

УДК 551.521.3.583

Содержание тяжелых металлов в пылевом аэрозоле и почвах Северного Таджикистана

М.Н. Рахматов¹, С.Ф. Абдуллаев^{2*}

¹ Худжандский государственный университет им. акад. Бободжона Гафурова
735700, г. Худжанд, проезд Мавлонбекова, 1, Республика Таджикистан

² Физико-технический институт им. С.У. Умарова НАНТ
734063, г. Душанбе, ул. Айни, 299/1, Республика Таджикистан

Поступила в редакцию 25.11.2020 г.

Определены концентрации тяжелых металлов в форме свободных элементов или оксидов, а также мышьяка в пробах атмосферного аэрозоля и почв Северного Таджикистана за период с 2011 по 2019 г. Рассматриваются локальные источники тяжелых металлов, в основном антропогенные (автомобильный транспорт, предприятия металлургической промышленности, открытые хвостохранилища и др.). С помощью модели HYSPLIT выявлены возможные источники воздушного переноса загрязняющих веществ на территорию Согдийской обл.

Ключевые слова: аэрозоль, элементный состав, почва, тяжелые металлы, мышьяк, источники загрязнения; aerosol, elemental composition, soils, heavy metals, arsenic, pollution sources.

Введение

В настоящее время в мире особое внимание уделяется исследованию 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]. Участие ТМ во всех видах миграции и в биологическом круговороте неизбежно приводит к загрязнению важнейших жизнеобеспечивающих природных сред: воды и воздуха [3–6]. В этой связи появилось много работ, в которых изучаются изменения элементного состава атмосферных аэрозолей и почв, вызванные участием ТМ в ряде важнейших процессов, протекающих в атмосфере, в Средней Азии [7–9], России [10–17] и других регионах планеты [18–20].

Цель настоящей работы — исследование содержания ТМ в пробах атмосферного аэрозоля (АА) и почв Северного Таджикистана. Полученные данные предназначены для изучения миграции аэрозольных частиц, включающих ТМ, в атмосфере и почве, а также для выявления источников аэрозолей и оценки уровня загрязнения окружающей среды.

Поскольку термин «тяжелые металлы» не является однозначно общепринятым и иногда подвергается критике [1, 21], уточним, что объектами исследования в настоящей работе выступают 11 тяжелых металлов, три из которых — в форме оксидов (Sr, Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, V, Fe₂O₃, MnO, TiO₂),

а также полуметалл мышьяк (As), как высокотоксичный элемент

Особенности природных условий Северного Таджикистана

Северный Таджикистан (Согдийская обл.) расположен между 39°04' и 41°08' с.ш. и 69°25' и 70°34' в.д. и занимает территорию в 25400 км². Доля сельскохозяйственных угодий — 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 которой загрязняющие вещества переносятся ветром как по трубе. Основной тип почв — сероземы. Климат — континентальный сухой и зависит от высоты над уровнем моря. Лето без осадков, зима теплая.

В горах добываются уголь, нефть, медь, золото, свинец, серебро, олово, висмут, железо, сурьма, ртуть, фосфориты и т.п. Разработка месторождений урана, дававших сырье в первые десятилетия атомной программы СССР, уже прекращена, но осталось незакрытое Дигмайское хвостохранилище, откуда пыль разносится по окрестностям. Замкнутые горные долины не позволяют загрязнителям распространяться далеко, но в Ферганской долине препятствий для ветра нет.

Объекты и методика исследований

Пробы атмосферного аэрозоля и почв были отобраны силами лаборатории физики атмосферы ФТИ им. С.У. Умарова НАНТ на территории Со-

* Мухамади Нуридинович Рахматов (muhamadi.rahmatov@yandex.com); Сабур Фузайлович Абдуллаев (sabur.f.abdullaev@gmail.com).

гдийской обл. в 2011 и 2013–2019 гг. Всего проанализировано 248 проб (104 пробы аэрозоля и 144 пробы почв), собранных в административных центрах или других селениях перечисленных ниже районов Северного Таджикистана (в 2011 пробы отбирались 1 раз, в 2013–2019 гг. — ежемесячно по всем нижеуказанным районам).

1. Ашт (40°39' с.ш., 70°22' в.д.) — самый северный район в Ферганской долине. На его территории находится Камышкурганское месторождение каменной соли. Запасы, подсчитанные по юго-западному участку, составляют более 558 млн т. На базе месторождения работает солязавод. В качестве бассейнов используются естественные или небольшие искусственные котловины; общая площадь бассейнов 20 га.

2. Истиклол (40°34' с.ш., 69°38' в.д.) расположен рядом с богатым месторождением полиметаллических руд и хвостохранилищем, которые находятся в Кураминском хребте г. Табошара на высоте 1300–1500 м н.у.м. Истиклол вытянут вдоль горы Курама, входящей в систему Тянь-Шань и находящейся к северу от Табошара, в 34 км от г. Худжанда.

3. Худжанд (40°17' с.ш., 69°37' в.д.) расположен на территории Ферганской долины, в 200 км к северо-востоку от Душанбе и в 35 км от узбекского г. Бекабада, между отрогами Туркестанского хребта на юге и горами Моголтау на севере, на берегу р. Сырдарьи, ниже Кайраккумского водохранилища. В Северном Таджикистане находится десять крупнейших радиоактивных хвостохранилищ [8], три из них — в пределах Худжанда: Гафуровское хвостохранилище «Опытного завода» (в 10 км от областного центра Худжанда, не имеет санитарно-защитной зоны); хвостохранилище г. Чкаловска площадью 18 га (в промышленной зоне, в 200 м от гидрометаллургического завода и в 5 км от Худжанда); Худжандское хвостохранилище (в горах Моголтау, в 1,5 км от Худжанда на высоте 500 м н.у.м.; радиоактивные отвалы в ложине между горным хребтом Моголтау занимают 6 га).

Все радиоактивные хвостохранилища представляют угрозу из-за близости к населенным пунктам, особенно в период сильных селевых и градовых дождей, землетрясений, горных обвалов, разрушений покрытий и дамб, шквальных ветров. Во всех радиоактивных хвостохранилищах основными загрязнителями биосферы являются радионуклиды и ТМ.

4. Спитамен (40°08' с.ш., 69°22' в.д.) расположен в 28 км к юго-западу от Худжанда. На территории Спитаменского района функционируют предприятия по переработке мрамора, производству кирпичей, бетонных плит и т.д. Разработка месторождений в основном ведется открытым способом.

5. Зафарабад (40°09' с.ш., 68°48' в.д.) находится в 106 км к западу от Худжанда, между Туркестанским хребтом и Ферганской долиной. На севере, западе и юго-западе граничит с Сырдарьинской и Джизакской обл. Узбекистана. В Зафарабадском районе к техногенным источникам выбросов ТМ

в атмосферу относятся сжигание мусора предприятиями коммунального хозяйства и автотранспорт.

6. Истаравшан (39°54' с.ш., 69°03' в.д.) расположен в 90 км к юго-западу от Худжанда.

7. Деваштич (39°57' с.ш., 69°08' в.д.) расположен в 64 км к юго-западу от Худжанда.

8. Шахристан (39°46' с.ш., 68°49' в.д.) находится в 102 км к юго-западу от Худжанда, на западе граничит с Республикой Узбекистан.

9. Айнинский район (39°23' с.ш., 68°32' в.д.) располагается в долине р. Зеравшан. В районе имеются месторождения сурьмы, ртути, угля, минеральных красок. Анзобский горно-обогатительный комбинат (ГОК) и угольная шахта, являющиеся источниками загрязнения атмосферного воздуха, расположены на северном склоне Гиссарского хребта.

10. Поселок Адрасман (40°16' с.ш., 69°49' в.д.) находится на юго-западных склонах Кураминского хребта. Адрасманский ГОК добывает и перерабатывает свинцовую руду с получением свинцово-серебряного концентрата.

11. Отдельно рассматривались пробы почв на территории Дигмайского радиоактивного хвостохранилища (ДРХ) (40°12' с.ш., 69°30' в.д.). Оно расположено в Гафуровском (ранее Ходжентском) районе, в 1,5 км от ближайшего населенного пункта и в 10 км от Худжанда, на высоте 485 м н.у.м. Его общая площадь — 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. В последние десятилетия экологическое состояние ДРХ и его влияние на окружающую среду привлекают внимание экологов и геохимиков. Информация о ДРХ приведена во многих работах и монографиях [8, 22, 23]. В печати представлены результаты исследования экскаляции радона, физико-химические характеристики ураносодержащих отходов, данные об общем радиационном фоне и пробах рудных пород, а также анализ проб воды за пределами ДРХ [24].

Более подробное описание мест отбора проб до 2018 г., включая координаты и время сбора, приведено в [7, 25]. Отбор и подготовку проб для анализа проводили в соответствии с нормативными документами [26–28]. Пробы аэрозоля отбирались двумя способами: путем естественного осаждения пыли на поверхность полиэтиленовой пленки размером 10 × 10 м² либо путем естественного осаждения частиц аэрозоля в пластмассовые ванночки размером 85 × 45 см² на высоте 3 м на специальной вышке. Пробы почвы брались из ее верхнего слоя с глубины 1–2 см. В лабораторных условиях пробы очищались от инородного материала, измельчались в порошок и просеивались через сито с сеткой 1 мм, после чего помещались 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) [29–32]. Статистический анализ результатов

измерений выполнялся в 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 обсуждение

Результаты измерений приведены в табл. 1. Для каждого вещества выделена самая высокая по области средняя концентрация в пробах АА. 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 аэрозоле. Распределение этих элементов по районам оказалось весьма неоднородным (различия вплоть до десятков раз), что можно объяснить местными геологическими особенностями, дальним трансграничным переносом и антропогенными факторами. Особенно это касается северных приграничных районов (Аштский, Зафарабадский), для которых преобладающее направление ветров из западной части Ферганской долины создает постоянную угрозу воздушного переноса загрязнений.

На территории Согдийской обл. с 2011 по 2019 г. были отобраны 144 пробы почв. Данные по максимальным и средним концентрациям (по районам) всех исследованных элементов и соединений приведены в табл. 2.

Средняя по району концентрация исследованных веществ, видимо, более объективно характеризует уровень загрязнения территории. Особенно важны данные о содержании свинца, мышьяка и цинка. Содержание мышьяка превышает ПДК во всех районах Согдийской обл. Самая высокая средняя концентрация отмечена в Айни (250 ppm), максимальная — в ДРХ (392 ppm). По-видимому,

повышенная концентрация в пробах почв Айнинского района связана с техногенными факторами. В Центральном Таджикистане, вблизи Анзобского ГОКа, находятся разведанные золоторудные месторождения, например Чоре и Восточная Дуоба; их минерализация представлена первичными малосульфидными золотомышьяковистыми рудами. Основные минералы — золотосодержащие арсенопирит и пирит, попутные — серебро и сера, вредные — мышьяк, сурьма и углистое вещество. Разложение соединений мышьяка из этих месторождений и обуславливает высокое содержание мышьяка в этом районе.

Превышение ПДК свинца по средним значениям наблюдалось в ДРХ (521,5 ppm) и Адрасмане (1500 ppm), самый высокий уровень загрязнения зарегистрирован в почвах ДРХ (2826 ppm). В табл. 2 показано, что наибольшая средняя по району концентрация свинца превышает его ПДК/ОДК (ориентировочно допустимая концентрация) в почве в 47, мышьяка — в 77, цинка — в 34, кобальта — в 5, хрома — в 129 раз.

Дигмайское радиоактивное хвостохранилище расположено на Дигмайской возвышенности с седловидным и чашеобразным углублением, в 9 км от р. Сыр-Дарьи; эксплуатировалось с 1963 по 1993 г. [8]. При скорости ветра 15–20 м/с с поверхности ДРХ выносятся до 6000 м³ радиоактивной пыли в год [8]. Естественно, что при этом ТМ в виде примесей попадают на почву. Ореол загрязнения почвенного слоя радиоактивными и тяжелыми металлами в ДРХ составляет 120 га. Таким образом, можно утверждать, что высокое содержание Pb, As, Zn, Co и Cr на территории ДРХ имеет техногенный характер.

Еще одним эталоном для сравнения является среднее содержание элемента в земной коре (кларк) [33]. Анализ отношений среднего содержания ТМ и мышьяка в почвах к их кларкам показал, что содержание Zn в почвах в 20 раз выше кларка (50 мг/кг), As — в 8,5 раз, Cu — в 2,5 раза, Pb — в 13,5 раза. Самые высокие концентрации цинка — средняя по району 3384,1 и максимальная по области 7274 ppm — зафиксированы в ДРХ.

Таблица 1

Среднее по районам содержание ТМ и их оксидов, а также мышьяка в пробах аэрозоля

ТМ	Район							
	Юг			Запад		Центр	Север	
	Шахристан	Деваштич	Истаравшан	Зафарабад	Спитамен	Худжанд	Истиклол	Ашт
Sr, ppm	164,7	149,1	194,3	187,4	152,9	198,6	164,9	142
Pb, ppm	13,4	80,9	32,9	51,7	22	73,6	28,4	85,7
As, ppm	2	16,1	15,9	16,5	7,9	17,5	50,9	16,3
Zn, ppm	82,3	1074	1645,1	963,7	142,9	728,8	507,8	1814,6
Cu, ppm	44,8	42,2	63,9	74,9	43,4	56,9	45,2	42,9
Ni, ppm	36,4	38,2	44,4	47,7	32	44,6	29,4	78,4
Co, ppm	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, ppm	133,6	295,8	310	348,6	226,2	295	145,3	983,2
Cr, ppm	87,8	99,6	96,2	98	96,1	92,5	93,7	92,4
V, ppm	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. Полужирным выделены максимальные по области значения для каждого вещества.

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 проб	Sr, ppm	Pb, ppm	As, ppm	Zn, ppm	Cu, ppm	Ni, ppm	Co, ppm	Fe ₂ O ₃ , %	MnO, ppm	Cr, ppm	V, ppm	TiO ₂ , %
Айни	178/297	28/49	154 /250	199/319	44,8/45,7	38/53	26/44	4/5	885 /1514	107/ 112	81/208	0,69 /0,98
Шахристан	142/184	17 /35	30/100	119/257	45/48	42/58	12/36	4/5	391/1467	98/110	58/93	0,3/1,12
Деваштич	167/187	12/18	7/22	71/77	45 /46	38/44	4/9	4,8/5,4	144,9/145,4	94/94	64/91	0,05/0,07
Истаравшан	141/288	19/33	41/177	217/1135	45/46	40/56	14/33	3,9/4,8	458/1032	98/109	67/96	0,43/1
Зафарабад	203/416	20/63	35,4/198	124/283	45/47	39/ 84	10/28	4/5,3	340/ 1514	97/106	76/139	0,27/0,87
Спитамен	169/182	14/23	12/18	171/185	46 /46,4	42/45	3/3	5,3 /5,32	146/146,3	94/94	68/96	0,01/0,02
ДРХ	139/390	522/ 2826	87/ 392	2635/20964	45/ 57	38/50	15/2	3/8	581/845	105/111	90/272	0,56/0,88
Худжанд	152/198	34/246	15/41,5	125/393	44/46	109 /1389	8,6/14	4/ 12,34	231/1139	776/6286	82/406	0,8/ 4,2
Адрасман	173/173	1500 /1945	129/179	551/685	43,9/44	32/33	5/6	5/5	147,98/148	93,59/93,6	82/84	—
Истиклол	155/175	19/73	8/26	158/302	45/46,7	33/46	7/11	4/6	134/146	88/98	54/71	0,12/0,38
Ашт	175/199	25/130	8/26	256/1538	44,8/47	29/47	9/14	5/7	146,2/148,2	93,7/94,3	65/99	0,06/0,11
ПДК ¹	н/у	32	2	100	55	85	5	н/у	2374	6 ³	150	0,8
ОДК ²	—	130	—	220	132	80	—	—	—	—	—	—

Примечание. ¹ — значения ПДК и ОДК по стандартам России ГН 2.1.7.2041-06 [26], ² — ГН 2.1.7.2511-09 [27], ПДК для марганца (1500 ppm) и титана (0,048%) пересчитаны в соответствующие ПДК для оксидов; н/у — не установлено; полужирным выделены максимальные по области концентрации элементов, ³ — ПДК подвижных форм.

Содержание меди, никеля, кобальта и хрома в почве во многих районах также превышает ПДК/ОДК [34–36]. В Худжанде обнаружены самые высокие средняя (109,1 ppm) и максимальная (1389,2 ppm) концентрации никеля, что превышает ПДК в 1,3 и 16 раз соответственно. Там же зафиксированы самая высокая средняя (775,8 ppm) и максимальная (6286,5 ppm) концентрации хрома, это выше уровня ПДК в 129 и 1000 раз. На наш взгляд, это связано с местными геологическими особенностями и наличием открытых хвостохранилищ в регионе, так как точечные источники загрязнения почв ТМ (в первую очередь – предприятия цветной металлургии) на территории г. Худжанда отсутствуют.

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

Сравнительный анализ содержания ТМ и мышьяка в аэрозоле и почве

Наши исследования показали, что содержание некоторых исследованных веществ в пробах АА и в пробах почв существенно различается.

На рис. 1 в логарифмических координатах изображена линия, аппроксимирующая соотношение содержания C (оксидов) тяжелых металлов и мышьяка в почве и АА (коэффициент корреляции $r \approx 0,98$). Если рассматривать Северный Таджикистан как замкнутую область, то прямая линия – зависимость между веществом, оседающим в виде аэрозоля на поверхность почвы, и аэрозолем, образовавшимся на территории Северного Таджикистана и переносимым подвижными воздушными массами (ветрами). При замкнутости объема и равной вероятности выветривания пород должен наблюдаться баланс. Положение точек ниже прямой может быть обусловлено неодинаковой вероятностью выветривания различных пород или выносом аэрозоля

за пределы Северного Таджикистана. Точки, расположенные выше прямой, относятся к аэрозолям не только местного происхождения, но и внешним.

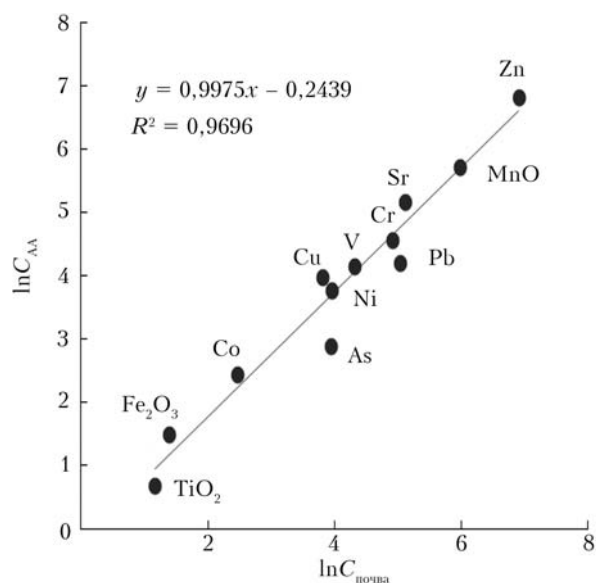


Рис. 1. Отношение содержания ТМ в пробах почв и аэрозоля в виде корреляционно-регрессионных связей

Гистограмма на рис. 2 показывает, что элементы, содержание которых в аэрозоле выше, чем в почве, входят в соединения, источниками которых выступают местные или образовавшиеся за пределами указанного района легковыветриваемые породы. Содержание марганца, никеля, хрома и ванадия почти одинаково в пробах аэрозоля и почв; соответствующие точки расположены на прямой линии на рис. 1.

С целью определения источников поступления загрязняющих веществ (ЗВ) в дни с максимальной за весь период наблюдений концентрацией исследуемых тяжелых металлов в АА и верхнем слое

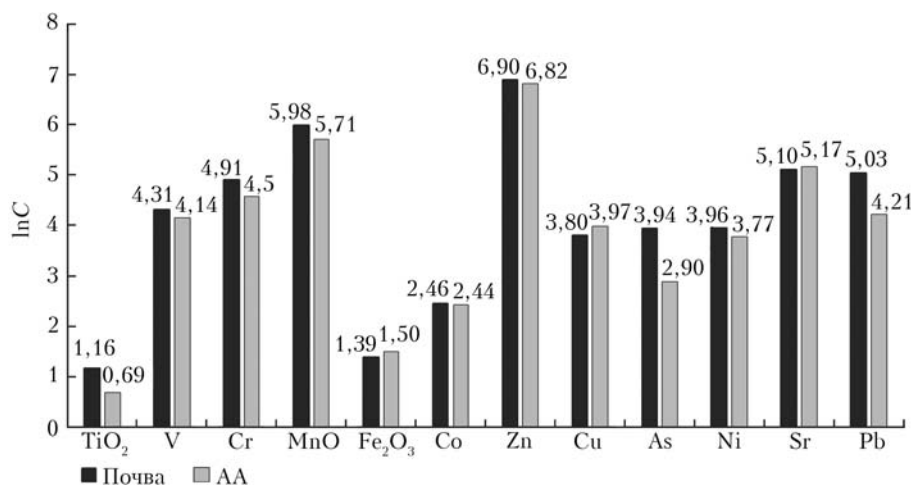


Рис. 2. Отношение содержания ТМ в пробах почв и аэрозоля в виде гистограммы

почвы с помощью модели HYSPLIT рассчитаны обратные траектории переноса воздушных масс (ВМ). Для расчета в модель вводились следующие показатели: время движения ВМ — 168 ч, высота ВМ над уровнем земли в точке расчета — 1000, 2000 и 3000 м [37, 38].

Пользуясь данными табл. 3 и 4, для ТМ первого класса опасности Pb, As и Zn при максимальных их значениях в составе АА и почвах можно определить источник потока. На рис. 3–5 приведены обратные траектории воздушных масс (<https://ready.arl.noaa.gov/hypub-bin/trajresults>) за 168 ч на высоте 1000, 2000 и 3000 м от уровня земли для дней с максимальным содержанием ТМ в пробах АА соответственно.

Значительный вклад в загрязнение атмосферы Северного Таджикистана взвешенными частицами могут внести и источники, расположенные на больших расстояниях, за счет дальнего переноса ВМ. В Адрасмане зафиксировано самое высокое содержание свинца в пробах атмосферного аэрозоля по области. На рис. 3 изображены 7-дневные обратные траектории воздушных масс, которые пере-

носят часть АА, содержащего примеси свинца, пришедших в Адрасман 30 сентября 2018 г. На рис. 3, а показана единственная обратная траектория ВМ, пришедшей в Адрасман на высоте 1000 м, которая начинается в Туркменистане. Направление переноса в каждой точке траектории ВМ совпадает с направлением преобладающих ветров. При переходе к рис. 3, б видим, что ВМ движутся по разным траекториям на каждой из трех высот. На рис. 3, в приведен ансамбль траекторий на трех высотах (21 траектория), направление которых существенно изменяется каждый день. Такая же ситуация наблюдается при расчете обратных траекторий, пришедших в Истаравшан 15 апреля 2014 г., когда была обнаружена самая высокая по области концентрация цинка в АА (рис. 4), и в Истиклоле 22 сентября 2018 г. при обнаружении самой высокой по области концентрации мышьяка в пробах АА (50,9 ppm) (рис. 5).

Обратная 168-часовая траектория переноса ВМ, пришедшей 30 сентября 2018 г. в Адрасман со стороны Узбекистана на высоте 2000 м, начинается во Франции (рис. 3, б).

Таблица 3

Статистические параметры 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

Примечание. $\langle C \rangle$, $C_{\min}$, $C_{\max}$ — среднее, минимальное и максимальное содержания элемента в пробах; σ — среднеквадратичное отклонение; V — коэффициент вариации; S_n — погрешность; I — геохимический индекс загрязнения; D — отношение концентраций; t_c — критерий Стьюдента; δ — доверительный интервал.

Таблица 4

Статистические параметры 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
ИР	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

Примечание. ИР — интегральный индекс загрязнения.

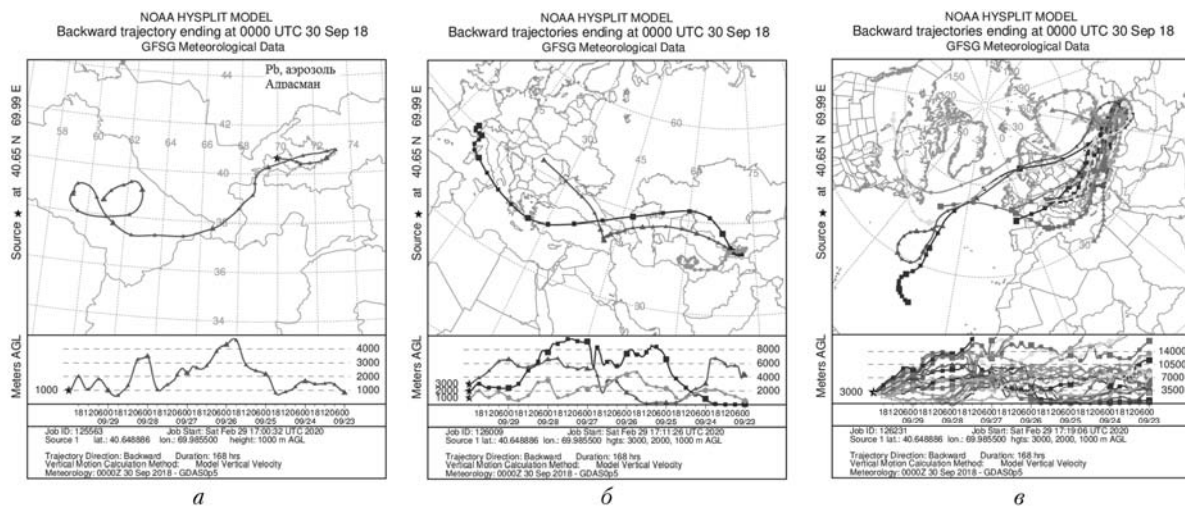


Рис. 3. Обратные траектории ВМ при максимальных значениях содержания Рb в пробах АА (Адрасман)

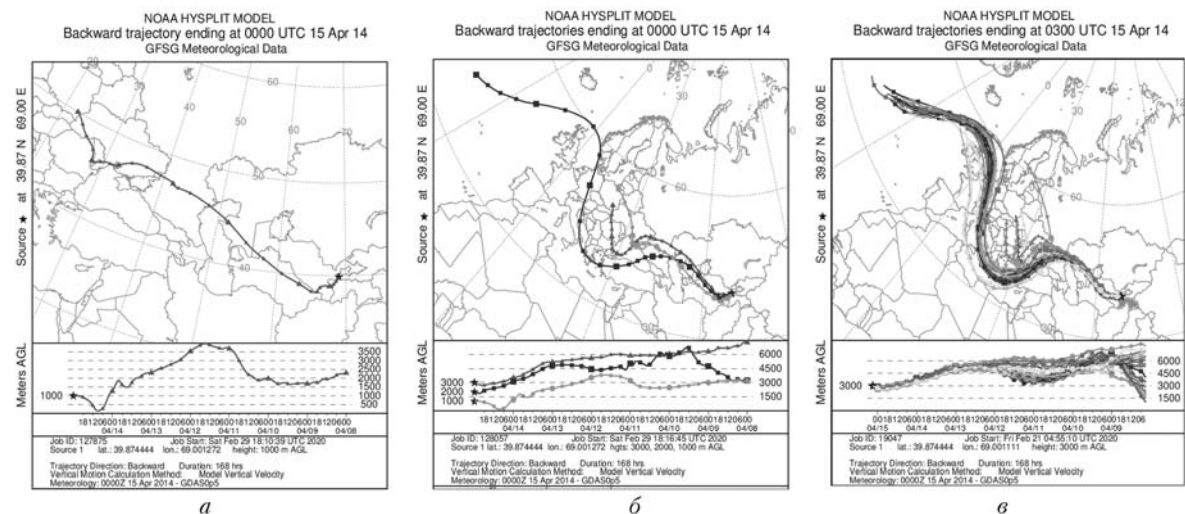


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для Zn (Истаравшан)

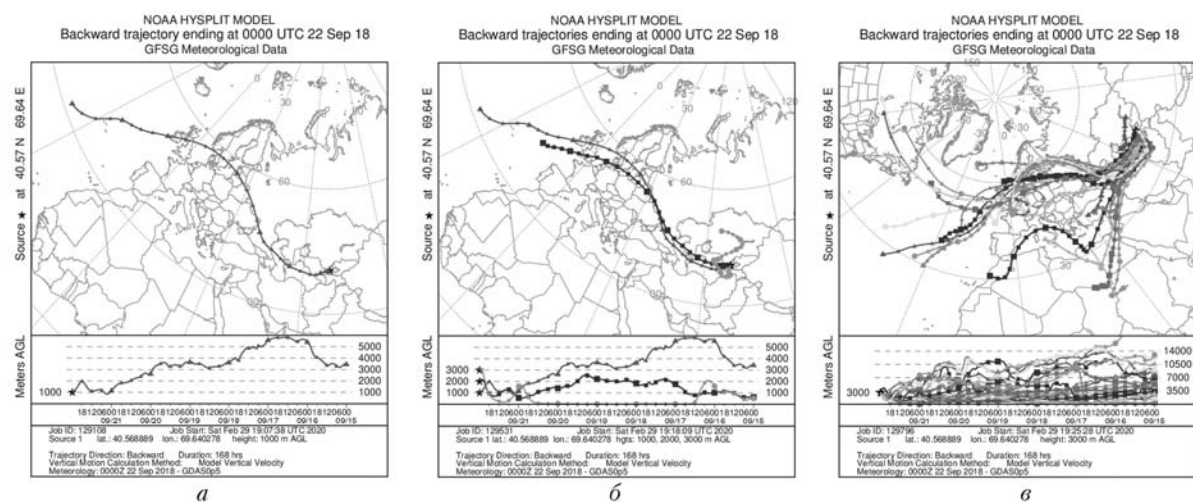


Рис. 5. То же, что и на рис. 3, для As (Истиклол)

На рис. 4, а, б приведен пучок обратных траекторий ВМ, пришедших в Истаравшан ко времени сбора проб аэрозоля с высоким содержанием Zn.

Траектории ВМ начинаются от Атлантического океана на высоте 3000 м, проходят над Каспийским морем и входят на территорию района со стороны

Узбекистана. На высоте 2000 м ВМ пришла на территорию Истаравшана со стороны Литвы; на высоте 1000 м — из Польши (рис. 4, б).

На рис. 5 приведены полученные по модели HYSPLIT обратные траектории ВМ, переносящих загрязнение, включающие As, в Истиклол. На высоте 1000 и 2000 м траектории ВМ начинаются от Атлантического океана и от Британских островов (рис. 5, а, б). На высоте 3000 м ВМ приходит с территории Казахстана.

Добавление ежесуточных траекторий (рис. 3, в — 5, в) делает картину более сложной; определяющими становятся те траектории, которые проходят вблизи поверхности земли и могут вовлекать в движение аэрозоль из приземных источников. Выбор ансамбля траекторий за 7 дней был определен средним временем жизни в атмосфере молекул водяного пара, которое характеризует скорость конденсации водяного пара на частицах и, следовательно, скорость осаждения частиц аэрозоля.

Такой метод применяется не только в метеорологии, но и при изучении перемещения ВМ с веществами, загрязняющими атмосферу, позволяя локализовать основные источники загрязнения. Благодаря анализу обратного переноса ВМ и концентрации ЗВ на исследуемой территории нам удалось определить предполагаемый источник загрязнений в Северном Таджикистане [38].

Статистическая обработка результатов

В табл. 3 и 4 приведены параметры, полученные при статистической обработке результатов измерений для проб почв и аэрозоля с помощью пакета стандартных программ Excel. Для выборки значений x вычислялись: среднее $\langle C \rangle$, минимальное $C_{\min}$ и максимальное $C_{\max}$ содержание элемента в пробах пылевого аэрозоля и почв; среднеквадратичное отклонение σ , коэффициент вариации $V = \sigma / \langle C \rangle$, погрешность $S_n = \sigma / n$ (n — количество проб элемента), интегральный индекс загрязнения $IPI = 0,98x / x_{\min}$, геохимический индекс загрязнения $I = 2x / 3x_{\min}$, отношение концентраций $D = C_{\max} / C_{\min}$, критерий Стьюдента $t_c = \sigma / \sqrt{n}$, доверительный интервал $\delta = t_c \sigma / \sqrt{n}$.

В табл. 5 представлены рассчитанные коэффициенты корреляции между концентрациями исследованных веществ в пробах атмосферного аэрозоля. Обнаружена значимая корреляция между концентрациями Sr и Cu ($r = 0,8$), V и TiO_2 (0,7), As и Fe_2O_3 (0,5). Между концентрациями других тяжелых металлов значимых корреляций (не меньше 0,5) не обнаружено.

В табл. 6 даны коэффициенты корреляции между концентрациями исследованных веществ в пробах почв. Обнаружена значимая корреляция между

Таблица 5

Коэффициенты корреляции между концентрациями исследуемых веществ в пробах атмосферного аэрозоля

TM	Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe_2O_3	MnO	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_2O_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												

Примечание. Полужирным выделена $0,5 < r < 0,7$ средняя корреляция.

Таблица 6

Коэффициенты корреляции между концентрациями исследуемых веществ в пробах почв

TM	Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe_2O_3	MnO	Cr	V	TiO_2
Sr		-0,2	0,2	—	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				—	-0,3	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_2O_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												

Примечание. Полужирным выделена $0,7 < r < 0,9$ сильная корреляция в ряде.

Pb и As (0,7), As и Co (0,6), As и MnO (0,5), Co и MnO (0,72), MnO и TiO₂ (0,6), V и TiO₂ (0,6). По результатам корреляционного анализа содержания ТМ в пробах можно судить о природе загрязнения территории и его источнике. Так, высокие коэффициенты корреляции свидетельствуют в пользу того, что путь поступления и источник загрязнения одинаковы. В нашем случае наибольшая корреляция в пробах атмосферного аэрозоля оказалась между Sr и Cu (0,8) и V и TiO₂ (0,7), то есть с вероятностью 80% можно говорить о том, что путь, источник и время поступления этих элементов одинаковы.

Корреляционный анализ концентраций исследованных веществ в пробах почв (табл. 6) показывает (на примере Pb и As), что с изменением концентрации одного элемента по местам отбора происходит изменение концентрации другого в близких пропорциях. Исходя из этого можно предположить, что такие элементы, как Pb и As, поступают в почву региона из одного источника.

Заключение

В ходе проведенных исследований выявлены высокие концентрации некоторых тяжелых металлов, их оксидов и мышьяка в пробах пылевого аэрозоля и почв в Согдийской обл. Таджикистана. Создана первичная карта элементного состава почв и аэрозолей Северного Таджикистана. Обнаружены территории с опасно высоким уровнем загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком.

По результатам работы можно заключить, что основными источниками тяжелых металлов и мышьяка в атмосферном воздухе и почве являются автомобильный транспорт, предприятия металлургической промышленности (в частности, по переработке урановых отходов) и открытые хвостохранилища. За счет ветрового переноса аэрозоля от этих объектов тяжелые металлы распространяются по всему региону, а площадь загрязненных территорий постепенно увеличивается. На основе модели HYSPLIT построены обратные траектории воздушных масс, пришедших на рассматриваемую территорию в дни, когда были выявлены максимальные концентрации некоторых из рассматриваемых элементов; они позволяют определить возможные источники воздушного переноса загрязняющих веществ на территорию Согдийской обл. Наши результаты указывают на высокий уровень трансграничного переноса и на необходимость дальнейшего комплексного изучения этой проблемы.

1. Duffus J.H. "Heavy metals" a meaningless term? // Pure. Appl. Chem. 2002. V. 74. P. 793.
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. 144 с.
4. Health Aspects of Air Pollution — answers to follow-up questions from CAFÉ // WHO. Germany, 15–16 January, 2004. 71 p.

5. Хотимченко С.А., Гмошинский И.В., Тутельян В.А. Проблема обеспечения безопасности нано-размерных объектов для здоровья человека // Гигиена и санитария. 2009. № 5. С. 7–11.
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: Дошиш, 2017. 416 с.
8. Муртазаев Х. Радиационно-экологические особенности природных сред Северного Таджикистана. Худжанд: Меъроҷ, 2014. 164 с.
9. Рахматов М.Н., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Расулзода Х.Х. Элементный состав атмосферного аэрозоля и почв Северного Таджикистана // Ученые записки ХГУ. 2018. № 3. С. 56.
10. Сересева О.В., Рапута В.Ф., Ярославцева Т.В., Медвяцкая А.М., Глотов П.В. Анализ данных сетевых наблюдений субмикронных аэрозолей в атмосферном воздухе г. Новосибирска // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2018. Т. 4, № 2. С. 37–47.
11. Рапута В.Ф., Леженин А.А., Ярославцева Т.В., Девятова А.Ю. Экспериментальные и численные исследования загрязнения снежного покрова г. Новосибирска в окрестностях тепловых электростанций // Изв. ИГУ. Сер. «Науки о Земле». 2015. Т. 12. С. 77–93.
12. Способ мониторинга загрязнения природных сред техногенным источником. Пат. RU2532365C2. Россия. Рапута В.Ф., Девятова А.Ю.; ИНГГ СО РАН. № 2012121866/15; Заявл. 25.05.2012; Опубл. 27.11.2013; Бюл. № 33.
13. Виноградова А.А., Котова Е.И., Иванова Ю.А. Поступление загрязнений из атмосферы на поверхность Баренцева моря: тяжелые металлы и черный углерод // Геология морей и океанов. Материалы XXIII Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии. 2019. С. 15–19.
14. Vinogradova A.A., Kotova E.I. Pollution of Russian northern seas with heavy metals: comparison of atmospheric flux and river flow // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2019. V. 55, N 7. P. 695–704.
15. Vinogradova A.A., Ivanova Y.A. Heavy metals in the atmosphere over the northern coast of Eurasia: Interannual variations in winter and summer // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2017. V. 53, N 7. P. 711–718.
16. Vinogradova A.A., Ivanova Y.A. Transport of air masses and pollutants to the Russian arctic islands (1986–2016): long-term, interannual, and seasonal variations // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2018. V. 54, N 7. P. 688–699.
17. Снежко С.И., Шевченко О.Г. Источники поступления тяжелых металлов в атмосферу // Ученые записки Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2011. № 18. С. 57–69.
18. Ji Y., Feng Y., Wu J., Zhu T., Bai Z., Duan C. Using geo-accumulation index to study source profiles of soil dust in China // J. Environ. Sci. 2008. V. 20, N 5. P. 571. DOI: 10.1016/S1001-0742(08)62096-3.
19. Wood J.M. Biological cycles for toxic elements in the environment // Sci. 1974. V. 183. P. 1049–1059.
20. Rahman Z., Singh V.P. The relative impact of toxic heavy metals (THMs)(arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment // Environ. Monit. Assess. 2019. V. 191, N 7. P. 419.
21. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. 2012. № 3. С. 368–375.
22. Муртазаев Х. Бобоев Б.Д., Муртазаев А., Болибеков Ш. Трансграничные радиоэкологические проблемы

- (на примере соседних районов Кыргызстана и Таджикистана) // Ученые записки ХГУ. 2006. № 12. С. 62–68.
23. Назаров Х.М., Эрматов К.А., Бахронов С.М., Мухамедова С.Г., Мирсаидов У.М. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмаи (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него. Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 115–121.
 24. Юнусов М., Разыков З., Муртазаев Х. Естественные радионуклиды в экосистемах Согдийской области // Ученые записки ХГУ. 2005. № 10. С. 67–72.
 25. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Расулзода Х.Х., Рахматов М.Н. Элементный состав атмосферного аэрозоля и почв Таджикистана // Вестн. Тадж. нац. ун-та. Сер. естественных наук. 2018. № 1. С. 77–82.
 26. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю атмосферы. Введение 1991-07-01. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 615 с.
 27. ГОСТ 17.4.2.01-81. Охрана природы (ССОП). Почвы. Номенклатура показателей санитарного состояния (с Изменением N 1). М.: Стандартиформ, 2008. 4 с.
 28. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартиформ, 2008. 9 с.
 29. Абдуллаев С.Ф., Назаров Б.И., Маслов В.А., Джураев А.А. Распределение природной и техногенной радиоактивности в образцах почвы и пылевой мглы юга Таджикистана // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 3. С. 187–193; Abdullaev S.F., Nazarov B.I., Maslov V.A., Djuraev A.A. Distribution of natural and anthropogenic radioactivity in samples of soil and dust haze in the south of Tajikistan // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 5. P. 396–403.
 30. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Джураев А.А., Давлатшоев Т. Динамика распределения тяжелых металлов и радиоактивных изотопов в образцах почвы и пылевого аэрозоля юга Таджикистана // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 3. С. 207–214.
 31. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Давлатшоев Т. Содержание элементов в пробах почв и пылевого аэрозоля в Таджикистане // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 143–152; Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I., Madvaliev U., Davlatshoev T. The elemental composition of soils and dust aerosol in the south-central part of Tajikistan // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 4. P. 347–358.
 32. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Давлатшоев Т. Элементный состав почв и пылевого аэрозоля юго-центральной части Таджикистана // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 246–255.
 33. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.
 34. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 16 с.
 35. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 12 с.
 36. URL: <https://ready.arl.noaa.gov/index.php> (дата обращения: 10.11.2020).
 37. Draxler R.R. The accuracy of trajectories during ANATEX calculated using dynamic model analyses versus rawinsonde observations // J. Appl. Meteorol. 1991. P. 1446–1467.
 38. Рахматов М.Н., Абуллаев С.Ф., Маслов В.А. Вариация статистических характеристик содержания тяжелых металлов в пробах атмосферного аэрозоля и почв Северного Таджикистана // Политехнич. вестн. ТТУ. 2019. № 3. С. 17–22.

M.N. Rakhmatov, S.F. Abdullaev. Distribution of heavy metals in dust aerosol and soils of northern Tajikistan.

The concentrations of heavy metals (or metal oxides) and arsenin samples of atmospheric aerosol and soil collected in northern Tajikistan in 2011 to 2019 are determined. Their local sources, mainly anthropogenic (automobile transport, metallurgical enterprises, open tailing dumps, etc.) are discussed. Possible sources of air transport of pollutants to the territory of the Sogd region are identified on the basis of the HYSPLIT back trajectory model.