

Динамика распределения тяжелых металлов и радиоактивных изотопов в образцах почвы и пылевого аэрозоля юга Таджикистана

С.Ф. Абдуллаев, В.А. Маслов, Б.И. Назаров,
У. Мадвалиев, А.А. Джураев, Т. Давлатшоев*

*Физико-технический институт им. С.У. Умарова АН Республики Таджикистан
734063, г. Душанбе, Академгородок, ул. Айни, 299/1, Республика Таджикистан*

Поступила в редакцию 29.04.2013 г.

Рассмотрено распределение тяжелых металлов — наиболее опасных загрязнителей почвы. В пробах пылевого аэрозоля обнаружено увеличение содержания Са, Zn и Sr по сравнению с почвой зоны распространения пылевой мглы. В почве зоны распространения пылевой мглы в 2008–2010 гг. концентрация элементов была понижена для Sr, Rb, Eu, Cs, Co и повышена для Mn, Ba, Ce, La, Yb и Th; содержание элементов имело максимум в 2009 г. Изучена динамика изменения содержания изотопов в составе проб пылевой мглы, собранных в 2007–2010 гг. Распределение изотопов в почве Таджикистана с юга на север имеет неравномерный характер с максимумом в г. Душанбе.

Ключевые слова: тяжелые металлы, пылевая мгла, пыльная буря, почва, рентгено-флуоресцентный анализ почвы, элементный состав, изотопы, кларк; heavy metals, dust haze, dust storm, soil, X-ray fluorescence analysis of soil, elemental composition, isotopes, clarke.

Введение

В условиях развития промышленности, энергетики и транспорта, интенсивной разработки полезных ископаемых и активной химизации сельского хозяйства происходит резкий рост уровня загрязнения природной среды — атмосферы, воды, почвы и растений. Среди наиболее опасных загрязнителей все чаще называют тяжелые металлы. Их миграция и распределение в компонентах экосистем зависят от целого комплекса природных факторов, а также от интенсивности и характера техногенеза [1].

Предотвращение техногенного внесения тяжелых металлов в окружающую среду — это серьезная научная проблема. В литературе широко обсуждаются вопросы экологического нормирования содержания тяжелых металлов в различных компонентах экосистем и, прежде всего, в воде, воздухе, почвах и растениях [1–12].

Еще одной техногенной проблемой является распространение загрязнений от мест объявленных подземных ядерных испытаний. Это связано как с большим выходом на поверхность радиоактивных изотопов ксенона и криптона, имеющих максимальный

выход в реакции деления радиоактивного вещества, так и с плохой герметичностью используемых устройств.

В переносе тяжелых металлов и радиоактивных загрязнений большую роль играют атмосферные процессы, в частности пыльные бури и пылевая мгла, переносящие твердые частицы на большие расстояния от места пылевого выброса.

Северная и центральная части Таджикистана разделены горной системой, состоящей из Гиссарского, Зарафшанского и Туркестанского хребтов. Благодаря довольно большим высотам (вершины достигают 5 км и более) эти горы имеют значительную площадь снеговой и ледниковой поверхности. Этот высотный и температурный барьер создает препятствие для перемещения воздушных масс как от Северного Ледовитого океана, так и от южного муссона Индийского океана. Так, горы Гиссарского хребта практически полностью преграждают путь на север мощным пыльным бурям, формирующимся в регионе и известным под названием «афганец».

Настоящая статья посвящена изучению динамики изменения концентрации некоторых тяжелых металлов и радиоактивных изотопов в пробах почвы и пылевого аэрозоля на юге Таджикистана.

Описание методики сбора проб и экспериментальных установок приведено в [13–15]. Гамма-радиометрический анализ радиоактивных изотопов осуществлялся с помощью детектора производства фирмы «Канберра» на основе сверхчистого германия относительной эффективностью 10%. Измерения проводились

* Сабур Фузайлович Абдуллаев (sabur.f.abdullaev@gmail.com); Владимир Анатольевич Маслов (vamaslov@inbox.ru); Бахрон Исломович Назаров (systemavto@rambler.ru); Умархон Мадвалиев (umarkhon@mail.ru); Акрам Ахматович Джураев (ajuraev@mail.ru); Тавалло Давлатшоев (t_davlat@mail.ru).

в домике из свинца с толщиной стенок 5 см, облицованном с внутренней стороны слоем кадмия толщиной 2 мм. Внутренняя поверхность домика дезактивировалась перед каждым сеансом измерений. При измерениях образец помещался в сосуд Мариелли вместимостью 500 см³. Время измерения образцов и эталона составляло 6 ч, а время измерения фона (в начале и конце серии измерений) – 24 ч. Используемая система обладает необходимыми свойствами (эффективность, разрешение) для решения поставленной задачи. Точность определения удельной активности была проверена на 15 образцах по 5 гамма-линиям для изотопов уранового и по 7 линиям ториевого рядов.

Отобранные пробы исследовались на содержание тяжелых металлов методом рентгено-флуоресцентного анализа. Использовались рентгено-флуоресцентная установка на основе кремниевого детектора высокого разрешения фирмы «Канберра» и трубка Eclipse II с регулируемым спектром возбуждения для получения рентгеновского излучения. Кювета с образцами размещалась над входным окном детектора. Толщина майлара, используемого в кювете, и толщина входного окна определяли нижний порог регистрируемого излучения. Установка позволяла надежно регистрировать характеристическое излучение элементов, начиная с калия, энергия излучения 3,3 кэВ. Результаты показали, что установка с трубкой Eclipse II позволяет получить чувствительность анализов не хуже 10⁻⁵ г/г, или 0,1 ppm [13–15].

Миграция элементов в почве и пылевом аэрозоле

Элементный анализ проб почв, собранных по пути распространения пылевой мглы (As, Au, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hf, La, Lu, Mn, Na, Rb, Sb, Sc, Sm, Tb, Th, U, Yb, Zn), свидетельствует о высокой положительной корреляции содержания Th (0,72), Sm (0,58), Hf (0,42), Tb и Na (0,33) и средних коэффициентах корреляции содержания La (0,21), Rb (0,20), Ba (0,15), Cs и Eu (0,13) относительно содержания урана. Остальные элементы ряда имеют отрицательную корреляцию относительно урана. В пробах пылевого аэрозоля обнаружено более высокое содержание Ca (в 3 раза), Zn (3,3), Sr (1,9) по сравнению с почвой зоны распространения пылевой мглы. Карта точек сбора проб представлена на рис. 1. Количество проб, взятых в каждой точке, составляло от 2 до 15, что вполне представительно для анализа пыли, осаждаемой на подложку после пылевого эпизода.

На рис. 2, а и б приведена динамика изменения содержания некоторых элементов во всех взятых образцах почвы юга Таджикистана в 2008–2010 гг. В почве зоны распространения пылевой мглы с 2008 по 2010 г. обнаружены падение концентрации элементов Cr, Rb, Eu, Cs, Co и рост концентрации элементов Mn, Ba, Ce, La, Yb и Th. Содержание остальных элементов имеет максимум в 2009 г.

На рис. 3 приведены распределения содержания некоторых тяжелых металлов на расстоянии до 300 км

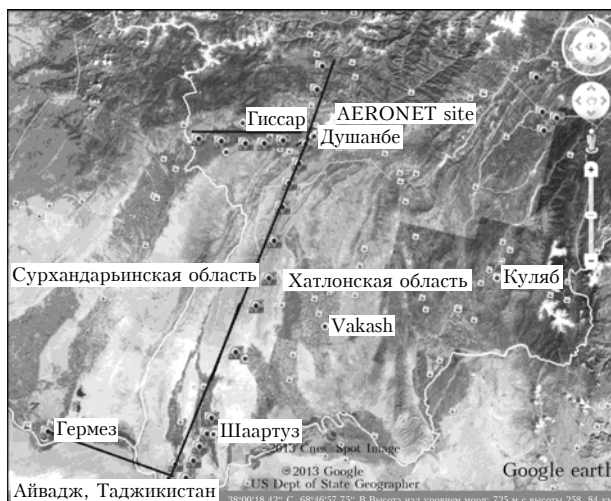


Рис. 1. Карта мест сбора проб почв и частиц пылевого аэрозоля

от источника пылевого выброса. Содержание элементов U, Th, Fe, As, Cs, Co, Tb, Eu, Sb, Ba, Mn, Yb, Hf, Sc, Sm, Ce, Cr, La и Rb возрастает к северу от места образования пылевого выброса. Эта зависимость может быть аппроксимирована бимодальной функцией. Содержание Na и Ca в этом направлении убывает. Коэффициенты детерминации и корреляции этих распределений, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о высокой степени корреляции данного распределения.

Мы произвели сравнительный анализ отклонения содержания некоторых элементов в пробах аэрозоля и почвы пустыни Айвадж (рис. 4), а также в пробах почвы субаридной зоны (Гиссарский район) и аэрозоля пустыни Айвадж (рис. 5).

На рис. 4 в двойном логарифмическом масштабе приведено содержание некоторых химических элементов в почве и в пылевом аэрозоле. Коэффициент корреляции очень велик ($r = 0,97$), состав частиц пыли и почвы по этим элементам очень близок. Аэрозольные частицы обогащены теми элементами, которые указаны выше прямой линии (Ti, Co, V, Fe, K), а концентрация элементов, находящихся ниже прямой (Sc, Sr, Ca), выше в песке. В аэрозольных частицах обнаружено повышенное содержание Sc (в 2,93 раза), Zn (2,89), Ni (2,45), Ce (1,9), Sr (1,84) и Ca (1,74), что, возможно, связано с антропогенными факторами. Пустынное происхождение пылевого аэрозоля подтверждается тем, что для проб почвы, взятых в пустыне, коэффициент корреляции высок. Такой вывод подтверждается результатами, полученными методом ИК-спектроскопии [16].

По сравнению с почвой Душанбе существенно отличается содержание Ca (в 3,1 раза больше), а остальные элементы имеют такое же соотношение для песка из пустыни Шаартуз.

В аридной зоне (пустыня Айвадж) юга Таджикистана обнаружены более высокие концентрации Sb (в 4,5 раза), Ba (3,3), Hf (1,55), Cs (1,35), Au, U, As, Yb (1,3) и Mn (1,2), чем в субаридной зоне, сравнимые значения Ce, Rb, La, Zn, Cr, Co, Eu, Sc, Tb, Th и более низкие концентрации Na (0,53), Ca (0,70).

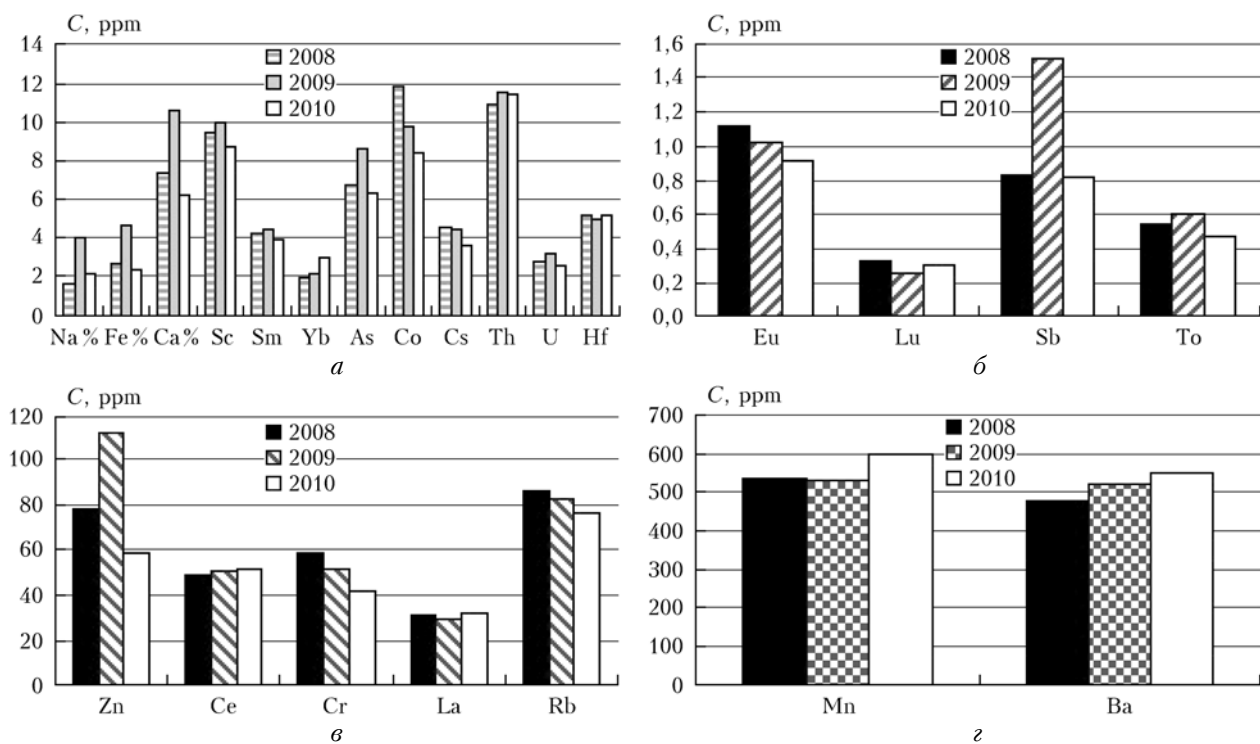


Рис. 2. Динамика среднего содержания элементов в пробах почвы Южного Таджикистана в 2008–2010 гг.

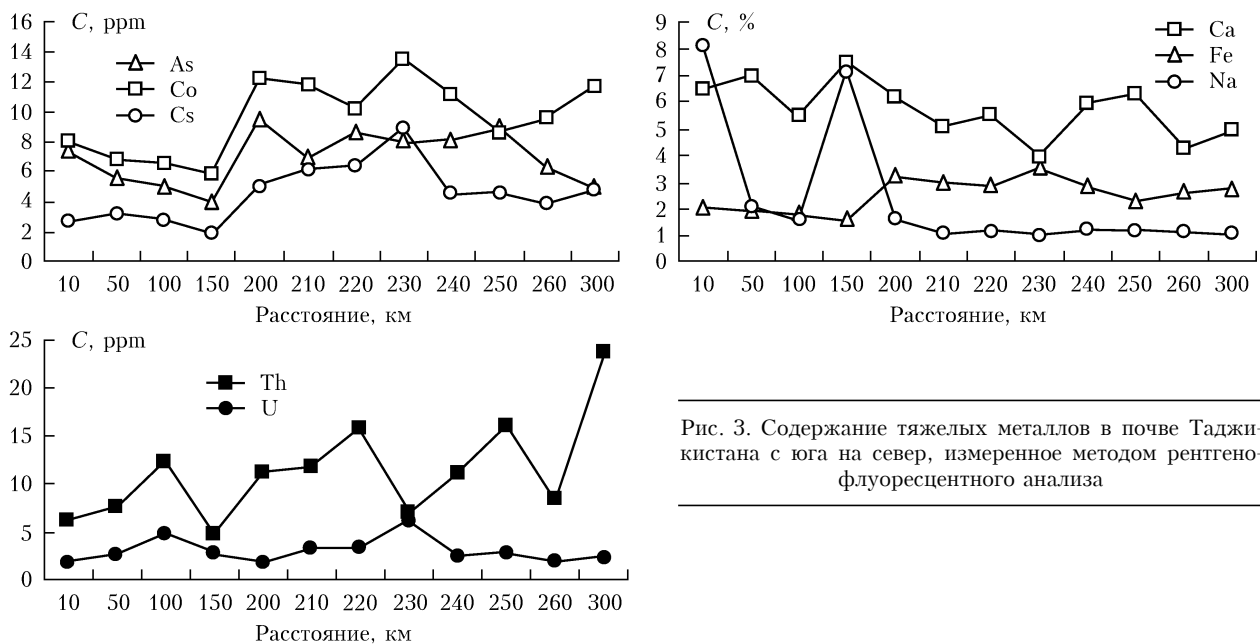


Рис. 3. Содержание тяжелых металлов в почве Таджикистана с юга на север, измеренное методом рентгено-флуоресцентного анализа

Таблица 1

Средние коэффициенты детерминации и корреляции распределения элементов в частицах пылевого аэрозоля (Айвадж, 15 проб)

Элемент	R^2	r	Элемент	R^2	r	Элемент	R^2	r
U	0,46	0,68	Ca	0,52	0,72	Cr	0,63	0,80
Th	0,60	0,77	Na	0,77	0,88	La	0,65	0,80
Co	0,74	0,86	Fe	0,74	0,86	Ce	0,16	0,41
As	0,63	0,80	Sb	0,60	0,77	Sc	0,79	0,89
Cs	0,82	0,91	Eu	0,64	0,80	Hf	0,56	0,75
Ba	0,48	0,69	Tb	0,41	0,64	Sm	0,39	0,62
Mn	0,41	0,64	Rb	0,47	0,69	Yb	0,69	0,83

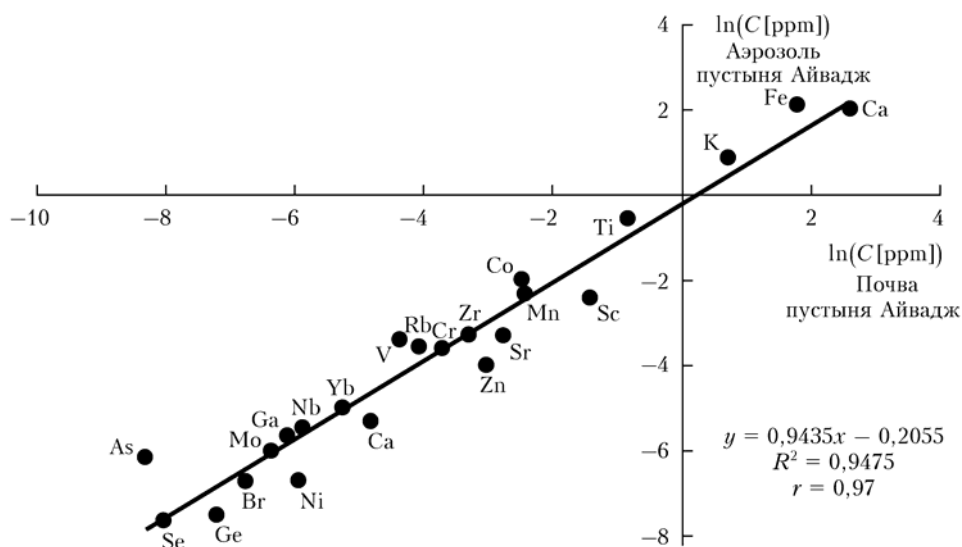


Рис. 4. Содержание тяжелых металлов в почве и в пылевом аэрозоле пустыни

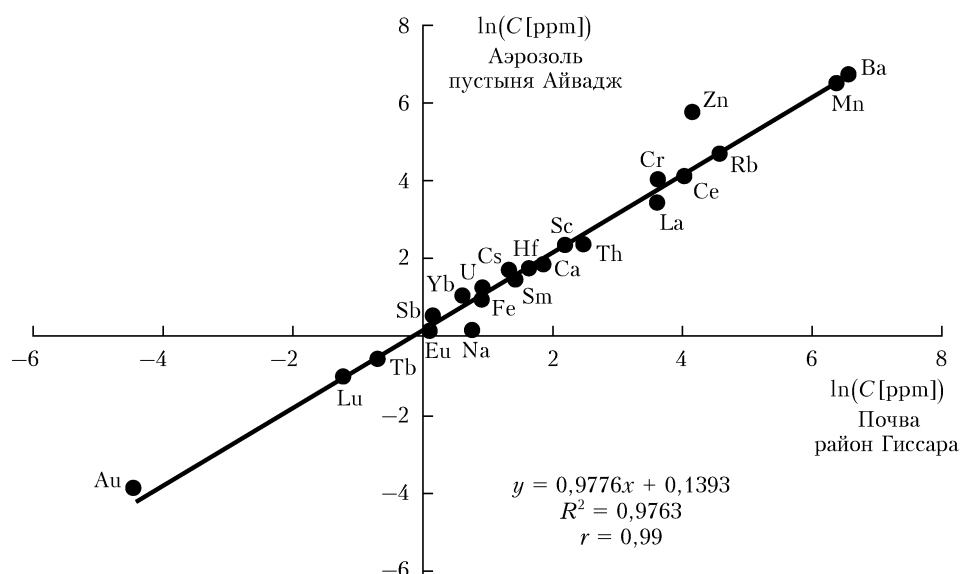


Рис. 5. Содержание тяжелых металлов в почве и в пылевом аэрозоле пустыни

Такой факт свидетельствует о существенном различии состава почв в этих районах. Это отличие иллюстрирует рис. 5, построенный в двойном логарифмическом масштабе. Для прямой на рис. 5 коэффициент корреляции r равен 0,99. Содержание элементов, указанных над прямой, больше в пустынной почве (Sc, Co, As, Hf, Cs, U, Yb, Sb), а ниже прямой (Th, Ca, Na, Sm, Fe, Eu, Tb) больше в субаридной зоне.

Концентрации Ce, Rb, La, Zn, Cr в составе обоих видов почв одинаковы.

В табл. 2 представлены статистические характеристики некоторых элементов в почве юга Таджикистана. Как видно из табл. 2, обнаружен высокий коэффициент корреляции для Sm, Th, Cs, Ba, Au и As относительно U. Коэффициент вариации и относительные отклонения для элементов Zn, Na, Au, Th,

Таблица 2

Среднее, максимальное и минимальное содержание элементов в пробах почв (r – коэффициент корреляции относительно урана, σ – среднее квадратическое отклонение, V – вариация данных, K – кларк)

Элемент	<C>	C_{max}	C_{min}	r	σ	V	Кларк	<C>/K	C_{max}/K
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Au	0,013	0,047	0,002	0,286	0,0096	0,74	3,46	0,00	0,01
Ba	529	1510	100	0,25	288	0,54	425	1,24	3,55
Ca %	6,45	14,6	0,63	-0,02	3,05	0,47	3,38	1,91	4,32

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ce	50,3	108,7	10,9	0,175	15,1	0,25	60	0,84	1,81
Cr	48,7	74,5	25	0,09	13,2	0,27	100	0,49	0,75
Eu	1	1,39	0,62	0,177	0,25	0,26	0,77	1,30	1,81
Fe %	2,27	3,83	0,28	0,006	0,79	0,35	1,56	1,46	2,46
Lu	0,29	0,54	0,1	-0,05	0,13	0,46	1,52	0,19	0,36
Mn	556	993	350	-0,1	150	0,27	950	0,59	1,05
Na %	2,09	8,05	0,16	-0,17	1,67	0,8	3,78	0,55	2,13
Rb	81	120	5	0,186	26	0,32	90	0,90	1,33
Sb	1,22	2,58	0,1	0,204	0,75	0,61	2,03	0,60	1,27
Sc	9,5	14	5,5	0,152	1,9	0,2	22	0,43	0,64
Tb	0,55	1,08	0,26	0,304	0,18	0,33	1,5	0,37	0,72
U	3	7,4	1,2	-	1,4	0,48	2,04	1,47	3,63
Yb	2,1	4,5	1	0,059	0,6	0,27	1,67	1,26	2,69
As	7,6	21	2,6	0,234	3,3	0,43	2,42	3,14	8,68
Cs	4,1	8,9	1,5	0,324	1,6	0,38	1,79	2,29	4,97
Hf	5	8,1	2,5	0,155	1,4	0,27	1,13	4,42	7,17
Sm	4,2	6,2	2,3	0,537	1	0,23	0,93	4,52	6,67
Th	11,4	38	4,2	0,365	6,2	0,54	2,97	3,84	12,79
Zn	90	546	34	0,188	94	1	5,69	15,82	95,96
La	29,9	88,2	14,6	0,179	11,9	0,39	2,46	12,15	35,85
Co	9,5	13,8	5,6	0,128	2,4	0,25	0,86	11,05	16,05

Ba, U, As, Ca, и Sb высокие, а для Sc, Eu, Hf, Sm, Rb, Ce, и Co – низкие.

Миграция радиоактивных изотопов в почве и пылевом аэрозоле

Для проб пылевой мглы, собранных в 2007–2010 гг. (рис. 6), распределение содержания изотопов для Pb-210, Pb-212, Pb-214 оказалось бимодальным, а для Bi-214, Ac-228, Tl-208 и K-40 – одномодальным. Анализ содержания изотопов в пробах почв зоны распространения пылевой мглы показал увеличение содержания изотопов Pb-214, Tl-208 и K-40 в 2009 г., максимальные значения содержания для Pb-210 и Pb-212 обнаружены в 2007 и 2010 гг., Bi-214 в 2007, а Ac-228 в 2008 г. Концентрация всех изотопов в пробах пылевой мглы вдвое выше, чем для проб почвы в районе образования, а в случае пылевой мглы в октябре 2010 г. произошло увеличение в 6 раз для Pb-210, в 4 раза для Pb-212 и в 3 раза для K-40.

В пробах аэрозоля пылевой мглы из пустыни Айвадж с марта по октябрь 2010 г. (рис. 7) обнаружено повышенное содержание изотопов в октябре, кроме Bi-214 и Tl-208. Высокие концентрации Pb-210, K-40 и Ac-228 обнаружены в октябре, а низкие – в июне.

На рис. 8, а приведено содержание изотопов в почве пустыни (песок) и в пылевом аэрозоле. Коэффициент корреляции $r = 0,91$. Аэрозольные частицы обогащены теми элементами, которые лежат выше прямой линии (K-40, Ac-228, Tl-208, Bi-214), а концентрации элементов, которые находятся ниже прямой (Pb-210, Pb-212, Pb-214), в песке более высокие. На рис. 8, б приведено отношение концентраций изотопов в пробах частиц пылевого аэрозоля и пробах почвы в районе возможного источника пыли (г. Термез, Рес-

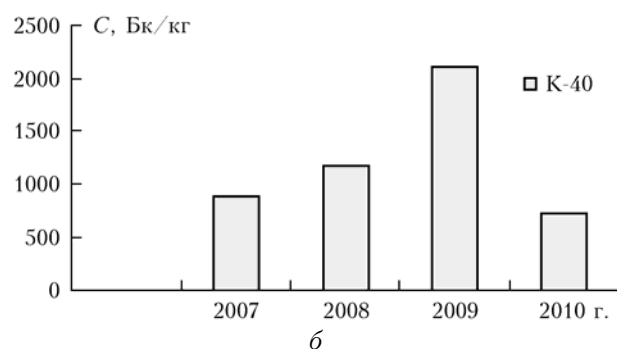
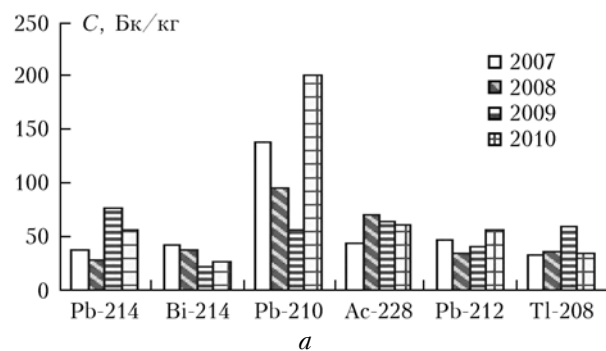


Рис. 6. Динамика содержания радиоактивных изотопов в пробах пылевого аэрозоля в 2007–2010 гг.

публика Узбекистан). Как видно на рис. 8, б, за исключением эпизодов 25.09.2009; 09.10.2010 и 24.10.2010, это соотношение близко к единице, т.е. изотопный состав очень близок.

В табл. 3 приведены статистические характеристики некоторых изотопов в пробах пылевого аэрозоля юга Таджикистана. Высокие коэффициенты вариации и относительные отклонения обнаружены для изотопов Pb-210 и K-40, а для Ac-228 – низкие.

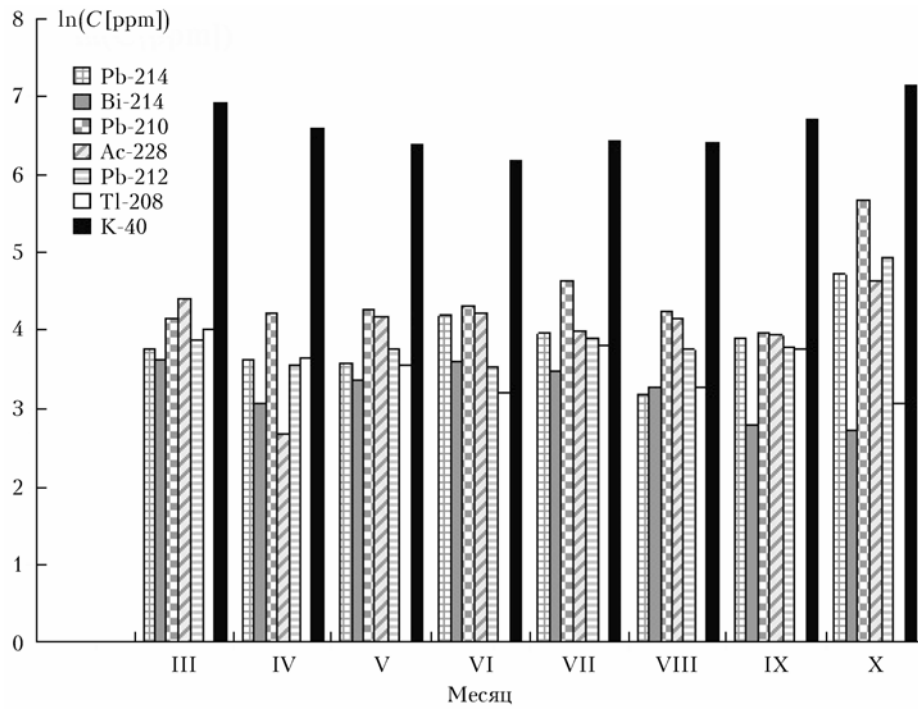


Рис. 7. Содержание радиоактивных изотопов в пробах пылевого аэрозоля, собранных в марте–октябре 2010 г. в пустыне Айвадж

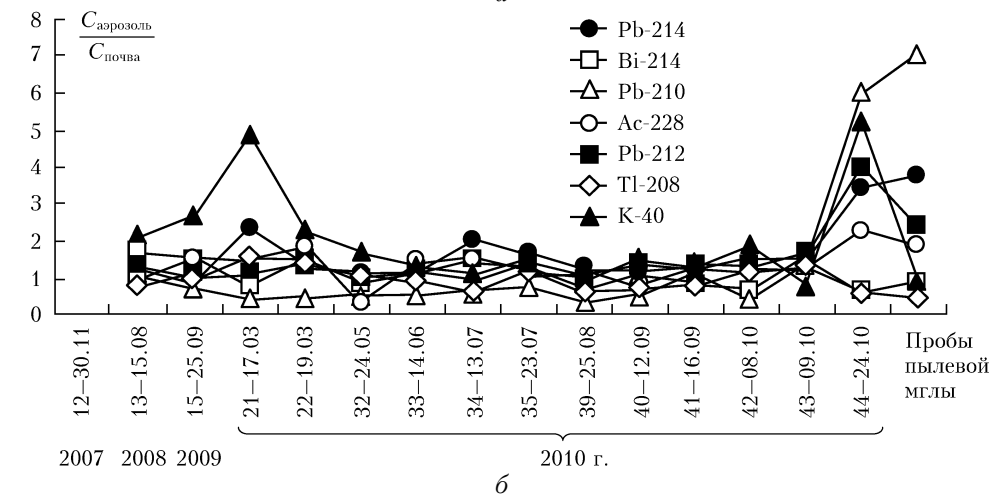
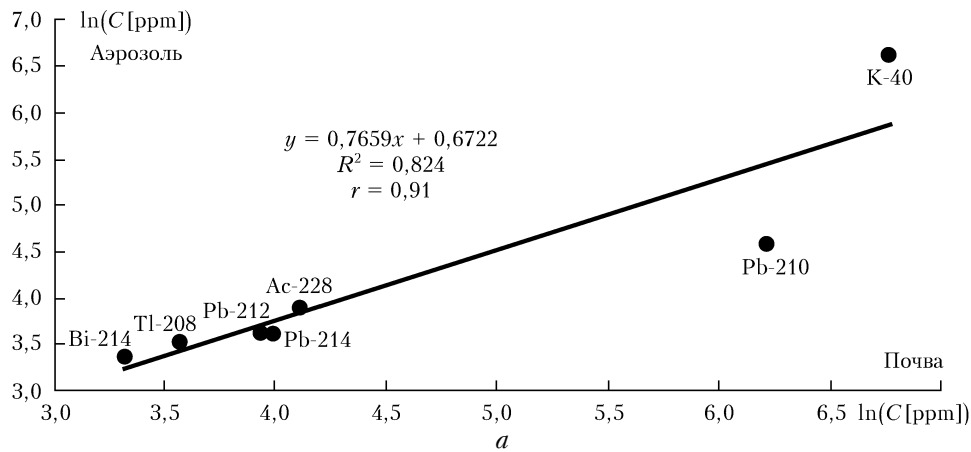


Рис. 8. Содержание радиоактивных изотопов в песке и в пылевом аэрозоле (а); отношение концентраций изотопов в пробах пылевого аэрозоля и в пробах почвы пустыни Айвадж (б)

Таблица 3

Среднее, максимальное и минимальное содержание радиоактивных изотопов в пробах почв (σ – среднееквадратическое отклонение, V – вариация данных и ε – относительное отклонение)

Изотоп	$\langle C \rangle$	C_{\max}	C_{\min}	σ	V	ε
Pb-214	55,15	120,9	23,7	28,27	0,51	1,76
Bi-214	30,14	58,23	15,42	11,03	0,37	1,42
Pb-210	615	3480,2	56,52	999,84	1,62	5,57
Ac-228	56	81,88	14,46	23,18	0,41	1,20
Pb-212	54,26	138,83	34,58	23,78	0,44	1,92
Tl-208	40,48	105,34	18,5	19,99	0,49	2,15
K-40	891	2261	330	552,72	0,62	2,17

На рис. 9 представлено изменение содержания некоторых радиоактивных изотопов в почве Таджикистана с юга на север. Распределение содержания изотопов имеет многомодовый характер с максимумом в г. Душанбе. По характеру распределения можно сгруппировать изотопы Pb-214, Ac-228 и Bi-214 (с вариацией до 80 Бк/кг) и отдельно Pb-212 и Tl-208 (с вариацией до 50 Бк/кг), а K-40 имеет вариацию до 1100 Бк/кг.

На рис. 8, 9 приведены коэффициенты детерминации для каждого изотопа. Самый высокий коэффициент корреляции 0,99 получен для распределения изотопа Pb-214, а самый низкий коэффициент корреляции для K-40 (0,28). К северу наблюдается рост концентрации изотопов, что, возможно, связано с влиянием миграции радионуклидов в районе хвостохранилища отходов переработки урановой руды на заводах Северного Таджикистана, оставшихся со времен Советского Союза. Из 10 хвостохранилищ

восемь частично реабилитированы и в настоящее время не представляют опасности для окружающей среды и здоровья населения. Но два хвостохранилища – Фабрика бедных руд (ФБР) в г. Истиклол (бывший Табошар) и самое большое в Центральной Азии хвостохранилище «Дегмай» площадью около 90 га, вблизи селения Гозиен Гафуровского района – являются открытыми. Следует отметить, что Северный Таджикистан находится на краю Ферганской долины, с двух сторон окружен горами средней высоты и образует своеобразную аэродинамическую трубу, что периодически создает сильные ветры, способствующие распространению пыли и частиц хвостохранилищ, в том числе и радионуклидов, по всей долине. На протяжении многих лет радиоактивные материалы распространяются по всему региону, и за счет атмосферных осадков, ветровой и водной эрозии площадь загрязненных территорий вокруг этих объектов постепенно увеличивается.

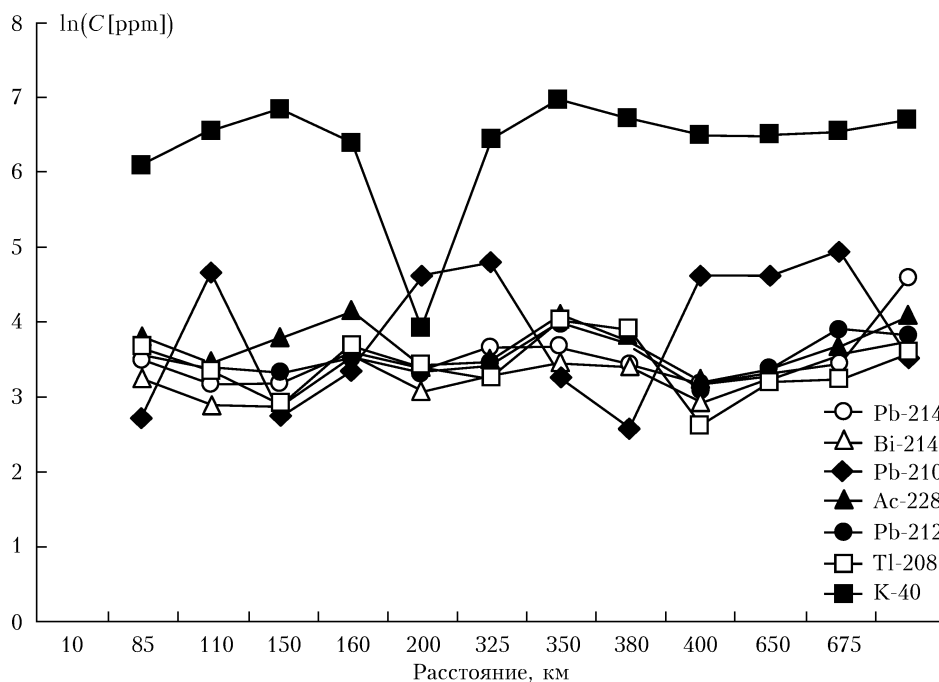


Рис. 9. Содержание радиоактивных изотопов в почве Таджикистана с юга на север, измеренное методом гамма-радиометрического анализа

Заклучение

В пробах пылевого аэрозоля обнаружено повышенное содержание Ca, Zn, Sr по сравнению с пробами почвы зоны распространения пылевой мглы. В почве зоны распространения пылевой мглы в течение 2008–2010 гг. концентрация элементов Cr, Rb, Eu, Cs и Co уменьшается, а концентрация элементов Mn, Ba, Ce, La, Yb и Th возрастает. Для остальных элементов обнаружен максимум в 2009 г.

В аридной зоне юга Таджикистана обнаружены более высокие концентрации Sb (в 4,5 раза), Ba (3,3), Hf (1,55), Cs (1,35), Au, U, As, Yb (1,3) и Mn (1,2), чем в субаридной зоне, сравнимые значения Ce, Rb, La, Zn, Cr, Co, Eu, Sc, Tb, Th и более низкие концентрации Na (0,53), Ca (0,70). Такой факт свидетельствует о существенном различии состава почв в этих районах.

Статья выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект Т-1688).

1. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
2. Алексеев Ю.Г. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987. 142 с.
3. Алексеенко В.А. Геохимия ландшафта и окружающая среда. М.: Недра, 1990. 142 с.
4. Lantry R.S., Mackenzie F.T. Atmosphere trace metals global cycles and assessment of man's impact // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1979. V. 43, N 4. P. 511–525.
5. Lisk D.J. Trace metals in soils plant and animals // *Adv. Agron.* 1972. V. 24, N 1. P. 267–325.

6. Valerio F., Brescianini C., Lastraioli S. Airborne metals in urban areas // *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 1989. V. 35, N 2. P. 101–110.
7. Альтшулер И.И., Ермаков Ю.П. Загрязнение атмосферы Земли // Актуальные проблемы природной среды за рубежом. М.: Изд-во МГУ, 1976. С. 19–42.
8. Назаров А.Г. Современная миграция тяжелых металлов в биосфере. М.: ВНИЦентр, 1980. 188 с.
9. Курпатовский И.П. Охрана природы: Справочник. М.: Химия, 1974. 376 с.
10. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
11. Никифорова Е.М. Загрязнение природной среды свинцом от выхлопных газов автотранспорта // *Вестн. МГУ. Сер. 5*. 1975. № 3. С. 28–36.
12. *Vheemalingeswara K.* Geochemical exploration data: utility in environmental studies // *Rapp. och medd.* 1991. N 69. P. 123–125.
13. Абдуллаев С.Ф., Назаров Б.И., Маслов В.А. Распределение природной и техногенной радиоактивности на образцах почвы и пылевой мглы юга Таджикистана // 17-й Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 2011. С. 49–52.
14. 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 атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 3. С. 187–193.
15. *Материалы семинара, посвященного 70-летию А.А. Джураева.* Душанбе: ООО «Эр-граф», 2012. 142 с.
16. Абдуллаев С.Ф., Шукуров Т., Марупов Р., Назаров Б.И. Исследование проб почв и пылевого аэрозоля методом ИК-спектроскопии // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 2. С. 166–171.

S.F. Abdullaev, V.A. Maslov, B.I. Nazarov, U. Madvaliev, A.A. Juraev, T. Davlatshoev. Dynamics of the distribution of heavy metals and radioactive isotopes in soil and dust aerosol samples from south of Tajikistan.

The paper considers the distribution of heavy metals, the most dangerous contaminants of soil. In the composition of dust aerosol samples, an increased content of Ca, Zn, and Sr is shown in comparison with soil from zone of dust haze spread. In the soil of the zone of dusty haze in 2008–2010, concentration of Cr, Rb, Eu, Cs, and Co was reduced, and of Mn, Ba, Ce, La, Yb, and Th was increased; concentrations of other elements were maximal in 2009. The dynamics of the content of isotopes in the samples of dust haze, collected in 2007–2010, was studied. Distribution of isotopes in the soil from the south to the north of Tajikistan has been uneven, with a maximum in Dushanbe.