

УДК 613.6

DOI: 10.15372/KhUR20170304

## Техногенное загрязнение атмосферы Караканского угольного кластера

К. С. ГОЛОХВАСТ<sup>1</sup>, А. Н. КУПРИЯНОВ<sup>2</sup>, Ю. А. МАНАКОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет,  
Владивосток, Россия

E-mail: droopy@mail.ru

<sup>2</sup>Институт экологии человека  
Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения РАН,  
Кемерово, Россия

(Поступила 07.05.16; после доработки 27.04.17)

### Аннотация

Приведены результаты исследования воздействия на атмосферу объектов Караканского угольного кластера (Кузбасс). Наблюдение за составом атмосферной взвеси проводилось в период с 2012 по 2014 гг. Показано, что в атмосферной взвеси проб из точек отбора, расположенных вблизи технологических и автомобильных дорог, карьеров, на протяжении всего периода наблюдений значительно содержание частиц размером менее 1 и 10 мкм (до 50 и 71 % соответственно). Качественный состав атмосферной взвеси характеризуется высоким содержанием угольных частиц с многочисленными включениями самородных металлов и их соединений (в том числе, редкоземельные элементы). Редкоземельные фазы имеют потенциально опасный ингалибельный размер – от наноразмерного до десятков микрометров. В целом, как показали результаты наблюдений, в плане загрязнения атмосферы все исследованные районы Караканского угольного кластера неблагоприятны для проживания.

**Ключевые слова:** атмосферная взвесь, Кузбасс, микрочастицы, уголь, техногенные частицы

### ВВЕДЕНИЕ

Угольная пыль – один из сильнейших загрязнителей воздуха в местах добычи, оказывающих выраженное негативное влияние на здоровье людей [2, 32]. Процессы переноса частиц в атмосфере крайне неоднозначны и неоднородны [7, 13–16, 18, 21–24, 29–31, 33]. Считается, что по большинству классов болезней максимальный уровень заболеваемости наблюдается при отработке коксовых и жирных углей, биологически агрессивных и наиболее неблагоприятных в фиброгенном отношении и по пылевому фактору [9, 25, 36, 38].

Согласно гигиенической оценке условий труда, постоянное загрязнение атмосферы угольной пылью относится к неблагоприятным фак-

торам рабочей среды и трудового процесса и способствует повышению уровня заболеваемости [9, 19]. Крайне сильное негативное воздействие угольной пыли на окружающую среду и заболеваемость среди населения отмечается в Китае [2]. Кроме этого, по мнению авторов [8], отрицательное воздействие на окружающую среду от угольного загрязнения столь велико, что может быть сопоставимо с атомными станциями.

Цель работы – оценить воздействие крупного угольного объекта на состав атмосферной взвеси в условиях трехлетнего наблюдения.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования нами выбран крупный техногенный источник пы-



**Точка 7.** Дорога в сторону с. Новохудяково, 1,5 км от с. Пермьяки на север. Участок представлен обширной поляной, спускающейся к р. Иня. Она защищена от выбросов со стороны угольных разрезов и с. Пермьяки большими лесными насаждениями и может рассматриваться в качестве контроля.

Вырезание кернов на всю глубину снегового покрова производилось с помощью цилиндрического пробоотборника диаметром 50 мм. Для отбора проб выбирали площадку, на которой можно построить треугольник со сторонами не менее 10 м. В вершинах треугольника размечались учетные площадки  $1 \times 1$  м. Таким образом получены три учетные площадки. Отбор проб проводился методом конверта – по пять проб с каждой учетной площадки. Снеговой керн отбирался всю глубину снежной толщи. Все 15 проб смешивали и формировали одну средневзвешенную пробу. Банки с пробами помещались в холодильник до проведения анализа.

Для исследования взвешенных частиц использовался комплексный метод исследования частиц атмосферных взвесей, включающий лазерную гранулометрию, масс-спектрометрию высокого разрешения, сканирующую электронную микроскопию с энергодисперсионным анализом.

Через 2 ч, когда снег в контейнерах растаивал, из каждого образца набирали 60 мл жидкости и анализировали на лазерном анализаторе частиц Analysette 22 NanoTec (фирма Fritsch), позволяющем в ходе одного измерения устанавливать распределение частиц по размерам, а также определять их форму и ряд морфометрических параметров. Измерения проводили в режиме nanotech с установками carbon/water 20 °С. Также из каждого образца набирали 10 мл жидкости и анализировали на масс-спектрометре высокого разрешения с индуктивно связанной плазмой Element XR (Thermo Scientific). Измерения проводили с использованием методики ЦВ 3.18.05–2005 ФР.1.31.2005.01714 (Методика выполнения измерений элементного состава питьевых, природных, сточных вод и атмосферных осадков методом масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме). Пробы отфильтровывались от твердого осадка с помощью фильтра (0,47 мкм). Веществен-

ный анализ взвесей проводили с использованием светового микроскопа SMZ1000 (Nikon, Япония) и сканирующего электронного микроскопа S-3400N (Hitachi, Japan) с энергодисперсионным спектрометром Ultra Dry (Thermo Scientific, США).

Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП “Межведомственный центр аналитического контроля состояния окружающей среды” ДВФУ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Гранулометрический анализ

Состав снега адекватно отражает загрязнение атмосферы. Особенно информативен этот показатель для районов с устойчивым многомесячным снежным покровом. В северных регионах в зимний период характерно накопление в снежном покрове элементов, доминирующих в составе атмосферных аэрозолей. Качество снежного покрова ярко демонстрирует влияние различных источников загрязнения атмосферного воздуха на поверхности земли, а также позволяет проследить пространственное распределение загрязняющих веществ по территории и получить достоверную картину зон влияния конкретных технологических объектов.

Согласно предложенной нами классификации [5], по размерам частиц атмосферные взвеси подразделяются на семь классов, мкм: <1, 1–10, 10–50, 50–100, 100–400, 400–700, >700 мкм. Это позволяет соотнести экологическую опасность и размерность [4]. Наибольшую опасность представляют частицы первых двух классов, среднюю опасность – частицы третьего размерного класса [5]. Второй важнейшей гранулометрической характеристикой частиц, с точки зрения экологической опасности, является их удельная поверхность. Согласно данным лазерного анализатора, можно выделить три класса частиц по величине удельной поверхности,  $\text{см}^2/\text{см}^3$ : 1) более 7000 (наиболее опасный), 2) от 1000 до 7000; 3) менее 1000  $\text{см}^2/\text{см}^3$  (наименее опасный). В табл. 1 приведено распределение частиц в снеге по точкам отбора.

ТАБЛИЦА 1

Распределение частиц в снеге по фракциям на точкам отбора за период 2012–2014 гг., %

Диаметр частиц, мкм	Годы	Точки отбора проб						
		1	2	3	4	5	6	7
<1	2012	3	2	24 <sup>a</sup>	5	1		2
	2013			15 <sup>a</sup>	50 <sup>a</sup>			
	2014		5	34 <sup>a</sup>				
1–10	2012	3	28 <sup>b</sup>	44 <sup>b</sup>	45 <sup>b</sup>	11		17 <sup>b</sup>
	2013	7	4	31 <sup>b</sup>	46 <sup>b</sup>			
	2014	71 <sup>b</sup>	20 <sup>b</sup>	66 <sup>b</sup>	6	2		12
10–50	2012	94	20	32	50	20	52	70
	2013	93	56	54	4		100	
	2014	29	46		47	8	100	40
50–100	2012		50			10	48	
	2013		40					
	2014		32		32	4		48
100–400	2012					13		
	2013							
	2014				15			
400–700	2012					6		
	2013					100		
	2014							
>700	2012					45		3
	2013							
	2014					76		

<sup>a</sup>Опасность высокой степени для здоровья человека.<sup>b</sup>Опасность средней степени для здоровья человека.

В табл. 2 приведены более детальные физические характеристики частиц взвеси, обнаруженных в снеге, которые также получены с помощью лазерного анализатора.

По результатам обследований 2012–2014 гг., самыми неблагоприятными условиями характеризуется территория между двумя технологическими дорогами (возле Дунаевского разреза, точка 3). Здесь в пробах стабильно обнаруживаются наночастицы размером от 100 нм (50 %) и микрочастицы до 10 мкм (до 100 %). Происхождение их, скорее всего, связано с угледобывающей промышленностью (дробление, погрузка) и обусловлено открытой разработкой угля, что присуще подобным горным процессам [3].

Частицы, обнаруженные в пробах с точек отбора 1–4 и 7, обладают значительной удельной поверхностью (до 1 832 750 см<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>) и

потому могут сорбировать на своей поверхности большое количество токсинов [10]. Это также определяет неблагоприятные условия для проживания ввиду серьезной нагрузки на органы дыхания. Наиболее мелкодисперсными фракциями характеризуются пробы из районов, находящихся между угольными разрезами.

По ряду морфометрических показателей частиц (диаметр, площадь поверхности) к числу относительно неблагоприятных районов также можно отнести участки отбора проб 2 (возле с. Караканы, технологическая дорога, от разреза к угольному складу) и 6 (восточная окраина с. Пермьяки).

Во взвесьях практически из всех точек отбора значительна доля частиц 3-го и 4-го размерных классов (10–100 мкм), которые, скорее всего, являются выхлопами грузового ав-

ТАБЛИЦА 2

Морфометрические параметры частиц взвеси, содержащихся в снеге в различных районах отбора за период 2012–2014 гг.

Параметры	Годы	Точки отбора						
		1	2	3	4	5	6	7
Средний арифметический диаметр, мкм	2012	15.98	33.19	7.47	14.59	468.95	44.1	38.8
	2013	28.50	37.23	11.83	5.06	476.45	23.1	–
	2014	10.25	27.64	4.45	49.11	839.92	13.76	46.21
Мода, мкм	2012	16.91	55.46	15.12	26.39	1003.38	69.29	15.12
	2013	41.20	30.62	21.92	8.99	477.55	23.61	–
	2014	8.35	57.55	7.47	66.76	1003.38	10.05	80.38
Медиана, мкм	2012	16.43	30.15	4.54	21.26	239.66	39.41	15.91
	2013	22.95	32.85	8.36	0.23	471.25	23.01	–
	2014	9.07	20.94	3.61	30.23	957.85	10.55	31.13
Отклонение, мкм <sup>2</sup>	2012	12.49	735.21	44.46	139.48	183 993.1	639.59	15 866.16
	2013	181.87	522.42	97.57	53.09	8173.76	4.38	–
	2014	11.44	441.78	19.01	1981.33	97 716.22	106.01	1154.6
Среднеквадратичное отклонение, мкм	2012	3.53	27.11	6.67	11.81	428.94	25.29	126.04
	2013	13.48	22.85	9.88	7.29	90.41	2.09	–
	2014	3.38	21.02	4.36	44.51	312.6	10.3	33.98
Коэффициент отклонения, %	2012	22.12	81.68	89.29	80.94	91.47	57.34	324.80
	2013	47.31	61.39	83.50	143.87	18.97	9.05	–
	2014	32.98	76.04	95.84	90.62	37.21	74.81	73.52
Удельная площадь поверхности, см <sup>2</sup> /см <sup>3</sup>	2012	7142.07	10 126.58	24 903.82	19 854.22	1986.36	2036.59	10 340.97
	2013	2924.12	2701.05	177 136.7	704 498.3	130.56	2617.99	–
	2014	6453.56	17894.48	134 844	2684.1	431.52	7013.44	3065.68

<sup>a</sup>Опасность высокой степени для здоровья человека.

<sup>b</sup>Опасность средней степени для здоровья человека.

тотранспорта [5]. Они не относятся к наиболее опасным размерным формам (до 10 мкм), но могут попадать и оставаться в дыхательных путях, усиливая нагрузку на легкие.

Лишь в пробах из точек, удаленных от мест добычи и погрузки угля (5 и 6), фиксируются частицы крупных размеров (от 100 мкм и выше), с невысокой удельной поверхностью (до 1000 см<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>).

В целом, приходится констатировать, что практически все участки трансекты возле Караканского угольного кластера (за исключением подветренной стороны Караканского хребта, точка 5), загрязнены частицами атмосферных взвесей, опасными для здоровья.

В угольной пыли из атмосферных взвесей установлены многочисленные включения самородных металлов и их соединений, но особенно примечательно обилие минеральных

фаз, содержащих редкоземельные элементы (РЗЭ). Размер редкоземельных фаз варьирует от нанометров до десятков микрометров. Они представлены преимущественно фосфатами легких (по составу близки к моноциту) и тяжелых РЗЭ (состав близок к ксенотиму). Также встречаются единичные микронные зерна силиката РЗЭ, чей состав близок к ортиту.

Присутствие РЗЭ в углях Кузбасса закономерно, более того, кузнецкие угли даже оценивались как редкоземельное сырье [1, 11].

Интересно отметить большое количество редкоземельных минералов в угольной пыли из атмосферных взвесей. Согласно экспериментальным данным, только 10–20 % РЗЭ в углях находятся в виде собственных минералов, 1–2 % – в виде изоморфных примесей в минеральном веществе углей, а 80–90 % – в виде комплексных гуматов. Следовательно,

можно говорить о высокой “зараженности” угольной пыли РЗЭ, как в минеральной, так и в неминеральной формах.

В типичном образце, отобранном в окрестности с. Евтухово (точка 1), определены следующие частицы (в порядке убывания): уголь > природные минералы (преобладают кварц и алюмосиликаты) > растительный детрит > Fe-содержащие частицы (техногенные сплавы железа, оксиды железа, пирит). В образце, взятом возле с. Караканы (точка 2), обнаружены (в порядке убывания): уголь > природные минералы > Fe- и Ti-содержащие частицы > трудно определяемые техногенные частицы > растительный детрит. В образцах также фиксируются частицы, содержащие РЗЭ в виде монацита.

Самые мелкие частицы (тотально преобладает угольные микрочастицы) обнаруживаются между технологическими дорогами, возле Дунаевского угольного разреза (точка 3). Кроме того, здесь также обнаружены частицы, содержащие РЗЭ, которые по составу близки к ортиту.

#### *Динамика тяжелых металлов в снеговых пробах*

На мониторинговых площадках, расположенных возле Караканского хребта, выделяется участок между восточным склоном Караканского хребта и с. Пермьяки, который характеризуется минимальным загрязнением снеговых проб кадмием, свинцом, хромом, марганцем, железом, никелем, цинком. Наибольшее загрязнение снеговых проб кадмием, свинцом, никелем, цинком, железом приурочено к участку между технологическими дорогами на юго-западной стороне Каракан-

ского хребта. В остальных точках отбора уровень загрязнения средний (табл. 3).

На мониторинговых площадках в пределах трансекты содержание кадмия примерно одинаково и составляет 0.03 мкг/л, содержание свинца максимально (0.46 мкг/л) на участке между технологическими дорогами. Содержание хрома изменяется в больших пределах, но его максимум приурочен к залежи между Дунаевским и Пермьяковским разрезами (точка 4) – 0.86 мкг/л, а также к участку возле дороги на угольные склады (точка 2). Содержание марганца наибольшее на восточной окраине с. Пермьяки (точка 6) и составляет 19.2 мкг/л. Максимальное количество железа (38.33 мкг/л) обнаружено в пробах площадки 2 (окрестности с. Караканы). Наибольшее содержание никеля (1.13–1.58 мкг/л) установлено на участках с сильным техногенным загрязнением (точки 2–4). Содержание никеля во всех вариантах находится в пределах фоновых значений. Медь присутствует в пробах в больших количествах, но преобладает в пробах точек 1 и 3 (2.55 и 2.06 мкг/л соответственно). Максимальное содержание цинка (120 и 108.61 мкг/л соответственно) обнаружено в пробах, отобранных между технологическими дорогами (точка 3) и окраиной с. Пермьяки (точка 6).

Исходя из вещественного состава атмосферных взвесей, все исследованные районы Караканского угольного кластера неблагоприятны для проживания [6].

Во всех районах зафиксирована микроразмерная угольная пыль, насыщенная минеральными частицами и техногенной “грязью”. Происхождение последней преимущественно связано с угледобывающей промышленностью (добыча, дробление, погрузка угля).

ТАБЛИЦА 3

Средние концентрации токсичных металлов в снеговых пробах на участках отбора (среднее за 2012–2013 гг.), мкг/л

Точки отбора	Cd <sup>111</sup>	Ba <sup>138</sup>	Pb <sup>207</sup>	Al <sup>27</sup>	Cr <sup>52</sup>	Mn <sup>54</sup>	Fe <sup>56</sup>	Ni <sup>59</sup>	Cu <sup>63</sup>	Zn <sup>66</sup>
1	0.03	2.16	0.17	0.80	0.25	6.14	3.04	0.67	2.55	11.04
2	0.04	23.0	0.23	107.60	0.41	10.29	38.33	1.58	1.58	14.72
3	0.06	0.87	0.46	0.15	0.16	5.38	17.8	1.13	2.06	120.00
4	0.02	10.0	0.20	206.90	0.86	9.72	27.7	1.57	1.44	22.00
5	0.01	1.37	0.08	0.27	0.06	3.73	2.25	0.53	1.63	2.75
6	0.04	0.43	0.27	0.08	0.06	19.20	3.96	0.49	1.33	108.61

Происхождение редкоземельных фаз, скорее всего, природное: минералы редких земель нередко встречаются в углях и горных породах. Частая встречаемость и преимущественно фосфатная форма нахождения редкоземельных металлов в углях Кузбасса ранее была отмечена С. И. Арбузовым [1].

По качественному составу (доля угольных частиц и соединений металлов) и ряду визуальных морфометрических показателей частиц (размер, форма) к числу наиболее неблагоприятных можно отнести районы трансекты 3 (между технологическими дорогами), а к числу относительно неблагоприятных – районы 2 (возле технологической дороги), 6 (с. Пермьяки) и 7 (автомобильная дорога, возле с. Худяково).

Как известно, при попадании в организм редкоземельные минералы вызывают некоторые профессиональные заболевания, например пневмокозиозы [20, 27, 34, 35, 37], что повышает их потенциальную опасность для здоровья человека. С другой стороны, в литературе приводятся данные о нетоксичном влиянии РЗЭ на биохимические процессы и их положительном воздействии на растения и регенерацию тканей [12, 17, 26]. Например, показано, что ионы лантана способны увеличивать амплитуду ГАМК-активированных сигналов на пирамидальных нейронах гена CA1, отмеченных в гиппокампе головного мозга [26].

В целом, угольная пыль, содержащаяся в атмосферных взвешах Караканского угольного разреза, может служить источником потенциально опасных соединений, таких как редкоземельные минералы [27, 34]. При сжигании таких углей эти элементы будут попадать в воздух крупных городов и, несомненно, влиять на рост заболеваемости людей и загрязнение окружающей среды [35].

Важно, что частицы угольной пыли и РЗЭ находятся в нано- и микроразмерном диапазоне, а именно такие частицы обладают наибольшей реакционной активностью, вплоть до токсического поражения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценивая загрязнение воздушной среды Караканского угольного кластера, необходи-

мо отметить, что вблизи добычи угля, центров погрузочно-разгрузочных работ, транспортировки угля содержатся частицы атмосферных взвеси, относящиеся к высокоопасным для биологических объектов.

Уровень загрязнения несколько уменьшается на восток от расположенных вдоль западного склона Караканского хребта угольных разрезов, но повышается вблизи населенных пунктов.

Ни один из исследованных участков не может считаться “чистым” по содержанию техногенных взвесей, что свидетельствует о высокой техногенной нагрузке на всей территории Кузбасского угольного бассейна.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ для молодых докторов наук (МД-7737.2016.5).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Арбузов С. И., Ершов В. В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. Томск: Д-Принт, 2007. 468 с.
- 2 Балашова А. А. // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2010. № 5. С. 92–96.
- 3 Богатиков О. А. // Вестн. РАН. 2003. Т.73, № 5. С. 426–428.
- 4 Голохваст К. С., Христофорова Н. К., Кики П. Ф., Гульков А. Н. // Бюлл. физиологии и патологии дыхания. 2011. № 40. С. 94–100.
- 5 Голохваст К. С. Атмосферные взвеси городов Дальнего Востока. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2013. 178 с.
- 6 Голохваст К. С., Куприянов А. Н., Манаков Ю. А., Черыжов И. Ю., Поселожная А. В., Семенихин В. А. // Бюлл. физиологии патологии дыхания. 2014. № 52. С. 91–96.
- 7 Давитая Ф. Ф. // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1971. Вып. 4. С. 22–25.
- 8 Демин В. Ф., Крылов Д. А., Кураченко И. А. // Атомная энергия. 2014. Т. 116, № 3. С. 167–170.
- 9 Захаренков В. В., Олещенко А. М., Панаиотти Е. А., Суржиков Д. В. // Бюлл. Вост.-Сиб. науч. центра СО РАН. 2006. № 3. С. 29–33.
- 10 Иванов В. П., Трухан С. Н., Кочубей Д. И., Куценогий К. П., Макаров В. И. // Химия уст. разв. 2006. Т. 14, № 5. С. 449–452.
- 11 Кизильштейн Л. Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2002. 296 с.
- 12 Кожевникова Н. М., Убашеев И. О., Митышов Б. Б., Александрова Т. Е., Ермакова Е. П. // Химия уст. разв. 2001. Т. 9, № 2. С. 207–211.
- 13 Кондратьев К. Я., Поздняков Д. В. Аэрозольные модели атмосферы. М.: Наука, 1981. 104 с.
- 14 Кондратьев К. Я. Аэрозоль и климат. Л.: Гидрометеориздат, 1991. 542 с.
- 15 Кондратьев К. Я. // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17, № 1. С. 5–24.
- 16 Куценогий К. П., Куценогий П. К. // Сиб. экол. журн. 2000. № 1. С. 11–20.

- 17 Маладаев А. А. Влияние лантана на биологическую активность почв, урожай и качество растений: дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2007. 125 с.
- 18 Свинухов В. Г. Исследование, моделирование и прогноз загрязнения атмосферы в городе: автореф. дисс... д-ра геогр. наук. Владивосток, 1997. 44 с.
- 19 Сембаев Ж. Х., Исмаилова А. А., Мухамегижанова З. Т., Мешанов Г. Т., Илембаева Г. К., Султанов М. А. // Медицина труда и пром. экология. 2008. № 2. С. 22–25.
- 20 Семинихин В. А. Профессиональная патология у шахтеров Кузбасса: особенности формирования и профилактики: дисс. ... д-ра мед. наук. Иркутск, 2006. 253 с.
- 21 Христофорова Н. К. Экологические проблемы региона: Дальний Восток – Приморье. Хабаровск: Хабаровское кн. изд-во, 2005. 304 с.
- 22 Шевченко В. П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
- 23 Alonso-Pérez S., Cuevas E., Cuevas E., Querol X., Guerra J. C., Perez C. // *Arid Environ.* 2012. No. 78. P. 100–109.
- 24 Amato F., Pandolfi M., Moreno T., Furger M., Pey J., Alastuey A., Bukowiecki N., Prevot A. S. H., Baltensperger U., Querol X. // *Atmospheric Environment*. 2011. Vol. 45, No. 37. P. 6777–6787.
- 25 Bharti S., Banerjee T. K. // *CLEAN – Soil, Air, Water*. 2014. Vol. 42, No. 3. P. 260–266.
- 26 Boldyreva A. A. // *Bull. Exp. Biol. Med.* 2005. Vol. 140, No. 4. P. 403–405.
- 27 Hirano S., Suzuki K. T. // *Environ. Health Perspect.* 1996. Vol. 104, Suppl. 1. P. 85–95.
- 28 Kulmala M., Asmi A., Lappalainen H. K., Carslaw K. S., Pöschl U., Baltensperger U., Hov Ø., Brenquier J.-L., Pandis S. N., Facchini M. C., Hansson H.-C., Wiedensohler A., O'Dowd C. D. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009. No. 9. P. 2825–2841.
- 29 Kulmala M., Asmi A., Lappalainen H. K. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011. Vol. 11, No. 6. P. 17941–18160.
- 30 Kumar P., Hopke Ph. K., Raja S., Casuccio G., Lersch T. L., West R. R. // *Atmospheric Environment*. 2012. Vol. 46. P. 449–459.
- 31 Mahowald N., Ward D. S., Kloster S., Flanner M. G., Heald C. L., Heavens N. G., Hess P. G., Lamarque J.-F., Chuang P. Y. // *Annual Review of Environment and Resources*. 2011. Vol. 36, No. 1. P. 45–74.
- 32 Meegoda J. N., Gao Sh., Al-Joulani N. M. A., Hu L. // *J. Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. 2011. Vol. 15, No. 2. P. 99–107.
- 33 Menon S., Unger N., Koch D., Francis J., Garrett T., Sednev I., Shindell D., Streets D. // *Environ. Res. Lett.* 2008. Vol. 3, No. 2. P. 024004.
- 34 Pietra R., Sabbioni E., Ubertaini L., Orvini E., Vocaturo C., Colombo F., Zanoni M. // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 1985. Vol. 92, No. 2. P. 247–259.
- 35 Rim K. T., Koo K. H., Park J. S. // *Saf. Health Work.* 2013. Vol. 4, No. 1. P. 12–26.
- 36 Tiwary R. K. // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2001. Vol. 132, Issue 1–2. P. 185–199.
- 37 Vocaturo G., Colombo F., Zanoni M., Rodi F., Sabbioni E., Pietra R. // *Chest*. 1983. Vol. 83, No. 5. P. 780–783.
- 38 Wang R., Li F., Yang W., Zhang X. // *Acta Ecologica Sinica*. 2009. Vol. 29, No. 1. P. 1–6.