

УДК 504.61

**ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ  
И ЧАСТИЦАМИ ВЗВЕШЕННОЙ ПЫЛИ  
НА ВЫСОКОМЕХАНИЗИРОВАННОМ УГОЛЬНОМ КАРЬЕРЕ**

**Д. П. Трипати, Т. Р. Даш**

*Национальный технологический институт,  
Email: debi\_tripathy@yahoo.co.in, 769008, г. Роуркела, Индия*

Загрязнение воздуха частицами является большой проблемой при угледобыче. Твердые частицы наносят вред здоровью человека, животным и растительности, а также ухудшают экологию окружающей среды. Угольное месторождение в г. Талчер — одно из старейших в Индии с мощными пластами. Мониторинг вдыхаемой пыли ( $TЧ_{10}$  и  $TЧ_{2,5}$ ) проводился летом и зимой на восьми наблюдательных станциях, находящихся в окрестности высокомеханизованного карьера. Пробы отбирались согласно стандартным критериям Центрального департамента контроля загрязнений (ЦДКЗ). Выявлено, что зимой концентрация твердых частиц в воздухе выше по сравнению с летним периодом. В целом проанализированы и собраны 10 проб для определения источника появления твердых частиц и попутных тяжелых металлов в воздухе. Использовались одномерный (корреляционный) и многомерный статистический анализы, включая анализ главных компонент. Основными причинами наличия следов металлов являлись преимущественно угледобыча и связанная с ней деятельность, а также автомобильные выхлопы.

*$TЧ_{10}$ ,  $TЧ_{2,5}$ , тяжелые металлы, корреляционный анализ, анализ главных компонент*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180421

---

Ухудшение качества воздуха — основная проблема в районах производства горных работ [1], вследствие чего образуются твердые частицы (ТЧ), которые считаются основными загрязнителями окружающей среды. Горные работы включают бурение, взрывные работы, погрузку, транспортировку, разгрузку и т. д., что порождает выделение твердых частиц, негативно воздействующих на здоровье человека и окружающую среду [2, 3]. Передвижение и распространение твердых частиц зависит от размера, компактности формы, типа частиц и метеорологических условий в данной местности [4]. Твердые частицы, особенно  $TЧ_{2,5}$ , могут находиться в воздухе более длительное время и перемещаться на большие расстояния. При вдыхании они попадают в легкие и поражают дыхательную систему. Поэтому из-за проведения открытых горных работ необходимо измерять концентрацию твердых частиц для прогнозирования количества вдыхаемой человеком пыли и ухудшения качества воздуха. Различные источники энергии (ископаемое горючее органического происхождения или ядерный) по-разному наносят вред окружающей среде [5]. Среди всех источников энергии самым распространенным и деше-

188

вым топливом является уголь [6]. Повышение спроса на уголь привело к увеличению добычи, что напрямую или косвенно создает проблему загрязнения воздуха [7]. Выбросы твердых частиц ( $ТЧ_{10}$  и  $ТЧ_{2,5}$ ) и соответствующих тяжелых металлов являются наиболее значительными при угледобыче и сжигании угля.

Среди загрязняющих агентов самые опасные тонкодисперсные включения ( $ТЧ_{2,5}$ ). В эпидемиологических исследованиях [8, 9] установлена тесная взаимосвязь между повышенными концентрациями вдыхаемых  $ТЧ_{10}$  и  $ТЧ_{2,5}$ , возросшей смертностью и увеличением процента заболеваемости. Твердые частицы уменьшают видимость, губительно воздействуют на окружающую флору и фауну [10], а также известны своей способностью переносить токсичные вещества, такие как тяжелые металлы [11] и ядовитые органические соединения. Находящиеся в этих частицах сопутствующие металлы приводят к росту легочных и сердечных заболеваний [12] и вызывают преждевременную смерть [13]. Частицы могут включать широкий диапазон химикатов — от металлов до органических и неорганических соединений [14]. Среди неорганических соединений наиболее опасны следы металлов, поступающие от различных естественных и антропогенных источников, таких как вещества земной коры, дорожная пыль, автотранспортные средства, горение угля и нефти, мусоросжигание и другие виды производственной деятельности [15–17]. Пылинки и следы металлов вызывают как острые, так и хронические респираторные заболевания, рак легких, болезни сердца и других органов [18, 19]. Проведенные исследования в районе угледобычи выявили повышенные концентрации твердых частиц [20–22].

#### ОБЛАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения выбран высокомеханизированный угольный карьер, расположенный в г. Талчер штата Одиша. Его координаты  $20^{\circ}57'39''$  и  $20^{\circ}58'18''$  северной широты и  $85^{\circ}09'33''$  и  $85^{\circ}12'12''$  восточной долготы, высота 85–120 м над уровнем моря. Климат субтропический. Среднегодовая норма осадков 1277 мм, 70 % из которых выпадает во время сезона дождей. Средняя температура колеблется от 6.7 до 45.5°C. Общая площадь района, где ведутся горные работы, составляет 1410 га. Территория Талчера считалась наиболее загрязненной в штате, имея индекс загрязнения окружающей среды 82.09 [23]. Согласно докладу Государственного комитета по контролю загрязнений в Одише (OSBCP) 2016 г., индекс загрязнения в 2013 г. снизился до 72.86 в результате выполненных плановых работ в 2011 г. Поскольку в настоящее время индекс загрязнения превышает 70, эта территория все еще считается крайне загрязненной. Талчер — один из старейших промышленных районов, расположенных в центральной части штата Одиша, примерно в 120 км от столицы Бхубанешвар и в 160 км от Бенгальского залива. Река Брамани и ее притоки — главные источники воды и водоотведения. Две автомагистрали национального значения проходят по данной территории, делая ее привлекательным индустриальным центром. Основной район, где проводятся горные работы, частично или полностью охватывает 7 деревень. К другим объектам, расположенным в районе буферной зоны, относят карьеры Баларам, Ананта, Бхаратпур, Бхубанешвар, Джаганнат, подземные шахты Талчер, Хандидхуа и Нандира, а также ТЭС, завод по производству тяжелой воды в г. Талчер, углемойку в Баланде. Она насчитывает несколько деревень и восемь заповедных лесов: Кандхал, Патурия, Петачхира, Генгутия, Ракас, Кучхиахол, Мукунданали и Кахнейджена. Карта исследуемой территории с указанием мест отбора проб представлена на рис. 1.

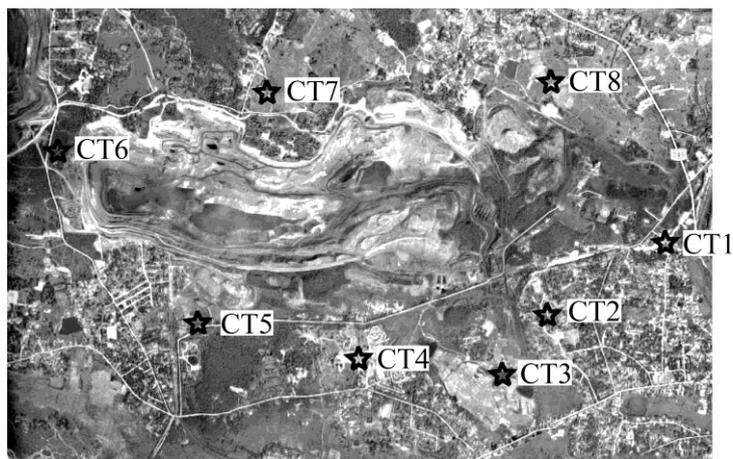


Рис. 1. Карта исследуемой местности с указанием участков отбора образцов

### МЕТОДОЛОГИЯ

Замеры вдыхаемой пыли ежечасно снимались с восьми наблюдательных станций в течение летнего и зимнего сезонов 2015–2016 гг. Контроль качества воздуха проводился в соответствии с современными критериями, предусмотренными индийским стандартом (BIS) [24]. Подробная информация о наблюдательных станциях представлена в табл. 1. Все станции расположены таким образом, чтобы охватить весь район, где ведутся горные работы, включая жилые кварталы, находящиеся как в центре данного района, так и в буферной зоне. Наблюдаемый уровень концентрации исследуемых загрязняющих веществ сравнивали с Национальным стандартом качества воздуха (NAAQS) [25].

ТАБЛИЦА 1. Подробное описание объектов в местах расположения наблюдательных станций

Станция	Географическое местоположение		Высота над уровнем моря, м	Основные объекты
	Север (N)	Восток (E)		
СТ1	20°57'28.80"	85°12'45.1"	96	Движение автотранспорта, дорога для транспортировки угля, железнодорожный подъездной путь длиной 500 м
СТ2	20°57'16.00"	85°12'06.4"	112	Горные работы, дорога для транспортировки угля, откаточный путь, отвал, площадка взвешивания, горение угля
СТ3	20°56'59.50"	85°12'33.0"	104	Хозяйственная деятельность населения, движение автотранспорта в обычном режиме, сжигание угля для бытовых нужд
СТ4	20°56'45.30"	85°11'40.3"	110	Магистральная дорога по направлению к Деру, дорога для транспортировки угля и других грузов, хозяйственная деятельность населения, сжигание угля для бытовых нужд
СТ5	20°57'11.10"	85°10'42.0"	131	Отвал, объездная дорога в Деру, горные работы, проводимые на расстоянии 500 м от объекта
СТ6	20°57'27.20"	85°10'14.3"	131	Станция технического обслуживания, карьер, рудник, жилые кварталы протяженностью 100 м
СТ7	20°57'56.50"	85°11'02.0"	123	Восстанавливающаяся деревня с малой численностью населения, горные работы, транспортировка в обычном режиме, сжигание угля для бытовых нужд
СТ8	20°57'53.05"	85°12'02.2"	101	Участок железнодорожного подъездного пути, угольный склад, жилые кварталы, сжигание угля для бытовых нужд и т.д.

Пробы окружающей среды на содержание ТЧ<sub>10</sub> отбирали пробоотборниками вдыхаемой пыли (Envirotech APM 460 NL) с интенсивностью подачи 1.1 м<sup>3</sup>·мин<sup>-1</sup> на ЕРМ 2000 фильтры (8" × 10"). В основе механизма пробоотборника лежит циклонное разделение вдыхаемых и невдыхаемых частиц из поступающего воздуха под действием центробежной силы. Фракция ТЧ<sub>10</sub> проходит через циклонную систему и переносится потоком воздуха для охлаждения на фильтровальной бумаге, расположенной между верхней крышкой и переходным устройством для крепления фильтра. Фракция ТЧ<sub>10</sub> остается на стекловолоконном фильтре ЕРМ 2000, а воздух выкачивается из системы через турбину вентилятора. Таким же образом ТЧ<sub>2.5</sub> отбирались пробоотборниками тонкодисперсных включений Envirotech APM 550 с интенсивностью подачи 16.7 на ПТФ7 фильтре диаметром 47 мм. После взятия образцов фильтры помещали в сушильный шкаф на 24 ч. Разницу масс фильтров до и после взятия образцов использовали для расчетов концентрации ТЧ<sub>10</sub> и ТЧ<sub>2.5</sub>. Мониторинг проводился в соответствии с требованиями индийского стандарта BIS. Отбор проб осуществлялся на станциях, географическое местоположение и условные обозначения которых приведены в табл. 1. Национальные стандарты качества воздуха даны в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Предельно допустимая годовая концентрация вдыхаемых твердых частиц по национальному стандарту качества воздуха

Загрязнители окружающей среды	Предельно допустимая концентрация вредных веществ в воздухе	Метод измерения
Твердые частицы (размер менее 10 мк) или ТЧ <sub>10</sub> , мг/м <sup>3</sup>	60	Гравиметрический
Твердые частицы (размер менее 2.5 мк) или ТЧ <sub>2.5</sub> , мг/м <sup>3</sup>	40	
Свинец (Pb), мг/м <sup>3</sup>	0.5	Атомно-абсорбционная спектрометрия / ICP метод после взятия эквивалентной пробы с фильтра ЕРМ 2000 или фильтровальной бумаги
Мышьяк (As), нг/м <sup>3</sup>	0.6	
Никель (Ni), нг/м <sup>3</sup>	20	

#### АНАЛИЗ СЛЕДОВ МЕТАЛЛОВ НА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦАХ

Фильтраты анализировали на наличие следов металлов при помощи атомно-абсорбционной спектрометрии [26]. После гравиметрического анализа на ТЧ<sub>10</sub> ЕРМ 2000 фильтры вываривали в азотной кислоте, а концентрацию тяжелых металлов анализировали на атомно-абсорбционном спектрометре ThermoFisher iCE 3300. Применяя тот же метод дигерирования, подготовлена серия слепых опытов. Металлы и реактивы, используемые для титрованных растворов, относятся к классу аналитических реактивов. Количество следов металлов в пробах рассчитывали путем вычитания пустого значения для соответствующего металла. Пределы чувствительности для атомно-абсорбционного спектрометра для обнаружения следов различных металлов составляют: Fe 0.032 нг/м<sup>3</sup>, Pb 0.063 мг/м<sup>3</sup>, Ni 0.6 нг/м<sup>3</sup>, Cu 0.02 мг/м<sup>3</sup>, Cd 0.006 мг/м<sup>3</sup>, Cr 0.032 мг/м<sup>3</sup>, Hg 0.38 нг/м<sup>3</sup>, As 0.44 нг/м<sup>3</sup> и Se 0.5 нг/м<sup>3</sup>. Концентрацию отдельных элементов в растворе определяли сравнением спектральной поглощательной способности титрованного раствора металлов. Пробы помещали в рамки на предмет наличия других металлов за исключением Hg, As и Fe. Для определения Hg и As использовали атомно-абсорбционную спектрометрию, а Fe выявляли методом титрования. Концентрацию элемента на объекте (мг/мл) получали по градуировочной кривой. Концентрацию элемента в атмосфере вычисляли по следующему соотношению [27]:  $C = C_1 V_o / V_b S_\phi$ , где  $C_1$  — концентрация элемента в дигерированном образце, мг/мл;  $V_b$  — объем отобранного на пробу воздуха, м<sup>3</sup>;  $V_o$  — общий объем пробы, м<sup>3</sup>;  $S_\phi$  — доля поверхности филь-

тра, используемого для анализа. Полученные данные обрабатывали при помощи статистического анализа, включая одно- и многомерный методы. Вычисление основных статистических параметров, таких как среднее значение, медиана, стандартное отклонение и отклонение по дальности, вместе с корреляционным анализом различных параметров [28] выполняли с использованием программного обеспечения IBM SPSS версии 20.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Статистическое распределение твердых частиц ( $TЧ_{10}$  и  $TЧ_{2.5}$ ), концентрации которых менялись в зависимости от времени года, представлено в табл. 3. Самые высокие концентрации  $TЧ_{10}$  и  $TЧ_{2.5}$  наблюдались в зимний период. Более высокая концентрация твердых частиц зимой объясняется распространением антициклона, отличительным признаком которого является безветрие или слабый ветер, ограниченная интенсивность ветрового перемещения из-за установившегося или инверсированного вертикального атмосферного температурного градиента [29].

ТАБЛИЦА 3. Статистическое распределение  $TЧ_{10}$  и  $TЧ_{2.5}$  в районе проведения исследования,  $мг/м^3$

Станция	Класс частиц	Концентрация частиц		Статистическое распределение	Среднее арифметическое	Среднее геометрическое	Медиана	Отношение $TЧ_{2.5}/TЧ_{10}$
		Минимум	Максимум					
СТ1	$TЧ_{10}$	94.07	582.91	178.87	307.48	260.72	223.81	0.372
	$TЧ_{2.5}$	39.22	173.84	45.44	114.45	104.61	109.37	
СТ2	$TЧ_{10}$	225.10	960.23	256.44	515.29	454.74	457.90	0.247
	$TЧ_{2.5}$	61.99	199.12	56.65	127.27	115.17	95.23	
СТ3	$TЧ_{10}$	101.55	391.39	107.17	246.95	223.94	238.18	0.480
	$TЧ_{2.5}$	36.17	208.84	52.66	118.60	104.89	125.40	
СТ4	$TЧ_{10}$	170.60	1092.93	354.02	510.75	401.97	326.04	0.287
	$TЧ_{2.5}$	56.74	276.66	74.54	146.62	126.16	134.02	
СТ5	$TЧ_{10}$	121.16	630.23	187.18	348.55	302.19	263.23	0.345
	$TЧ_{2.5}$	82.26	206.69	40.61	120.25	115.13	102.35	
СТ6	$TЧ_{10}$	200.90	787.64	194.66	453.63	415.72	364.38	0.320
	$TЧ_{2.5}$	78.21	223.43	42.83	145.28	139.28	139.81	
СТ7	$TЧ_{10}$	142.75	572.12	118.26	329.86	309.16	325.54	0.343
	$TЧ_{2.5}$	77.49	196.25	32.53	113.00	109.38	103.52	
СТ8	$TЧ_{10}$	170.66	685.84	179.63	386.53	347.51	312.27	0.294
	$TЧ_{2.5}$	76.06	165.29	31.28	113.52	109.60	101.94	

Среднегодовая концентрация  $TЧ_{10}$  и  $TЧ_{2.5}$  в районе проведения исследований согласно измерениям составила 387.38 и 124.87  $мг/м^3$ , что примерно в 6.5 и 3.1 раза выше предельно допустимой концентрации по национальному стандарту качества окружающей среды [25]. Среднегодовая концентрация  $TЧ_{10}$  в другом месте выше, что проверено на практике путем снятия показаний на СТ2 (515.29  $мг/м^3$ ), затем СТ4 (510.75  $мг/м^3$ ), СТ6 (453.63), СТ8 (386.53), СТ5 (348.55), СТ7 (329.86), СТ1 (307.48) и СТ3 (246.95  $мг/м^3$ ), где зафиксировано наименьшее количество твердых частиц. Аналогично среднегодовая концентрация  $TЧ_{2.5}$  отмечена показаниями СТ4 (146.62  $мг/м^3$ ), за которой следуют СТ6 (145.28  $мг/м^3$ ), СТ2 (127.27), СТ5 (120.25), СТ3 (118.60), СТ1 (114.45  $мг/м^3$ ), а СТ7 и СТ8 показывают наименьшие значения (113.00 и 113.52  $мг/м^3$  соответственно). При взятии проб на станциях 1 и 2 средняя концентрация частиц была самой высокой на протяжении обоих сезонов. В пробах со станций 2 и 4 концентрация твердых частиц оказалась наивысшей из-за постоянного ведения горных работ на близлежащих участках, а также выхлопов автотранспорта [30–32].

Горные работы, как правило, способствуют образованию пыли, содержащей фракции частиц более крупного размера, вместе с фракциями тонкодисперсных включений. Соотношение между  $TЧ_{10}$  и  $TЧ_{2.5}$  показывает, что они могут быть следствием выбросов выхлопных газов транспортными средствами. На всех станциях средняя концентрация частиц в пробах выше нормы, установленной Национальным стандартом качества воздуха [25]. Максимальное значение концентрации  $TЧ_{10}$  в пробах на станции 4 возрастает до  $1092.93 \text{ мг/м}^3$  при среднем значении  $510.75 \text{ мг/м}^3$ . Образцы со станции СТ3 имеют самую низкую концентрацию со средним значением  $246.95 \text{ мг/м}^3$ . Отношения  $TЧ_{2.5}$  и  $TЧ_{10}$ , рассчитанные по всем наблюдательным станциям, демонстрируют значительный вклад  $TЧ_{2.5}$  в суммарные концентрации  $TЧ_{10}$  (табл. 3). Высокий показатель отношения  $TЧ_{2.5}$  и  $TЧ_{10}$  свидетельствует о влиянии выхлопных газов транспортных средств, тогда как низкий показатель отражает воздействие поступления загрязняющих веществ в атмосферу вне системы дымовых труб, а также ресуспендирования осевшей пыли. Отношение  $TЧ_{2.5}$  к  $TЧ_{10}$  предполагает, что в пробах станций 2 и 4 преобладают фракции тонкодисперсных включений по сравнению с образцами, взятыми с других станций. На участках СТ2 и СТ4 проводилось больше горных работ, поэтому в пробах пыли содержатся более крупные частицы. Изменение концентрации  $TЧ_{10}$  и  $TЧ_{2.5}$  в летний и зимний периоды представлено на рис. 2. Среднее изменение концентрации  $TЧ_{10}$  и  $TЧ_{2.5}$  на разных станциях отбора проб показано на рис. 3. На рис. 4 приведено сезонное распределение  $TЧ_{10}$  и  $TЧ_{2.5}$ , а на рис. 5 — распределение квартиля по частицам проб со станций 1 – 8 соответственно.

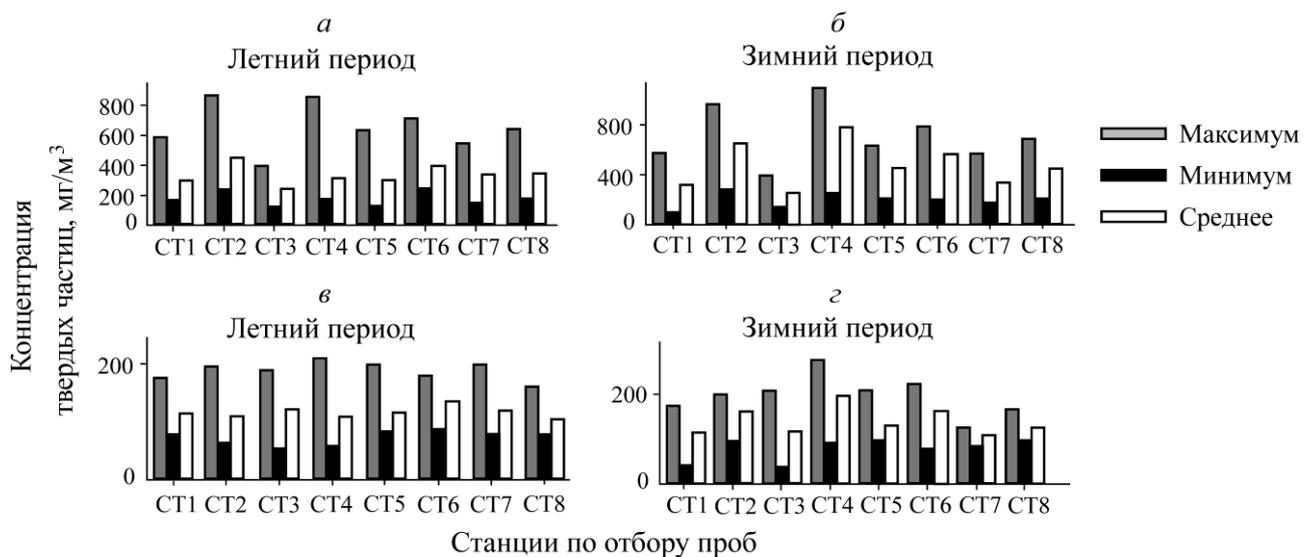


Рис. 2. Изменение концентраций  $TЧ_{10}$  (а, б) и  $TЧ_{2.5}$  (в, г) в летний и зимний периоды

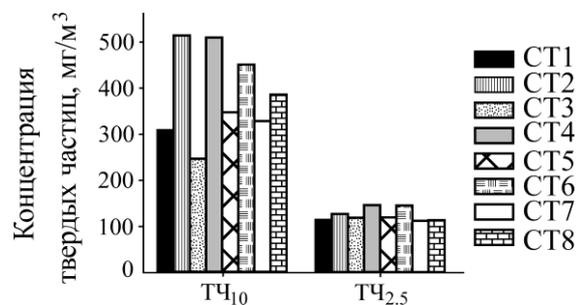
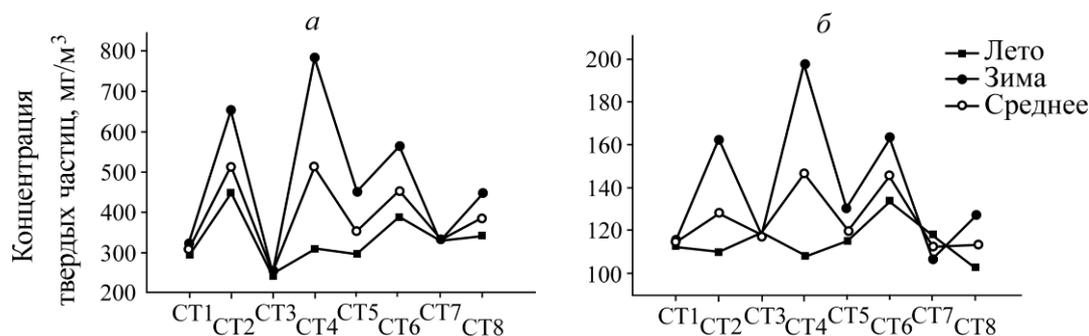
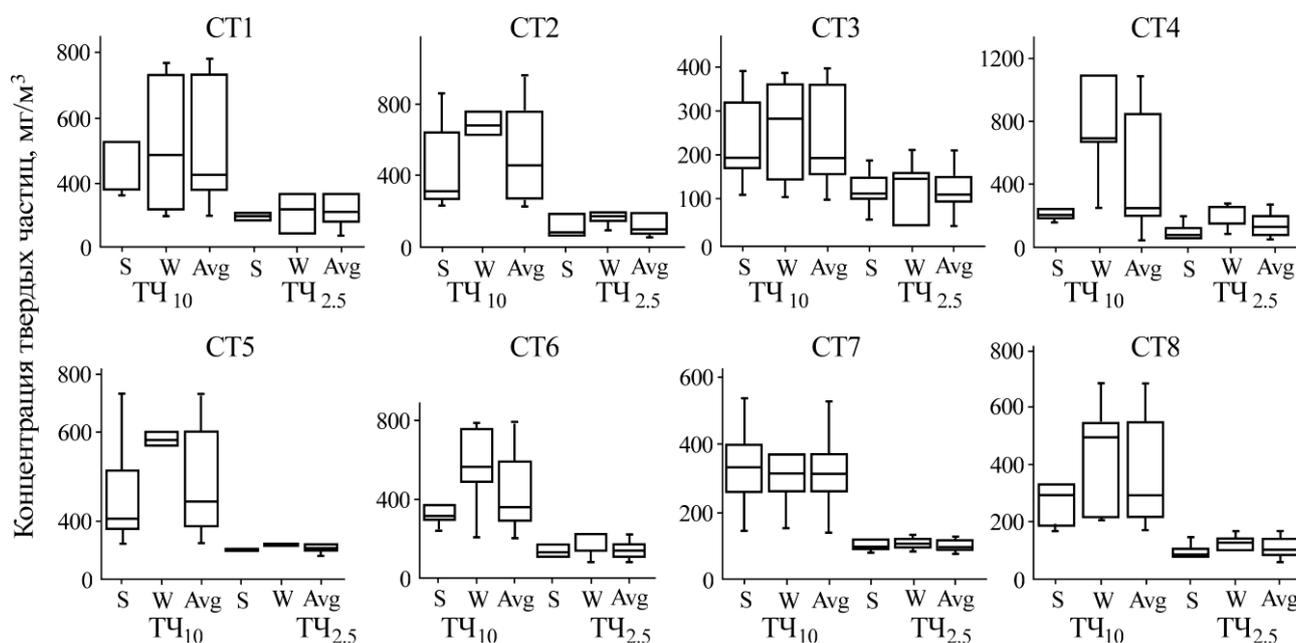


Рис. 3. Средняя концентрация  $TЧ_{10}$  и  $TЧ_{2.5}$  в пробах, взятых на различных станциях во время обоих сезонов

Рис. 4. Сезонное распределение концентраций ТЧ<sub>10</sub> (а) и ТЧ<sub>2.5</sub> (б)Рис. 5. Диаграммы распределения квартиля по концентрациям ТЧ<sub>10</sub> и ТЧ<sub>2.5</sub> на разных станциях отбора проб: S — лето; W — зима; Avg — среднее

### МИКРОЭЛЕМЕНТЫ

Самой высокой оказалась средняя концентрация Cd ( $6.92 \text{ мг/м}^3$ ), за ней следуют (в порядке убывания): Fe ( $2.07 \text{ мг/м}^3$ ), Cr ( $1.53$ ), Zn ( $0.77$ ), Pb ( $0.08$ ), Cu ( $0.04 \text{ мг/м}^3$ ), Ni ( $16.24 \text{ нг/м}^3$ ), Se ( $1.79$ ), Hg ( $1.43$ ) и As ( $1.08 \text{ нг/м}^3$ ). В районе, где проводились исследования, прослеживалась тенденция уменьшения концентрации элементов:  $\text{Cd} > \text{Fe} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Se} > \text{Hg} > \text{As}$ . Диапазон значений средней концентрации Pb в пробах всех наблюдательных станций был  $0.05 - 0.13 \text{ мг/м}^3$ , что не превысило предела  $0.5 \text{ мг/м}^3$ , установленного Национальным стандартом качества воздуха окружающей среды. Низкая концентрация свинца даже вдоль автотрасс возможна в результате использования топлива, не содержащего тетраэтил свинца.

Средние концентрации Ni колебались от  $5.92$  (СТ4) до  $29.69 \text{ нг/м}^3$  (СТ7). Концентрации никеля превышают нормы национального стандарта ( $20 \text{ нг/м}^3$ ) в пробах станций 2, 5 и 7, в то время как все остальные наблюдательные станции фиксировали концентрации в пределах нормы. Концентрация никеля в образцах СТ7 возросла до уровня  $44.55 \text{ нг/м}^3$ , что значительно выше предельно допустимой. Повышенные концентрации никеля в этом районе обусловлены влиянием интенсивного движения транспортных средств. Средняя концентрация мышьяка составила  $0.05 \text{ нг/м}^3$  в пробах СТ1, СТ8 и  $2.78 \text{ нг/м}^3$  на СТ3. Источниками выброса мышьяка яв-

ляются выхлопные газы автомобилей, промышленные выбросы [33] и сжигание угля [34–36]. Несмотря на то, что в Национальном стандарте качества воздуха ртуть не указана, анализ образцов пыли, взятых на всех наблюдательных станциях, показывает наличие небольшого содержания Hg в течение всех сезонов. Наиболее высокое содержание ртути обнаружено в образцах пыли со станций 3 и 4. На рис. 6 приведены все концентрации следов элементов на различных участках отбора проб. Аналогично на рис. 7 показано распределение квартиля следов металлов.

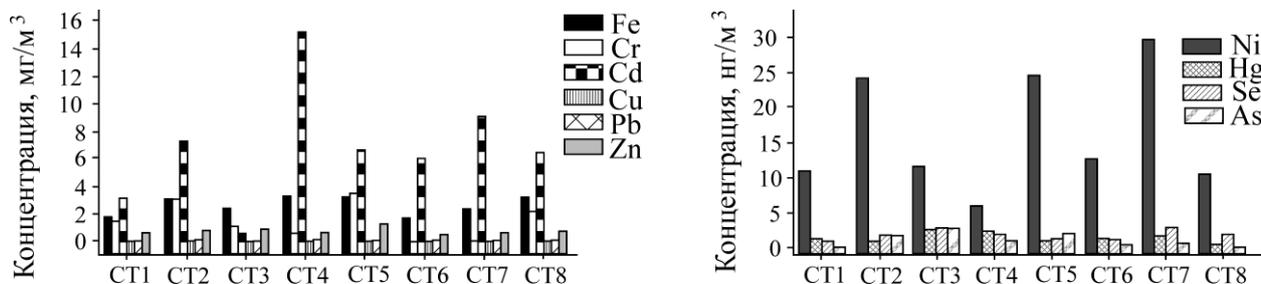


Рис. 6. Концентрация следов металлов в пробах с различных станций

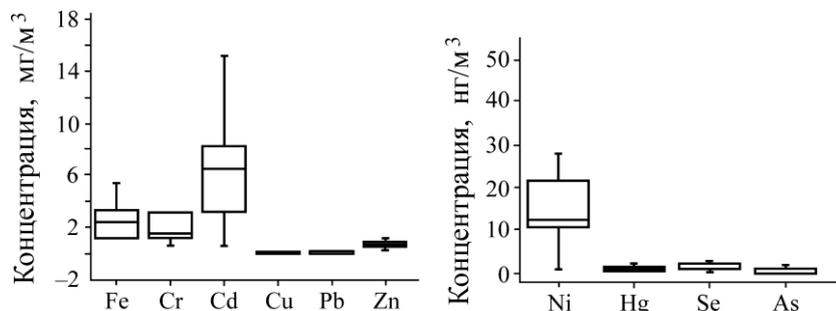


Рис. 7. Распределение квартиля концентраций микроэлементов

### АНАЛИЗ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Количественное содержание элементов и соответствующие источники их происхождения можно объяснить с помощью факторного анализа главных компонент [14, 17]. Основная цель анализа — уменьшение количества возможных величин, т. е. он может применяться как метод обработки и сокращения данных. Анализ главных компонент проведен методом варимакс, при котором матрица нагрузок получается путем ортогонального преобразования исходной матрицы, что приводит к максимуму функции (IBM SPSS 20.0) [37]. Данный метод используется для сокращения данных. Он выявляет факторы, находящиеся в наиболее тесной взаимосвязи с небольшим набором переменных и не вступающие в корреляцию с другим набором переменных [38]. На исследуемом участке выделено четыре главные компоненты, имеющих собственное значение  $> 1$  с суммарным расхождением около 89.50 % в общем наборе данных. В табл. 4 представлены вводные данные главных компонент для различных факторов в течение всего периода исследования.

Главная компонента 1 (ГК1) с расхождением 34.038 % показывает высокое содержание Cd, Cu и Pb, что указывает на связь этих элементов с твердыми частицами. Cd и Pb связаны с горнодобывающим производством и сопутствующей деятельностью [34, 39]. Помимо горных работ, наличие Cd связано с ресуспендированием дорожной пыли [40], а также свидетельствует о загрязнении автотранспортом [41–45]. Медь преимущественно образуется вследствие сгорания угля [46]. Глав-

ная компонента 2 (ГК2) представлена такими металлами, как хром и цинк, с расхождением 22.318 %. Хром выделяется главным образом в процессе сгорания угля [34, 36, 46], а цинк является элементом земной коры. Железо и мышьяк также значимые элементы в ГК2. Железо, преобладающее в земной коре, часто ассоциируется с дорожной пылью и деятельностью на открытых месторождениях [15, 16, 47]. Мышьяк обнаруживается в выхлопных газах автотранспорта. Главная компонента 3 (ГК3) представлена ртутью и селеном, имеет расхождение 18.67 %, а компонента 4 (ГК4) — никелем, с расхождением 4.47 %. Происхождение никеля чаще всего объясняется выбросами автотранспортных средств [15, 39, 47–50]. График значений анализа главных компонент показан на рис. 8.

ТАБЛИЦА 4. Анализ главных компонент твердых частиц и следов металлов

Фактор	ГК1	ГК2	ГК3	ГК4
TЧ <sub>10</sub>	<b>0.851</b>	-0.032	-0.318	-0.212
TЧ <sub>2.5</sub>	0.580	-0.121	0.030	-0.683
Fe	0.569	<b>0.705</b>	-0.012	0.214
Cr	-0.075	<b>0.803</b>	-0.517	0.189
Cd	<b>0.967</b>	-0.055	0.028	0.050
Cu	<b>0.881</b>	0.017	0.098	-0.349
Pb	<b>0.956</b>	-0.148	0.177	0.024
Zn	-0.191	<b>0.924</b>	-0.018	0.218
Ni	-0.028	0.195	-0.007	<b>0.802</b>
Hg	0.066	-0.062	<b>0.887</b>	-0.415
Se	0.014	0.025	<b>0.885</b>	0.379
As	-0.165	<b>0.774</b>	0.510	-0.110
Общее	4.085	2.678	2.241	1.737
% отклонения	34.038	22.318	18.672	14.471
% суммарного отклонения	34.038	56.357	75.028	89.500

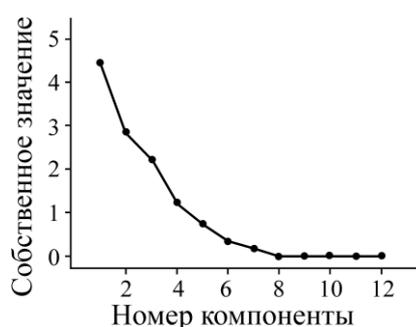


Рис. 8. График собственных значений для анализа главных компонент

### КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Корреляционный анализ проводился с целью установления соотношения между всеми микроэлементами и твердыми частицами в пересчете на концентрацию. Очевидным является тот факт, что взаимосвязанные элементы имеют общие источники происхождения [51, 52]. Для проведения корреляционного анализа взяты средние данные за весь период исследования. Значения TЧ<sub>10</sub> в значительной степени коррелировали с TЧ<sub>2.5</sub> ( $r=0.733$ ), Cd (0.745), Pb ( $r=0.778$ ) на уровне 0.05. Тесная взаимосвязь установлена между элементами Cu–Cd ( $r=0.879$ ), Pb–Cd ( $r=0.902$ ) и Pb–Cu ( $r=0.843$ ). Железо и хром также проявляли высокую корреляцию (Fe–Cr;

$r = 0.580$ ). Они являются литофильными элементами, т. е. содержатся в больших концентрациях в земной коре [53, 54] и могут попадать с переносимой ветром пылью [55]. Существенная взаимосвязь обнаружена в парах Zn–Cr ( $r = 0.761$ ) и Zn–Fe (0.583). Нахождение элементов в воздухе имеет преимущественно антропогенное происхождение из-за выбросов автомобильного транспорта и коррозии металлов (Cu, Zn, Cd), а также вследствие сгорания угля (As, Cr, Pb) [34–36]. Выброс Zn происходит от автотранспорта: износ и повреждение вулканизированных покрышек, сжигание жидкого топлива [45, 56–58]. Таким образом, наиболее значимыми источниками микроэлементов являются ресуспендирование дорожной пыли, автотранспортные выбросы и сжигание угля. Для четкого представления взаимосвязей полученных данных разработана корреляционная матрица (табл. 5).

ТАБЛИЦА 5. Корреляция различных параметров изучаемого участка для двух сезонов

Фактор	TЧ <sub>10</sub>	TЧ <sub>2.5</sub>	Fe	Cr	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Hg	Se	As
TЧ <sub>10</sub>	1	0.733*	0.352	0.047	0.745*	0.700	0.778*	-0.285	-0.087	-0.154	-0.336	-0.199
TЧ <sub>2.5</sub>		1	0.004	-0.342	0.539	0.658	0.524	-0.347	-0.397	0.341	-0.254	-0.003
Fe			1	0.580	0.511	0.451	0.457	0.583	0.095	-0.146	0.172	0.327
Cr				1	-0.156	-0.156	-0.240	0.761*	0.269	-0.585	-0.351	0.355
Cd					1	0.879**	0.902**	-0.167	0.028	0.092	0.013	-0.224
Cu						1	0.843**	-0.204	-0.352	0.328	-0.071	-0.102
Pb							1	-0.360	-0.079	0.214	0.201	-0.177
Zn								1	0.390	-0.165	0.052	0.684
Ni									1	-0.309	0.195	0.210
Hg										1	0.583	0.446
Se											1	0.404
As												1

\*Уровень корреляции 0.05; \*\*уровень корреляции 0.01.

## ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в ходе мониторинга концентраций твердых частиц, показали, что на территории проведения исследования отмечается высокий уровень загрязняющих частиц в воздухе как от угольного производства, так и от других источников. Сезонные колебания содержания TЧ<sub>10</sub> и TЧ<sub>2.5</sub> свидетельствуют о более высоком загрязнении в зимний период по сравнению с летним. Концентрация твердых частиц превышает уровень, соответствующий стандартам качества воздуха (NAAQS), на протяжении всего года. Установлено, что на исследуемой территории главными источниками загрязнения являются продукты земной коры и связанная с ними деятельность, такая как угледобыча, а также выбросы автотранспорта и загрязнение от немоощенных дорог. Характеристика следов металлов затруднительна ввиду наличия большого количества источников загрязнения. Факторный анализ выявил во фракции воздуха на исследуемой местности преимущественное содержание таких металлов, как кадмий, медь и свинец, которые представлены в виде главных компонент. Это в большей степени связано с транспортировкой угля, работой горнодобывающей техники и сжиганием угля. Анализ главных компонент показал также повышенную концентрацию железа, мышьяка, хрома и цинка. Корреляционный анализ предполагает взаимосвязь между различными параметрами в районе, где проводились исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghose M. K. and Majee S. R. Air pollution caused by opencast mining and its abatement measures in India, J. of Environmental Management, 2001, Vol. 63, No. 2. — P. 193–202.
2. Trivedi R., Chakraborty M., Prasad N., and Tiwary R. K. A study of source wise emission inventory for air quality modeling in Padampur opencast project of Western Coalfields Limited, India, Min. Eng. J., 2009, Vol. 9. — P. 20–27.

3. **Chaulya S. K.** Assessment and management of air quality for an opencast coal mining area, *J. of Environmental Management*, 2004, Vol. 70, No. 1. — P. 1–14.
4. **Vesovic V., Auziere A., Calviac G., and Dauriat A.** Modelling of the dispersion and deposition of coarse particulate matter under neutral atmospheric conditions, *Atmospheric Environment*, 2001, Vol. 35, No. 1. — P. S99–S105.
5. **Omer A. M.** Energy, environment and sustainable development, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2008, Vol. 12, No. 9. — P. 2265–2300.
6. **Franco A. and Diaz A. R.** The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control, *Energy*, 2009, Vol. 34, No. 3. — P. 348–354.
7. **Collins M. J., Williams P. L., and McIntosh D. L.** Ambient air quality at the site of a former manufactured gas plant, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2001, Vol. 68. — P. 137–152.
8. **Perez P. and Reyes J.** Prediction of maximum of 24-h average of PM10 concentrations 30-h in advance in Santiago, Chile, *Atmospheric Environment*, 2002, Vol. 36. — P. 4555–4561.
9. **Pope C. A.** Review: Epidemiological basis for particulate air pollution health standards, *Aerosol Science and Technology*, 2000, Vol. 32. — P. 4–14.
10. **Wheeler A. J., Williams I., Beaumont R. A., and Manitol R. S.** Characterization of particulate matter sampled during a study of children’s personal exposure to airborne particulate matter in a UK urban environment, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, Vol. 65. — P. 69–77.
11. **Gunawardana C., Goonetilleke A., Egodawatta P., Dawes L., and Kokot S.** Source characterization of road dust based on chemical and mineralogical composition, *Chemosphere*, 2011, Vol. 87, No. 2. — P. 163–170.
12. **Shaheen N., Shah M. H., Khalique A., and Jaffar M.** Metal levels in airborne particulate matter in urban Islamabad, Pakistan, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, Vol. 75, No.4. — P. 739–746.
13. **Callen M. S., de la Cruz M. T., Lopez J. M., Navarro M. V., and Mastral A. M.** Comparison of receptor models for source apportionment of the PM<sub>10</sub> in Zaragoza (Spain), *Chemosphere*, 2009, Vol. 76. — P. 1120–1129.
14. **Park S. S. and Kim Y. J.** Source contributions to fine particulate matter in an urban atmosphere, *Chemosphere*, 2005, Vol. 59. — P. 217–226.
15. **Shah M. H., Shaheen N., Jaffar M., Khalique A., Tariq S. R., Manzoor S.** Spatial variations in selected metal contents and particle size distribution in an urban and rural atmosphere of Islamabad, Pakistan, *J. of Environmental Management*, 2006, Vol. 78. — P. 128–137.
16. **Quiterio S. L., da Silva C. R. S., Arbilla G., Escaleira V.** Metals in airborne particulate matter in the industrial district of Santa Cruz, Rio de Janeiro, in an annual period, *Atmospheric Environment*, 2004, Vol. 38. — P. 321–331.
17. **Watson J. G., Zhu T., Chow J. C., Engelbrecht J., Fujita E. M., Wilson W. E.** Receptor modelling application framework for particle source apportionment, *Chemosphere*, 2002, Vol. 49. — P. 1093–1136.
18. **Wild P., Bourgkard E., Paris C.** Lung cancer and exposure to metals: the epidemiological evidence, *Method Molecular Biology*, 2009, Vol. 472. — P.139–167.
19. **Prieditis H., Adamson I. Y. R.** Comparative pulmonary toxicity of various soluble metals found in urban particulate dusts, *Experimental Lung Research*, 2002, Vol. 28. — P. 563–576.
20. **Suman Papiya, Pal A. K., and Singh G.** Assessment of air quality status in Angul-Talcher coal mining area in Orissa, *Int. Conf. on MSECCMI, New Delhi, India*, 2007. — P. 577–589.
21. **Ghose M. K. and Majee S. R.** Assessment of the status of work zone air environment due to opencast coal mining, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, Vol. 77. — P. 51–60.

22. **Sinha S. and Sheekesh S.** Air quality status and management options for the mining belt of Goa, Indian J. of Environment Protection, 2002, Vol. 22. — P. 241–253.
23. **Implementation Status** and action plan in critically polluted areas, state pollution control board, Odisha, 2016, Available on [http://www.ospcboard.org/ckeditor/CKFiles/25-Jun-2016ActionPlan\\_Implementation\\_Status\\_Angul%20Talcher\\_Mar2016.compressed.pdf](http://www.ospcboard.org/ckeditor/CKFiles/25-Jun-2016ActionPlan_Implementation_Status_Angul%20Talcher_Mar2016.compressed.pdf). Last Assessed on 2nd March 2017.
24. **BIS** (Bureau of Indian Standards), methods for measurement of air pollution: Guidelines for Planning the Sampling of Atmosphere (Second Revision) IS 5182 (Part 14), New Delhi, 2000.
25. **NAAQS**. National ambient air quality standard, India, prescribed by Central Pollution Control Board on 18 November, 2009. [http://cpcb.nic.in/National\\_Ambient\\_Air\\_Quality\\_Standards.php](http://cpcb.nic.in/National_Ambient_Air_Quality_Standards.php).
26. **Katz M.** Standard methods for air sampling and analysis, 2<sup>nd</sup> edition, APHA, 1977, Press Inc. Spring Field, VA.
27. **Sinha S. and Banerjee S. P.** Characterization of haul road dust in an Indian opencast iron ore mine, Atmospheric Environment, 1997, Vol. 31. — P. 2809–2814.
28. **Pandit G. G., Sahu S. K. and Puranik V. D.** Distribution and source apportionment of atmospheric non-methane hydrocarbons in Mumbai, India, Atmospheric Pollution Research, 2011, Vol. 2. — P. 231–236.
29. **Chaulya S. K.** Spatial and temporal variations of SPM, RPM, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> concentrations in an opencast coal mining area, J. of Environmental Monitoring, 2004, Vol. 6. — P. 134–142.
30. **Kumar V. and Ratan S.** Particulate pollution in opencast coal mines, National Seminar on Status of Environmental Management in Mining Industry, Banaras Hindu University, Varanasi, India, 2003. — P. 49–56.
31. **Reddy G. S. and Ruj B.** Ambient air quality status in Raniganj-Asansol area, India, Environmental Monitoring and Assessment, 2003, Vol. 89. — P. 153–163.
32. **Ravichandran C., Chandrasekharan G. E., and Srikanth S.** A short report on ambient air quality inside and outside Tiruchirapalli city, Indian J. of Environment Protection, 1998, Vol. 18. — P. 440–442.
33. **Senlin L., Longyi S., Minghong W., Zheng J., and Xiaohui C.** Chemical elements and their source apportionment of PM<sub>10</sub> in Beijing urban atmosphere, Environmental Monitoring and Assessment, 2007, Vol. 133. — P. 79–85.
34. **Tian H. Z., Wang Y., Xue Z. G., Cheng K., Qu Y. P., Chai F. H., and Hao J. M.** Trend and characteristics of atmospheric emissions of Hg, As, and Se from coal combustion in China, 1980–2007, Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, Vol. 10, No. 23. — P. 11905–11919.
35. **Zhang Y., Wang X., Chen H., Yang X., Chen J., and Allen J. O.** Source apportionment of lead-containing aerosol particles in Shanghai using single particle mass spectrometry, Chemosphere, 2009, Vol. 74, No. 4. — P. 501–507.
36. **Pacyna E. G., Pacyna J. M., Fudala J., Strzelecka-Jastrzab E., Hlawiczka S., Panasiuk D., Nitter S., Pregger T., Pfeiffer H., Friedrich R.** Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe, Atmospheric Environment, 2007, Vol. 41, No. 38. — P. 8557–8566.
37. **Winner D. A., Cass G. R.** Modeling the long-term frequency distribution of regional ozone concentrations using synthetic meteorology, Environmental Science Technology, 2001, Vol. 35, No.18. — P. 3718–3726.
38. **Stevens J.** Applied multivariate statistics for the behavioural sciences (3rd edition), Mahwah, Erlbaum, NJ, 1996.
39. **Chen Y. C., Hsu C. Y., Lin S. L., Chang-Chien G. P., Chen M. J., Fang G. C., and Chiang H. C.** Characteristics of concentrations and metal compositions for PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>2.5–10</sub> in Yunlin County, Taiwan during air quality deterioration, Aerosol and Air Quality Research, 2015, Vol. 15, No. 7. — P. 2571–2583.
40. **Sternbeck J., Sjjodin A., Andreasson K.** Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension — results from two tunnel studies, Atmospheric Environment, 2002, Vol. 36, No. 30. — P. 4735–4744.
41. **Ambade B.** Seasonal variation and sources of heavy metals in hilltop of Dongargarh, Central India, Urban Climate, 2014, Vol. 9. — P. 155–165.

42. **Ahumada H. T., Whitehead L., Blanco S.** Personal exposure to PM<sub>2.5</sub> and element composition — a comparison between outdoor and indoor workers from two Mexican cities, *Atmospheric Environment*, 2007, Vol. 41. — P. 7401–7413.
43. **Cetin B., Yatkin S., Bayram A., Odabasi M.** Ambient concentrations and source apportionment of PCBs and trace elements around an industrial area in Izmir, Turkey, *Chemosphere*, 2007, Vol. 69. — P. 1267–1277.
44. **Senlin L., Longyi S., Minghong W., Zheng J., and Xiaohui, C.** Chemical elements and their source apportionment of PM<sub>10</sub> in Beijing urban atmosphere, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, Vol. 133. — P. 79–85.
45. **Banerjee A. D. K.** Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India, *Environmental Pollution*, 2003, Vol. 123. — P. 95–105.
46. **Zhang Q., Shen Z., Cao J., Ho K., Zhang R., Bie Z., Chang H., and Liu S.** Chemical profiles of urban fugitive dust over Xi'an in the south margin of the Loess Plateau, China, *Atmospheric Pollution Research*, 2014, Vol. 5, No. 3. — P. 421–430.
47. **Ragosta M., Caggiano R., D'Emilio M., Macchiato M.** Source origin and parameters influencing levels of heavy metals in TSP, in an industrial background area of Southern Italy, *Atmospheric Environment*, 2002, Vol. 36. — P. 3071–3087.
48. **Kim K. H., Lee J. H., Jang M. S.** Metals in airborne particulate matter from the first and second industrial complex area of Taejeon City, Korea, *Environmental Pollution*, 2002, Vol. 118. — P. 41–51.
49. **Weckwerth G.** Verification of traffic emitted aerosol components in the ambient air of Cologne (Germany), *Atmospheric Environment*, 2001, Vol. 35. — P. 5525–5536.
50. **Ramadan Z., Song X. H., Hopke P. K.** Identification of sources of phoenix aerosol by positive matrix factorization, *J. of the Air and Waste Management Association*, 2000, Vol. 50. — P. 1308–1320.
51. **Javed W., Wexler A. S., Murtaza G., Ahmad H. R., Basra S. M. A.** Spatial, temporal and size distribution of particulate matter and its chemical constituents in Faisalabad, Pakistan, *Atmosfera*, 2015, Vol. 28, No. 2. — P. 99–116.
52. **Zhou S., Yuan Q., Li W., Lu Y., Zhang Y., Wang W.** Trace metals in atmospheric fine particles in one industrial urban city: spatial variations, sources, and health implications, *J. of Environmental Science*, 2014, Vol. 26, No. 1. — P. 205–213.
53. **White W. M.** Trace elements in igneous process, in geochemistry (1<sup>st</sup>), John Wiley and Sons Ltd, 2013, UK.
54. **Nordberg G. F., Fowler B. A., Nordberg M., Friberg L.** Handbook on the toxicology of metals, third ed. European Environmental Agency, 2005.
55. **Basha A. M., Yasovardhan N., Satyanarayana S. V., Reddy G. V. S., Kumar A. V.** Baseline survey of trace metals in ambient PM<sub>10</sub> at Tummalapalle uranium mining site, *Atmospheric Pollution Research*, 2014, Vol. 5, P. 591–600.
56. **Alolayan M. A., Brown K. W., Evans J. S., Bouhamra W. S., and Koutrakis P.** Source apportionment of fine particles in Kuwait City, *Science of Total Environment*, 2013, Vol. 448. — P. 14–25.
57. **Manoli E., Voutsas D., and Samara C.** Chemical characterization and source identification/apportionment of fine and coarse air particles in Thessaloniki, Greece, *Atmospheric Environment*, 2002, Vol. 36, No. 6. — P. 949–961.
58. **Borbely-Kiss I., Koltay E., Szabo G. Y., Bozo L., Tar K.** Composition and sources of urban and rural atmospheric aerosol in eastern Hungary, *J. of Aerosol Science*, 1999, Vol. 30, No. 3. — P. 369–391.

*Поступила в редакцию 17/VI 2018*