

УДК 551.578.46:504.4:622.333.012

ВЛИЯНИЕ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ СНЕГОВОГО ПОКРОВА ПРИЛЕГАЮЩИХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ Г. МЕЖДУРЕЧЕНСК)

Осипова Нина Александровна¹,
osipova@tpu.ru

Быков Анатолий Александрович²,
bykov@icc.kemsc.ru

Таловская Анна Валерьевна¹,
talovskaj@yandex.ru

Николаенко Александр Николаевич¹,
saiiiek@mail.ru

Язиков Егор Григорьевич¹,
yazikoveg@tpu.ru

Ларин Сергей Анатольевич³,
larin57@list.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 650025, Кемерово, ул. Рукавишниковая, 21.

³ Институт экологии человека ФИЦ УУХ СО РАН, Россия, 650065, Кемерово, Ленинградский проспект, 10.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения специфики влияния пылевых выбросов угледобывающих предприятий на загрязнение прилегающих урбанизированных территорий.

Цель: оценка уровня пылевой нагрузки расчетным и экспериментальным методом в зоне влияния угледобывающих предприятий по данным изучения снегового покрова на территории г. Междуреченска и его окрестностей.

Объекты: пробы снега, отобранные по площадной схеме на территории города, и по векторной в направлении от города к угольным объектам

Методы: атмогеохимический, расчетный с использованием модели долгосрочного выпадения частиц из атмосферы на поверхность.

Результаты. Территории с максимальными значениями пылевой нагрузки расположены в районе угольного разреза (459 мг/м²·сут.) и шахты (422 мг/м²·сут.), эти значения соответствуют, согласно градации, высокому уровню загрязнения. Высокие значения пылевой нагрузки (200–245 мг/м²·сут.) на территории города соответствуют расположению угольных котельных с открытыми складами. На окраине центральной и восточной части города пылевая нагрузка дополнительно формируется за счет ветрового переноса пыли от близ расположенных угольных объектов. По уменьшению среднего значения уровня пылевой нагрузки исследованные территории образуют ряд: юго-западная часть от города в направлении угольного разреза (260±45 мг/м²·сут.) > северо-восточная часть от города в направлении шахты (153±71 мг/м²·сут.) > восточная часть города (131±12 мг/м²·сут.) > западная часть города (128±17 мг/м²·сут.) > юго-восточное направление от города в сторону турбазы (30±1 мг/м²·сут.). Кратность превышения фоновой пылевой нагрузки составила, соответственно, 24,8; 14,6; 12,5; 12,2; 2,9 на исследованных территориях. Доля техногенных частиц, включающих угольную пыль, сажу, шлаки, алюмосиликатные микросферы, волокна, максимальна на территориях, прилегающих к угольному разрезу (85 %) и шахте (88 %), несколько ниже в пределах городской черты (76–79 %). Содержание угольных частиц меняется от 20–23 % на территории города до 44–82 % в районах шахт и разрезов, при этом поступление угольной пыли при подземном способе добычи значительно ниже, чем при открытом. На территории города доля частиц, характеризующих сгорание угля (сажа), составляет 33–36 %. Проведено сопоставление расчетных и экспериментально определенных значений пылевой нагрузки. Достоверно значимые коэффициенты корреляции для западной и восточной частей города, района угольного разреза и турбазы составили, соответственно, 0,66 (число проб 11); 0,83 (число проб 21); 0,73 (9 проб); 0,76 (6 проб). Модель долгосрочного выпадения достаточно хорошо отражает изменение количественных показателей осаждения на исследуемой территории. Результаты моделирования могут быть в дальнейшем использованы для оценки хронических ингаляционных рисков для здоровья населения, базирующихся на среднегодовых концентрациях.

Ключевые слова:

Снеговой покров, пылевая нагрузка, угольная котельная, открытая и подземная добыча угля, модель долгосрочного выпадения.

Введение

Значимым показателем загрязнения атмосферного воздуха городов является присутствие пыли в снеговом покрове. Снежный покров выступает как надежный индикатор загрязнения атмосферы [1–4]. Твердый осадок снегового покрова характеризует пылевое выпадение в зимний период, что особенно актуально для регионов с длительным периодом продолжительности снегового покрова [3]. Промышленные предприятия влияют на интенсивность пылевого выпадения, характеризуемого величиной пылевой нагрузки. При этом пылевая нагрузка в районах влияния разнопрофильных предприятий различается и зависит от характера производственной деятельности [4–7]. Особое место среди отраслей производства, вносящих вклад в пылевое загрязнение атмосферы, занимает угольная промышленность [8–12]. Кузбасс – регион с развитой угледобывающей и углеперерабатывающей промышленностью [13, 14], доля Междуреченска в общекузбасской добыче составляет почти 20 %.

Угольные предприятия находятся в непосредственной близости от городской черты, а также располагаются на правом берегу р. Уса, в 5–20 км от черты города. На левом берегу р. Томь размещены разрезы с ежегодной добычей свыше 56 тыс. т топлива, где круглосуточно ведутся выемочно-погрузочные и буровые работы, а также 1 раз в неделю производятся массовые взрывы горных пород. Суммарный годовой выброс твердых частиц предприятий угледобычи составляет около 4400 т. При преобладании юго-западных ветров большая доля загрязняющих веществ с левого берега достигает города.

В городе большое количество котельных, как муниципальных, так и ведомственных. Выброс муниципальных составляет около 3300 т угольной золы и пыли, причем большая часть выбрасывается в зимний период. Наиболее мощные котельные расположены в восточной части города.

На долю остальных стационарных и передвижных источников приходится около 1350 т. Из них следует отметить предприятия строительной отрасли, расположенные непосредственно в городе.

Итого в атмосферу города выбрасывается ежегодно порядка 9000 т пылевых частиц, и эта цифра в последние годы остается достаточно устойчивой.

Постановка задачи

Выбросы крупных угледобывающих предприятий содержат большой процент пылевых частиц разнообразного химического состава, обладающих эффектом оседания на подстилающую поверхность. Даже если их содержание в воздухе не превышает установленных нормативов, они могут накапливаться в депонирующих средах (почвах, снежном покрове). Поэтому, с одной стороны, содержание пыли отражает загрязнение атмосферного воздуха, а с другой, характеризует процессы вторичного поступления загрязнителей в природные

среды при таянии снега, что проявляется в составе атмосферных выпадений в бассейне р. Оби [15–17].

Изучение этих процессов требует пристального внимания. Точность оценок возрастает при сопоставлении экспериментальных данных и результатов расчета по модели выпадения частиц с использованием информации об источниках выбросов и параметрах, определяющих распространение примесей в атмосфере. Экспериментальные данные об уровне пылевой нагрузки в районах угледобывающих предприятий, без дифференциации на зоны, подверженные выбросам угледобывающих и теплоэнергетических предприятий в разной степени, ранее получены [16, 17], однако сопоставление экспериментальных и расчетных данных для города, вблизи которого расположено такое количество угольных объектов, ранее не проводилось. В условиях продолжающегося роста добычи угля в России и на Кузбассе такое исследование поможет прогнозировать риски, связанные с дальнейшим развитием отрасли и ростом количества пылевых выбросов [18].

Объекты и методика исследований

Пробы снега отбирались в период максимального накопления влагозапаса и загрязняющих веществ в феврале 2015 г. на территории города (38 проб) и в феврале 2016 г. на угольных разрезах (14 проб, рис. 1). На территории города использовали площадную систему наблюдения в масштабе 1:80000 [17]. Для оценки вклада угольных объектов, действующих вблизи города, в формирование пылевого загрязнения за счет ветрового переноса проводили отбор проб по профилям согласно главенствующему направлению ветра. Профили были заложены:

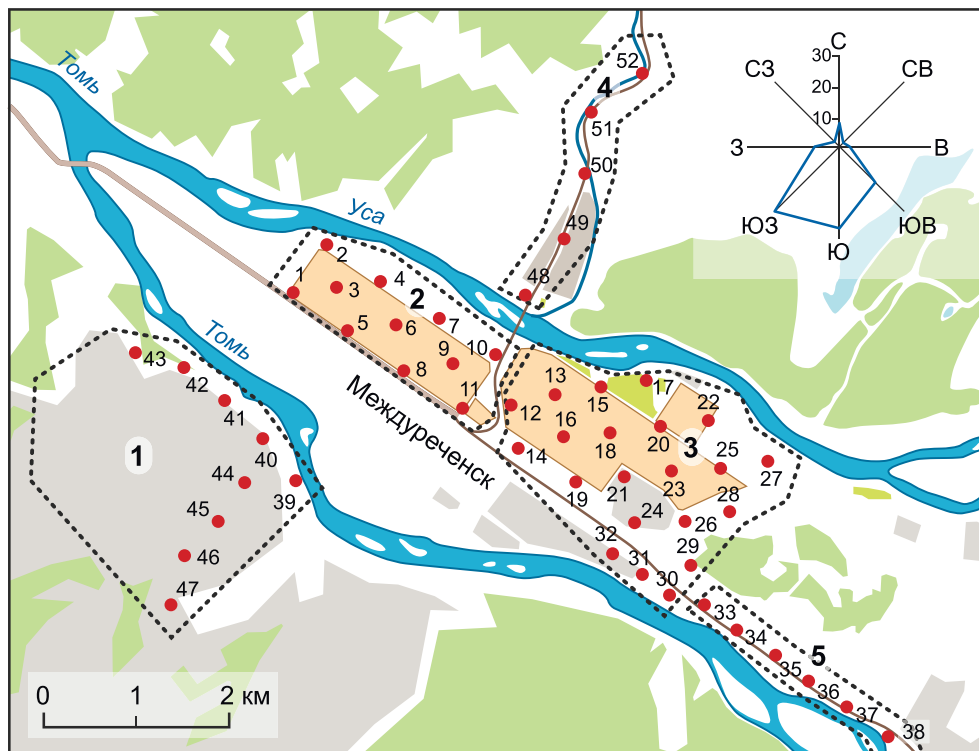
- в юго-западной части от города в направлении угольного разреза;
- северо-восточной части от города в направлении шахты;
- юго-восточном направлении от города в сторону турбазы.

На этих профилях выбирали доступные участки для отбора проб, где возможно максимальное накопление пылевых выбросов, переносимых от угольных объектов во время буровзрывных работ в сторону города. Фоновые пробы отобраны в 15 километрах восточнее города, где влияние города и угольных объектов минимально.

Отбор и пробоподготовка описаны ранее [16, 17]. Схема пробоподготовки представлена на рис. 2.

Пробы отбирались методом шурфа, на всю мощность снегового покрова, за исключением пятисантиметрового слоя над почвой, с замером сторон и глубины шурфа. Все пробы были помещены в полиэтиленовые пакеты, в журнале был указан номер пробы и его длина, ширина, глубина шурфа, дата отбора. Вес одной пробы составлял 17–19 кг.

Таяние снега проводили при комнатной температуре 18–19 °С в пластмассовых предварительно



● – точки отбора проб снега - - - границы изучаемых территорий

Рис. 1. Расположение точек отбора проб на территории г. Междуреченска (2015 г.), и на угольных объектах (2016 г.): 1 – юго-западная часть от города в направлении угольного разреза; 2 – западная часть города; 3 – восточная часть города; 4 – северо-восточная часть от города в направлении шахты; 5 – юго-восточное направление от города в сторону турбазы

Fig. 1. Sampling points in Mezhdurechensk (2015) and in coal plants (2016): 1 is the south-west direction from town to open-cut coal mine; 2 is the west part of the town; 3 is the east part of the town; 4 is the north-east direction from the town to coal mine; 5 is the south-west direction from the town to tourist camp

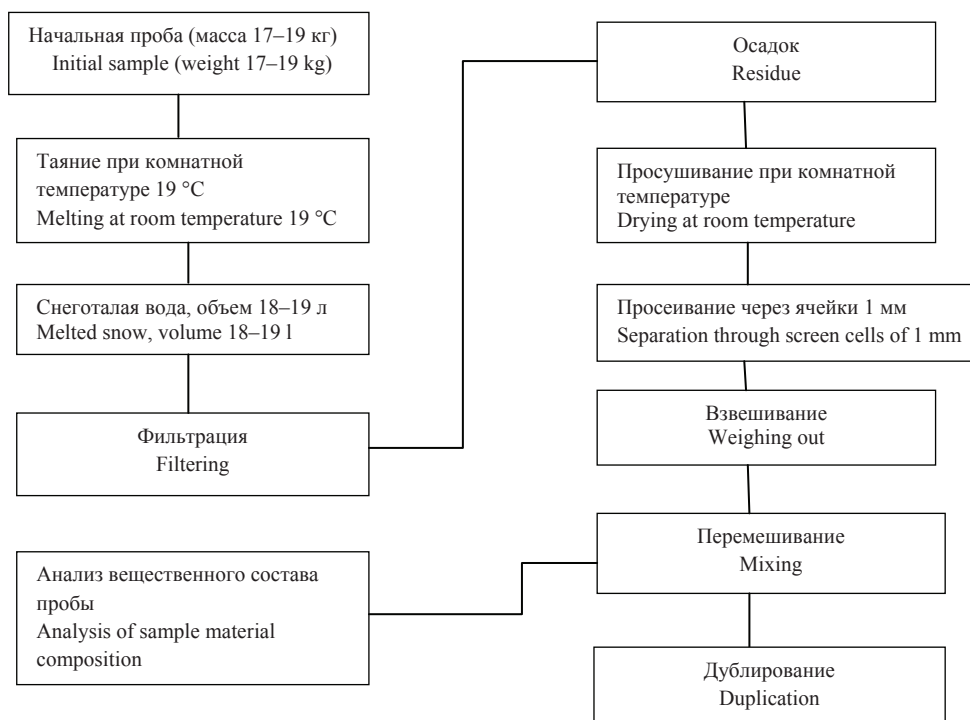


Рис. 2. Схема пробоподготовки

Fig. 2. Diagram of sample preparation

подготовленных емкостях в течение суток, объем воды одной пробы при оттаивании снега 15–18 л. Отстоявшуюся воду фильтровали через предварительно взвешенные фильтры типа «Синяя лента». После фильтрации, не вынимая беззольного фильтра из воронки, просушивали пробы при комнатной температуре и затем просеивали через сито с диаметром в 1 мм и взвешивали на электронных весах. Разница в весе предварительно взвешенного фильтра и фильтра с твердым осадком характеризует вес пыли, осевшей на снеговой покров.

Пылевая нагрузка рассчитывается по формуле (1):

$$P_n = \frac{P_o}{S \cdot t}, \quad (1)$$

где P_n – величина пылевой нагрузки, мг/м²·сут.; P_o – вес твердого снегового осадка, мг; S – площадь снегового шурфа, м²; t – количество суток от начала снегопада до дня отбора проб.

Чтобы определить, за счет каких типов частиц, содержащихся в пыли, формируется пылевая нагрузка, проводили изучение вещественного состава твердого осадка снега на основе [19]. С помощью стереоскопического бинокулярного микроскопа (Leica EZ4D) в пробах определяли количество минеральных и неминеральных частиц различных типов с последующим определением их процентного содержания. Статистическая обработка и анализ данных проводили посредством программного обеспечения STATISTICA 7.0 и Microsoft Excel.

Для расчетов пылевой нагрузки на снежный покров на основе атмосферного переноса частиц от заданной совокупности источников использовалась модель выпадения частиц из атмосферы на поверхность за длительный период T (сезон, год) [20], в основе которой лежат работы специалистов ФГБУ ГГО им. А.И. Воейкова и НПО Тайфун [21, 22]. Модель позволяет количественно оценить суммарный поток загрязняющих веществ из атмосферы на подстилающую поверхность, который складывается из вымывания осадками P_m и сухого выпадения P_c , имеющих размерность г/м². В общем виде вымывание записывается как $P_m = u w \bar{C}_z$, где u – коэффициент вымывания примеси; w – интенсивность осадков; $\bar{C}_z$ – интегральная за период T средняя концентрация в вертикальном столбе от земли до нижней границы облаков. Сухой поток, являющийся в зимний период доминирующим слагаемым, $P_c = V_d \bar{C}_0$, где $\bar{C}_0$ – приземная ($z=0$) средняя за период T концентрация примеси (мг/м³), а V_d – скорость выпадения частиц на поверхность (м/с). Параметр V_d зависит от скорости гравитационного осаждения, шероховатости поверхности и ряда других параметров приземного слоя атмосферы.

Средние концентрации $\bar{C}_z$ и $\bar{C}_0$ рассчитываются на основе [21]. При этом используются: повторяемость направлений ветра; распределение скорости ветра; интенсивность осадков; координаты и технологические параметры источников.

Параметр V_d существенно зависит от размера частиц, поэтому сухой поток P_c во многом опреде-

ляется фракционным составом пылевых выбросов. Перед расчетом можно задать индивидуальный фракционный состав выбросов отмеченных источников и автоматически разбить суммарные выбросы остальных единообразно в зависимости от заданного числа фракций и их процентного содержания [23]. Модель выпадения включена как дополнительная расчетная функция в программный комплекс ЭРА [24], что позволяет использовать базы данных источников выбросов, созданные при проведении проектных работ, для исследовательских задач. Ранее расчетные оценки осаждения на поверхность сопоставлены с экспериментальными данными для различных территорий, получена хорошая сходимость результатов [20, 25].

Для задания расположения и параметров источников использованы данные общегородской инвентаризации источников выбросов в атмосферу из сводного тома ПДВ по г. Междуреченску, который был разработан специалистами ООО «Кузбасский экологический центр» по заданию природоохранных властей в 2008 г. и действовал до 2012 г. В инвентаризации учтены 73 из 100 предприятий, дающие 99 % выбросов. Всего пыль выбрасывают 1977 источников, в том числе 765 точечных, 98 линейных и 1114 площадных. Общая сумма выброса пыли в атмосферу по инвентаризации составляет 9102 т в год, из которых 4428,5 т выбрасывают угледобывающие предприятия и 3345 т – муниципальные котельные. Эти две группы источников в основном и определяют загрязнение атмосферы и снега г. Междуреченска и зон расположения точек отбора проб.

Следует заметить, что при разработке сводного тома ПДВ проводятся только нормативные расчеты максимальных разовых (средних за 20 минут) концентраций загрязняющих веществ с использованием единой в нашей стране методики ОНД-86. И принятие решений о нормативах выбросов и платежах за них осуществляется на основе именно этих расчетных данных. При этом предполагается, что обоснованность результатов достигается применением единых утвержденных методов расчета выбросов по отраслям промышленности, использованием для расчета по ОНД-86 только согласованных в ФГБУ ГГО им. А.И. Воейкова компьютерных программ и строгим контролем за всем со стороны природоохранных властей. Сравнение расчетов с данными наблюдений за загрязнением атмосферы упоминается в нормативных документах как информационный параграф и предусмотрено только при наличии в городе стационарных постов Росгидромета. В г. Междуреченске таких постов нет, и, следовательно, сравнение проведенных в томе ПДВ расчетов с натурными наблюдениями не проводилось.

Расчеты пылевого загрязнения снега в состав обязательных нормативных расчетов не входят и поэтому в томе ПДВ не содержатся. Представленный в работе расчет выпадения в точках отбора снеговых проб дает достаточно уникальную воз-

возможность сопоставить расчетные значения пылевой нагрузки с экспериментальными данными для всего промышленного города с окружающими его угледобывающими предприятиями. А поскольку пылевая нагрузка за зиму в любой расчетной точке определяется средней за зиму концентрацией C_0 и скоростью выпадения частиц V_d (что и рассчитывает модель [21]), то удовлетворительное соответствие расчетов и замеров может свидетельствовать о достаточной качественной базе данных по источникам выбросов и корректности модели расчета долговременных концентраций [22].

Результаты и их обсуждение

В таблице приведены средние значения пылевой нагрузки и вещественный состав проб твердого осадка снега в процентном отношении в западной и восточной частях города и на территориях, соответствующих выбранным профилям. На рис. 3 приведена диаграмма размаха пылевой нагрузки на исследованных территориях, из которой видно, что в пробах твердой фазы снегового покрова во всех зонах проявляется вариабельность значений, что может свидетельствовать о наличии точечных аномалий с высоким и низким значением пылевой нагрузки.

По результатам исследования 2015 г. на территории города Междуреченска величина пылевой нагрузки изменяется от 29 до 246 мг/м²·сут., среднее значение составило 130 мг/м²·сут. Данные величины соответствуют низкой степени загрязнения и неопасному уровню заболеваемости согласно градации [26] (менее 250 мг/м²·сут.). В то же время величины пылевой нагрузки на территорию города превышают фон (10,5 мг/м²·сут.) от 4 до 35 раз.

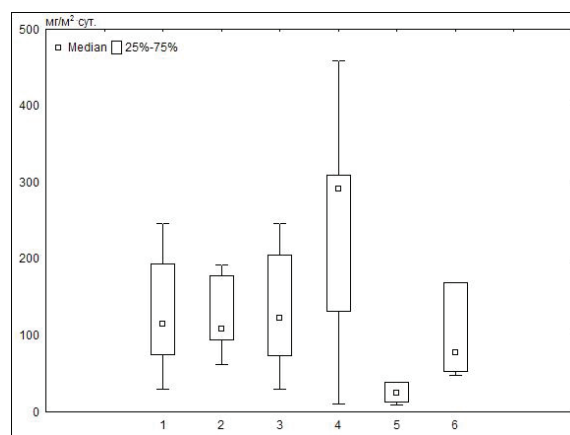


Рис. 3. Диаграмма размаха значений пылевой нагрузки (мг/м²·сут.) на исследованные территории г. Междуреченск и его окрестностей по данным снеговой съемки, 2015–2016 гг.: 1 – город; 2 – западная часть города; 3 – восточная часть города; 4 – юго-западная часть от города в направлении угольного разреза; 5 – юго-восточное направление от города в сторону турбазы; 6 – северо-восточная часть от города в направлении шахты

Fig. 3. Diagram of dust load (mg/m²·day) on the studied territories of Mezhdurechensk and its suburb according to snow cover survey, 2015–2016: 1 is the town; 2 is the western part of the town; 3 is the eastern part of the town; 4 is the south-west direction from the town to open-cut coal mine; 5 is the south-west direction from the town to tourist camp; 6 is the north-east direction from the town to coal mine

Анализ пространственного распределения пылевой нагрузки на территории города показал, что высокие значения пылевой нагрузки выявлены в

Таблица. Вещественный состав проб твердого осадка снега на территории г. Междуреченска и его окрестностей в 2015–2016 гг., %

Table. Material composition of solid precipitation samples in Mezhdurechensk and its suburb in 2015–2016, %

Определяемая величина Determined value	Город (весь) Town (whole)	Западная часть города West part of town	Восточная часть города East part of town	Юго-западная часть от города в направлении угольного разреза South-west direction from town to open-cut coal mine	Юго-восточное направление от города в сторону турбазы South-west direction from town to tourist camp	Северо-восточная часть от города в направлении шахты North-east direction from town to coal mine
Точки отбора (число проб) Sampling point (number of samples)	1–32 (32)	1–11 (11)	12–32 (21)	39–47 (9)	33–38 (6)	48–52 (5)
Пылевая нагрузка, мг/м ² ·сут Dust load, mg/m ² ·day	130±13 29–246	128±17 62–191	131±12 29–246	260±45 83–459	30±1 10–91	153±71 48–422
Природные минеральные и биогенные частицы, % Mineral natural and biogenic particles, %	21	24	21	15	40	12
Кварц/Quartz	21	24	21	15	40	12
Техногенные частицы, %/Technogenic particles, %	79	76	79	85	60	88
Частицы сажи/Cinder particles	33	30	36	–	–	30
Угольная пыль/Coal dust	22	20	23	82	44	41
Шлак/Slag	22	26	18	–	11	11
Алюмосиликатные микросферы Alumosilicate microspheres	1	–	1	–	–	–
Волокнистые частицы/Fibrous particles	1	–	1	3	5	6

центральной и восточной частях города, где в жилых кварталах расположены большинство угольных котельных с открытыми угольными складами. В этих районах города превышения фоновых значений составляет от 30 до 35 раз. Изучение вещественного состава проб, отобранных в этой части города, показало, что они в основном содержат такие неминеральные частицы, как частицы угольной пыли (35–55 %) и недожжённого угля (15–25 %). В пробах, отобранных вблизи котельных, содержание частиц угольной пыли составляет 55–60 %, а недожжённого угля – 20–25 %. Эти частицы являются типичными выбросами для угольных котельных. Угольная пыль также может поступать за счет ветрового переноса с открытых угольных складов и во время погрузочно-разгрузочных работ. Кроме того, в пробах выявлены и другие типичные для выбросов угольных котельных частицы – алюмосиликатные микросферы, содержание которых составляет 10–15 %.

Дополнительно в пробах из центральной и восточной части города выявлено содержание таких минеральных частиц, как кварц (10–15 %). В пробах, отобранных вблизи котельных, содержание кварца составляет 15 %. Кроме того, мы предполагаем, что на окраине центральной и восточной части города пылевая нагрузка дополнительно еще формируется за счет ветрового переноса пыли от близ расположенных угольных объектов. С учетом расположения города между двух рек формируется свой ветровой режим переноса от угольных объектов за счет аэродинамического переноса пыли вдоль рек. Данное предположение обосновано результатами наших исследований в юго-западной, северо-восточной и юго-восточной части от города, где и расположены угольные объекты. Было выявлено, что величина пылевой нагрузки в юго-западной части от г. Междуреченска в направлении угольного разреза изменяется от 83 до 459 мг/м²·сут. и в среднем составляет 260 мг/м²·сут. при фоне 10,5 мг/м²·сут. Это означает, что, согласно нормативной градации, пылевая нагрузка изменяется от низкой до высокой степени загрязнения, а среднее значение соответствует средней степени загрязнения. Более того, высокая степень пылевого загрязнения выявлена в точках, приближенных к восточной части г. Междуреченска. Вероятнее всего пылевая нагрузка сформирована в этой части от города за счет переноса пыли от буровзрывных работ на угольных разрезах, а также во время транспортировки угля. Из анализа вещественного состава проб твердого осадка снега в юго-западной части от г. Междуреченска в направлении угольного разреза видно, что эти пылевые выбросы содержат преимущественно угольную пыль (80–90 %) и кварц (10–20 %). При этом максимальное содержание угольной пыли (80–90 %) было выявлено в точках исследования с максимальным значением пылевой нагрузки.

В северо-восточной части от г. Междуреченска в направлении шахты было выявлено, что пылевая нагрузка изменяется от 48 до 422 мг/м²·сут. и в

среднем составляет 153 мг/м²·сут. при фоне 10,5 мг/м²·сут. Это означает, что, согласно нормативной градации, пылевая нагрузка изменяется от низкой до высокой степени загрязнения, а среднее значение соответствует низкой степени загрязнения. Высокая степень загрязнения выявлена непосредственно на территории, примыкающей к шахте, тогда как по мере приближения к городу пылевая нагрузка существенно уменьшается. Дополнительно выявлено, что величина пылевой нагрузки в северо-восточной части от города ниже величины пылевой нагрузки в юго-западной части от города. Это связано с тем, что поступление пыли при подземном способе добычи значительно ниже, чем при открытом способе добычи угля. Это также видно из анализа вещественного состава проб из северо-восточной части от города. Было определено, что содержание угольной пыли (30–50 %) в пробах из северо-восточной части от города ниже содержания этих частиц в пробах из юго-западной части.

В юго-восточном направлении от города в сторону турбазы видна закономерность уменьшения величины пылевой нагрузки от 91 до 13 мг/м²·сут., в среднем она составляет 38 мг/м²·сут. при фоне 10,5 мг/м²·сут. Кроме того, в первых двух точках от города выявлено максимальное значение пылевой нагрузки 39 и 91 мг/м²·сут., соответственно. В пробах из этих же точек определено высокое содержание угольных частиц, 70 и 45 % соответственно. Полученные значения соответствуют низкой степени загрязнения. В юго-восточном направлении перенос пыли от угольных объектов и города происходит в меньшей степени, поскольку этот участок расположен вкостр преобладающему направлению ветра. Также полученные значения пылевой нагрузки показывают, что с объектов, расположенных в юго-восточной части, перенос пыли в сторону города незначителен.

Общая картина загрязнения снега на расчетном прямоугольнике (черная рамка на рис. 4) размером 12000×9000 м с шагом 200 м показана на рис. 4. При этом использована роза ветров за зимний период 2014–2015 гг. По темно-синему контуру 15 г/м² легко заметить, что область существенного загрязнения снега пылевыми частицами в пределах города почти распадается на две части. В западной части города загрязнение определяется на 65–80 % предприятиями по добыче угля, расположенными на левом берегу р. Томь. В восточной части загрязнение вызвано источниками предприятий, расположенных непосредственно в городе, к которым относятся крупные котельные (30–55 %), предприятия строительной отрасли (10–40 %) и более мелкие локальные источники. Здесь вклад предприятий по добыче угля не превышает 20–25 %. На юго-восточной окраине города, где потемнение снега по расчетным оценкам не наблюдается, более половины вклада (50–70 %) в снеговое загрязнение создают городские предприятия, а остальной вклад дают предприятия по добыче угля.

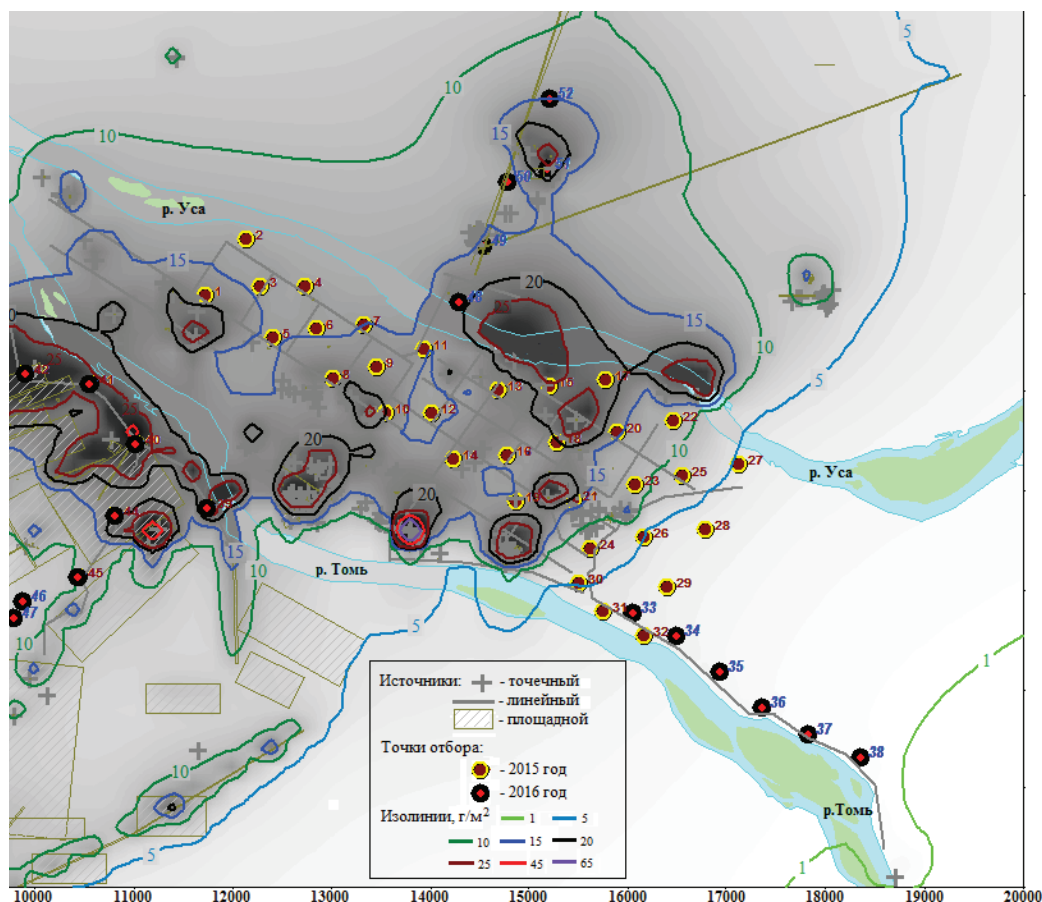


Рис. 4. Изолинии расчетного пылевого загрязнения (г/м^2 за зиму, 102 дня) на территорию г. Междуреченск и прилегающую территорию по данным снеговой съемки

Fig. 4. Isolines of calculated dust pollution (g/m^2 in winter, 102 days) in Mezhdurechensk and its suburb according to snow survey

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по точкам отбора проб приведено на рис. 5. При расчете по точкам 2015 и 2016 гг. использовались розы ветров за зимний период 2014–2015 и 2015–2016 гг. соответственно. В целом как замеры, так и расчеты выделяют три группы точек: в городе, на окраине и вблизи горных работ. Максимальное выпадение пыли отмечено в районе ведения горных работ, которое, очевидно, создается предприятиями угледобычи. В центре (между реками) для точек 9–22 основными вкладчиками (35–60 %) в суммарное загрязнение являются котельные.

Результаты сопоставления экспериментально определенных и расчетных значений пылевой нагрузки, показанные на рис. 5, свидетельствуют об удовлетворительной для данного класса задач схожести. Достоверно значимые коэффициенты корреляции для западной и восточной частей города, района угольного разреза и турбазы составили, соответственно, 0,66 (число проб 11); 0,83 (число проб 21), 0,73 (9 проб); 0,76 (6 проб). То есть модель достаточно хорошо отражает изменение количественных показателей осаждения на исследуемой территории.

Для проб, отобранных в северо-восточной части от города в направлении шахты (рис. 5), следует отметить отсутствие корреляции пылевой нагрузки с расчетными данными, что при малом числе данных вызвано резким расхождением в точке 4. Результаты замеров значительно возросли, а расчетное значение продолжает убывать с увеличением расстояния по преобладающему направлению ветра от основных источников. Причиной такого явления, скорее всего, является наличие вблизи точки 4 существенного источника пыли, который не учтен в инвентаризации. А поскольку в точке 5 измеренное и расчетное значения вновь синхронно убывают по сравнению с точкой 3, то этот источник должен иметь малую зону влияния. Таким свойством обладают, как правило, приземные неорганизованные источники, выбрасывающие в основном крупнодисперсные частицы. На расстоянии 300–500 м влияние такого источника практически прекращается, поскольку частицы успевают выпасть на поверхность на меньших расстояниях.

В целом по данным снеговых проб суммарное по всем точкам выпадение пылевых частиц в снег составило 2699 г/м^2 за зимний период, а по расчет-

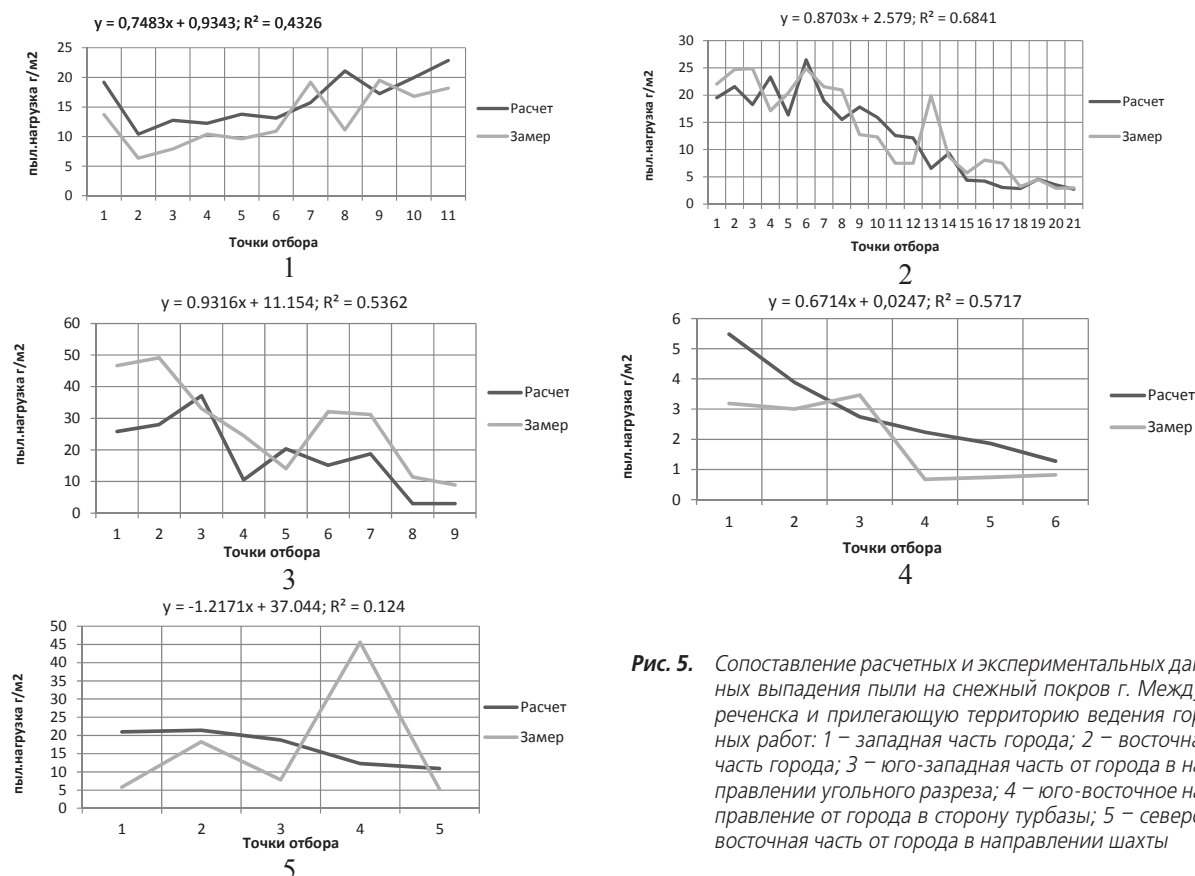


Рис. 5. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных выпадения пыли на снежный покров г. Междуреченска и прилегающую территорию ведения горных работ: 1 – западная часть города; 2 – восточная часть города; 3 – юго-западная часть от города в направлении угольного разреза; 4 – юго-восточное направление от города в сторону турбазы; 5 – северо-восточная часть от города в направлении шахты

Fig. 5. Comparison of the calculated and experiment data of dust precipitation to snow cover in Mezhdurechensk and adjacent territory of mining: 1 is the western part of the town; 2 is the eastern part of the town; 3 is the south-west direction from the town to open-cut coal mine; 4 is the south-west direction from the town to tourist camp; 5 is the north-east direction from the town to coal mine

ным оценкам – 2187 г/м², что представляется удовлетворительным результатом, при условии, что в модели не учитывалось фоновое загрязнение снега, которое всегда присутствует в природе.

Заключение

Средний уровень пылевой нагрузки на территории города соответствует низкому уровню загрязнения. Высокие значения пылевой нагрузки на отдельных участках города соответствуют расположению угольных котельных с открытыми складами. В западной части города загрязнение определяется на 65–80 % предприятиями по добыче угля, расположенными на левом берегу р. Томь. В восточной части загрязнение вызвано источниками предприятий, расположенных непосредственно в городе, к которым относятся крупные котельные (30–55 %), предприятия строительной отрасли (10–40 %) и более мелкие локальные источники, вклад предприятий по добыче угля не более 20–25 %. На юго-восточной окраине города более половины вклада (50–70 %) в снеговое загрязнение создают городские предприятия, а остальной вклад дают предприятия по добыче угля.

Средний уровень пылевой нагрузки убывает в ряду: юго-западная часть от города в направлении угольного разреза → северо-восточная часть от города в направлении шахты → восточная часть города → западная часть города → юго-восточное направление от города в сторону турбазы.

Результаты сопоставления расчетного и экспериментально определенного выпадения пылевых частиц на снеговой покров г. Междуреченска позволяют сделать вывод о том, что расчетная модель выпадения и подготовленные для нее исходные данные удовлетворительны. А поскольку в основе расчета выпадения лежит расчет средних за зимний период концентрации, то с достаточной долей уверенности результаты моделирования могут быть в дальнейшем использованы для оценки хронических ингаляционных рисков для здоровья населения, базирующихся на среднегодовых концентрациях.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 16-45-700184p_a). Исследования выполнены в Национальном исследовательском Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siudek P., Frankowski M., Siepak J. Trace element distribution in the snow cover from an urban area in central Poland // *Environmental monitoring and assessment*. – 2015. – V. 187. – № 5. – P. 225–240.
2. Pan Y., Wang Y. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2015. – V. 15. – № 2. – P. 951–972.
3. Urban snow indicates pollution originating from road traffic / K. Kuoppamäki, H. Setälä, A. Rantalainen, D. Kotze // *Environmental Pollution*. – 2014. – V. 195. – P. 56–63.
4. Determination of major and trace elements in snow in Tianjin, China: a three-heating-season survey and assessment / G. Wu, Q. Wei, C. Sun, J. Gao, L. Pan, L. Guo // *Air Quality, Atmosphere and Health*. – 2016. – V. 9. – № 6. – P. 687–696.
5. Geochemical Approach to Human Health Risk Assessment of Inhaled Trace Elements in the Vicinity of Industrial Enterprises in Tomsk, Russia / N. Osipova, E. Filimonenko, A. Talovskaya, Y. Yazikov // *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*. – 2015. – V. 21. – № 6. – P. 1664–1685.
6. Role of snow in the fate of gaseous and particulate exhaust pollutants from gasolinepowered vehicles / Y. Nazarenko, S. Fournier, U. Kurien, R. Rangel-Alvarado, O. Nepotchatykh, P. Seers, P. Ariya // *Environmental Pollution*. – 2017. – V. 223. – P. 665–675.
7. Evaluating the suitability of different environmental samples for tracing atmospheric pollution in industrial areas / A. Francová, V. Chrástný, H. Šillerová, M. Vitková, J. Kocourková, M. Komárek // *Environmental Pollution*. – 2017. – V. 220. – P. 286–297.
8. Surber S., Simonton D. Disparate impacts of coal mining and reclamation concerns for West Virginia and central Appalachia // *Resources Policy*. – 2017. – V. 54. – P. 1–8.
9. Ito S., Yokoyama T., Asakura K. Emissions of mercury and other trace elements from coal-fired power plants in Japan // *Science of the Total Environment*. – 2006. – V. 368. – № 1. – P. 397–402.
10. Yu X. Coal mining and environmental development in southwest China // *Environmental Development*. – 2017. – V. 21. – P. 77–86.
11. Hota P., Behera B. Coal mining in Odisha: an analysis of impacts on agricultural production and human health // *The Extractive Industries and Society*. – 2015. – V. 2. – № 4. – P. 683–693.
12. Ghose M., Majee S. Characteristics of hazardous airborne dust around an Indian surface coal mining area // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2007. – V. 130. – № 1–3. – P. 17–25.
13. Zakharov Y., Bondareva L. Simulation of Domestic and Industrial Wastewater Disposal in Flooded Mine Workings // *Procedia Engineering*. – 2015. – V. 117. – P. 389–396.
14. Limanskiy A., Vasilyeva M. Using of low-grade heat mine water as a renewable source of energy in coal-mining regions // *Ecological Engineering*. – 2016. – V. 91. – P. 41–43.
15. Савичев О.Г., Иванов А.О. Атмосферные выпадения в бассейне Средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2010. – № 1. – С. 63–70.
16. Шатилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2001. – 24 с.
17. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia) / A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, E.A. Filimonenko, J.-C. Lata, J. Kim, T.S. Shakhova // *Environmental Technology*. – 2017. – URL: <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2017.1354075> (дата обращения 15.09.2017).
18. Gorbacheva N., Benjamin K. Pain without gain? Reviewing the risks and rewards of investing in Russian coal-fired electricity // *Applied Energy*. – 2015. – V. 154. – P. 970–986.
19. Способ определения загрязнённости снегового покрова техногенными компонентами: пат. № 2229737 Россия, МПК7 G 01 V 9/00 заявл. 17.10.2002; опубл. 27.05.2004.
20. 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. 563–574.
21. Методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (дополнение к ОНД-86). – СПб.: ГГО им. А.И. Воейкова, 2005. – 17 с.
22. Газиев Я.И., Соснова А.К. Физико-математическое моделирование процесса аэрозольного загрязнения почв промышленными дымовыми выбросами в атмосферу и продуктами их физико-химических превращений // *Труды ИЭМ*. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – Вып. 14 (129). – С. 3–15.
23. 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.
24. Программный комплекс «ЭРА-ВОЗДУХ»; сертификат соответствия на ПК ЭРА-Воздух N RA.RU.CP09.H00115 (действует до 25.12.2018); URL: <https://lpp.ru/> (дата обращения 15.09.2017).
25. Organic Carbon in the City Territories of the South of West Siberia / V.F. Raputa, V.V. Kokovkin, S.V. Morozov, T.V. Yaroslavtseva // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2016. – Т. 24. – № 4. – С. 483–489.
26. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.

Поступила 20.09.2017 г.

Информация об авторах

Осипова Н.А., кандидат химических наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Быков А.А., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Кемеровского филиала Института вычислительных технологий СО РАН.

Таловская А.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Николаенко А.Н., магистрант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Язиков Е.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ларин С.А., кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник Института экологии человека ФИЦ УУХ СО РАН.

UDC 551.578.46:504.4:622.333.012

COAL PRODUCER EFFECT ON SNOW COVER POLLUTION AT ADJACENT URBAN TERRITORIES (CASE STUDY OF MEZHDURECHENSK)

Nina A. Osipova¹,
osipova@tpu.ru

Anatoly A. Bykov²,
bykov@icc.kemsc.ru

Anna V. Talovskaya¹,
talovskaj@yandex.ru

Alexandr N. Nikolaenko¹,
saiiiek@mail.ru

Egor G. Yazikov¹,
yazikoveg@tpu.ru

Sergey A. Larin³,
larin57@list.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Kemerovo Division of Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS,
21, Rukavishnikov street, Kemerovo, 650025, Russia.

³ Institute of Human Ecology of the Siberian Branch of the RAS,
10, Leningradsky avenue, Kemerovo, 650065, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to study the specific character of coal producer dust input effect on pollution of adjacent urban territories.

The main aim of the research is to evaluate the dust load level using the computational and experimental techniques in the area of coal producer effect by snow cover survey data.

Objects of the research are snow samples taken by the square scheme in the town area and by the vector scheme in directions from the town to coal enterprises.

Methods: atmogeochemical, calculation using the model of long-term particle fallout from atmosphere to the surface.

Results. Regions with maximum values of dust load are in the area of open cut (459 mg/m²·day) and mine (422 mg/m²·day), by the gradation these values correspond to high level of pollution. High values of dust load (200–245 mg/m²·day) within the limits of the town correspond to location of coal boiler houses with open storage. On the outskirts of central and eastern parts of the town the dust load is additionally formed due to the dust wind transfer from closely located coal plants. The studied areas form the range by the decrease of mean value of dust load level: the south-west direction from town to open-cut coal mine (260±45 mg/m²·day) > the north-east direction from town to coal mine (153±71 mg/m²·day) > the eastern part of the town (131±12 mg/m²·day) > the western part of the town (128±17 mg/m²·day) > the south-west direction from town to tourist camp (30±1 mg/m²·day). Excess ratio of ambient dust load amounts to 24,8; 14,6; 12,5; 12,2; 2,9, respectively, at the studied areas. A part of industrial particles, including coal dust, soot, slags, aluminosilicate micro-spherule, fibers, is maximum in the territory, adjacent to the open-cut coal mine (85 %) and coal mine (88 %), and it is lower within the limits of the town (76–79 %). Content of coal particles, prevailing in all studied samples, changes from 20–23 % in the town to 44–82 % near the coal mine and open-cut coal mine; coal dust input in this case is considerably lower at underground mining than at open-cut coal mine. In the town a part of the particles, distinguishing coal burning (carbon coal), amounts to 33–36 %. The authors have compared the calculated coal dust values with those determined by the experiment. The well-significant correlation ratios for western and eastern parts of the town, the area of open-cut coal mine and tourist camp amounted to 0,66 (11 samples); 0,83 (21 samples); 0,73 (9 samples); 0,76 (6 samples) respectively. The model of the long-term fallout reflects rather well the change in quantitative precipitation indices in the studied territories. The results of modeling may be further used to assess chronic inhalation risks for population health, based on average annual concentrations.

Key words:

Snow cover, dust load, coal boiler house, coal mines, long-term fallout model.

The research was partially financially supported by the RFBR grant (no. 16–45–700184p_a). The research was carried out at National Research Tomsk Polytechnic University within the program of TPU competitive growth among the leading world research centers.

REFERENCES

1. Siudek P., Frankowski M., Siepak J. Trace element distribution in the snow cover from an urban area in central Poland. *Environmental monitoring and assessment*, 2015, vol. 187, no. 5, pp. 225–240.
2. Pan Y., Wang Y. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 951–972.
3. Kuoppamäki K., Setälä H., Rantalainen A., Kotze D. Urban snow indicates pollution originating from road traffic. *Environmental Pollution*, 2014, vol. 195, pp. 56–63.
4. Wu G., Wei Q., Sun C., Gao J., Pan L., Guo L. Determination of major and trace elements in snow in Tianjin, China: a three-heating-season survey and assessment. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2016, vol. 9, no. 6, pp. 687–696.
5. Osipova N., Filimonenko E., Talovskaya A., Yazikov E. Geochemical Approach to Human Health Risk Assessment of Inhaled Trace Elements in the Vicinity of Industrial Enterprises in Tomsk, Russia. *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*, 2015, vol. 21, no. 6, pp. 1664–1685.
6. Nazarenko Y., Fournier S., Kurien U., Rangel-Alvarado R., Nepotchatykh O., Seers P., Ariya P. Role of snow in the fate of gaseous and particulate exhaust pollutants from gasoline-powered vehicles. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 223, pp. 665–675.
7. Francová A., Chrástný V., Šillerová H., Vítková M., Kocourková J., Komárek M. Evaluating the suitability of different environmental samples for tracing atmospheric pollution in industrial areas. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 220, pp. 286–297.
8. Surber S., Simonton D. Disparate impacts of coal mining and reclamation concerns for West Virginia and central Appalachia. *Resources Policy*, 2017, vol. 54, pp. 1–8.
9. Ito S., Yokoyama T., Asakura K. Emissions of mercury and other trace elements from coal-fired power plants in Japan. *Science of the Total Environment*, 2006, vol. 368, no. 1, pp. 397–402.
10. Yu X. Coal mining and environmental development in southwest China. *Environmental Development*, 2017, vol. 21, pp. 77–86.
11. Hota P., Behera B. Coal mining in Odisha: an analysis of impacts on agricultural production and human health. *The Extractive Industries and Society*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 683–693.
12. Ghose M., Majee S. Characteristics of hazardous airborne dust around an Indian surface coal mining area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, vol. 130, no. 1–3, pp. 17–25.
13. Zakharov Y., Bondareva L. Simulation of Domestic and Industrial Wastewater Disposal in Flooded Mine Workings. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 117, pp. 389–396.
14. Limanskiy A., Vasilyeva M. Using of low-grade heat mine water as a renewable source of energy in coal-mining regions. *Ecological Engineering*, 2016, vol. 91, pp. 41–43.
15. Savichev O., Ivanov A. Atmospheric losses in the middle Ob river basin and their influence on a hydrochemical runoff of the rivers. *Izvestiya Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya*, 2010, no. 1, pp. 63–70. In Rus.
16. Shatilov A. *Veschestvennyy sostav i geokhimicheskaya kharakteristika atmosferynykh vyipadeniy na territorii Obskogo basseyna*. Dis. Kand. nauk [Material composition and geochemical characteristic of atmospheric fallout in the territory of Ob basin. Cand. Diss.]. Tomsk, 2001. 24 p.
17. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Lata J.-C., Kim J., Shakhova T.S. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia). *Environmental Technology*, 2017. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2017.1354075> (accessed 15 September 2017).
18. Gorbacheva N., Benjamin K. Pain without gain? Reviewing the risks and rewards of investing in Russian coal-fired electricity. *Applied Energy*, 2015, vol. 154, pp. 970–986.
19. Yazikov E.G., Shatilov A.Yu., Talovskaya A.V. *Sposob opredeleniya zagryaznennosti snegovogo pokrova tekhnogennymi komponentami* [Method for determining snow cover pollution with man-made components]. Patent RF, no. 2229737, 2004.
20. Bykov A.A., Schastlivtsev E.L., Pushkin S.G., Klimovich M.Yu. Razrabotka i aprobatsiya lokalnoy modeli vypadeniya zagryaznyayushchikh veshchestv promyshlennogo proiskhozhdeniya iz atmosfery na podstilayushchuyu poverkhnost [Development and testing the local model of human-made pollutant fallout from atmosphere to the substrate]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2002, vol. 10, no. 5, pp. 563–574.
21. *Metodika rascheta osrednennykh za dlitelny period kontsentratsiy vybrasyvaemykh v atmosferu vrednykh veshchestv (dopolnenie k OND-86)* [Technique for calculating the average concentrations of contaminant injected into atmosphere for a long period (supplement to OND-86)]. St-Petersburg, GGO im. A.I. Voeykova, 2005. 17 p.
22. Gaziev Ya.I., Sosnova A.K. Fiziko-matematicheskoe modelirovaniye protsessov aeralnogo zagryazneniya pochvy promyshlennymi dymovymi vybrosami v atmosferu i produktami ikh fiziko-khimicheskikh prevrashcheniy [Physical and mathematical modeling of aerial soil contamination with industrial smoke emissions into atmosphere and with the products of their physical and chemical conversions]. *IEM Proc. Moscow, Gidrometeoizdat Publ.*, 1987. Iss. 14 (129), pp. 3–15.
23. Byikov A.A., Schastlivtsev E.L., Pushkin S.G., Smirnova O.V. Modelirovaniye zagryazneniya pochvy atmosferynymi vybrosami ot promyshlennykh obektov ugledobnyayushchego regiona [Modeling soil pollution with atmospheric emissions from industrial enterprises]. *Polzunovskiy vestnik*, 2006, no. 2, pp. 209–217.
24. *The program complex «ERA-AIR»*; certificate of compliance on the PC ERA-Air N RA.RU.SP09.N00115 (valid until 25.12.2018); Available at: <https://lpp.ru/> (accessed 15 September 2017).
25. Raputa V.F., Kokovkin V.V., Morozov S.V., Yaroslavl'tseva T.V. Organic Carbon in the City Territories of the South of West Siberia. *Chemistry for sustainable development*, 2016, vol. 24, no. 4, pp. 483–489.
26. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.

Received: 20 September 2017.

Information about the authors

Nina A. Osipova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anatolii A. Bykov, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Anna V. Talovskaya, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexandr N. Nikolaenko, master, National Research Tomsk Polytechnic University.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey A. Larin, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Human Ecology of the Siberian Branch of the RAS.