

УДК 551.521.3, 551.583
ББК Д217 с Б12

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ
РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ И ТЯЖЕЛЫХ
МЕТАЛЛОВ В ОБРАЗЦАХ ПОЧВЫ И ПЫЛЕВОГО
АЭРОЗОЛЯ НА ПРАВОМ БЕРЕГУ СЫР-ДАРЬИ В
ПРЕДЕЛАХ ХУДЖАНДА**

Рахматов Мухамади Нуридинович -
преподаватель кафедры общей физики и
твёрдого тела ХГУ имени академика
Б.Гафурова, (Республика Таджикистан, г.
Худжанд),
e-mail: muhamadi.rahmatov@yandex.ru

**ТАДҚИҚОТИ КОНСЕНТРАТСИЯИ ИЗОТОПҲОИ
РАДИОАКТИВӢ ВА МЕТАЛЛҲОИ ВАЗНИН ДАР
НАМУНАҲОИ АЭРОЗОЛИ АТМОСФЕРА ВА ХОК
ДАР СОХИЛИ РОСТИ СИРДАРӢ ДАР ХУДУДИ
ХУЧАНД**

Раҳматов Муҳаммадӣ Нуридинович -
омӯзгори кафедраи физикаи умумӣ ва
ҷисмҳои сахт ДДХ ба номи академик
Б.Гафуров (Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш.
Хучанд),
e-mail muhamadi.rahmatov@yandex.ru

**RESEARCH ON THE CONTENT OF RADIOACTIVE
ISOTOPES AND HEAVY METALS IN SOIL AND DUST
AEROSOL SAMPLES ON THE RIGHT BANK OF THE
SYR-DARIA WITHIN KHUJAND**

Rahmatov Muhamadi Nuridinovich -
Theacher at the Department of General
Physics and Solid State Khujand State
University named after academician
B.G.Gafurov (Tajikistan Republic, Khujand),
e-mail muhamadi.rahmatov@yandex.ru

Ключевые слова: изотопный анализ, элементный состав, радиоактивные изотопы, тяжёлые металлы, корреляционный анализ, обратные траектории, атмосферный аэрозоль.

Представлены результаты исследования элементного состава образцов почв и проб атмосферного аэрозоля, собранных на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда. Проведён анализ данных о распределении радиоактивных изотопов уранового и ториевого рядов, ^{40}K и других техногенных изотопов. Полученные результаты сопоставлены с данными Юго-Центрального Таджикистана. Представлены межгодовые вариации содержания некоторых исследованных ТМ в пробах аэрозоля на правом берегу Сыр-дарьи в пределах Худжанда. Среднее высокое содержание свинца (284,83 ррт) в 2019 г., мышьяка (43,73 ррт) в 2020 г., цинка (2426,2 ррт) зафиксированы в 2021 г. Самая минимальная средняя концентрации Pb (29,4 ррт) и Zn (65,3 ррт) отмечена в 2017 г., минимальная среднее значение As (9,6 ррт) было получено в 2021 г. Проведён корреляционный анализ концентраций некоторых тяжёлых металлов. Корреляция между концентрациями многих тяжёлых металлов мала, средняя корреляция в пробах атмосферного аэрозоля наблюдается между Cu и TiO_2 ($r = 0,62$) и высокая корреляция обнаружена между концентрациями Sr и Cr ($r = 0,8$), As и Cu ($r = 0,74$), Co и MnO ($r = 0,83$). Значительная положительная корреляция в пробах почв отмечена между концентрациями Pb и Zn, MnO и TiO_2 ($r = 0,9$). Кроме того, были обнаружены высокие корреляции между As и Cu, V и TiO_2 ($r = 0,8$). Построены обратные траектории движения воздушных масс по методике HYSPLIT для выяснения места расположения источников образования пыли, в которой отмечены высокие концентрации цинка.

Вожаҳои калидӣ: таҳлили изотопҳо, таркиби элементҳо, изотопи радиоактивӣ, металлҳои вазнин, таҳлили коррелятсия, траекторияҳо, аэрозолҳои атмосфера.

Натиҷаҳои тадқиқоти таркиби унсурҳои намунаҳои хок ва намунаҳои аэрозоли атмосфера, ки дар соҳили рости Сирдарё дар доҳили Хучанд чамъ карда шудаанд, оварда шудааст. Таҳлили маълумот дар бораи паҳншавии изотопҳои радиоактивӣ қатори уран ва торий, ^{40}K ва дигар изотопҳои техногенӣ гузаронида шуд. Натиҷаҳои ба даст овардашуда бо маълумотҳои қисми ҷанубӣ-марказии Тоҷикистон муқоиса карда шудааст. Тағйироти байнисолони концентратсия баъзе металлҳои вазнини омӯхташуда дар намунаҳои аэрозол дар соҳили рости дарёи Сир дар ҳудуди Хучанд оварда шудаанд. Миқдори миёнаи баланди сурб (284,83 ррт) дар соли 2019, мышьяк (43,73 ррт) дар соли 2020, руҳ (2426,2 ррт) дар соли 2021 ба қайд гирифта шудааст. Концентратсияи минималии миёнаи Pb (29,4 ррт) ва Zn (65,3 ррт) дар 2017, ҳадди ақали миёнаи As

(9,6 ppm) дар соли 2021 ба даст оварда шуд. Таҳлили коррелятсияи консентратсияи баъзе металлҳои вазнин гузаронида шуд. Коррелятсияи байни консентратсияи аксари металлҳои вазнин наст аст, коррелятсияи миёна дар намунаҳои аэрозоли атмосфера дар байни Cu ва TiO_2 ($r = 0,62$) ба мушоҳида расид ва коррелятсияи баланд байни консентратсияи Sr ва Cr ($r=0,8$), ва Cu ($r = 0,74$), Co ва MnO ($r = 0,83$) ба қайд гирифта шуд. Дар намунаҳои хок коррелятсияи назарраси мусбат байни консентратсияи Pb ва Zn, MnO ва TiO_2 ($r = 0,9$) ба қайд гирифта шуд. Илова бар ин, байни As ва Cu, V ва TiO_2 ($r = 0,8$) коррелятсияи баланд ошкор карда шуд. Бо усули HYSPLIT траекторияҳои баръақси ҳаракати массаи ҳаво барои муайян кардани ҷойгиршавии манбаъҳои пайдоиши чанг, ки дар онҳо консентратсияи баланди руҳ ба қайд гирифта шудааст, сохта шуд.

Key words: isotope analysis, elemental composition, radioactive isotope, heavy metals, correlation analysis, backtrajectories, atmospheric aerosol.

The results of a study of the elemental composition of soil samples and atmospheric aerosol samples collected on the right bank of the Syr-Darya within Khujand are presented. An analysis of data on the distribution of radioactive isotopes of the uranium and thorium series, ^{40}K and other technogenic isotopes was carried out. The obtained results are compared with the data of South-Central Tajikistan. Interannual variations in the content of some studied HMs in aerosol samples on the right bank of the Syr Darya within Khujand are presented. The average high content of lead (284.83 ppm) in 2019, arsenic (43.73 ppm) in 2020, zinc (2426.2 ppm) was recorded in 2021. The lowest average concentration of Pb (29.4 ppm) and Zn (65.3 ppm) was noted in 2017, the minimum average value of As (9.6 ppm) was obtained in 2021. A correlation analysis of the concentrations of some heavy metals was carried out. The correlation between the concentrations of many heavy metals is low, an average correlation in atmospheric aerosol samples is observed between Cu and TiO_2 ($r = 0.62$) and a high correlation is found between the concentrations of Sr and Cr ($r = 0.8$), As and Cu ($r = 0.74$), Co and MnO ($r = 0.83$). A significant positive correlation in soil samples was noted between the concentrations of Pb and Zn, MnO and TiO_2 ($r = 0.9$). In addition, high correlations were found between As and Cu, V and TiO_2 ($r = 0.8$). The reverse trajectories of air mass movement were constructed using the HYSPLIT method to determine the location of the sources of dust formation, in which high concentrations of zinc were noted.

Проблема экологического состояния окружающей среды с каждым годом приобретает всё большую актуальность. Одним из ключевых факторов, серьезно влияющих на здоровье человека, является атмосферный аэрозоль (АА). Тяжелые металлы (ТМ), которые содержатся в частицах аэрозолей, оказывают токсическое воздействие на организм человека. Анализ элементного состава пылевого аэрозоля и почв позволяет составить карту опасных регионов и определить источники образования загрязнений. В данной работе поставлена задача определить распределение ТМ и радиоактивных изотопов в пробах атмосферного аэрозоля и почв на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда. Для территории Северного Таджикистана такими источниками загрязнений являются транспорт, цементные заводы, открытые хвостохранилища, расположенные в Дигмае, Истиклоле и др. На территории Ферганской долины все выбросы и сбросы загрязняющих веществ в окружающую среду остаются в долине. Кроме того, Таджикистан расположен в глобальном поясе, через который передвигается пыль с крупнейших пустынь Африки и Азии, и эта пыль, пришедшая издалека, также частично осаждается в пространстве Согдийской области [1-13].

В переносе ТМ и радиоактивных загрязнений большую роль играют атмосферные процессы, в частности, атмосферные аэрозоли, переносящие частицы на большие расстояния от места пылевого выброса. Предотвращение техногенного внесения ТМ и радиоактивных изотопов (РА) в окружающую среду (ОС) – это серьезная научная проблема. Радиоактивные элементы попадают в ОС в процессе производства ядерного топлива, эксплуатации атомных электростанций, но, и что немаловажно, в результате хранения радиоактивных отходов, обращение с которыми требует особого внимания и дополнительных затрат для принятия наиболее рационального решения [1-4].

На территории Согдийской области сосредоточено достаточное количество месторождений руд радиоактивных и тяжёлых металлов, с другой стороны, практически все земли Северного Таджикистана, мало-мальски пригодные для вспашки, вовлечены в сельскохозяйственный оборот.

В Северном Таджикистане расположено десять крупнейших радиоактивных хвостохранилищ [4-11], три из них - в пределах Худжанда: Гафуровское хвостохранилище «Опытный завод» (в 10 км от областного центра Худжанда, не имеет санитарно-защитной зоны); хвостохранилище в Бустоне (бывший Чкаловск), площадью 18 га (в промышленной зоне, 200 м от гидromеталлургического завода и в 5 км от Худжанда); Худжандское хвостохранилище (в горах Моголтау; 1,5 км от Худжанда на высоте 500 м н. у. м.; радиоактивные отвалы в лощине между горным хребтом Моголтау занимают 6 га [4,11,13].

Настоящая статья посвящена изучению динамики изменения концентрации некоторых ТМ в пробах атмосферного аэрозоля, а также исследованию содержания ТМ и радиоактивных изотопов в пробах почв и АА на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда. Таким образом, представляемая статья является актуальной для Согдийской области и территорий с аналогичными природно-климатическими условиями и техногенно-усиленными уровнями загрязнённости окружающей среды тяжёлыми металлами и радиоактивными изотопами.

Полученные данные могут быть использованы в дальнейших мониторинговых исследованиях.

Материалы и методы исследования

Собранные пробы были использованы для проведения анализа элементного и изотопного состава почвы и атмосферного пылевого аэрозоля. Сбор проводился только из самого верхнего слоя почвы. Образцы пылевого аэрозоля собирались по графику, раз в месяц, в одном и том же месте.

Описание методики сбора проб и экспериментальных установок приведено в [5-9]. Гамма-радиометрический анализ радиоактивных изотопов проводился с помощью детектора производства фирмы «Канберра» на основе сверхчистого германия с относительной эффективностью в 10 %. Измерения проводились 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 Маринелли 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 [6,7].

Во всех отобранных почвенных образцах и АА методом рентгено-флуоресцентной спектроскопии были определены концентрации тяжелых металлов, которые относятся к разным классам опасности. Методика анализа объектов ОС реализована с помощью рентгенофлуоресцентного кристалл-дифракционного сканирующего спектрометра "СПЕКТРОСКАН МАКС G", имеющего сканирующий канал модели «G» [14].

Образцы устанавливались в спектрометр в специальных обоямах и кюветах, входящих в комплект прибора [15]. При этом используются следующие принадлежности: обойма с крышкой, кювета порошковая с прижимным кольцом, кювета фильтровальная с оправой, переходник, плёнка лавсановая (полиэтилентерефталатная марки ПЭТ-КЭ, толщиной 6 мкм). Пробы устанавливаются в обойму, снизу прижимаются пороном до полного прилегания поверхности пробы к обойме или переходнику и закрываются крышкой. Поверхность образца должна плотно прилегать к внутренней части кюветы, что не даст ей деформироваться в процессе измерений. Спектрометр позволяет одновременно изучать 10 проб, включая эталонный образец. Дальнейшая обработка происходит автоматически с выводом результатов на компьютер [14,15].

Статистический анализ полученных данных проводили с использованием общепринятых методов и пакета прикладных программ MS Excel for Windows (2013).

Содержание радиоактивных изотопов в почве и атмосферном аэрозоле

Целью данного исследования является получение данных, необходимых для анализа и количественной оценки содержания радиоактивных изотопов (источников гамма-излучения) в почвах и пылевого аэрозоля для выявления радиоактивных аномалий, объективной оценки и прогноза развития радиационной ситуации на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда. В связи с этим в настоящей работе обсуждаются новые результаты исследования содержания и изучения концентрации радиоактивных изотопов (^{40}K , ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{226}Ra , ^{228}Th , ^{228}Ac) в АА в почвах в пределах Худжанда. Исходя из цели исследования, сформулированы следующие задачи: исследовать особенности распределения радиоактивных изотопов в атмосферном аэрозоле и почве, сравнить полученные результаты исследований АА и почв на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда с юго-центральной частью Таджикистана.

Радиоактивность почвообразующих пород определяет среднее содержание радиоактивных изотопов в почве. Основными источниками гамма-излучения в природной среде являются изотопы уранового и ториевого рядов, а также изотопы калия ^{40}K . Излучаемые ими гамма-кванты попадают в энергетический интервал до 2615 кэВ. Гамма-спектрометрическое определение концентрации калия основано на регистрации радиоактивного изотопа калия ^{40}K , доля которого в естественных изотопах калия составляет 0,012% [5-9].

Изучение изотопного состава отобранных образцов почв и аэрозоля проводилось на базе инструментальных анализов при помощи аналитиков и оборудования лаборатории радиэкологии Агентства по ХБРЯБ НАНТ [16].

В табл. 1 приведены средние значения концентрации изотопов уранового и ториевого рядов, а также изотопа ^{40}K в пробах атмосферного аэрозоля и почв. Из табл. 1 видно, что соотношение изотопов в аэрозоле и в почве на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда только Pb-210 в 2,24 раза больше в аэрозоле, а других изотопов в почве больше, чем в пробах пылевого аэрозоля. Из табл. 1 видно, что в пробах атмосферного аэрозоля изотопы Th-228 и U-235 не обнаружены. Результаты проведённых исследований выявили незначительный диапазон значений удельной активности радиоактивных изотопов в почвах Худжанда: значения ^{40}K находятся в пределах от 1522,5 до 1989,4 Бк/кг, при среднем 1755,95 Бк/кг; среднее значение концентрации данного изотопа в пробах в 1,7 раза выше, чем в пробах почв юго-центрального Таджикистана (см. рис. 1) [6-9]. Значения ^{137}Cs – от 11,7 – до 87,7 Бк/кг, при среднем значении 49,7 Бк/кг; среднее содержание изотопа ^{137}Cs в пробах в 1,5 раза выше по сравнению с пробами почв юго-центральной части Таджикистана. Минимальная удельная активность ^{210}Pb составляет 1576,3 Бк/кг, максимальная – 2494,3 Бк/кг, при среднем значении – 2035,3 Бк/кг. Средняя удельная активность ^{212}Pb в пробах почв на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда в 4,7 раза, ^{214}Pb – в 26,9 раза, ^{214}Bi – в 18,2 раза, ^{226}Ra – в 3,8 раза, ^{228}Ac – в 3,9 раза выше, чем в юго-центральной части страны. По-видимому, это связано с техногенным радиоактивным загрязнением территории, в том числе с вредными выбросами промышленных объектов, находящихся в северном регионе.

Таблица 1. Соотношение концентрации изотопов в пробе аэрозоля и почв

Изотоп	аэрозоль	почва	$S_{\text{пыль}}/S_{\text{почва}}$
K-40	1449,1	1755,95	0,82
Cs-137	3,3	49,7	0,06
Pb-210	4564,6	2035,3	2,24
Pb-212	99,45	210,85	0,471
Pb-214	112,4	999,65	0,11
Bi-214	96,8	694,75	0,13
Ra-226	70,8	556,3	0,12
Th-228	-	3058,6	-
Ac-228	78,3	219,2	0,3

В пробах почв на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда изотоп ^{234}Th выявлен только в хвостохранилище Худжанда, а в остальных пробах значения ^{234}Th не зафиксированы.

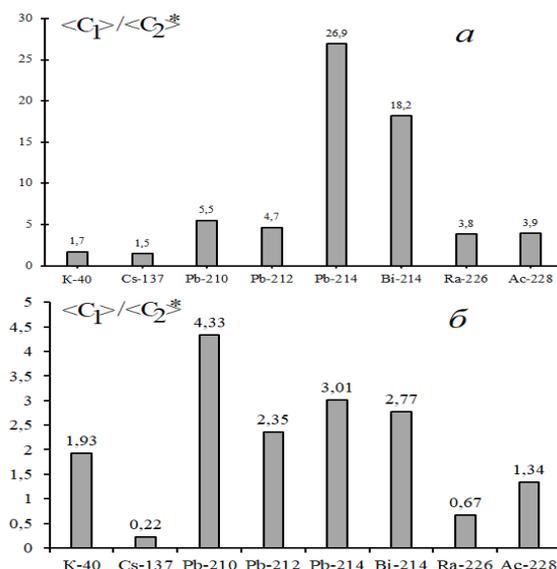


Рис. 1. Сравнительная оценка содержания радиоактивных изотопов в пробах почв (а) и атмосферного аэрозоля (б) на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда с юго-центральной частью Таджикистан ($\langle C_1 \rangle$ - среднее значения радиоактивных изотопов в пробах почв и АА на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда, $\langle C_2 \rangle^*$ - среднее значение радиоактивных изотопов в пробах юго-центральной части Таджикистана)

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что концентрация ^{40}K в атмосферном аэрозоле колеблется от 1214 до 1684,2 Бк/кг, при среднем значении – 1449,1 Бк/кг. Полученные данные (рис. 1 б) показывают, что во всех образцах АА концентрация радиоактивных изотопов на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда выше, чем в юго-центральной части страны, за исключением ^{137}Cs и ^{226}Ra . Из результатов анализа содержание радиоактивных изотопов значения ^{40}K – в 1,93 раза, ^{210}Pb – в 4,33 раза, ^{212}Pb – в 2,35 раза, ^{214}Pb – в 3 раза, ^{214}Bi – в 2,77 раза, ^{228}Ac – в 1,34 раза выше в частицах пылевого аэрозоля на правом берегу Сыр-дарьи в пределах Худжанда, чем в юго-центральной части страны [6-9]. На правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда аэрозольное загрязнение воздуха связано с выбросами автотранспорта, промышленных предприятий и переносом частиц аэрозоля с поверхности открытых хвостохранилищ данного региона [4, 11, 13]. Во всех этих случаях может происходить загрязнение воздуха радиоактивными изотопами. Изучение радиоактивного загрязнения атмосферы региона взвешенными частицами актуально для понимания и решения проблем регионального и глобального трансграничного переноса воздушных масс. Движением воздушных масс аэрозоль переносится на большие расстояния и оказывает значительное влияние на климат и экологическое состояние территорий.

На рис. 2 приведено соотношение содержание радиоактивных изотопов в пробах почв и в пылевом аэрозоле в виде корреляционно–регрессионных связей. Коэффициент корреляции $r = 0,89$. Аэрозольные частицы обогащены теми элементами, которые выше прямой линии (^{40}K , ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^{228}Ac), а концентрации элементов, которые находятся ниже прямой (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{226}Ra), в почве более высокие.

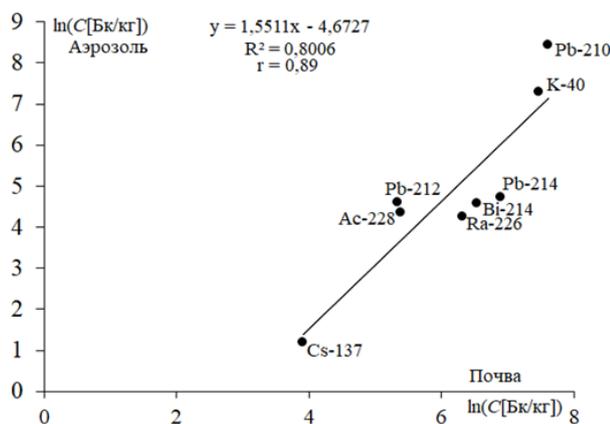


Рис. 2 Соотношение содержание радиоактивных изотопов в пробах почв и аэрозоля в виде корреляционно-регрессионных связей

Содержание элементов в почве и атмосферном аэрозоле

Содержание элементов в атмосферном аэрозоле, собранных в 2017–2021 гг. (рис. 3), свидетельствует о многомодовом распределении всех ТМ. Анализ содержания элементов первого класса опасности в пробах атмосферного аэрозоля на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда показал среднее высокое содержание свинца (284,83 ppm) в 2019 г., мышьяка (43,73 ppm) в 2020 г., цинка (2426,2 ppm), показатели зафиксированы в 2021 г. Самая минимальная средняя концентрации Pb (29,4 ppm) и Zn (65,3 ppm) отмечена в 2017 г., минимальное среднее значение As (9,6 ppm) было получено в 2021 г.

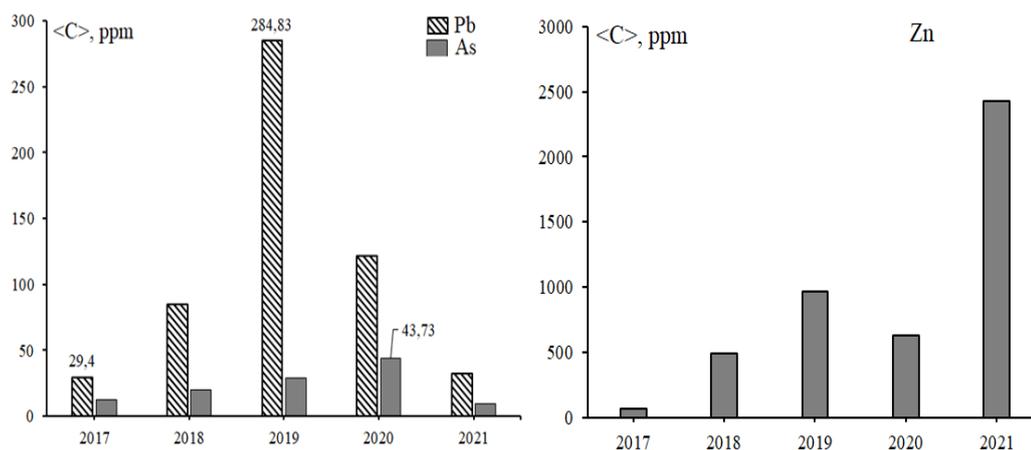


Рис. 3. Динамика содержания элементов первого класса опасности в пробах атмосферного аэрозоля в 2017–2021 гг.

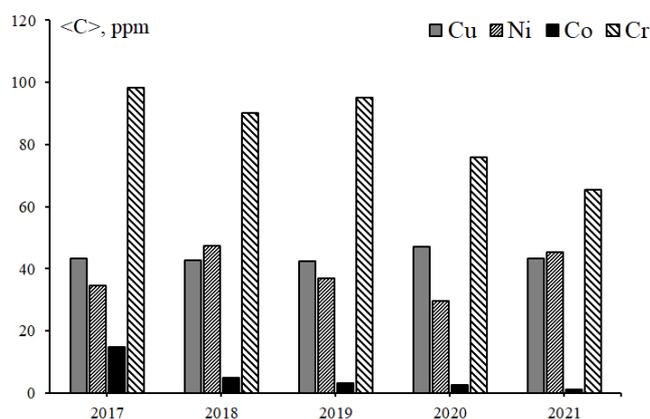


Рис. 4 Динамика содержания элементов второго класса опасности в пробах атмосферного аэрозоля в 2017–2021 гг.

Межгодовой ход средней концентрации элементов второго класса опасности (медь, никель, кобальт, хром) в АА (рис. 4) показывает, что максимальное содержание меди (47 ppm) отмечено в 2020 г., наибольшее содержание никеля (47,4 ppm) – в 2018 г. Наиболее высокие концентрации кобальта (14,9 ppm) и хрома (98,4 ppm) зафиксированы в 2017 г. Выявлены минимальные значения концентрации меди (42,5 ppm) в 2019 г., минимальное значение никеля (29,7 ppm) было получено в 2020 г., а для кобальта (1,2 ppm) и хрома (65,3 ppm) наблюдалось явное уменьшение в 2021 г.

Cu, Zn, Co, Cr и Ni – эти металлы считаются индикаторами сжигания жидкого топлива и влияния буровых работ. Zn является одним из индикаторных металлов техногенеза и попадает в атмосферу с промышленными выбросами при коррозии металлических частей инженерных сооружений [12]. Атмосферные твёрдые частицы, образующиеся при сжигании нефти, содержат повышенное количество этого металла, которое затем попадает в почву.

Динамика содержания Sr, MnO и V в пробах атмосферного аэрозоля в 2017–2021 гг. представлена на рисунке 5. Практически для Sr, MnO и V отмечается одинаковый ход

изменения концентрации, за исключением MnO (392,9 ppm), максимальное содержание которого отмечается в 2017 г. и почти одинаковые значения в 2018, 2019, 2020 и в 2021 гг. В литературе по анализу источника поступления загрязняющих веществ приводятся данные, свидетельствующие о том, что в атмосферу годовое поступление ванадия из антропогенных источников составляет $9 \cdot 10^4$ т за счёт промышленности и транспорта и $52 \cdot 10^3$ т за счёт энергетических предприятий. Общий входной поток ванадия в атмосферу составляет $4 \cdot 10^6$ т/г [17].

Для проб, собранных на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда в период с 2017 г. по 2021 г. (рис.6), распределение содержания Fe_2O_3 оказалось одномодовым с максимумом в 2021 г. По данным мониторинговых исследований, самая высокая средняя концентрация TiO_2 (0,5 %) в пробах атмосферного аэрозоля отмечена в 2013 году.

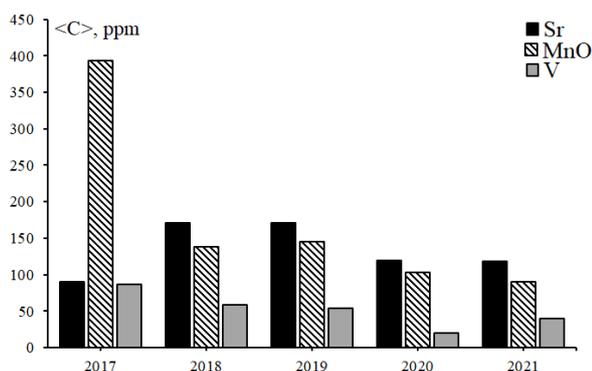


Рис. 5 Динамика содержания Sr, MnO и V в пробах атмосферного аэрозоля в 2017–2021 гг.

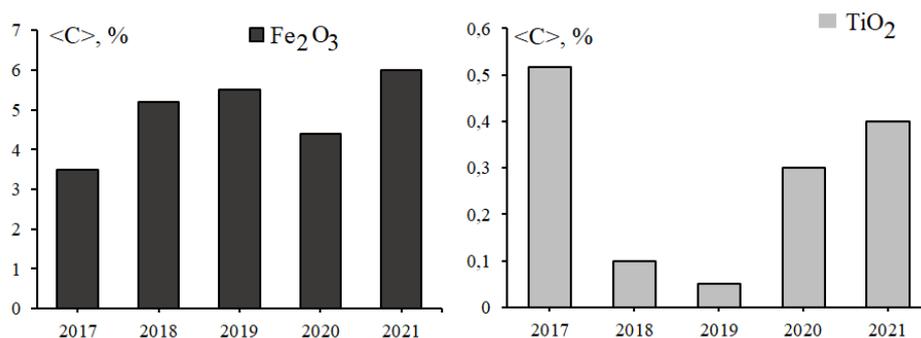


Рис. 6 Динамика содержания Fe_2O_3 и TiO_2 в пробах атмосферного аэрозоля в 2017–2021 гг.

На рис.7 в логарифмическом масштабе показаны корреляционные зависимости между содержанием некоторых ТМ в почве и в атмосферном аэрозоле. Коэффициент корреляции $r = 0,85$, состав атмосферного аэрозоля и почвы по этим элементам не очень близки. Атмосферный аэрозоль обогащён теми элементами, которые указаны выше прямой линии (Zn, Pb), а концентрация ТМ, находящихся ниже прямой линии (Cr, Ni, As, Co, Sr, Fe_2O_3 , TiO_2), выше в почве. Содержание MnO и Cu почти одинаково в пробах АА и почв на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда. В АА обнаружено повышенное содержание Pb (в 3,5 раза) и Zn (7,7), что, возможно, связано с антропогенными факторами.

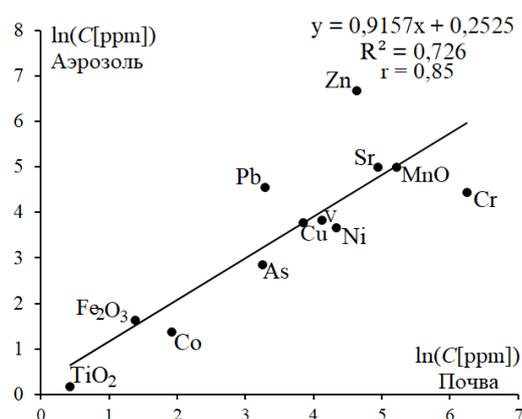


Рис.7. Отношение содержания ТМ в пробах атмосферного аэрозоля в виде корреляционно-регрессионных связей

Наши исследования показали, что содержание свинца в почвах города Худжанда (правобережье реки Сыр-Дарьи) колеблется от 3,13 ppm до 246,16 ppm; среднее содержание в пробах почв составило 26,90 ppm, что в 2,69 раза выше кларка (см. табл.2). Нами установлено, что средняя концентрация мышьяка в пробах почв составляет 19,48 ppm и в 3,9 раза превышает значение кларка. Установлено, что содержание Zn в пробах почв колеблется от 27,83 ppm до 392,7 ppm, среднее содержание в пробах почв составило 103 ppm. Среднее содержание цинка в почвах в 2 раза выше кларка. Коэффициент вариаций для элементов Pb, Ni, MnO, Cr и TiO₂ высокий, для остальных элементов низкий.

Таблица 2. Статистические характеристики содержания элементов в почвах на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда

Элемент	<C>	C _{min}	C _{max}	\bar{x}	V	<C>/K	C _{max} /K
Sr	139,74	95,99	198,02	33,02	0,24	0,47	0,66
Pb	26,90	3,13	246,16	30,33	1,13	2,69	24,61
As	19,48	0,89	63,36	14,34	0,74	3,90	12,67
Zn	103,04	27,83	392,7	44,96	0,44	2,06	7,85
Cu	46,67	40,94	52,79	3,40	0,07	2,33	2,63
Ni	75,74	12,97	1389,18	257,66	3,44	1,89	34,72
Co	6,67	0,63	13,88	3,87	0,58	0,67	1,38
MnO	184,87	87,81	1138,69	222,85	1,21	0,22	1,33
Cr	516,23	63,89	6286,5	1500	2,91	2,58	31,48
V	59,52	6,16	405,59	48,26	0,81	0,40	2,70
Fe ₂ O ₃ ,%	3,60	1,83	12,34	1,87	0,52	0,95	3,24
TiO ₂ ,%	0,46	0,01	4,18	0,65	1,41	0,11	0,995

В табл. 3 представлены статистические характеристики ТМ в пробах АА на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда. Статистическую обработку полученных результатов осуществляли с помощью программ Microsoft Office Excel 2013, достоверность оценивали по критерию Стьюдента.

Таблица 3. Вариационно-статистические данные содержания ТМ в пробах аэрозоля (2017–2021)

Параметр	Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe ₂ O ₃	MnO	Cr	V	TiO ₂
<C>	150,6	97	30,8	813,8	43,9	39,1	3,7	5	146,8	86,7	46,2	0,2
C _{max}	195,8	318,2	55,1	3035,5	51,2	77,2	14,9	6,4	692,9	101,9	92,8	0,5
C _{min}	90,5	6,2	9,9	65,3	40,8	20,8	0,3	3,1	89,1	63,8	2,2	0,001
\bar{x}	34,99	92,4	10,44	635,4	7	10,7	2,61	0,91	103,4	10,9	26,21	0,15
V	0,23	0,95	0,33	0,78	0,16	0,27	0,69	0,18	0,7	0,12	0,56	0,83
S _n	1,16	3,08	0,34	21,18	0,23	0,35	0,08	0,03	3,44	0,36	0,87	0,005

I	0,14	3,39	1,04	3,05	-0,48	0,32	3,05	0,09	0,13	-0,14	3,82	6,89
D	2,16	51,6	5,5	46,5	1,25	3,7	49,5	2,04	7,7	1,59	42,63	495,2
t _c	3,28	3,46	3,81	3,48	3,48	3,5	3,51	3,53	3,53	3,51	3,51	3,51
σ	20,99	58,5	7,2	404,2	4,5	6,84	1,68	0,58	62,06	6,54	15,7	0,09
C _{max} (t)	195,8	318,2	55,1	3035,5	51,2	77,2	14,9	6,4	692,9	101,9	92,8	0,5
	07.10.18	10.02.18	02.09.20	07.11.21	26.03.20	25.02.18	04.11.17	20.05.18	04.11.17	20.10.19	20.10.19	04.11.17
C _{min} (t)	90,5	6,2	9,9	65,3	40,8	20,8	0,3	3,1	89,1	63,8	2,2	0,001
	04.11.17	16.12.18	04.04.19	04.11.17	24.02.19	23.04.20	07.11.21	23.04.20	20.06.18	20.06.18	02.09.20	20.10.19

Примечание: <C>, C_{max} C_{min} – среднее, максимальное и минимальное содержание ТМ в пробах пылевого аэрозоля (ppm), соответственно, σ – среднее квадратичное отклонение, S_n – погрешность, I – геохимический индекс загрязнения среды. [C_{max},t. x] – место и время обнаруженного максимального значения содержания ТМ. [C_{min},t. x] – место и время обнаруженного минимального значения содержания ТМ.

Считается, что обратная траектория воздушных масс (ОТВМ) представляет наиболее вероятную историю движения предполагаемого загрязнителя по истечении некоторого временного промежутка [18-21]. Использование модели HYSPLIT для построения ОТВМ с целью выявления предполагаемого расположения источников образования пылевых вторжений, включая различные загрязнители в ОС, в настоящее время довольно часто упоминается в литературе [19-23].

В нашем случае ко времени сбора проб атмосферного аэрозоля на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанде с высоким содержанием цинка за весь период наблюдений использование метода траекторного моделирования с расчётом ОТВМ позволило определить области, где могли находиться вероятные источники загрязнения цинка. Таким образом, метод анализа траекторий переноса ВМ достаточно обоснован, информативен и повсеместно используется в научной практике. Более подробная информация о модели HYSPLIT может быть получена на [24]. На рис. 8 и 9 приведены ОТВМ, определённые по модели NOAA (<https://ready.arl.noaa.gov/hypub-bin/trajresults>) за 168 часов на высоте 1000 м, 2000 м, 3000 м от уровня Земли для дней с максимальным содержанием цинка в пробах АА, соответственно. На рис. 7 видно, что воздушные массы в виде единственной обратной траектории, пришедшей в Худжанд на высоте 1000 м, начинаются в Атырауской области (Казахстан). Видно, что траектории движения воздушных масс на высоте 1000 м направлены на восток, в сторону Кыргызстана, за семь суток поток воздушных масс достиг территории Согдийской области. Естественно предположить, что при переносе воздушных масс произошло осаждение большей части аэрозолей на поверхности исследуемой территории.

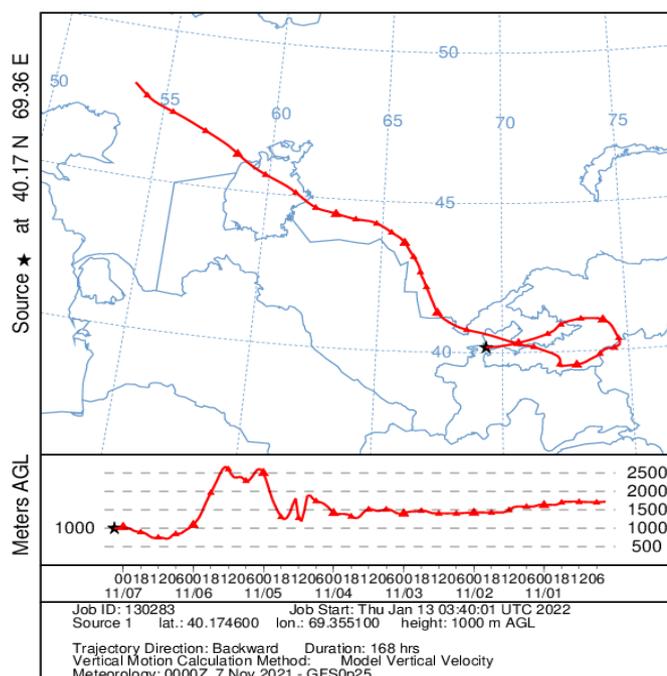


Рис.8. Обратные траектории движения потока воздушных масс, пришедших в Худжанда 11 ноября 2021 г., на высоте 1000 м за неделю до сбора пробы атмосферного аэрозоля с максимальным содержанием цинка

С целью выяснения происхождения загрязняющих веществ в частности Zn на трех высот (1000, 2000, 3000) по методике HYSPLIT были рассчитаны обратные траектории движения ВМ, пришедших на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда для 11 ноября 2021 г., указывают на доминирующие источники на высоте 2000 м – Эль-Каим (город в Ираке расположенный почти в 400 км северо-западнее Багдада вблизи сирийской границы). На высоте 3000 м траектории ВМ начинаются от Северного Ледовитого океана. Особый интерес представляют те траектории, которые проходят очень низко над поверхностью почвы, которые и могут осуществить выдувание пыли в более высокие слои воздуха.

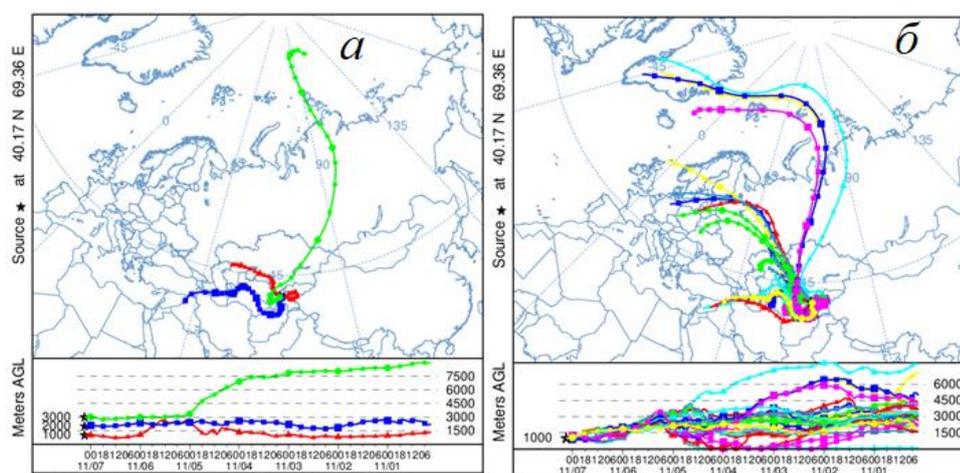


Рис. 9. Обратные траектории движения потока воздушных масс, пришедших в Худжанде 11 ноября 2021 г., за семь суток: а - на трёх высот; б- для ансамбля из 21 траекторий при максимальных значениях содержания цинка в пробах атмосферного аэрозоля

Рассчитан коэффициент корреляции между концентрациями ТМ в пробах АА. Как видно (табл.4) имеется высокая корреляция между Sr и Cr ($r = 0,8$), As и Cu ($r = 0,74$), Cu и TiO_2 ($r = 0,62$), Co и MnO ($r = 0,83$), и между Cr и V ($r = 0,65$).

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между концентрациями исследуемых веществ в пробах атмосферного аэрозоля на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда

ТМ	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe ₂ O ₃	MnO	Cr	V	TiO ₂
Sr	0,3	-0,66	0,11	-0,76	0,5	-0,04	0,48	-0,12	0,8	0,65	-0,83
Pb		0,03	0,20	-0,19	-0,03	-0,2	0,18	-0,10	0,3	0,25	-0,41
As			-0,08	0,74	-0,50	-0,2	-0,50	-0,22	-0,57	-0,69	0,50
Zn				-0,22	0,20	-0,38	0,27	-0,20	-0,17	0,30	-0,05
Cu					-0,58	-0,18	-0,70	-0,23	-0,73	-0,67	0,62
Ni						0,08	0,47	0,02	0,33	0,43	-0,31
Co							-0,39	0,83	0,39	0,35	0,32
Fe ₂ O ₃								-0,24	0,28	0,15	-0,58
MnO									0,43	0,43	0,17
Cr										0,65	-0,74
V											-0,45

Проведение корреляционного анализа позволило выделить несколько значимых соответствий в пробах почв (табл. 5), таких как Pb и Zn, MnO и TiO₂ ($r = 0,9$). Кроме того, были обнаружены высокие корреляции между As и Cu, V и TiO₂ ($r = 0,8$). Значимые положительные корреляционные связи между ТМ в пробах почв и атмосферного аэрозоля имеют двойное объяснение. С одной стороны, это характеризует высокий вклад почвенной составляющей в состав атмосферного аэрозоля, а с другой – отражает долговременную тенденцию формирования состава почв исследуемой территории.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между концентрациями исследуемых веществ в пробах почв на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда

	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe ₂ O ₃	MnO	Cr	V	TiO ₂
Sr	-0,06	-0,7	0,2	-0,6	-0,24	0,5	-0,11	-0,22	-0,18	0,1	-0,4
Pb		-0,08	0,9	-0,4	0,02	0,2	0,15	-0,01	-0,1	0,01	0,05
As			-0,2	0,8	-0,15	-0,5	-0,24	-0,29	-0,02	-0,42	-0,18
Zn				-0,5	-0,002	0,5	0,02	-0,05	-0,22	0,03	-0,05
Cu					-0,1	-0,6	-0,27	-0,25	-0,11	-0,38	-0,13
Ni						0,3	0,11	0,8	-0,04	0,21	0,70
Co							-0,32	0,5	-0,2	0,44	0,35
Fe ₂ O ₃								0,04	0,68	-0,09	0,09
MnO									-0,12	0,98	0,9
Cr										-0,19	-0,01
V											0,8

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллаев, М.А. Миграция искусственных и естественных радионуклидов в системе почва-растение / М.А. Абдуллаев, Дж. А. Алиев.- Баку: Элм, 1998. – 240 с
2. Романов Г.Н. Поведение радиоактивных веществ в окружающей среде / Г.Н. Романов, Д.А. Спиринов, Р.М. Алексахин // Природа. - 1990. - №5. - с. 53-58.

3. Стасов, В.В. Исследование связи радионуклидного состава почвенных фракций и атмосферных аэрозолей / В.В. Стасов, Л.В. Зорина, А.Н. Морозов, Е.А. Бураева // Инженерных вестник дона, №2,2007, с.103-110.
4. Назаров, Х.М. Экологические аспекты реабилитации урановых хвостохранилищ г. Истиклола Республики Таджикистан / Х.М. Назаров, Дж. А. Саломов, Н. Хакимов, Н.Н. Рахматов, Э.А. Эрматов // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. - 2015. - №2 (159). - с.87-92.
5. Абдуллаев, С.Ф. «Динамика распределения элементов и изотопов в образцах почвы и пыльной мглы юга Таджикистана» / С.Ф. Абдуллаев, В.А. Маслов, Б.И. Назаров и др. // Оптика атмосферы и океана. - 2013. - т. 26. - № 06. - с. 187-193.
6. Абдуллаев, С.Ф. Динамика распределения тяжелых металлов и радиоактивных изотопов в образцах почвы и пылевого аэрозоля юга Таджикистана / С.Ф. Абдуллаев, В.А. Маслов, Б.И. Назаров и др. // Оптика атмосферы и океана. -2014. - т. 27. - № 03. - с. 207-214.
7. Абдуллаев, С.Ф. Изотопный состав пылевого аэрозоля Таджикистана / С.Ф. Абдуллаев, В.А. Маслов, Б.И. Назаров, Х.И. Кадилова, Р.А. Кариева, А.М.Джураев, Т.Давлатшоев // Вестник ТНУ. - 2017. - №113. - с. 155-162.
8. Кодирова, Х.И. Изотопный состав почв Таджикистана / Х.И. Кодирова // Ученые записки ХГУ им. акад.Б.Гафурова. Естественные и эконом. науки. - 2017. - №2(41). - с.60-65.
9. Абдуллаев, С.Ф. Изотопный состав атмосферного аэрозоля Таджикистана / С.Ф. Абдуллаев, В.А. Маслов, Б.И. Назаров, Х.И. Кодирова Р.А. Кариева, А.М., Джураев, Т. Давлатшоев // Оптика атмосферы и океана.- 2018. - т. 30. - №2. - с.114-120.
10. Назаров, Х. М. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него / Х.М. Назаров, К.А. Эрматов, С.М. Бахронов, С.Г. Мухамедова, У.М. Мирсаидов // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 1. – с.115-121.
11. Муртазаев, Х. Миграция U и Th из радиоактивного хвостохранилища “Отходы бедных руд” Табшара / Х. Муртазаев, Н.Бозорова, Ш.Рахимбердиев // Ученые записки ХГУ, №2(33), Худжанд: 2015, с.56-60.
12. Голованова, О.А. Динамика загрязнения ионами тяжелых металлов поверхностных вод рек Сибирского региона / О.А. Голованова, Е.А. Маловская // Вестн. Ом. Ун-та.2016. №3. с.64-73.
13. Рахматов, М.Н. Содержание тяжелых металлов в пылевом аэрозоле и почвах Северного Таджикистана / М. Н. Рахматов, С.Ф. Абдуллаев // Оптика атмосферы и океана, г. Томск, 2021.Т.34. №02.с. 112-121.
14. <https://spectronxray.ru/devices/spe%D1%81trometers/spe%D1%81tros%D1%81an-maks-g/> [дата обращения 14.01.2022].
15. Пуховский, А. В. Рентгенофлуоресцентное определение тяжелых металлов в экологическом мониторинге почв / А.В. Пуховский, Т. Ю. Пуховская // Природобустройство. – 2013. - №2. - с. 11—
16. www.nrsa.tj [дата обращения 14.01.2022].
17. Alloway, B. J. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability / B. J. Alloway // 3rd ed. L. Springer. - 2013. - 613 p.
18. Василевич, М.И. Применение траекторного подхода с использованием модели HYSPLIT при оценке переноса воздушных масс от возможных источников эмиссии / М.И. Василевич, В.М. Щанов // Известия Коми научного центра УрО РАН, №3(39), Сыктывкар, 2019, с. 18-22.
19. Draxler, R.R. Horizontal dispersion parameters for long-range transport modeling / R. R. Draxler., A. D. Taylor // Journal of Applied Meteorology. -1982.-P.367-372.
20. Draxler, R.R. Description of the HYSPLIT-4 Modeling System / R.R. Draxler, G.D. Hess // Silver Spring: Air resources Laboratory, NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224/-1997. P.1-22.
21. Draxler, R.R. The accuracy of trajectories during ANATEX calculated using dynamic model analyses versus rawinsonde observations / R.R. Draxler // Journal of Applied Meteorology. -1991. -P. 1446-1467.
22. Hurley, P. PARTPUFF - A Lagrangian particle-puff approach for plume dispersion modeling applications / P. Hurley // Journal of Applied Meteorology. -1994. -P. 285- 294.
23. Moody, J.L. The use of atmospheric transport pattern recognition techniques in understanding variation in precipitation chemistry / J.L. Moody., J.A. Galusky, J.N. Galloway // Atmospheric Deposition. IAHS Publ. No. 179.-1989.-P. 119-125.
24. <https://ready.arl.noaa.gov/index.php> [дата обращения 14.01.2022].

LITERATURE

1. Abdullaev, M.A. Migration of artificial and natural radionuclides in the soil-plant system / M.A. Abdullaev, J. A. Aliyev.- Baku: Elm, 1998. - 240 p.
2. Romanov G.N. Behavior of radioactive substances in the environment / G.N. Romanov, D.A. Spirin, R.M. Aleksakhin // Nature. - 1990. - No. 5. - With. 53-58.
3. Stasov, V.V. Investigation of the relationship between the radionuclide composition of soil fractions and atmospheric aerosols / V.V. Stasov, L.V. Zorina, A.N. Morozov, E.A. Buraeva // Engineering Bulletin of the Don, No. 2, 2007, pp. 103-110.
4. Nazarov, Kh.M. Ecological aspects of the rehabilitation of uranium tailings in the city of Istiklol of the Republic of Tajikistan / Kh.M. Nazarov, J. A. Salomov, N. Khakimov, N.N. Rakhmatov, E.A. Ermatov // Proceedings of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Department of physical and mathematical, chemical, geological and technical sciences. - 2015. - No. 2 (159). - p.87-92.
5. Abdullaev, S.F. "Dynamics of the distribution of elements and isotopes in soil samples and dust haze in the south of Tajikistan" / S.F. Abdullaev, V.A. Maslov, B.I. Nazarov et al. // Optics of the atmosphere and ocean. - 2013. - v. 26. - No. 06. - p. 187-193.
6. Abdullaev, S.F. Dynamics of the distribution of heavy metals and radioactive isotopes in soil and dust aerosol samples from the south of Tajikistan / S.F. Abdullaev, V.A. Maslov, B.I. Nazarov et al. // Optics of the atmosphere and ocean. -2014. - v. 27. - No. 03. - p. 207-214.
7. Abdullaev, S.F. Isotopic composition of dust aerosol in Tajikistan / S.F. Abdullaev, V.A. Maslov, B.I. Nazarov, Kh.I. Kadirova, R.A. Karieva, A.M. Dzhuraev, T. Davlatshoev // Bulletin of TNU. - 2017. - No. 113. - p. 155-162.
8. Kodirova, Kh.I. Isotopic composition of soils in Tajikistan / Kh.I. Kodirova // Uchenye zapiski KSU im. academician B. Gafurov. Natural and economy. Sciences. - 2017. - No. 2 (41). - p.60-65.
9. Abdullaev, S.F. Isotopic composition of atmospheric aerosol in Tajikistan / S.F. Abdullaev, V.A. Maslov, B.I. Nazarov, Kh.I. Kodirova R.A. Karieva, A.M., Juraev, T. Davlatshoev // Optics of the atmosphere and ocean. - 2018. - v. 30. - No. 2. - p.114-120.
10. Nazarov, Kh. M. Evaluation of the potential radiation hazard of the Digmay tailings (Tajikistan) for the population living around it / Kh.M. Nazarov, K.A. Ermatov, S.M. Bahronov, S.G. Mukhamedova, U.M. Mirsaidov // Radiation hygiene. - 2019. - T. 12, No. 1. - p.115-121.
11. Murtazaev, H. Migration of U and Th from the radioactive tailing dump "Waste of poor ores" of Taboshara / H. Murtazaev, N. Bozorova, Sh. Rakhimberdiev // Scientific Notes KSU, No. 2(33), Khujand: 2015, p.56-60.
12. Golovanova, O.A. Dynamics of pollution by heavy metal ions of surface waters of the rivers of the Siberian region / O.A. Golovanova, E.A. Malovskaya // Vestn. Ohm. Univ.2016. No. 3. p.64-73.
13. Rakhmatov, M.N. The content of heavy metals in dust aerosol and soils of Northern Tajikistan / M.N. Rakhmatov, S.F. Abdullaev // Optics of the atmosphere and ocean, Tomsk, 2021.V.34. No. 02.p. 112-121.
14. <https://spectronxray.ru/devices/spe%D1%81trometers/spe%D1%81tros%D1%81an-maks-g/> [дата обращения 14.01.2022].
15. Pukhovskiy, A.V. X-ray fluorescence determination of heavy metals in ecological monitoring of soils / A.V. Pukhovskiy, T. Yu. Pukhovskaya // Environment. - 2013. - No. 2. - With. 11-14.
16. www.nrsa.tj [date of appeal 01.14.2022].
17. Alloway, B. J. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability / B. J. Alloway // 3rd ed. L. Springer. - 2013. - 613 p.
18. Vasilevich, M.I. Application of the trajectory approach using the HYSPLIT model in assessing the transfer of air masses from possible emission sources / M.I. Vasilevich, V.M. Shchanov // Proceedings of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, No. 3 (39), Syktyvar, 2019, p. 18-22.
19. Draxler, R.R. Horizontal dispersion parameters for long-range transport modeling / R. R. Draxler., A. D. Taylor // Journal of Applied Meteorology. -1982.-P.367-372.
20. Draxler, R.R. Description of the HYSPLIT-4 Modeling System / R.R. Draxler, G.D. Hess // Silver Spring: Air resources Laboratory, NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224/-1997. P.1-22.
21. Draxler, R.R. The accuracy of trajectories during ANATEX calculated using dynamic model analyses versus rawinsonde observations / R.R. Draxler // Journal of Applied Meteorology. -1991. -P. 1446-1467.
22. Hurley, P. PARTPUFF - A Lagrangian particle-puff approach for plume dispersion modeling applications / P. Hurley // Journal of Applied Meteorology. -1994. -P. 285- 294.

23. Moody, J.L. The use of atmospheric transport pattern recognition techniques in understanding variation in precipitation chemistry / J.L. Moody, J.A. Galusky, J.N. Galloway // Atmospheric Deposition. IAHS Publ. No. 179.-1989.-P. 119-125.
24. <https://ready.arl.noaa.gov/index.php>_[date of appeal 14.01.2022].