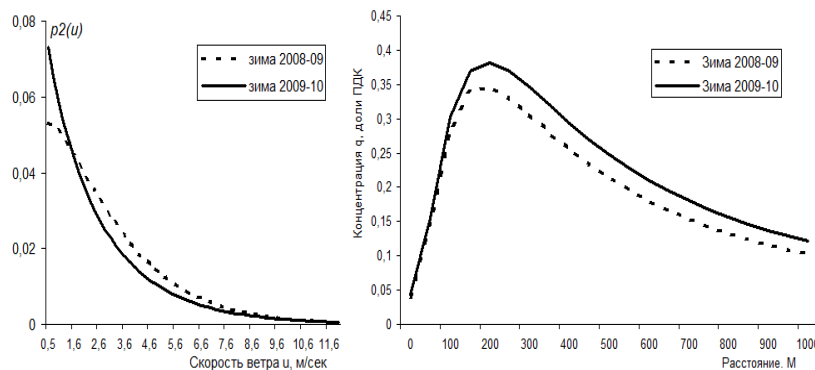


Рис. 2. Естественные изменения плотности распределения скорости ветра (слева) и их влияние на расчет среднегодовой концентрации от площадного источника при круговой розе ветров (справа)

Несмотря на то, что зима 2009 – 2010 годов отличалась заметно большей повторяемостью слабых скоростей ветра, влияние данных отличий на результат расчета среднегодовой концентрации от неорганизованного пылящего источника (отвал) составляет порядка 10 % в районе максимума концентрации (250 м от центра источника) и далее слабо затухает.

На рисунке 3 показаны изменения от года к году повторяемости направлений ветра (розы ветров) за зимние периоды трех последних лет. Получена оценка влияния соответствующих сглаженных функций $p_1(\varphi)$ на расчетные значения сухого осаждения пыли от неорганизованного площадного источника в западном и северном направлениях. При этом во всех трех расчетах использован единый дисперсный состав m_{i1} суммарного выброса, приведенный в таблице в 4-й строке (Распределение 1). Нетрудно заметить, что влияние естественной изменчивости повторяемости направлений ветра только за 3 года может привести к различию в результатах суммарного осаждения пыли почти в 2 раза.

Параметры выброса промышленных источников, содержащиеся в базах данных для нормативных расчетов, в большинстве случаев получаются с привлечением расчетных методов, официально рекомендованных в РФ для тех или иных типов производственных процессов. Рассчитанные параметры контролируются природоохранными властями на этапе утверждения проектов. В результате можно считать, что данные инвентаризации выбросов являются подобными для одинаковых типов производств. И если величина выброса какого-то источника содержит погрешность, то она с большой долей вероятности характерна и для остальных аналогичных источников тех же производств. Таким образом, в силу линейности формул (1) и (3) погрешности определения мощностей выброса промышленных источников приводят в рамках данной модели к систематической ошибке при расчете средней концентрации q_i .

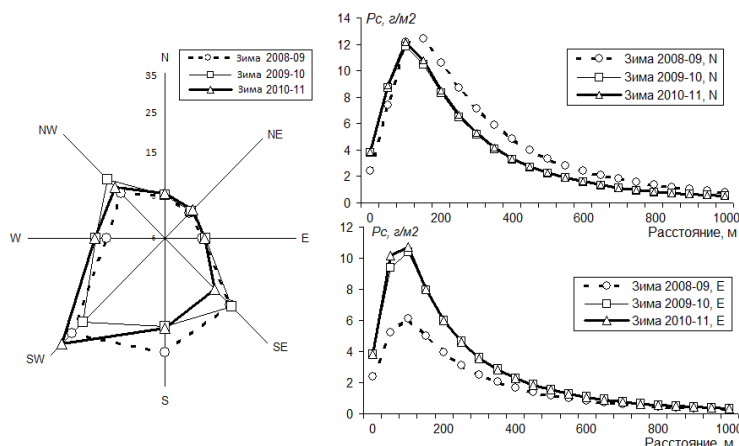


Рис. 3. Изменчивость зимней розы ветров г. Белово и ее влияние на расчет выпадения пылевых частиц в северном (N) и западном (E) направлениях от неорганизованного площадного источника

Таблица

Три варианта дисперсного состава выброса пылящего источника

Номер фракции, i	1	2	3	4	5
Размер частиц, μm	<1	1-10	10-50	50-100	>100
Скорость осаждения, V_i , м/с	0.001	0.007	0.04	0.15	0.5
Распределение 1, $100m_{i1}, \%$	20	47	22	8	3
Распределение 2, $100m_{i2}, \%$	15	40	30	10	5
Распределение 3, $100m_{i3}, \%$	50	30	18	2	1

Однако нормативные базы данных не содержат в настоящее время информации о распределении m_i частиц по размерам в суммарных пылевых выбросах M . На рисунке 4 показаны результаты модельных расчетов, полученные для фракционного состава выброса с тремя вариантами m_i , $i=1, \dots, 5$, представленными в таблице. Распределение 1 (m_{i1}) и скорости осаждения V_i для действующего отвала (работа техники и сдувание) взяты из [14], где был проведен литературный обзор немногочисленных экспериментальных исследований дисперсного состава выбросов предприятий угледобычи (в основном для Донецкого бассейна). Однако достаточно очевидно, что фракционный состав существенно зависит от различных факторов (марка угля, прочность породы, интенсивность обработки). Для имитации погрешности в задании дисперсного состава предположим, что количество крупных частиц несколько увеличилось (за период осреднения поверхность отвала интенсивно обрабатывалась горной техникой – распределение 2). В распределении 3, напротив, преобладают мелкие частицы, что возможно в случае, когда основной механизм образования частиц есть ветровое сдувание. При этом суммарный выброс M предполагается неизменным.

На рисунке 4 (слева) можно видеть изолинии расчетного суммарного сухого осаждения пыли (P_c , формула (2)) в окрестности ранее описанного неорганизованного площадного источника с распределением 1. При этом средние концентрации q_i рассчитаны для метеоусловий зимы 2008 – 2009 годов. В правой части рисунка показано влияние изменения распределения выброса по размерам частиц m_i при неизменности других данных по линии на север от центра источника. Нетрудно заметить, что результаты меняются почти в 3 раза.

Проведенные выше расчеты показывают, что для получения достаточно надежных модельных оценок осаждения пылевых частиц в окрестности объектов угледобывающей промышленности необходимо весьма аккуратно подходить к подготовке входных данных.

Изменение повторяемости скоростей ветра достаточно слабо влияет на результаты моделирования.

Для оценки максимально возможного осаждения необходимо выбирать наиболее неблагоприятную розу ветров, причем для каждого направления ветра.

Наибольшее влияние на результаты моделирования оказывает задание дисперсного состава суммарного выброса, для определения которого необходимы экспериментальные исследования. В частности, для неорганизованных источников представляется перспективным восстановление дисперсного состава по данным снегового анализа и краткосрочных замеров суммарного осаждения пыли вдоль линии ветра.

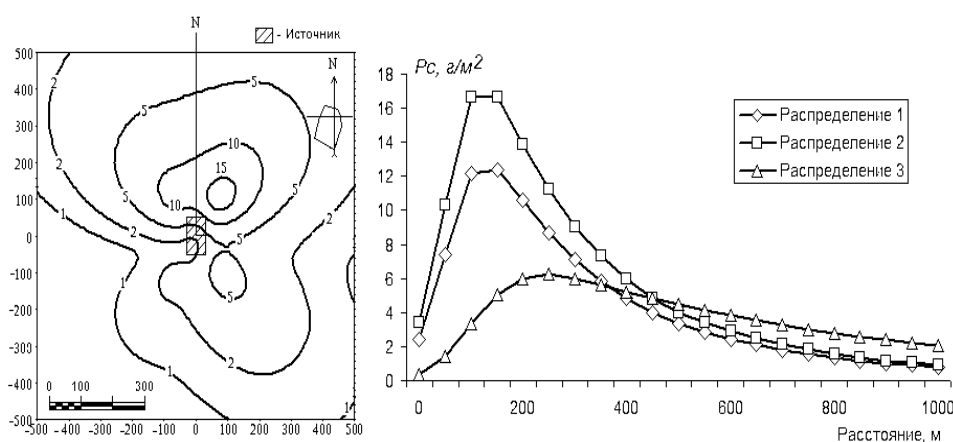


Рис. 4. Изолинии расчетного сухого осаждения P_c ($г/м^2$) за зимний период 2008-2009 в окрестности площадного источника (слева) и влияние дисперсного состава выброса с распределениями из таблицы на результаты расчетов по линии на север (N) от центра источника (справа)

Литература

1. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / под ред. Ф. Т. М. Ньистадта, Х. Ван-Доба – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 350 с.
2. Программный комплекс “ЭРА” / А. А. Быков, П. А. Безруков, К. Ю. Попенко [и др.] // Экология производства. – 2007. – № 9.
3. Разработка и апробация локальной модели выпадения загрязняющих веществ промышленного происхождения из атмосферы на подстилающую поверхность / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин, М. Ю. Климович // Химия в интересах устойчивого развития. – 2002. – Т. 10. – № 5.
4. Моделирование загрязнения почвы атмосферными выбросами от промышленных объектов угледобывающего региона / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин, М. Ю. Климович // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2.
5. Быков, А. А. Особенности построения и практического применения локальной модели загрязнений почвы техногенными выбросами пылевых частиц / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2007. – № 4.
6. Газиев, Я. И. Физико-математическое моделирование процесса аэрального загрязнения почв промышленными дымовыми выбросами в атмосферу и продуктами их физико-химических превращений / Я. И. Газиев, А. К. Соснова // Труды ИЭМ. – Вып. 14 (129). – М.: Гидрометеиздат, 1987.
7. Генихович, Е. Л. Определение коэффициента турбулентности по данным стандартных метеорологических наблюдений / Е. Л. Генихович, Г. И. Осипова // Труды ГГО. – Вып. 479. – Л.: Гидрометеиздат, 1984.
8. Оперативная модель расчета концентраций, осредненных за длительный период / Е. Л. Генихович, М. Е. Берлянд, И. Г. Грачева [и др.] // Труды ГГО им. А. И. Воейкова. – Вып. 549. – СПб.: Гидрометеиздат.
9. Методика экологической экспертизы предпроектных и проектных материалов по охране атмосферного воздуха / Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ. – М., 1995.
10. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. – СПб.: НИИ Атмосфера, 2005. – 211 с.
11. Методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (дополнение к ОНД-86). – СПб.: ГГО им. А. И. Воейкова, 2005.
12. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 92 с.
13. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду 2.1.10.1920-04. – М., 1994. – 163 с.
14. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 с изменением № 1 СанПиН 2.2.1./2.2.1-2362-08 от 10 апреля 2008 г. № 25. “Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов”. – М., 2008.

Информация об авторах:

Быков Анатолий Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-913-123-03-70, e-mail: bykov@icc.kemsc.ru

Bykov Anatoly Aleksandrovitch – Candidate of Physics and Mathematics, senior researcher at Kemerovo branch of the Institute for Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Счастливцев Евгений Леонидович – доктор технических наук, заведующий лабораторией Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-903-944-52-68, e-mail: zavlab@icc.kemsc.ru

Schastlivtsev Evgeniy Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory at Kemerovo branch of the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Пушкин Сергей Григорьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-913-074-99-18, e-mail: pushkin@icc.kemsc.ru

Pushkin Sergey Grigorievich – Candidate of Technical Sciences, senior researcher at Kemerovo branch of the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.