

Динамика распределения тяжелых металлов и мышьяка в пылевом аэрозоле и почвах Северного Таджикистана

М. Н. Рахматов^{1}, В. А. Маслов², С. Ф. Абдуллаев²*

¹Государственное образовательное учреждение «Худжандский государственный университет имени академика Бободжона Гафурова», г. Худжанд, Республика Таджикистан,

*e-mail: muhamadi.rahmatov@yandex.com

²Физико-технический институт им. С.У. Умарова АН Республики Таджикистан, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Поступила в редакцию 21.06.2019 г.

Аннотация – Приведены результаты исследования по определению содержания тяжелых металлов (ТМ) в форме свободных элементов или оксидов, а также мышьяка в пробах атмосферного аэрозоля и почв северного Таджикистана за период с 2013 по 2019 годы. По результатам сравнительного анализа элементного состава аэрозоля и почв выявлена их межгодовая изменчивость, свидетельствующая о том, что особенности временных вариаций носят региональный характер и, в основном, определяются динамикой изменения содержания ТМ при смене воздушных масс. Анализ элементного состава проб методом рентгенофлуоресцентного анализа показал наибольшее содержание в аэрозоле стронция (376,8 ppm), цинка (2159,5 ppm), меди (118,8 ppm), оксида марганца (796,7 ppm) и ванадия (124,3 ppm) – зафиксировано в 2013 г.; оксида железа (5,3 %) и мышьяка (23,7 ppm) – в 2014 г.; никеля (66,7 ppm), хрома (112 ppm) и оксида титана (0,67%) – в 2015 г.; свинца (124,7 ppm), и кобальта (19,9 ppm) – в 2017 г. Содержание в почве элементов первого (мышьяк, свинец, цинк) и второго классов опасности (медь, никель, кобальт, хром) значительно превышает ПДК во многих районах. Обсуждаются возможные источники загрязнения ТМ, которые, в основном, имеют антропогенный характер (автомобильный транспорт, предприятия металлургической промышленности, открытые хвостохранилища и др.).

Ключевые слова: аэрозоль, элементный состав, почва, тяжелые металлы, мышьяк, источники загрязнения.

Dynamics of Distribution of Heavy Metals and Arsenic in Dust Spray and Soils of Northern Tajikistan

M. N. Rakhmatov^{1}, V. A. Maslov², and S. F. Abdullaev²*

¹Khujand State University named after academician B. Gafurov, Khujand, Republic of Tajikistan, *email: muhamadi.rahmatov@yandex.com

²S. U. Umarov Physical-Technical Institute of Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan

Received June 21, 2019

Abstract – The article presents the results of determining content of heavy metals (or metal oxides) and arsenic in samples of atmospheric aerosol and soils of northern Tajikistan collected during 2013–2019. The results of a comparative analysis of the elemental composition of aerosol and soils highlighted their interannual variability, indicating a specific regional character of temporal variations which are mainly determined by dynamics of changes in the content of the examined substances affected by air mass changing. X-ray fluorescence technique has been used for analysis of the elemental composition of the samples and revealed the following highest concentrations of the examined substances in aerosol: strontium (376.8 ppm), zinc (2159.5 ppm), copper (118.8 ppm), manganese oxide (796.7 ppm),

and vanadium (124.3 ppm) as measured in 2013; the highest content of arsenic (23.7 ppm) – measured in 2014; nickel (66.7 ppm), chromium (112 ppm), and titanium oxide (0.67%) – in 2015; lead (124.7 ppm) and cobalt (19.9 ppm) – in 2017. The measured concentrations in soil samples for the substances belonging to the first (arsenic, lead, zinc) and second hazard class (copper, nickel, cobalt, chromium) are found to exceed the levels of the corresponding maximum permissible values for many sampling locations. Possible sources of heavy metal and arsenic pollution are discussed, which are mostly of anthropogenic origin (automobile transport, metallurgical industrial enterprises, open tailing dumps, etc.).

Keywords: aerosol, elemental composition, soils, heavy metals, arsenic, pollution sources.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире проявляется особый интерес к оценке загрязнения природной среды тяжелыми металлами (ТМ), которые, в отличие от других загрязнителей, не включаются в процессы естественного самоочищения, что приводит к их накоплению в биоэкологическом цикле [1, 2]. Участвуя во всех видах миграции и в биологическом круговороте, они неизбежно приводят к загрязнению важнейших жизнеобеспечивающих природных сред: воды, воздуха и пищи [3–6]. В этой связи появилось много исследований, в которых проводится изучение изменений элементного состава атмосферных аэрозолей и почв, вызванных участием ТМ в ряде важнейших процессов, протекающих в атмосфере, в том числе в Азии [7–10], России [11–13] и других странах [14–16].

Целью настоящей работы было исследование содержания ТМ в пробах атмосферного аэрозоля и почв северного Таджикистана. Полученные данные использованы для изучения миграции аэрозольных частиц, включающих тяжелые металлы, в атмосфере и почве, а также для выявления источников происхождения аэрозолей и оценки уровня загрязнения окружающей среды.

Поскольку термин «тяжелые металлы» не является однозначно общепринятым и иногда подвергается критике [1, 17], уточним, что в данной работе объектами исследования являлись одиннадцать тяжелых металлов, три из которых были в форме оксидов (а именно, определялось содержание Sr, Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, V, Fe₂O₃, MnO, TiO₂). Кроме того, в качестве объекта исследования был выбран полуметалл – мышьяк (As) как элемент, обладающий высокой токсичностью.

ОСОБЕННОСТИ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ СЕВЕРНОГО ТАДЖИКИСТАНА

Северный Таджикистан (Согдийская область) расположен между 39°04' и 41°08' северной широты и 69°25' и 70°34' восточной долготы и занимает территорию в 25400 км². Доля сельскохозяйственной площади – менее 6%. С севера область ограничивают Кураминский хребет и горы Моголтау, с юга – Туркестанский хребет и Зеравшанские горы. Северная часть области расположена на северо-западе Ферганской долины. По Ферганской долине загрязнения атмосферы переносятся ветром, как по трубе. Основной почвенный тип почв – сероземы. На плодородных сероземах горных долин из водораздела рек Сырдарья и Зеравшан выращиваются фрукты, овощи, зерно, хлопок. Климат – континентальный, сухой и зависит от высоты над уровнем моря. Лето без осадков, зима теплая. Население – около двух с половиной миллионов человек, и только четверть из них горожане.

В недрах горных хребтов добываются уголь, нефть, медь, золото, свинец, серебро, олово, висмут, железо, сурьма, ртуть, фосфориты, и другие материалы. Разработка месторождений урана, дававших сырье в первые десятилетия атомной программы СССР, уже прекращена, но осталось незакрытое Дегмайское хвостохранилище, откуда пыль разносится по окрестностям. Замкнутые горные долины не позволяют загрязнениям далеко распространяться, но в Ферганской долине для ветра границ нет.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробы атмосферного аэрозоля и почв были отобраны силами лаборатории физики атмосферы ФТИ им. С.У. Умарова АН РТ на территории Согдийской области в период с 2013 до 2019 гг. Сбор проб почвы в 2011 году производился вдоль автотрассы от Айнинского района до Худжанда. Всего проанализировано 248 проб (104 пробы аэрозоля и 144 пробы почв), собранных в административных центрах или других селениях перечисленных ниже районов северного Таджикистана. Далее будем описывать результаты исследования, называя только центр района. Центры районов, где производился отбор проб:

1. Ашт ($40^{\circ}39'$ с.ш., $70^{\circ}22'$ в. д.), это самый северный район, лежащий в Ферганской долине.

2. Истиклол ($40^{\circ}34'$ с.ш., $69^{\circ}38'$ в.д.) находится рядом с богатым месторождением полиметаллических руд и хвостохранилищем. Город Истиклол расположен вдоль горы Курама, входящей в систему Тянь-Шань и находящейся к северу от города, в 34 км от города Худжанд.

3. Город Худжанд ($40^{\circ}17'$ с.ш., $69^{\circ}37'$ в.д.) расположен на территории Ферганской долины между отрогами Туркестанского хребта на юге и горами Моголтау на севере, на берегу реки Сырдарья ниже Кайраккумского водохранилища, в 35 км от узбекского города Бекабада. Город расположен в 200 км к северо-востоку от Душанбе.

4. Спитамен ($40^{\circ}08'$ с.ш., $69^{\circ}22'$ в. д.), расположен в 28 км юго-западнее г. Худжанда.

5. Зафарабад ($40^{\circ}09'$ с.ш., $68^{\circ}48'$ в.д.) расположен в 106 км западнее г. Худжанда. Зафарабадский район расположен между Туркестанским хребтом и Ферганской долиной. На севере, западе и юго-западе граничит с Сырдарьинской и Джизакской областями Узбекистана.

6. Город Истаравшан ($39^{\circ}54'$ с.ш., $69^{\circ}03'$ в.д.) расположен в 90 км юго-западнее г. Худжанда.

7. Деваштич ($39^{\circ}57'$ с. ш., $69^{\circ}08'$ в. д.) расположен в 64 км юго-западнее города Худжанд.

8. Шахристан, ($39^{\circ}46'$ с. ш. $68^{\circ}49'$ в. д.) расположен в 102 км юго-западнее г. Худжанда. Шахристанский район на западе граничит с Республикой Узбекистан.

9. Айнинский район расположен в долине реки Зеравшан. В районе имеются месторождения сурьмы, ртути, угля, других минералов. Анзобский горно-обогащительный комбинат и угольная шахта расположены на северном

склоне Гиссарского хребта, являясь источниками загрязнения атмосферного воздуха. В поселке действует горно-обогатительный комбинат, занимающийся добычей свинцовой руды и переработкой свинцово-серебряного концентрата.

10. Поселок Адрасман расположен на юго-западных склонах Кураминского хребта. Адрасманский горно-обогатительный комбинат осуществляет добычу и переработку свинцовой руды на обогатительной фабрике с получением свинцово-серебряного концентрата.

11. Отдельно рассматривались также пробы почв, отобранные на территории Дегмайского радиоактивного хвостохранилища. Оно расположено в Гафуровском (ранее Ходжентском) районе, на расстоянии 1,5 км от ближайшего населенного пункта и на расстоянии 10 км от г. Худжанд на высоте 485 м. н. у. м. Общая площадь его – более 90 га, в нем содержится более 36 млн. т отходов переработки урановых руд, а также 5,7 млн т отходов переработки руд, содержащих ванадий.

Более подробное описание мест отбора проб, включая координаты и время сбора, приведено в [7, 18]. Отбор и подготовку проб для анализа проводили в соответствии с нормативными документами [19–21]. Отбор проб аэрозоля проводился двумя способами: путем естественного осаждения пыли на поверхность полиэтиленовой пленки размером 10 x 10 м², либо естественным осаждением частиц аэрозоля на пластмассовые ванночки размером 85 x 45 см². Отбор проб почвы проводился из верхнего слоя почвы на глубине 1–2 см. При отборе проб фиксировались координаты мест сбора проб, производилась их упаковка в стеклянные сосуды, маркировка и транспортировка в лаборатории для дальнейшего изучения. Пробы очищались в лабораторных условиях от инородного материала и размельчались до порошкообразного вида, затем просеивались через сито с сеткой 1 мм, упаковывались в стеклянный сосуд для хранения и исследований.

Концентрации элементов в пробах определяли в лабораторных условиях методом рентгенофлуоресцентного анализа. Измерения проводились на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре «Спектроскан МАКС-G» (ООО «СПЕКТРОН», Россия) [22–25]. Статистический анализ результатов измерений выполнялся в среде пакета прикладной статистики стандартных программ Excel. В частности, был выполнен корреляционный анализ для оценки взаимосвязи содержания элементов в аэрозоле и почвах северного Таджикистана.

Концентрации элементов с высоким содержанием в земной коре приведены в процентах, остальные даются в миллионных долях (ppm). Содержание оксидов марганца, железа и титана определялись прибором автоматически по установленной программе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 1 и 2 представлены карты точек отбора проб атмосферного аэрозоля (рис. 1) и почв (рис. 2). На картах указаны места отбора проб, количество отобранных проб, а также максимальные для исследованной области значения средних концентраций веществ первого класса опасности (Zn,

Pb, As), обнаруженные в соответствующих точках. Сначала мы рассмотрим результаты анализа проб аэрозоля и почвы по отдельности, а затем проведем их сравнительный анализ.

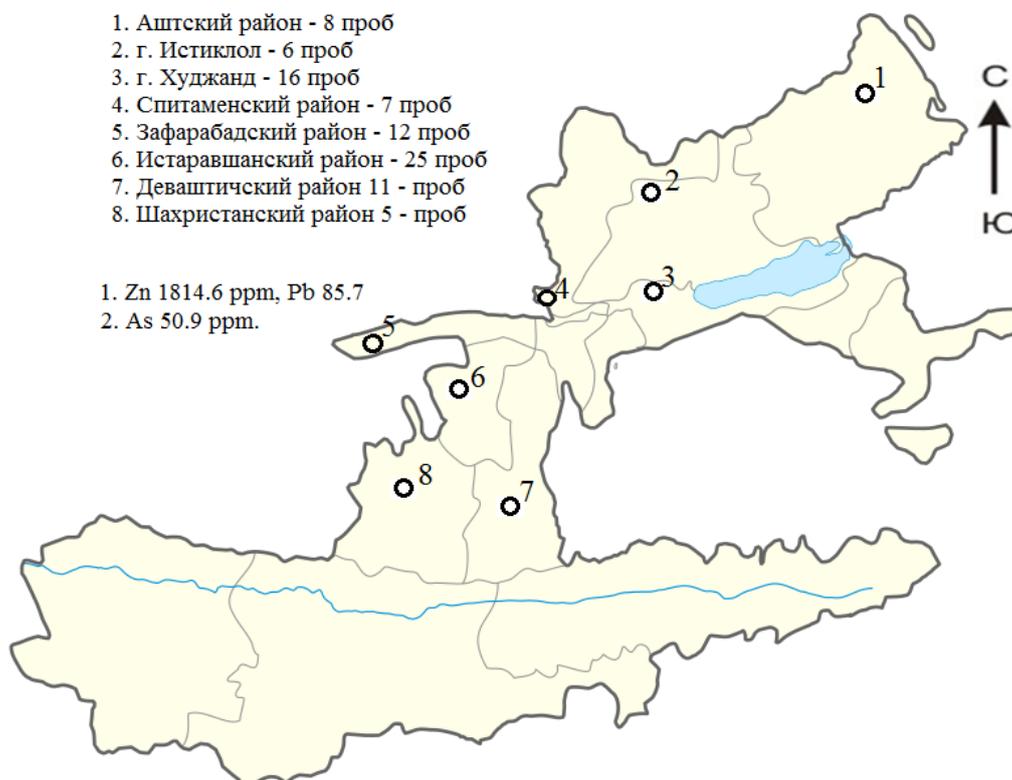


Рис. 1. Места отбора проб атмосферного аэрозоля в Северном Таджикистане за период 2013–2019 гг. с указанием максимальных обнаруженных значений средних концентраций веществ первого класса опасности.

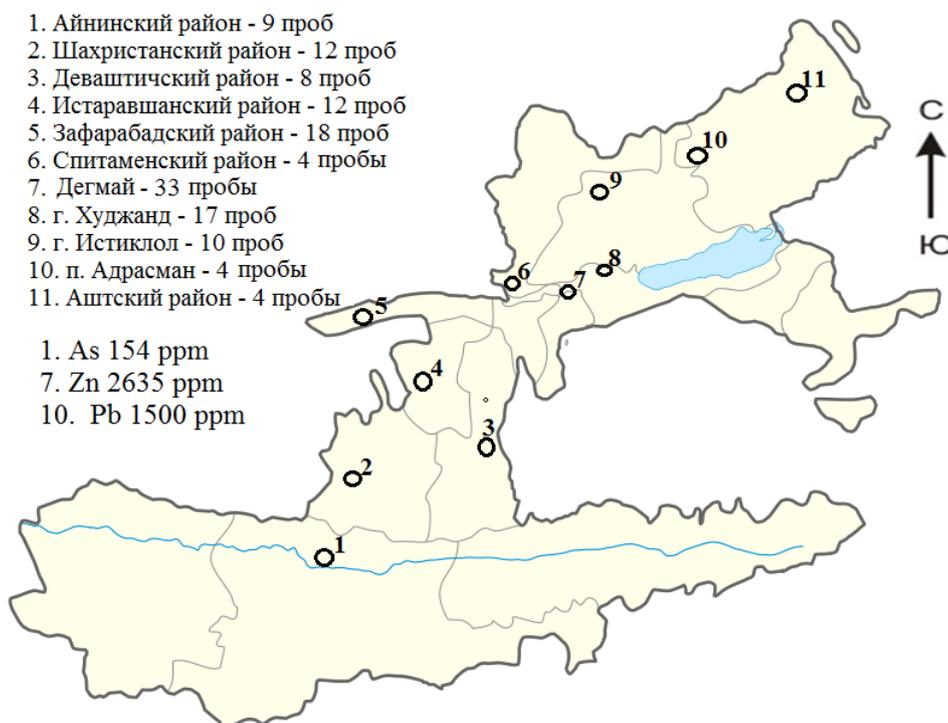


Рис. 2. Места отбора проб почв Северного Таджикистана в 2011–2019 гг. с указанием максимальных обнаруженных значений средних концентраций веществ первого класса опасности.

АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ТМ И МЫШЬЯКА В ПРОБАХ АЭРОЗОЛЯ

С октября 2013 г. по апрель 2019 г. были отобраны 104 пробы атмосферного аэрозоля. Регистрируемые прибором элементы были обнаружены почти во всех отобранных пробах. Критерием загрязненности служил уровень предельно допустимых концентраций (ПДК) или ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) ТМ в почве, а при его отсутствии (например, для стронция или оксида железа) – сопоставление с данными по другим странам. Оценки проводились по пиковым значениям и по средним для каждого района за весь период наблюдения.

Результаты измерений приведены в таблице 1. В таблице для каждого вещества выделено самое высокое по области значение его средней концентрации в пробах аэрозоля. Как и следовало ожидать, наиболее распространенные в земной коре ТМ в составе их оксидов (оксиды железа и титана) были найдены в наибольшем количестве также и в составе аэрозоля. А вот распределение этих элементов по районам области оказалось весьма неоднородным и отличающимся даже в десятки раз.

Это можно объяснить, как местными геологическими особенностями, так и дальним трансграничным переносом, а также и антропогенными факторами. Особенно это касается северных приграничных районов (Аштский, Зафарабадский), для которых преобладающее направление ветров от западной части Ферганской долины создает постоянную угрозу воздушного переноса загрязнений.

Таблица 1. Среднее по районам содержание ТМ, их оксидов и мышьяка в пробах аэрозоля

С, ppm	Пробы атмосферного аэрозоля							
	Юг			Запад		Центр	Север	
	Шахрис тан	Девашти ч	Истарав шан	Зафара бад	Спита мен	Худжа нд	Истикла л	Ашт
Sr	164,7	149,1	194,3	187,4	152,9	198,6	164,9	142
Pb	13,4	80,9	32,9	51,7	22	73,6	28,4	85,7
As	2	16,1	15,9	16,5	7,9	17,5	50,9	16,3
Zn	82,3	1074	1645,1	963,7	142,9	728,8	507,8	1814,6
Cu	44,8	42,2	63,9	74,9	43,4	56,9	45,2	42,9
Ni	36,4	38,2	44,4	47,7	32	44,6	29,4	78,4
Co	3,8	27,7	8,3	12,5	8,8	6,8	9,5	21,5
Fe ₂ O ₃ , %	4,7	4,4	4,5	4,4	3,6	5,1	4,5	4,7
MnO	133,6	295,8	310	348,6	226,2	295	145,3	983,2
Cr	87,8	99,6	96,2	98	96,1	92,5	93,7	92,4
V	67	56,7	61,4	67,4	50,2	62,2	59,8	56,1
TiO ₂ , %	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,03	0,3

Примечание: жирным шрифтом выделены самые высокие по области значения для каждого вещества

Межгодовой ход средних по области концентраций исследованных веществ в пылевом аэрозоле (рис. 3) показывает, что наибольшее содержание стронция (376,8 ppm), цинка (2159,5 ppm), меди (118,8 ppm), окиси марганца

(796,7 ppm) и ванадия (124,3 ppm) – было обнаружено в 2013 г. Наиболее высокое содержание мышьяка (23,7 ppm) отмечено в 2014 г., никеля (66,7 ppm), хрома (112 ppm) и титана (0,67 %) – в 2015 г., свинца (124,7 ppm), кобальта (19,9 ppm) – в 2017 г.

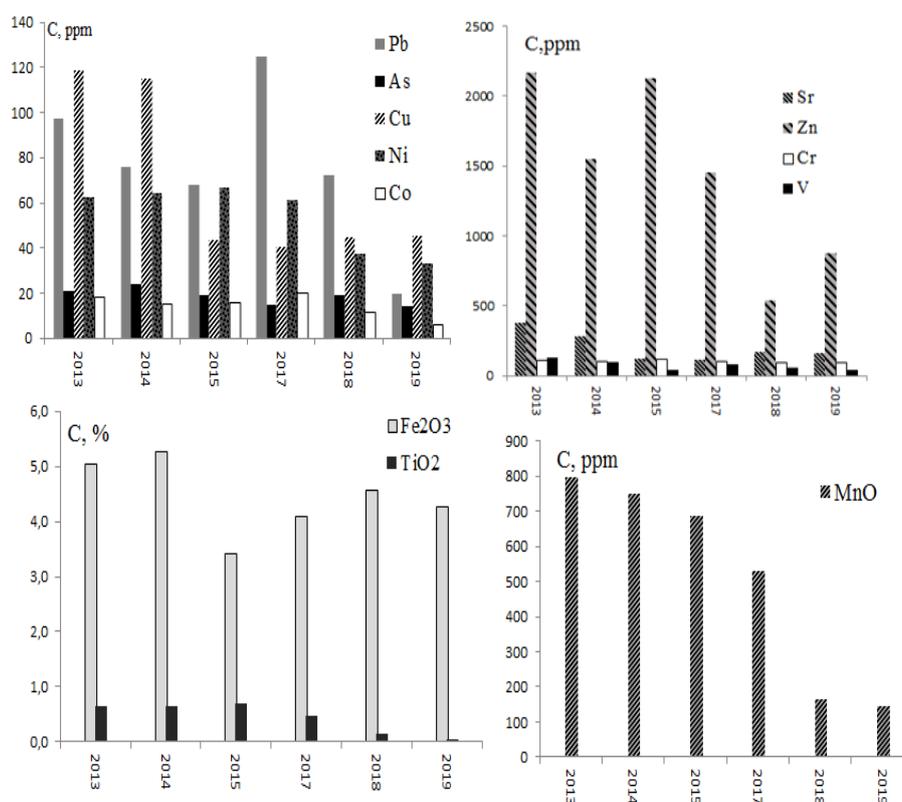


Рис. 3. Межгодовой ход среднего по области содержания ТМ, их оксидов и мышьяка в атмосферном аэрозоле за период с 2013 по 2019 гг.

АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ТМ И МЫШЬЯКА В ПРОБАХ ПОЧВЫ

На территории области за период с 2011 по 2019 гг. были отобраны 144 пробы почв. Данные по максимальным и средним (по районам) концентрациям всех исследованных элементов и соединений, обнаруженных в пробах почвы районов Согдийской области Таджикистана, приведены в таблице 2.

Средняя по району концентрация исследованных веществ, видимо, более объективно характеризует уровень загрязнения территории. Особую важность имеют данные о содержании **элементов первого класса опасности** (свинец, мышьяк, цинк). Содержание мышьяка превышает ПДК во всех районах Согдийской области. Самая высокая средняя концентрация мышьяка отмечена в Айни (250 ppm), максимальная концентрация зафиксирована в Дегмае (392 ppm). Превышение уровня ПДК свинца по средним значениям наблюдалось в Дегмае (521,5 ppm) и Адрасмане (1500 ppm), самый высокий уровень загрязнения зарегистрирован в почвах Дегмая (2826 ppm). Данные табл. 2 показывают, что наибольшая средняя по району концентрация свинца превышает его ПДК/ОДК в почве в 47 раз, мышьяка – в 77, цинка – в 34, кобальта – в 5, хрома – в 129 раз.

Таблица 2. Распределение по районам средних/максимальных концентраций ТМ, их оксидов и мышьяка в пробах почв северного Таджикистана и ПДК/ОДК металлов в почве

Место отбора	Sr, ppm	Pb, ppm	As, ppm	Zn, ppm	Cu, ppm	Ni, ppm
ПДК/ОДК ¹	н/у ²	32 ppm	2 ppm	100 ppm	55 ppm	85 ppm
Айни	178/297	28/49	154/250	199/319	44,8/45,7	38/53
Шахристан	142/184	17 /35	30/100	119/257	45/48	42/58
Деваштич	167/187	12/18	7/22	71/77	45 /46	38/44
Истаравшан	141/288	19/33	41/177	217/1135	45/46	40/56
Зафарabad	203/416	20/63	35,4/198	124/283	45/47	39/ 84
Спитамен	169/182	14/23	12/18	171/185	46/46,4	42/45
Дегмай	139/390	522/2826	87/392	2635/20964	45/ 57	38/50
Худжанд	152/198	34/246	15/41,5	125/393	44/46	109/1389
Адрасман	173/173	1500/1945	129/179	551/685	43,9/44	32/33
Истиклол	155/175	19/73	8/26	158/302	45/46,7	33/46
Ашт	175/199	25/130	8/26	256/1538	44,8/47	29/47
Место отбора	Co, ppm	Fe ₂ O ₃ , %	MnO, ppm	Cr, ppm	V, ppm	TiO ₂ ,%
ПДК	5 ppm	н/у	2374 ppm	6 ppm ³	150 ppm	0,8%
Айни	26/44	4/5	885/1514	107/ 112	81/208	0,69/0,98
Шахристан	12/36	4/5	391/1467	98/110	58/93	0,3/1,12
Деваштич	4/9	4,8/5,4	144,9/145,4	94/94	64/91	0,05/0,07
Истаравшан	14/33	3,9/4,8	458/1032	98/109	67/96	0,43/1
Зафарabad	10/28	4/5,3	340/ 1514	97/106	76/139	0,27/0,87
Спитамен	3/3	5,3/5,32	146/146,3	94/94	68/96	0,01/0,02
Дегмай	15/2	3/8	581/845	105/111	90/272	0,56/0,88
Худжанд	8,6/14	4/ 12,34	231/1139	776/6286	82/406	0,8/ 4,2
Адрасман	5/6	5/5	147,98/148	93,59/93,6	82/84	-
Истиклол	7/11	4/6	134/146	88/98	54/71	0,12/0,38
Ашт	9/14	5/7	146,2/148,2	93,7/94,3	65/99	0,06/0,11

Примечания: ¹ значения ПДК соответствуют стандартам России [26, 27]; ПДК для марганца (1500 ppm) и титана (0,048%) пересчитаны в соответствующие ПДК для оксидов; ² н/у – не установлено; жирным шрифтом выделены максимальные по области концентрации элементов, ³ ПДК подвижных форм.

Еще одним эталоном для сравнения является среднее содержание элемента в земной коре (кларк). Анализ отношения среднего содержания ТМ и мышьяка в почвах к его кларку показал, что содержание Zn в почвах в 20 раз выше кларка (50 мг/кг). Содержание в почве As – в 8,5 раз, содержание Cu – в 2,5 раз, Pb – в 13,5 раза выше кларка. Самые высокие концентрации цинка – средняя по району (3384,1 ppm) и максимальная по области (7274 ppm) зафиксированы в Дегмае.

Содержание элементов второго класса опасности (медь, никель, кобальт, хром) в почве во многих районах также превышает уровень ПДК/ОДК. В Худжанде обнаружено самое высокое значение средней (109,1 ppm) и максимальной (1389,2 ppm) концентрации никеля, что превышает уровень допустимых концентраций в 1,3 и 16 раз, соответственно. Там же

зафиксирована самая высокая средняя (775,8 ppm) и максимальная (6286,5 ppm) концентрация хрома, это выше уровня ПДК в 129 раз и 1000 раз, соответственно.

Содержание меди и кобальта в почвах слабо отличается от среднего значения по области, что, видимо, является особенностью почв области.

Межгодовой ход средней концентрации элементов/их оксидов в почве (рис. 4) показывает, что максимальное содержание стронция (223 ppm), никеля (42 ppm) и оксида марганца (805 ppm) зафиксированы в 2013 г. Наибольшее содержание мышьяка (141,2 ppm) отмечено в 2014 г. Высокое содержание хрома (109,5 ppm) – в 2016 г., свинца (242,4 ppm), цинка (764,3 ppm), кобальта (54,3 ppm), оксида железа (4,7%), ванадия (379 ppm), оксида титана (2,2%) – в 2017 г., наиболее высокие концентрации меди (46 ppm) – в 2019 г. Амплитудные значения концентраций некоторых элементов в несколько раз превышают минимальные.

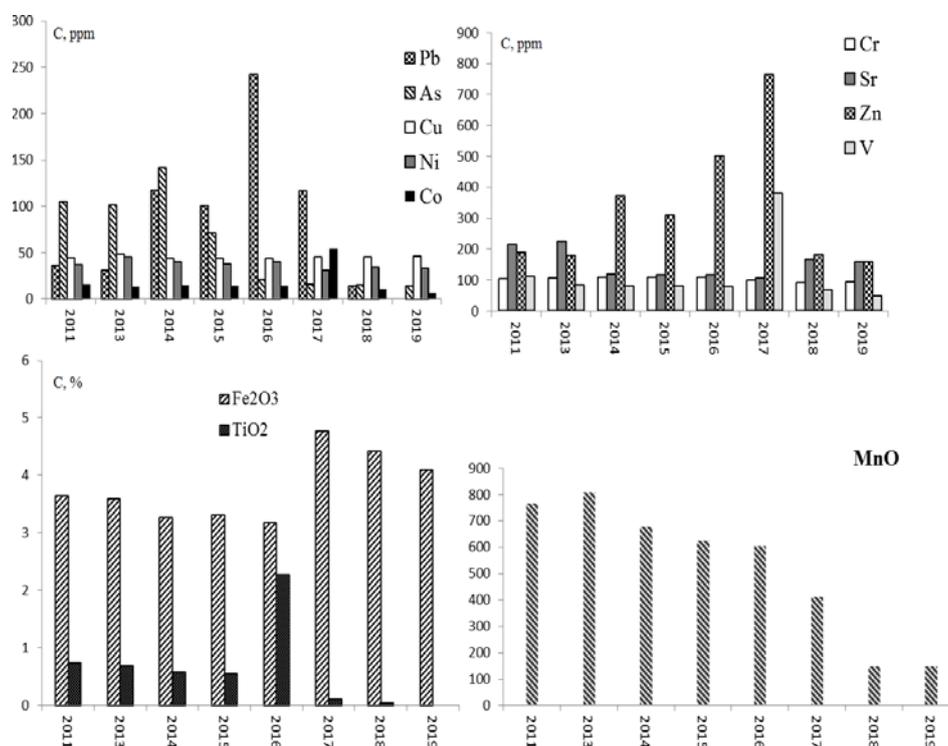


Рис. 4. Межгодовой ход среднего содержания элементов/их оксидов в почвах Северного Таджикистана за период 2011–2019 гг.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ТМ И МЫШЬЯКА В АЭРОЗОЛЕ И В ПОЧВЕ

Оказалось, что содержание некоторых исследованных веществ в пробах атмосферного аэрозоля и в пробах почв существенно отличается.

Как видно из рис. 1, в пробах атмосферного аэрозоля из Ашта зафиксированы самые высокие концентрации цинка (1814,6 ppm) – в 7 раз выше, чем в почве, свинца (85,7 ppm) – в 4 раза выше, чем в почве, никеля (78 ppm) – в 3 раза выше, чем в почве.

В Табошаре (ныне Истиклол) зарегистрировано максимальное содержание в пробах аэрозоля цинка (164,9 ppm) – в 3 раза выше, чем в почве, а содержание мышьяка (50,9 ppm) – в 6 раз выше.

В городе Худжанд из 16 отобранных проб аэрозоля содержание Sr (198,6 ppm) было в 1,3 раза больше, чем в пробах почв, содержание Zn (728,8 ppm) – в 6 раз больше, чем в почве. Также было обнаружено повышенное содержание V (67,4 ppm) – в 1,2 раза больше, чем в почве. В западной части Согдийской области (Зафарабадский район, село Фарманкураган) вблизи от границы с Узбекистаном обнаружено высокое содержание MnO (262,2 ppm) (см. рис. 1. точка 4) – в 1,3 раза выше, чем в пробах почв. Содержание хрома (96,1 ppm) в аэрозоле почти не отличалось от его содержания в почве. В аэрозоле обнаружено более высокое содержание, чем в почве следующих ТМ: Pb (51,7 ppm) – в 2,5 раза выше, Zn (963,7 ppm) – в 8 раз, Cu (74,9 ppm) – в 1,6 раза, Cr (98 ppm) – в 1,1 раза.

На карте юго-восточной части области, включая Шахристанский, Истаравшанский и Деваштичский районы, указаны максимальные значения концентрации элементов в аэрозольных частицах. В Истаравшане содержание стронция (194,3 ppm) в 1,4 раза, цинка (1645,1 ppm) в 7,6 раза выше, чем в почве. В Деваштиче в пробах аэрозоля содержание свинца (80,9 ppm) примерно в 7 раз, цинка (779,7 ppm) в 11 раз выше, чем в почве.

Концентрации тяжелых металлов в пробах аэрозоля выше, чем в пробах почв в юго-западной части области. Например, в Деваштиче содержание цинка в аэрозоле превышает его содержание в почве более чем в 11 раз, в Истаравшане содержание цинка было в 7,6 раза, а в Зафарабаде в 8 раз выше, чем в почве.

На рис. 5 в логарифмических координатах изображена линия, аппроксимирующая соотношение содержания (оксидов) тяжелых металлов и мышьяка в почве и аэрозоле, она соответствует коэффициенту корреляции $r = 0.94$. Веществ, расположенных выше линии (Zn, MnO, Sr и Cr), больше в частицах атмосферного аэрозоля, а элементов, расположенных ниже прямой (Pb, Ni, As), больше в почве. Расположение точки, соответствующей исследованному веществу, на прямой означает его одинаковое содержание в атмосферном аэрозоле и в почве.

ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Для выявления возможных источников происхождения (оксидов) тяжелых металлов и мышьяка в атмосфере по элементному составу необходимо проанализировать наличие как внутренних, так и внешних антропогенных загрязнений в местах отбора проб. На территории Согдийской области Таджикистана значительное влияние на состояние атмосферного воздуха могут оказывать цементные заводы, ТЭЦ и хвостохранилища обогатительных производств. Кроме того, на территории Узбекистана поблизости от границы расположен целый ряд крупных промышленных предприятий, выбросы которых широко распространяются по территории северного Таджикистана.

Юго-западная часть Согдийской области, включающая Истаравшанский, Деваштичский и Зафарабадский районы, граничит с Ташкентской, Джизакской и Сырдарьинской областями Республики Узбекистан.

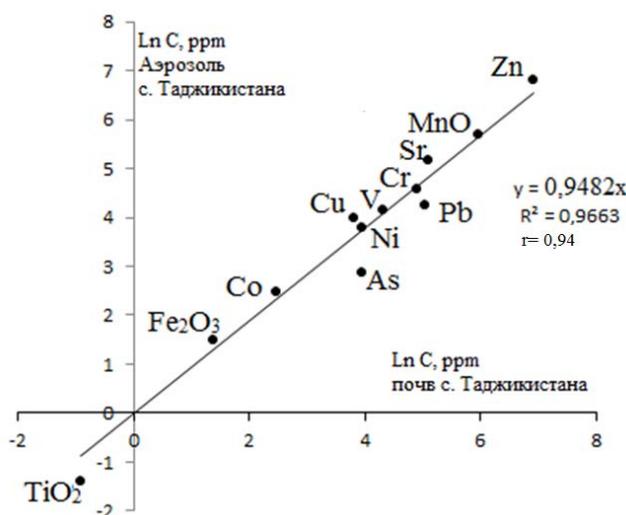


Рис. 5. Тренд корреляции содержания элементов/их оксидов в почве и в атмосферном аэрозоле Северного Таджикистана.

В этих областях Узбекистана действует большое количество химических предприятий, основным источником цинка является дым. Кроме того, на территории Сырдарьинской области находится крупнейшая в Азии ТЭС. В Джизакской области действует большое количество шахт, в которых добываются полиметаллические руды, содержащие свинец, цинк, железо и другие металлы.

Источником цинка часто является черная металлургия из-за выбросов из печей в виде пыли и дыма. При эксплуатации автотранспорта в атмосферу и почву также выделяется ряд ТМ: кобальт, медь, железо, марганец, свинец, никель, титан, цинк, никель и хром [28].

На территории приграничного Зааминского района Узбекистана, в основном, открытым способом ведется разработка месторождений золота, бурого угля, меди, мрамора, гранита и сланцев. Функционируют предприятия по переработке мрамора, по производству кирпича, бетонных плит и другие дающие газовые и аэрозольные выбросы в атмосферу.

Зафарабадский район расположен между Туркестанским хребтом и Ферганской долиной. На севере, западе и юго-западе он граничит с Сырдарьинской и Джизакской областями Узбекистана, на юге с Истаравшанским районом, на востоке с Спитаменским районом Согдийской области. В городе Бекабаде Ташкентской области (непосредственно возле города проходит граница с Зафарабадским районом) расположен Узбекский металлургический комбинат, который может быть источником загрязнения цинком атмосферы этого района.

Можно предположить еще одну причину загрязнения проб аэрозоля тяжелыми металлами. На севере, северо-западе, востоке и юго-востоке Аштский район граничит с Ташкентской, Наманганской и Ферганской областями Узбекистана, в которых действуют крупные промышленные предприятия. Кроме того, в этих областях расположены ТЭЦ, которые являются крупными стационарными источниками загрязнения.

Можно предположить, что высокое содержание цинка, свинца, никеля и марганца в аэрозоле Аштского района связано с их природным содержанием в породах Кураминского хребта. Возможно также, что причиной этой аномалии является влияние транспорта или воздушный перенос загрязнений из соседних государств.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблицах 3 и 4 приведены характеристики проб почв и проб атмосферного аэрозоля. Параметры, полученные при статистической обработке результатов измерений пробы почв и аэрозоля, производилась с помощью пакета стандартных программ Excel. Для выборки величин x вычислялись средние ($\langle C \rangle$), минимальные (C_{\min}), максимальные (C_{\max}) значения содержания элементов в пробах пылевого аэрозоля и почв. Соответственно, среднеквадратичное отклонение (σ), коэффициент вариации ($V = \sigma / \langle C \rangle$), погрешность ($S_n = \sigma / n$), интегральный индекс загрязнения ($IPi = 0.98x / x_{\min}$), геохимический индекс загрязнения ($I = 2x / 3x_{\min}$), N – количество проб, отношение концентраций ($D = C_{\max} / C_{\min}$), $t_c = \sigma / \sqrt{n}$ (критерий Стьюдента), $\delta = (t_c \cdot \sigma / \sqrt{n})$ – доверительный интервал.

Таблица 3. Статистические данные проб аэрозоля (104 пробы за 2013–2019 гг.)

Параметр	Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe ₂ O ₃	MnO	Cr	V	TiO ₂
$\langle C \rangle$	174,4	61,3	18,2	1056	56	41	10,1	4,5	305	96,3	63,3	0,5
C_{\max}	523	740	236	9719	299	109	58,3	11	1008	138	194	0,8
C_{\min}	88	4,3	1,1	65,2	16,5	17,7	2,5	2,0	89,1	63,6	16,9	0,1
σ	72	130	27	1724	10	15	10	1,3	274	10	27	0,2
V	0,4	2	1,5	1,6	0,2	0,36	1	0,3	0,1	0,1	0,4	0,4
S_n	0,7	1,3	0,34	19	0,1	0,15	0,1	0,01	2,65	0,09	0,26	0,005
I	0,39	3,43	3,43	2,83	1,16	0,62	1,41	0,55	1,16	0,01	1,32	1,77
D	5,91	201,4	210	64,8	18,1	6,15	23,10	5,46	10,6	2,16	11,5	8,05
t_c	2,87	2,87	3	2,91	2,88	2,9	2,85	2,87	2,88	2,87	2,88	3,37
δ	0,36	0,22	0,15	0,96	0,21	0,18	0,09	0,06	0,48	0,27	0,22	0,06

Таблица 4. Статистические данные проб почв (144 пробы за 2013–2019 гг.)

Параметр	Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe ₂ O ₃ %	MnO	Cr	V	TiO ₂ %
$\langle C \rangle$	164,5	134,8	51	994,8	37	109	11,7	4	394	98	90	0,5
C_{\max}	416,0	2826,4	392,11	2096	85,1	84,0	44,0	12,3	1514	112	208	4,2
C_{\min}	45,0	3,03	0,26	27,8	33,0	10,2	0,63	2,08	88	63,4	3	0,05
σ	65	432	72,4	2677	2	9	9	1,3	339	9	33	0,08
V	0,4	3,2	0,6	19	0,01	0,25	1	0,3	1	0,09	0,47	1
S_n	0,4	2,96	0,55	22,2	0,0	0,1	0,06	0,01	2	0,05	0,18	0,01
IPi	3,6	43,6	189	35	1,3	3,5	18	2	4	1,5	23	9
I	1,3	4,9	7	5	-0,1	1,3	3,64	0,37	2	0,04	3,97	3,15
D	9,2	933	1495	753	2,6	8,2	69,9	5,9	17	1,8	69	81
Кларк	300	10	5	50	20	40	10	3,8	850	200	150	4,2
t_c	2,7	2,70	2,75	2,7	2,7	2,7	2,7	2,70	3	2,70	2,72	3,03
δ	14,5	96,4	17,5	721,8	0,8	1,7	1,9	0,3	67	1,8	6	0,2
ПДК/ОДК	-	32	2	100	55	85	5	-	2373	6	150	0,8

В табл. 5 представлены рассчитанные коэффициенты корреляции между концентрациями исследованных веществ в пробах атмосферного аэрозоля. Обнаружена значимая корреляция между концентрациями Sr и Cu (0.8), между V и TiO₂ (0.7), между As и Fe₂O₃ (0.5). Между концентрациями других тяжелых металлов значимая корреляция (не меньше 0.5) не обнаружена.

В табл. 6 представлены коэффициенты корреляции между концентрациями исследованных веществ в пробах почв. Обнаружена значимая корреляция между Pb и As (0.7), между As и Co (0.6), между As и MnO (0.5), между Co и MnO (0.72), между MnO и TiO₂. (0.6), между V и TiO₂ (0.6).

Таблица 5. Коэффициент корреляции между концентрациями исследованных веществ в пробах атмосферного аэрозоля

TM	Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe ₂ O ₃	Mn	Cr	V	TiO ₂
Sr		- 0,06	0,08	0,1	0,8	-0,1	-0,1	0,32	0,04	0,11	0,49	0,27
Pb			0,1	0,12	0,09	-0,003	0,47	0,06	0,22	0,37	0,31	0,46
As				0,08	0,14	-0,03	0,1	0,5	0,12	0,14	0,02	0,06
Zn					0,25	-0,02	0,2	-0,01	0,13	0,25	0,22	0,31
Cu						-0,02	0,09	0,32	0,2	0,4	0,6	0,52
Ni							0,01	-0,17	-0,04	0,0001	0,38	- 0,06
Co								-0,08	0,26	0,31	0,3	0,37
Fe ₂ O ₃									-0,03	0,08	0,08	0,07
MnO										0,2	0,31	0,5
Cr											0,5	0,45
V												0,7
TiO ₂												

Таблица 6. Коэффициент корреляции между концентрациями исследованных веществ в пробах почв

TM	Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe ₂ O ₃	MnO	Cr	V	TiO ₂
Sr		-0,2	0,2	-0	0	-0,1	0,2	-0,1	0	-0,1	0,1	-0,1
Pb			0,7	0	-0,1	0	0,1	-0,1	0,2	0,0	0,1	0,1
As				-0	-0,3	0	0,6	-0,2	0,5	0,0	0,2	0,3
Zn					-0,3	0	0,1	-0,2	0,2	0,0	0,1	0,1
Cu						-0,4	-0,1	0	-0,2	0,0	0,3	-0,5
Ni							0	0	0,2	0,0	0	0,7
Co								-0,3	0,7	0,0	0,2	0,4
Fe ₂ O ₃									-0,3	0,0	-0,2	-0,2
MnO										-0,1	0,2	0,6
Cr											-0,1	0
V												0,6
TiO ₂												

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования выявили высокий уровень концентрации некоторых тяжелых металлов, их оксидов и мышьяка в пробах пылевого аэрозоля и почв в Согдийской области Таджикистана. Создана первичная карта элементного состава почв и аэрозолей северного Таджикистана. Обнаружены территории с опасно высоким уровнем загрязнения тяжелыми металлами/мышьяком. Показано, что некоторые тяжелые металлы (стронций, цинк, хром) переносятся преимущественно воздушным путем, через атмосферу.

По результатам исследования можно заключить, что основными источниками тяжелых металлов и мышьяка в атмосферном воздухе и почве является автомобильный транспорт, предприятия металлургической промышленности (в частности, по переработке урановых отходов) и открытые хвостохранилища в данном регионе. Периодически возникающие сильные ветры способствуют распространению частиц тяжелых металлов из их источников по всей Ферганской долине. За счет ветрового переноса аэрозоля от этих объектов тяжелые металлы распространяются по всему региону, а площадь загрязненных территорий постепенно увеличивается. Результаты исследования указывают на высокий уровень трансграничного переноса загрязнений и на необходимость дальнейших комплексных исследований этой проблемы.

Список литературы:

1. *Duffus J.H.* “Heavy metals” a meaningless term? (IUPAC Technical Report) // *Pure and Applied Chemistry*. 2002. V. 74. P. 793. DOI: <http://dx.doi.org/10.1351/pac200274050793>.
2. The European Atmospheric Emissions Inventory of Heavy Metals and Persistent Organic Pollutants for 1990. UBA-TNO Report. Bonn, 1991. P. 158.
3. *Бондарев Л.Г.* Микроэлементы – благо и зло. М.: Знание, 1984. С. 144.
4. Health Aspects of Air Pollution – answers to follow-up questions from CAFÉ. Report on a WHO working group meeting Bonn, Germany, 15-16 January, 2004.
5. *Хотимченко С.А., Гмошинский И.В., Тутельян В.А.* // *Гигиена и санитария*. 2009. № 5. С. 7.
6. *Сенотрусова С.В., Христофорова Н.К.* Загрязнение атмосферы и состояние здоровья населения промышленных городов. СПб.: Астерион, 2004. 246 с.
7. *Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А.* Атмосферный аэрозоль Центральной Азии. Душанбе: Дониш, 2017. 416 с.
8. *Муртазаев Х.* Радиационно-экологические особенности природных сред Северного Таджикистана. Худжанд: Меъроч, 2014. 164 с.
9. *Zheng L., Zhou Z., Rao M. et al.* // *Environ. Geochem. Health*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00428-x>.
10. *Рахматов М.Н., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Расулзода Х.Х.* // *Ученые записки ХГУ*. 2018. № 3(46). С. 56.
11. *Рапуга В.Ф., Смоляков Б.С., Куценогий К.П., Смирнова А.И., Ярославцева Т.В.* // *Сибирский экологич. журнал*. 2000. № 1. С. 97.
12. *Виноградова А.А., Котова Е.И., Топчая В.Ю.* // *География и природные ресурсы*. 2017. № 1. С. 108. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(108-116).
13. *Снежко С.И., Шевченко О.Г.* // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2011. № 18. С. 57.

14. *Ji Y., Feng Y., Wu J., Zhu T., Bai Z., Duan C.* // Journal of Environmental Sciences. 2008. V. 20. No. 5. P. 571. DOI: 10.1016/S1001-0742(08)62096-3.
15. *Wood J.M.* // Science. 1974. V. 183 P. 1049. DOI: 10.1126/science.183.4129.1049.
16. *Rahman Z., Singh V.P.* // Environ. Monit. Assess. 2019. V. 191 (7). P. 419. DOI: 10.1007/s10661-019-7528-7.
17. *Водяницкий Ю.Н.* // Почвоведение. 2012. № 3. С. 368.
18. *Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Расулзода Х.Х., Рахматов М.Н.* // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. 2018. № 1. С. 77.
19. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю атмосферы. Введение 1991-07-01. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 615 с.
20. ГОСТ 17.4.2.01-81. Охрана природы (ССОП). Почвы. Номенклатура показателей санитарного состояния (с Изменением N 1). М.: Стандартиформ, 2008.
21. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартиформ, 2008.
22. *Абдуллаев С.Ф., Назаров Б.И., Маслов В.А. и др.* // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 3. С. 187.
23. *Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И. и др.* // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 3. С. 207.
24. *Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И. и др.* // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 2. С. 143.
25. *Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И. и др.* // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 3. С. 246.
26. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006.
27. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.
28. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных элементов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.

References:

1. *Duffus J.H.* “Heavy metals” a meaningless term? (IUPAC Technical Report) // Pure and Applied Chemistry. 2002. V. 74. P. 793. DOI: <http://dx.doi.org/10.1351/pac200274050793>.
2. The European Atmospheric Emissions Inventory of Heavy Metals and Persistent Organic Pollutants for 1990. UBA-TNO Report. Bonn, 1991. P. 158.
3. *Bondarev L.G.* Microelements – benefits and harms. М.: Znanie, 1984. P.144 [in Russian].
4. Health Aspects of Air Pollution – answers to follow- up questions from CAFE // Report on a WHO working group meeting Bonn, Germany, 15-16 January, 2004.
5. *Khotimchenko S.A., Gmoshinsky I.V., Tutelyan V.A.* // Gигиена i sanitariya [Hygiene and Sanitation]. 2009. No. 5. P. 7 [in Russian].
6. *Senotrusova S.V., Khristoforova N.K.* Atmospheric pollution and state of health of population of industrial cities. SPb.: Asterion, 2004. 246 p. [in Russian].
7. *Nazarov B.I., Abdullaev S.F., Maslov V.A.* Atmospheric aerosol of Central Asia. Dushanbe: Donish, 2017. 416 p. [in Russian].
8. *Murtazaev Kh.* Radiation-ecological features of natural environments of Northern Tajikistan. Khujand: Meroch, 2014. 164 p. [in Russian].
9. *Zheng L., Zhou Z., Rao M. et al.* // Environ. Geochem. Health. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00428-x>.

10. *Rakhmatov M.N., Abdullaev S.F., Maslov V.A., Rasulzoda Kh.Kh.* // Uchyonye zapiski KhGU [Bulletin of KhSU]. 2018. No. 3 (46). P. 56 [in Russian].
11. *Rapuga V.F., Smolyakov B.S., Kutsenogyi K.P., Smirnova A.I., Yaroslavtseva T.V.* // Sibirskii ekologicheskii zhurnal [Siberian ecological journal]. 2000. No. 1. P. 97 [in Russian].
12. *Vinogradov A.A., Kotova E.I., Topchaya V.Yu.* // Geografiya i prirodnye recursy [Geography and natural resources]. 2017. No. 1. P. 108. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(108-116) [in Russian].
13. *Snezhko S.I., Shevchenko O.G.* // Uchyonye zapiski Ross. gosud. gidromet. univ. [Bulletin of Russian State Hydrometeorological University]. 2011. No. 18. P. 57 [in Russian].
14. *Ji Y., Feng Y., Wu J., Zhu T., Bai Z., Duan C.* // Journal of Environmental Sciences. 2008. V. 20. No. 5. P. 571. DOI: 10.1016/S1001-0742(08)62096-3.
15. *Wood J.M.* // Science. 1974. V. 183 P. 1049. DOI: 10.1126/science.183.4129.1049.
16. *Rahman Z., Singh V.P.* // Environ. Monit. Assess. 2019. V. 191 (7). P. 419. DOI: 10.1007/s10661-019-7528-7.
17. *Vodyanitskii Yu.N.* // Eurasian Soil Science. 2012. V. 45. No. 3. P. 321. DOI: 10.1134/S1064229312030131.
18. *Abdullaev S.F., Maslov V.A., Rasulzoda Kh.Kh., Rakhmatov M.N.* // Vestnik Tajikskogo natsyonalnogo universiteta [Bulletin of Tajik National University]. 2018. No. 1. P. 77 [in Russian].
19. RD [Regulatory Document] 52.04.186-89. Guide for controlling atmosphere. Introduction 1991-07-01. L.: Gidrometeoizdat, 1989. 615 p. [in Russian].
20. GOST [State Standard] 17.4.2.01-81 Nature protection. Soils. Nomenclature of sanitary conditions indices (as amended by N 1). M.: Standartinform, 2008 [in Russian].
21. GOST [State Standard] 17.4.4.02-84 Nature protection. Soils. Methods for sampling and preparation of soils for chemical, bacteriological, helminthological analysis. M.: Standartinform, 2008 [in Russian].
22. *Abdullaev S.F., Nazarov B.I., Maslov V.A. et al.* // Atmospheric and Oceanic Optics. 2013. V. 26. No. 5. P. 396. DOI: 10.1134/S1024856013050023.
23. *Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I. et al.* // Optika i atmosfera okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2014. V. 27 No. 3. P. 207 [in Russian].
24. *Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I. et al.* // Optika i atmosfera okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2015. V. 28. No. 2. P. 143 [in Russian].
25. *Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I. et al.* // Optics of the atmosphere and the ocean. 2015. V. 28. No. 4. P. 347. DOI: 10.1134/S1024856015040028.
26. Hygienic standards GN 2.1.7.2041-06. Maximum permissible concentrations (MPC) for chemicals in soil. M.: Federal Hygiene and Epidemiology Centre, 2006 [in Russian].
27. Hygienic standards GN 2.1.7.2511-09. Approximate permissible concentrations of chemicals in soil. M.: Federal Hygiene and Epidemiology Centre, 2009 [in Russian].
28. *Vinogradov A.P.* Geochemistry of rare and trace elements. M.: Izd. AN SSSR, 1957. 238 p. [in Russian].