

## А. А. Быков

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института вычислительных технологий СО РАН  
(Кемеровского филиала)

## Е. Л. Счастливец

д-р техн. наук, заведующий лабораторией Института вычислительных технологий СО РАН  
(Кемеровского филиала)

## С. Г. Пушкин

канд. хим. наук, старший научный сотрудник Института вычислительных технологий СО РАН  
(Кемеровского филиала)

УДК 551.551.61

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРНЫХ ВЫБРОСОВ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА И НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ

*Рассматривается совокупность моделей для оценки воздействия атмосферных выбросов угледобывающих предприятий на загрязнение воздуха и наземных экосистем. Приводятся примеры их использования для решения практических задач. Рассматривается вопрос обеспечения моделей специальными метеорологическими параметрами.*

*Ключевые слова: АТМОСФЕРНЫЕ ВЫБРОСЫ, ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ, ВЫПАДЕНИЕ, ПЫЛЕВЫЕ ЧАСТИЦЫ, МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ*

Согласно санитарной классификации предприятия по добыче угля открытым способом (разрезы) относятся к 1-му классу опасности, для которых проводится расчетная оценка рисков для здоровья населения [1]. При расчете острых рисков [2] необходимо вычисление максимальных разовых концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) с использованием модели ОНД-86 [3], разработанной в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова» (ФГБУ «ГГО»). Хронические и канцерогенные риски при вдыхании вычисляются исходя из среднегодовых концентраций ЗВ, для расчета которых в ФГБУ «ГГО» разработана нормативная модель [4] долгосрочного осреднения. Описанные модели рассматривают только распространение концентраций ЗВ в атмосфере, а не выпадения их на поверхность (почву, воду, растительность). Сложившаяся в настоящее время практика расчета рисков для здоровья населения ограничивается воздействием на человека только атмосферного загрязнения. Однако [2] предполагает учет всех путей поступления ЗВ в организм человека.

Таким образом, изучение процессов вторичного поступления ЗВ из атмосферы в почву, воду и продукты питания требует разработки соответствующих расчетных моделей и систем обеспечения исходными данными.

В дополнение к моделям [3] и [4] разработана и доведена до практического использования локальная долгосрочная модель расчета выпадения пылевых частиц на подстилающую поверхность [5]. Все модели реализованы в составе широко используемого в Сибирском регионе для нормативных расчетов программного комплекса «ЭРА» ([www.logos-plus.ru](http://www.logos-plus.ru)), что позволяет использовать накопленные в форматах данного комплекса исходные данные об источниках для дополнительных научных исследований.

Построение модели осаждения, основные соотношения и первые результаты сравнения с данными экспериментов представлены в работе [5]. Авторами проведен обзор литературных источников по дисперсному составу пылевых выбросов, сопровождающих основные процессы угледобычи [6], начаты работы по исследованию влияния составляющих модели на результаты вычислений [7]. В результате обработки

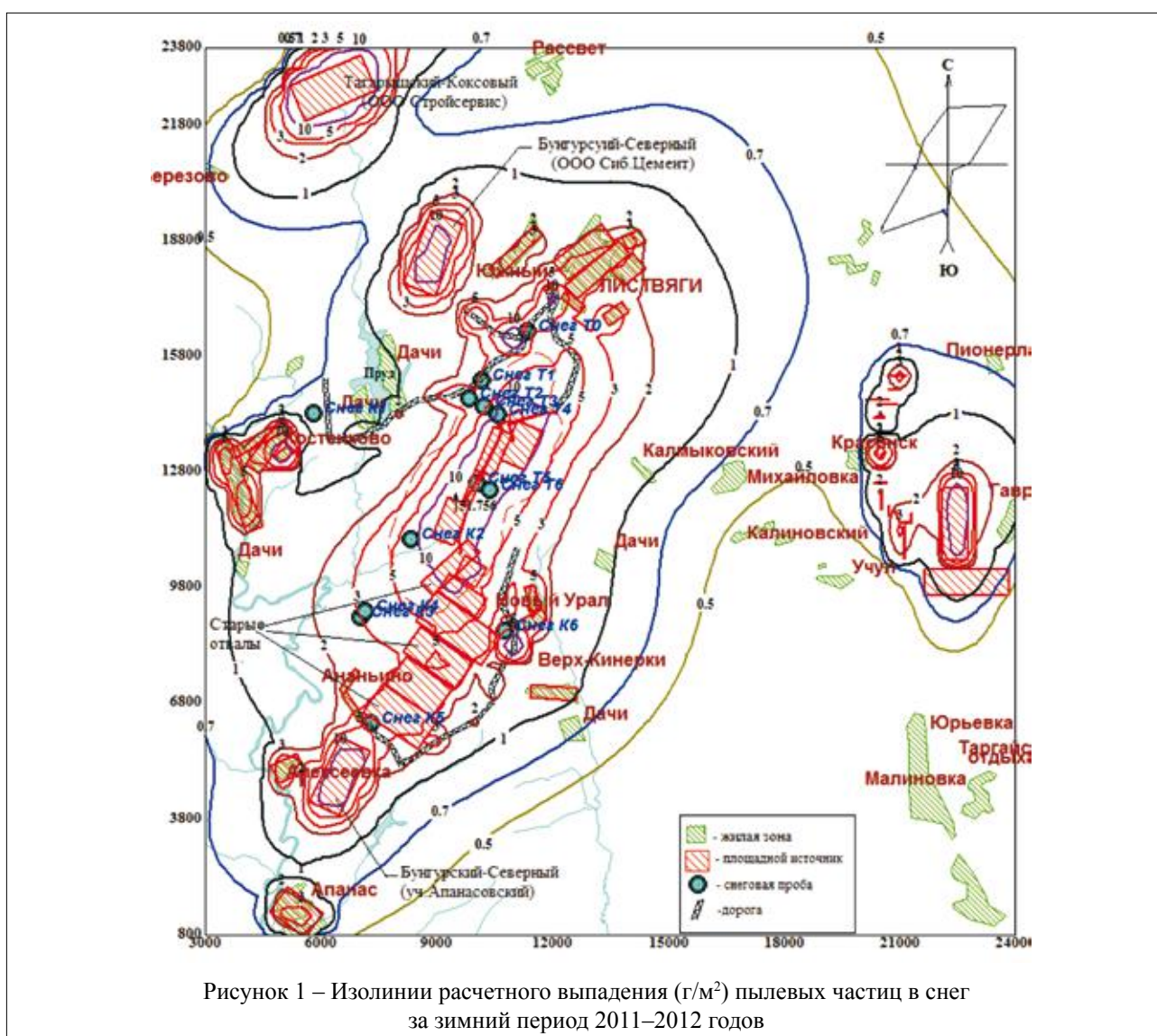
рядов стандартных наблюдений с метеостанций Кузбасса (взяты с сайта [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru)) проведена оценка [8] влияния годовой изменчивости метеопараметров на результаты расчетов выпадения пылевых частиц от типичного карьерного отвала. Показано также, что из всех входных данных наибольшее влияние (в 2–3 раза и более) на результаты моделирования оказывают погрешности в задании дисперсного состава суммарного выброса.

В настоящей работе приводятся результаты применения модели для оценки пылевого загрязнения снега в точках отбора проб весной 2012 года и интегрального выпадения пылевых частиц, соединений азота и серы в снеговой покров для бассейнов малых рек. Расчеты проведены для района расположения разреза Бунгурский-Южный, где ведется интенсивная разработка открытым способом. Рассматривается также вопрос обеспечения модели параметрами пограничного слоя атмосферы, не входя-

щими в состав стандартных метеорологических наблюдений.

Источниками фонового загрязнения изучаемого района являются близлежащие города: Новокузнецк, Прокопьевск, Осинники, Калтан. Минимальное расстояние до них составляет 12–40 км, поэтому влияние на загрязнение атмосферы района выбросов предприятий и автотранспорта этих городов достаточно ощутимо. Оценочные расчеты распространения и выпадения ЗВ, выполненные с использованием названной модели и частично агрегированных данных по источникам выбросов, показывают, что выпадение пылевых частиц от городов в снеговой покров рассматриваемого района составляет от 0,5 до 1,0 г/м<sup>2</sup>.

Весной 2012 года, в районе проведения горных работ разреза ООО «Сибэнергоуголь» и вблизи некоторых населенных пунктов, Институтом почвоведения и агрохимии СО РАН проведены отборы проб снега (рис. 1).



Пробы проанализированы на содержание различных элементов и суммарное содержание пылевых частиц (твердый остаток). Концентрации твердых частиц в снеговой воде (г/литр) пересчитаны с учетом глубины и плотности снежного покрова в размерность г/м<sup>2</sup> за зиму. Сравнение расчетных оценок с данными замеров выпадения в снег представлены на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, порядок измеренных и вычисленных величин для данного класса задач, а также тенденции изменения выпадения пыли от точки к точке частично совпадают. Это говорит о том, что модель достаточно хорошо отлажена на основе полученных ранее расчетов, для которых были проведены соответствующие экспериментальные исследования.

Заметим, что источниками загрязнения в расчете являются разрезы: Бунгурский-Южный (ОАО «Сибэнергоуголь»), Тагарышский-Коксовый (ООО «Стройсервис»), Бунгурский-Северный (ООО «Сибирский Цемент»; 2 участка), ФЛ ООО «Разрез Степановский», старые отвалы, автодороги и печное отопление населенных пунктов (см. рис. 1).

С помощью модельных вычислений получены также оценки количества ЗВ, выпадающих на территории водосборных бассейнов рек промышленного района, часть из которых может быть смыта талыми и дождевыми водами непосредственно в водотоки, а другая – накапливаться в почве, растительности и других наземных экосистемах.

Ниже представлены результаты таких расчетов для территории, прилегающей к промпло-

щадке разреза Бунгурский-Южный, проведенных в сумме для всех групп источников.

Бассейн реки задается на цифровой карте в виде произвольного полигона (рис. 3 А), для каждого из которых определяется покрытие расчетными точками, куда по границе входят все вершины ломаной. Внутри полигона создается прямоугольная сетка с заданным шагом, который используется также для разбиения границы, если длина между соседними вершинами достаточно велика. При вычислении интеграла по бассейну (полигону) последний покрывается минимальным описывающим прямоугольником (часть показана на рисунке 3 В), покрываемым сеткой с начальными шагами  $dX$  и  $dY$ . В каждой ячейке суммарное выпадение вычисляется как произведение  $P_c * S+$ , где  $P_c$  – среднее выпадение по окружающим ячейку расчетным точкам, а  $S+$  – площадь пересечения ячейки с полигоном. Затем шаг покрытия описывающего прямоугольника уменьшается до тех пор, пока результаты интегрирования различаются более заданного предела. Для размеров нашей территории шаг 250 м обеспечивает точность интегрирования на уровне 5 %, 100 м – на уровне 2 %.

В таблице 1 приведено суммарное и удельное (на единицу площади) выпадение ЗВ в бассейны рек от всех групп источников выброса. Кроме пылевых частиц, расчеты проведены для диоксидов азота и серы, данные по которым частично взяты из нормативных баз данных или рассчитаны по удельным показателям. Полужирным шрифтом в таблице выделены максимальные значения.

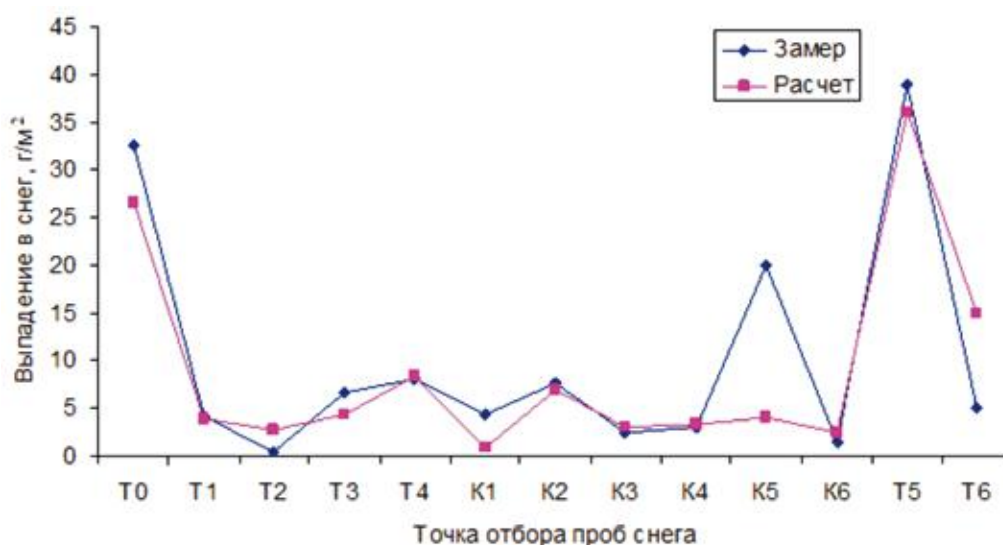


Рисунок 2 – Сравнение значений осадения в снег, полученных по результатам анализа снеговых проб и на основе расчетной модели [5]

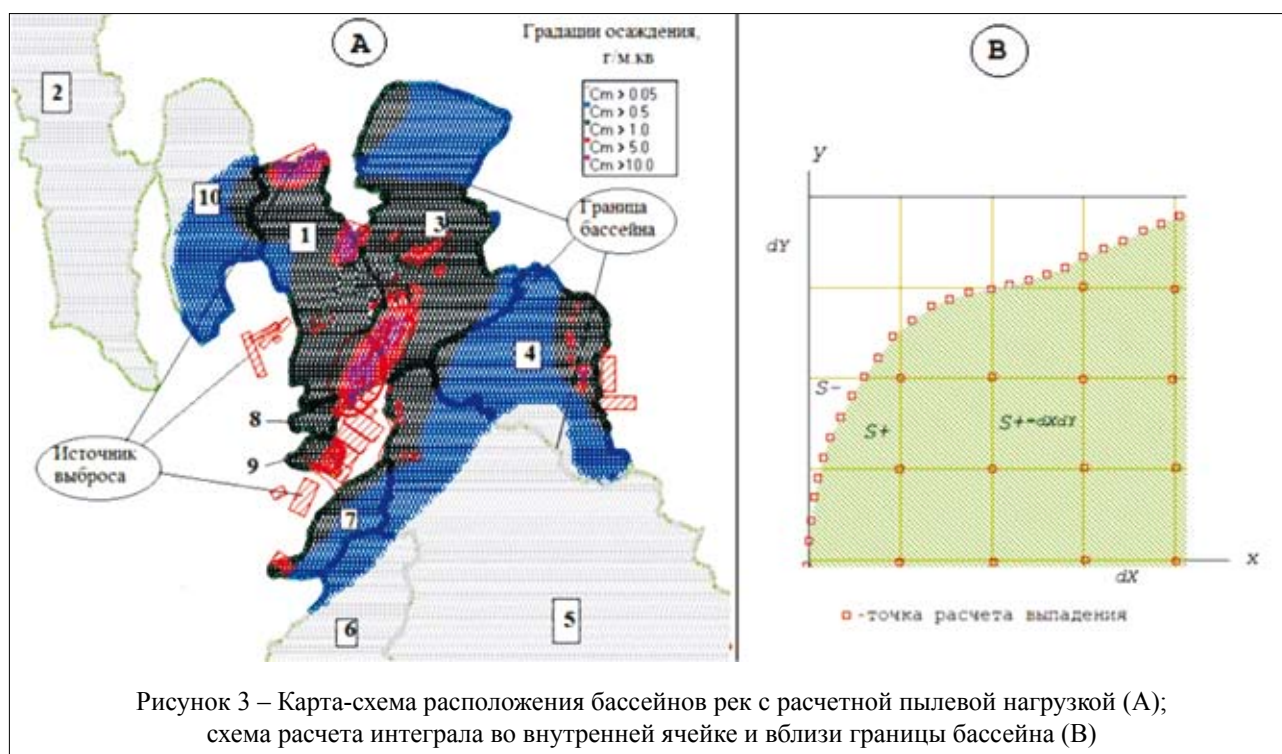


Рисунок 3 – Карта-схема расположения бассейнов рек с расчетной пылевой нагрузкой (А); схема расчета интеграла во внутренней ячейке и вблизи границы бассейна (В)

Таблица 1 – Расчетная оценка выпадения ЗВ в бассейны рек за зимний период

Номер, рис. 3 А	Название реки	Площадь бассейна, км <sup>2</sup>	Суммарное выпадение на всю площадь бассейна, кг. Выпадение на единицу площади, г/м <sup>2</sup>		
			Нитраты	Сульфаты	Пыль
1	Кандалеп	48,5	3180/0,066	479/0,099	350000/7,22
2	Таловая	125	670/0,006	63/0,0005	17000/0,14
3	Бунгур	85	4569/0,054	953/0,0112	260000/3,06
4	Учул	61,5	1634/0,027	303/0,0049	82000/1,33
5	Кинерка	304,5	3629/0,012	806/0,0026	102000/0,33
6	Ачигус	52	718/0,014	206/0,0040	22000/1,36
7	Углеп	14,8	4190/0,28	156/0,0105	20100/4,25
8	Безым. Ручей	3,74	264/0,071	47/0,0126	15900/5,12
9	Кишта	3,71	211/0,057	65/0,0175	19000/0,57
10	Березовка	53,1	10760,021	122/0,0043	30340/1,23

На основе расчетных оценок бассейны рек ранжированы по удельному выпадению (г/м<sup>2</sup>), которое меняется в пределах 0,2–7,3 для пылевых частиц, 0,015–0,066 для нитратов и 0,01–0,018 для сульфатов. В нашей стране нет законодательно установленных (как ПДК в атмосфере) нормативов допустимого осаднения примесей на почву и экосистемы. Однако в рекомендациях по отнесению территорий к зонам экологического бедствия [9] можно найти критические уровни выпадения пыли и основных закисляющих примесей для экосистем северных и центральных районов России: 100, 0,32 и 0,28 г/м<sup>2</sup> в год для пыли, соединений серы и азота соответственно. Несмотря на то, что непосредственно в промыш-

ленных зонах разрезов расчетные величины осаднения пыли (115 г/м<sup>2</sup>) и нитратов (0,26 г/м<sup>2</sup>) сравнимы к указанными критериями, территории бассейнов рек в среднем еще достаточно далеки от такой степени загрязнения, при которой их можно рассматривать как зоны чрезвычайной экологической ситуации.

Теперь рассмотрим проблему обеспечения модели выпадения метеорологическими параметрами, задание которых оказывает существенное влияние на результаты вычислений [8].

Суммарный поток частиц из атмосферы на подстилающую поверхность складывается из вымывания осадками  $P_m$  и сухого выпадения  $P_c$ . В самом общем и упрощенном виде мо-

крый поток записывается как  $P_m = uwq_z$ , где  $u$  – коэффициент вымывания примеси;  $w$  – интенсивность осадков;  $q_z$  – интегральная концентрация в вертикальном столбе от земли до нижней границы дождевых (снеговых) облаков, мг/м<sup>3</sup>. Сухой поток как  $P_c = V_d q_0$ , где  $q_0$  – приземная ( $z = 0$ ) концентрация примеси, мг/м<sup>3</sup>; а  $V_d$  – скорость выпадения частиц примеси на поверхность, м/с.

Интенсивность осадков  $w$  является устойчивой характеристикой как по пространству, так и по времени. Поэтому рассмотрим влияние метеопараметров на скорость выпадения  $V_d$  и расчет средней за длительный период концентрации  $q_0$ .

Следует отметить, что имеющий размерность скорости коэффициент  $V_d$  фактически является неким коэффициентом захвата поверхностью земли находящихся над ней частиц с концентрацией  $q_0$ . Параметр  $V_d$  зависит от скорости гравитационного осаждения  $V_g$ , шероховатости поверхности  $Z_0$  и параметров, характеризующих состояние атмосферы. Для выяснения перечня необходимых параметров состояния атмосферы рассмотрим выражение, принятое [10] для расчета  $V_d$  в модели AERMOD, рекомендованной природоохранным агентством США для регуляторных приложений (аналогично ОНД-86 в России):

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_p + R_a R_p V_g} + V_g, \tag{1}$$

где  $R_a$  – аэродинамическое сопротивление, с/м;  $R_p$  – сопротивление ламинарного подслоя, с/м;  $V_g$  – скорость гравитационного осаждения частиц, м/с. Не приводя полных формул, укажем зависимости  $R_a = R_a(u^*, L, Z_0)$ ,  $R_p = R_p(u^*, L, w^*, \nu)$ , где:  $u^*$  – скорость трения;  $L$  – масштаб Монина–Обухова;  $Z_0$  – параметр шероховатости;  $w^*$  – масштаб конвективной скорости;  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха. Смысл перечисленных параметров пограничного слоя атмосферы можно найти в [11].

Скорость  $V_g$  рассчитывается по известной классической формуле Стокса. На рисунке 4 показаны скорости гравитационного осаждения частиц различных размеров применительно к плотностям, характерным для пылевых выбросов угледобывающих предприятий. Расчеты по формуле (1) показывают, что  $V_d$  может существенно (в 2–3 раза) отличаться от  $V_g$  для мелких частиц (до 20–30 мкм), что, в свою очередь, оказывает значительное влияние на расчет выпадения, особенно на удалении от источника на 1 км и более, т. е. вне границ санитарно защитных зон разрезом.

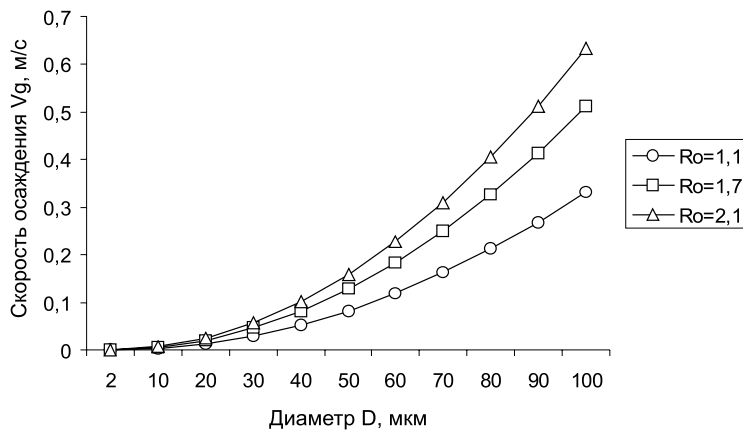


Рисунок 4 – Скорости гравитационного осаждения  $V_g$  для частиц различных размеров  $D$  и плотностей  $R_0$ , рассчитанные по формуле Стокса

При проведении расчетов выпадения за длительный период необходимо вычисление средней концентрации  $q_0(M, r, \varphi)$ , где  $r, \varphi$  – полярные координаты расчетной точки, причем  $r$  – расстояние от источника,  $\varphi$  – направление ветра,  $M$  – средний выброс примеси из источника за период осреднения:

$$q_0(M, r, \varphi) = \frac{p_1(\varphi)M}{r} \int_0^\infty du \int_0^\infty d\lambda p_2(u) p_3(\lambda) q_0(r, u, \varphi, \lambda, H_0). \tag{2}$$

Расшифровка обозначений формулы для подынтегральной функции  $q_0$  и эффективной высоты источника  $H_e$  представлены в [4]. Для практического использования соотношения (2) в дополнение к стандартным данным необходимо задать плотности распределения трех метеорологических параметров: направления ветра  $p_1(\varphi)$ ; скорости ветра  $p_2(u)$  и интенсивности турбулентного перемешивания  $p_3(\lambda)$ . Здесь:  $\lambda = 1,15K_1/u_2$ ;  $K_1$  – значение коэффициента турбулентности на уровне 1 м,  $u_2$  – значение скорости ветра на уровне 2 м. Метод перехода от стандартной 8-румбовой розы ветров к  $p_1(\varphi)$  и рекомендуемый вид распределений  $p_2(u)$  и  $p_3(\lambda)$  приведены в [4].

Климатические повторяемости  $p_1(\varphi)$ ,  $p_2(u)$  и  $p_3(\lambda)$  могут быть запрошены для интересующей территории в ФГБУ «ГГО» с точностью порядка 100 км. Однако при сопоставлении с натурными наблюдениями (например, с данными снеговых проб) интерес могут представлять распределения метеопараметров для конкретного сезона и точного района расположений конкретного пред-

приятия. Функции  $p_1(\varphi)$ ,  $p_2(u)$  можно приближенно построить по стандартным наблюдениям на ближайшей метеостанции, но для построения  $p_3(\lambda)$  требуются градиентные наблюдения, которые не проводятся в Кемеровской области.

Обеспечение соотношений (1) и (2) качественными и обоснованными метеорологическими параметрами турбулентности возможно реализовать на основе передвижного ультразвукового метеорологического комплекса АМК-03 ([www.imces.ru](http://www.imces.ru)), приобретенного Кемеровским филиалом ИВТ СО РАН в 2012 году. Комплекс непосредственно измеряет проекции скорости и направление ветра; температуру; давление; влажность; плотность воздуха. К вычисляемым параметрам относятся  $u^*$  – скорость трения;  $L$  – масштаб Монина–Обухова;  $H$  – вертикальный поток тепла. Зная параметр шероховатости местности, и оценив высоту слоя перемешивания на основе известных соотношений для пограничного слоя атмосферы можно вычислить все необходимые параметры для расчета среднегодовой концентрации  $q_0$  и скорости выпадения частиц  $V_d$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов : 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. – М., 2008.
2. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду 2.1.10.1920-04. – Москва, 1994. – 163 с.
3. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 92 с.
4. Методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (дополнение к ОНД-86). – С-Пб.: ГГО им. А.И.Воейкова, 2005.
5. Быков, А. А. 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. – С. 563–573.
6. Быков, А. А. Моделирование загрязнения почвы атмосферными выбросами от промышленных объектов угледобывающего региона / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин, О. В. Смирнова // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2. – С. 209–217.
7. 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. – С. 74–82.
8. Быков, А. А. Влияние изменчивости метеорологических параметров и дисперсного состава атмосферных выбросов на модельные оценки осаждения промышленной пыли / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2012. – Т. 2, № 4 (52). – С. 10–16.
9. Критерии оценки экологической обстановки территории для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия : Методика. – Министерство природных ресурсов РФ, 1992, (НЦПИ).
10. Wesely, M. L., P. V. Doskey, and J.D. Shannon, 2001: Deposition Parameterizations for the Industrial Source Complex (ISC3) Model. Draft ANL report ANL/ER/TM-nn, DOE/xx-nnnn, Argonne National Laboratory,

Argonne, Illinois 60439.

11. Хромов, С. П. Метеорологический словарь / С. П. Хромов, Л. И. Мамонтова – М.: Гидрометео-издат, 1974. – 569 с.

*MODELING THE IMPACT OF ATMOSPHERIC EMISSIONS OF COAL MINING ENTERPRISES ON AIR POLLUTION AND TERRESTRIAL ECOSYSTEMS*

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

*A set of models for assessment of the impact of atmospheric emissions of coal mining enterprises on air pollution and terrestrial ecosystems is presented. The examples of its use to solve practical problems. The issues of providing special models meteorological parameters are considered.*

*Key words: AIR EMISSION, AIR POLLUTION, FALL, DUST PARTICLES, METEOROLOGICAL DATA*

*Быков Анатолий Александрович  
e-mail: bykov@ict.sbras.ru*

*Счастливец Евгений Леонидович  
e-mail: schastlivtsev@ict.sbras.ru*

*Пушкин Сергей Григорьевич  
e-mail: pushkin@ict.sbras.ru*