



DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-477-493

EDN: IMKDJA

УДК 628.474

Научная статья / Research article

Идентификация загрязнений мусоросжигательных заводов в атмосферных выбросах на примере Москвы и области

А.А. Ерхов 

Российский государственный геологоразведочный университет, Москва, Российская Федерация
✉ a-erhov@yandex.ru

Аннотация. Утилизация коммунальных отходов современными методами основана на научно-технических достижениях естественных наук и позволяет помимо уничтожения мусора получать электроэнергию, тепло, а также продукты переработки: топливо, масла, корма, компост, однако может оказывать неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Утилизация на мусоросжигательных заводах связана со сложностями процесса контроля выбросов, поскольку инсинераторы, чтобы избежать лишних затрат на логистику, размещают в районах с высокой плотностью населения, где много промышленных предприятий и транспортных средств, вносящих искажения в статистику выбросов от сжигания мусора. Цель исследования — рассмотреть принципиальную возможность идентификации находящихся в атмосферном воздухе веществ, связанных с выбросами мусоросжигательных заводов. Материалы и методы: у разных по назначению источников атмосферных выбросов разные значения соотношений концентраций простых веществ, переносимых воздухом. Для их оценки необходим качественный отбор проб воздуха и их анализ при помощи современных средств измерительного контроля. В Москве создана сложноорганизованная система государственного экологического мониторинга, состоящая из подсистем, изучающих разные аспекты загрязнений, что позволяет вести сбор и статистический анализ любых данных. Результаты: определение источника загрязнений, соотнесенного со сжиганием отходов, возможно сравнением отношений концентраций, то есть химический состав загрязнений в определенных соотношениях абсолютных показателей позволяет идентифицировать источник. Индикаторные соотношения элементов мусоросжигательных заводов: Cd/Cu, Cd/Pb, Cr/Pb (в 4–5 раз больше, чем в воздухе без загрязнений, и еще больше, чем от транспорта), Cu/Pb (сопоставимо с воздухом без загрязнений, но в 3 раза меньше, чем от транспорта). Заключение: развитие теории и методов переработки отходов невозможно без современного аналитического оборудования и организованной системы отбора проб и обработки данных измерений.

Ключевые слова: сжигание отходов, атмосферные выбросы, источник загрязнения, аналитическое оборудование

© Ерхов А.А., 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

История статьи: поступила в редакцию 16.12.2024; доработана после рецензирования 21.04.2025; принята к публикации 04.09.2025.

Заявление о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Erkhov A.A. Идентификация загрязнений мусоросжигательных заводов в атмосферных выбросах на примере Москвы и области // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 477–493. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-477-493>

Identification of pollution of incinerators in atmospheric emissions: case study of Moscow and the region

Alexander A. Erkhov

Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russian Federation
✉ a-erhov@yandex.ru

Abstract. The disposal of municipal waste by modern methods is based on the scientific and technical achievements of the natural sciences, and allows in addition to the destruction of garbage, to receive electricity, heat, as well as processed products: fuel, oils, feed, compost, however, can have an adverse effect on the environment. Disposal at incinerators is associated with the difficulties of the emission control process since incinerators to avoid unnecessary logistics costs, are placed in areas with a high population density — where there are many industrial enterprises and vehicles that distort the statistics of emissions from incineration. Objective: to develop a method for identifying substances in the atmospheric air associated with emissions from incinerators. Materials and methods: different sources of atmospheric emissions have different values of the ratios of concentrations of simple substances carried by air. To assess them, it is necessary to take high-quality air samples and analyze them using modern measuring instruments. A complex system of state environmental monitoring has been created in Moscow, consisting of subsystems that study various aspects of pollution, which allows collecting and statistical analysis of any data. Results: determining the source of pollution correlated with waste incineration is possible by comparing concentration ratios, that is the chemical composition of pollution in certain ratios of absolute indicators allows identifying the source. Indicator ratios of incinerator elements: Cd/Cu, Cd/Pb, Cr/Pb (4-5 times more than in air without pollution and even more than from transport), Cu/Pb (comparable to air without pollution but 3 times less than from transport).

Keywords: waste incineration, atmospheric emissions, pollution source, analytical equipment

Article history: received 16.12.2024; revised 21.04.2025; accepted 04.09.2025.

Conflicts of interest. The author declares no conflicts of interest.

For citation: Erkhov AA. Identification of pollution of incinerators in atmospheric emissions: case study of Moscow and the region. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):477–493. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-477-493>

Введение

Увеличение объемов промышленного и сельскохозяйственного производства сопровождалось экспоненциальным ростом выбросов в окружающую среду вредных простых веществ и соединений, что потребовало создания инженерной науки по защите природы, разработки и совершенствования способов и устройств осаждения выбросов, утилизации отходов, разработки методологических подходов рекультивации загрязненных мест, в технологических процессах производств — рекуперации — ввода замкнутых циклов: вторичного использования отходов в виде сырья и энергии в любом виде.

Проблема утилизации зреала десятилетиями — полигоны разрастались, в последние десятилетия исключительно высокими темпами¹ [1; 2], не просто нанося вред окружающей среде, но и снижая в этом аспекте качество жизни местного населения², а также выводя из хозяйственного оборота вблизи городов земли разных форм собственности (как природные объекты), имеющие высокую кадастровую стоимость (как объекты недвижимости), при этом полигоны не в состоянии справиться с быстрым естественным разложением отходов — механизмы самоочищения в условиях больших захораниваемых объемов работают слабо. Метод захоронения не является ни экологичным, ни технологичным, впрочем, после биостабилизации бiorазлагаемых материалов (до более стабильного состояния) полигон обеспечивает наименьшие показатели выбросов парниковых газов, в сравнении с другими методами обращения с отходами [3; 4]. Поэтому, а также с учетом научно-технологических достижений последних лет органы власти и конкретные исполнители вынуждены перенацелить основное направление утилизации коммунальных отходов на сжигание с выработкой энергии (вместо сокращения количества и опасности отходов), превращая процесс в закрытую производственную операцию на локальной площадке. По сути, мусоросжигательные заводы (МСЗ) — индустриальный способ уничтожения отходов потребления, без которого невозможна дальнейшая масштабная хозяйственная деятельность, обеспечивающая экономический рост и рост благосостояния³.

¹ Ежегодный прирост мусора в Москве составляет 5 млн тонн, в Подмосковье — 3,5, РФ — 43 (складывающегося из выбрасываемых каждым жителем 200–500 кг или 2 м³ отходов; для сравнения, в США — 808 кг, ЕС — 524, Японии — 399).

² Особо неприятны для обоняния запахи соединений природного разложения белков (в процессе круговорота органических веществ животных клеток), то есть гниения с выделением чрезвычайно дурно пахнущих аминов: путресцина, кадаверина, нейрина. При даже несильном ветре в воздух поднимаются клубы мелкой пыли и имеющие высокую парусность полимерные пакеты, а при возгорании — дым, — с воздухом от полигонов переносятся любые мелкие частицы веществ и газ (поверхностные и грунтовые воды здесь не рассматриваются).

³ Исторически сжигать отходы начали на заводах Англии еще в XIX веке, при этом в 1874 г. в Ноттингеме печь соединили с паровым двигателем, а уже в начале 90-х двадцатого столетия количество МСЗ выросло до 780 (700 утилизировали медицинские отходы), но к 1999 г. упало до ста десяти, а к 2001 г. до двенадцати (из-за неблагоприятного воздействия на климат CO₂, важным техногенным источником которого являются МСЗ: сжиганием тонны углерода даёт 3,7 тонны CO₂ [3]);

В обеспечение решения означенной задачи в Москве запущены три завода: в Алтуфьево «Спецзавод № 2» (законсервирован), Южном округе «Спец завод № 3» и Руднево «Спецзавод № 4», в Московской области в конце 2024 г. введен в эксплуатацию завод в Воскресенском городском округе, завод вблизи Наро-Фоминска заработает в конце 2025 г., запуск заводов в окрестностях Ногинска и Солнечногорска из-за нехватки финансовых средств временно приостановлен (все планировались к вводу в 2021 г.).

Однако, несмотря на строгий контроль качества атмосферного воздуха и доступности этой информации, население Москвы в частности, а в целом РФ и других развитых стран, обеспокоено возможной опасностью для здоровья сжигания коммунальных отходов — пищевых и бытового мусора, — действительно, отдельные эпидемиологические исследования широких популяционных представительств указывали на положительную связь врожденных аномалий с проживанием вблизи МСЗ [5], но их результаты малоубедительны ввиду субъективности оценок воздействия, отсутствия достоверных статистических данных, сочетанного влияния разных факторов риска, то есть исследования, проведенные по всему миру, не доказали серьезной онко-, мутаген-, токсико-, аллергенной опасности МСЗ из-за загрязнения ими воздуха превышающими ПДК ксенобиотиками. Впрочем, технологически старые заводы являются источником атмосферного загрязнения переходными металлами.

И тем не менее, их количественное отношение теряется в выбросах других источников загрязнений — в Москве и области наибольший вклад вносит промышленность (56 % от общих выбросов) и автотранспорт, причем количество автомобильных выбросов растет год от года (сейчас зарегистрировано 8,4 млн единиц)⁴; промышленные предприятия Москвы: а) металлургия, наиболее грязная, с долей промышленных выбросов 35 %, на разных этапах процесса выбрасывает пыль (например, графитовую), шламы, шлаки (бензапирен, переходные металлы), газ (H_2S , CO_2 , NO_2 , SO_2), б) энергетика с долей 27 % выбрасывает золу, оксиды азота и серы, в) машиностроение с выбросами CO , H_2S , переходных металлов.

Конечно, выбросы МСЗ существенно отличаются от загрязнений промышленности и транспортных средств по составу и концентрациям, распределениям в шлейфе на различных расстояниях от источников при одинаковых метеоусловиях⁵, поскольку коммунальные отходы представлены широчай-

в Западной Европе и Японии массовое возведение МСЗ началось во второй половине XX века, и к началу текущего столетия в ЕС сжигалось 23 % мусора; в РФ технология применяется с 1972 г. — в девяти городах построено тринадцать МСЗ первого поколения, то есть без газоочистного и теплоэнергетического оборудования, но в настоящее время работает шесть, сжигающих только 3 % всех отходов (в Германии построено пятьдесят МСЗ, в Японии — более полутора тысяч, в США и ЕС сжигается 50-60 % отходов).

⁴ Автомобиль за год выбрасывает 800 кг CO — высокотоксичного угарного газа, 200 — C_nH_m , 40 — NO_2 , металлы.

⁵ Низкая турбулентность атмосферных потоков приводит к плохому смешению с воздухом окружающей среды и дает стабильные значения в шлейфе и сохранение первоначального химического состава выбросов.

шим классом материалов из органических (50–70 %) и неорганических соединений: пищевых отбросов (в Москве 30–38 %), бумаги (25–30), стекла (5–8), текстиля (4–7), пластмасс (2–5), металла (3–4), резины и кожи (2–4), дерева (1,5–3), керамики (1–3) и проч.⁶, а именно: электронных компонентов домашней техники, медицинских (фармакологических, косметических и гигиенических) изделий, бытовой химии и иных предметов повседневности, меняющихся по составу во времени и по территории. Химический состав отходов: а) неметаллы: А (зольность) — 30–45 %, С — 30–35, N — 1–2, P — 0,5–1, S — 0,2–0,3; б) металлы переходные распространенные: Zn — 4 г/кг, Pb — 3, Cr — 2,8, Cu — 1, Mn — 0,2, Ni — 0,19, Cd — 0,050, Hg — 0,015, As (полуметалл) — 0,006.



Рис. 1. Распределение ПДК воды и кларков от порядкового номера и зарядового числа простых веществ

Источник: составлено А.А. Ерховым.

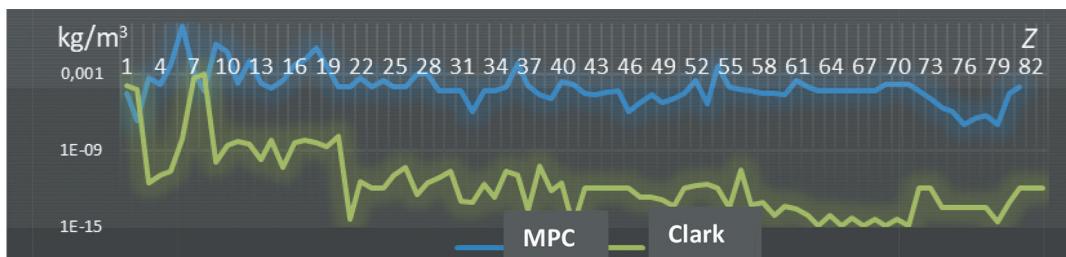


Figure 1. Distribution of MPC of water and clarke number from the serial number and charge number of simple substances.

Source: compiled by A.A. Erkhov.

Концентрацию веществ в природе в геохимии оценивают «кларковыми числами», а они коррелируемы с ПДК на 89 % (рис. 1) [6], но в сырье продуктов промышленности, изделий обихода, придающем им заданные потребительские свойства, концентрируются элементы с относительно низкими ПДК, то есть относительно токсичные. Даже по этим выборочным для периодической системы элементам видно, что люди потребляют, и их окружают продукты с ПДК меньшими чем в среднем в 16 раз и с кларками в 12, и поскольку химические

⁶ Прогноз на десять–пятнадцать лет снижает долю пищевых и бумажных почти в два раза, текстильных и проч. — увеличивает.

элементы оказываются в составе выбросов в виде продуктов неполного сгорания с металлами в форме солей и оксидов, в развитых странах для МСЗ установлены ограничения по переходным металлам⁷, монооксиду и общему органическому углероду, хлориду и фториду водорода, диоксиду и оксидам азота, диоксинам и фуранам, фосфору и сере, пыли⁸, также установлены санитарно-защитные зоны (в РФ — 1,0 км). Металлы и диоксины МСЗ значительно превышают фоновые концентрации, накапливаясь в почве и растительности, сельхозкультурах и продуктах животноводства, и если высокотемпературное — до 1250 °C (разные инсинераторы поддерживают различную температуру — от 600 до 2500 °C) воздействие на продукты выбросов в течение 4–5 с и окислительная среда разрушают диоксины и ПАУ⁹, исключая их повторное образование (а также уменьшая затраты на фильтры), то даже современные очистные установки не дают полного задержания переходных металлов.

Помимо главной — экологической — есть отдельная проблема утилизации сжиганием без вторичной переработки — возвращения материалов в материальный кругооборот, а также проблема экономической целесообразности — МСЗ имеют долгий срок окупаемости, но эти проблемы подчинены основной. Переработка — наиболее передовой метод — будущее утилизации отходов, однако пока недостаточно технологически развитый (половина коммунальных отходов легко и четверть потенциально перерабатываемые, но около десяти процентов — переработать трудно) и узкопредставленный даже в передовых развитых странах (рис. 2) [2]. Вместе с тем мусоросжигание теперь не считается абсолютно безвредным для окружающей среды и человека методом [3].

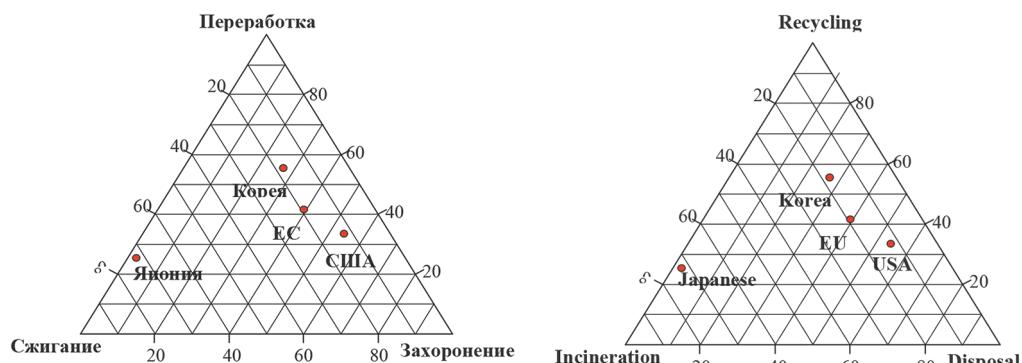


Рис. 2. Завершение жизненного цикла продукции в развитых странах

Источник: составлено А.А. Ерховым по [2].

Figure 2. End life cycle in developed countries

Source: compiled by A.A. Erkhov based on: [2].

⁷ Например, концентрация Cr в воздухе после запуска МСЗ возрастает в 1,5–3,0 раза, повышая и без того высокие городские фоновые концентрации до 40 000 раз (Cd в 20 000, Ni — 13 000, Pb — 5000, Cu — 3000), а PM₁₀ в шлейфах по розе ветров по земле в пределах 10 км от МСЗ снижается до 0,03–0,12 мкг/м³ (по году 20–30 мкг/м³), что меньше средних фоновых концентраций в 10–100 раз [3] и характеризует сложность проблемы.

⁸ В выбросах — 3–6 % золы, включающей 20 % сульфатов, хлоридов, фторидов, солей Pb, Zn, Hg, Cd, 20–30 % — нелетучих остатков — шлаков минеральных соединений Si в виде кварца, мелилита, альбита, оксиды Fe, Al.

⁹ Запрет в ЕС на выбросы диоксинов привел к их снижению до нуля.

Материалы и методы

Выбросы — это исходные данные для статистического анализа, выведения закономерностей, построения моделей, создания рекомендаций, поэтому требуют измерительного контроля, отсюда и система государственного экологического мониторинга — в Москве она сложно организована и состоит из подсистем, изучающих:

- а) промышленные выбросы, в том числе МСЗ, измеряемые на объектах непрерывно, а данные передаются в онлайн-режиме для учета и анализа в режиме реального времени;
- б) атмосферный воздух с целью определения концентраций взвесей исследуют удаленно в автоматическом режиме, и данные также передаются для создания прогнозных цифровых моделей;
- в) соотнесение полученных результатов с данными рассеивания атмосферных выбросов, зафиксированными ветровыми профилемерами, расчета температурных профилей атмосферы, измерений скоростей и направлений воздушных масс;
- г) водные объекты — физико-химических показателей веществ дна и берегов водоохраных зон, строения дна, ГИС, а также обработку данных дистанционного зондирования (ДДЗ);
- д) почвы и зеленые насаждения — результаты физико-химического состава почв, состояние древесины и листвы, обработку ДДЗ;
- е) подземные воды — уровень и температуру, истощение и загрязнение подземных вод;
- ж) централизованную обработку и анализ данных, в том числе работу над единой цифровой платформой, контроль полноты и качества данных, формирование отчетности, а также пространственную визуализацию данных;
- з) удаленное предоставление информации населению и надзорным органам с Web и SMS-информированием.

Таким образом, структура системы мониторинга атмосферного воздуха включает контроль промышленных выбросов на предприятиях, автоматические станции (вид исполнения — стационарный павильон (с информационным табло или без) и передвижная на автомобильной базе), мобильные лаборатории, службу оперативного контроля, химическую лабораторию, метеорологическую службу¹⁰.

В целом структура системы экологического мониторинга Москвы имеет три иерархических уровня:

- 1) территориальная наблюдательная сеть сбора данных: по атмосферному воздуху, промышленным выбросам, метеорологической обстановке, поверхностным/подземным водам, почве, геологии, зеленым насаждениям, шуму;

¹⁰ Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Мониторинг гидрологических, метеорологических и аэрологических условий в районах размещения объектов использования атомной энергии» (РБ-046-21).

2) цифровая платформа сбора, анализа и предоставления данных;

3) принятие управлений решений и информирование органов исполнительной власти (контрольно-надзорных: Росприроднадзора, Роспотребнадзора, органов прокуратуры, ДПиООС, Мосгорстройнадзора; МЧС; департамента транспорта (оценка эффективности транспортной политики); Москкомархитектуры (актуализация генплана города) и населения (на сайте в режиме реального времени, в ответах на обращения, подготовки ежегодных докладов).

В Московском регионе действуют 78 автоматических станций (рис. 3), в режиме реального времени контролирующих 21 показатель в воздухе: CO, CO₂, NO, NO₂, NO_x, O₂, O₃, NH₃, H₂S, SO₂, PM₁₀, PM_{2,5}, аммиак, бензол, метан, толуол, стирол, фенол, формальдегид, сумму углеводородов (полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) — продукты горения углеводородов и их производных — биологически активны, многие канцерогенны; индикаторным является бензпирен, но всего их 115 видов), для чего оснащены более чем 500 газоанализаторами исследовательского класса точности и 92 анализаторами взвешенных частиц размером до 10 мкм.

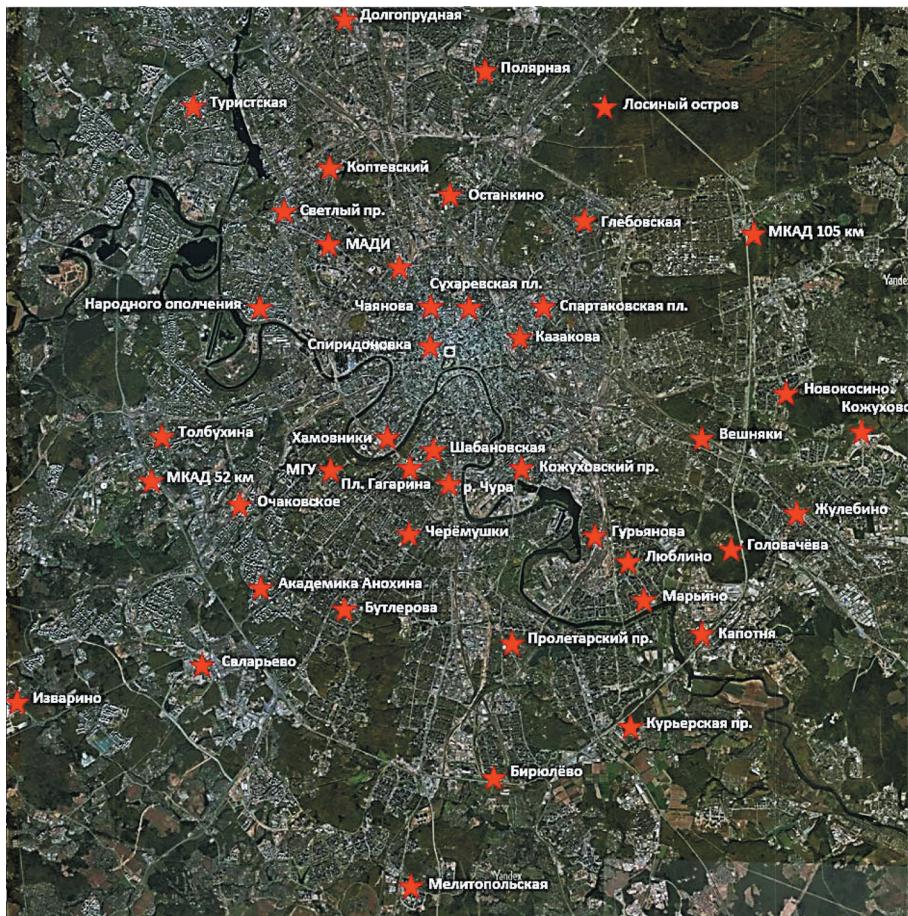


Рис. 3. Места расположения станций мониторинга атмосферного воздуха в Москве

Источник: составлено А.А. Ерховым.

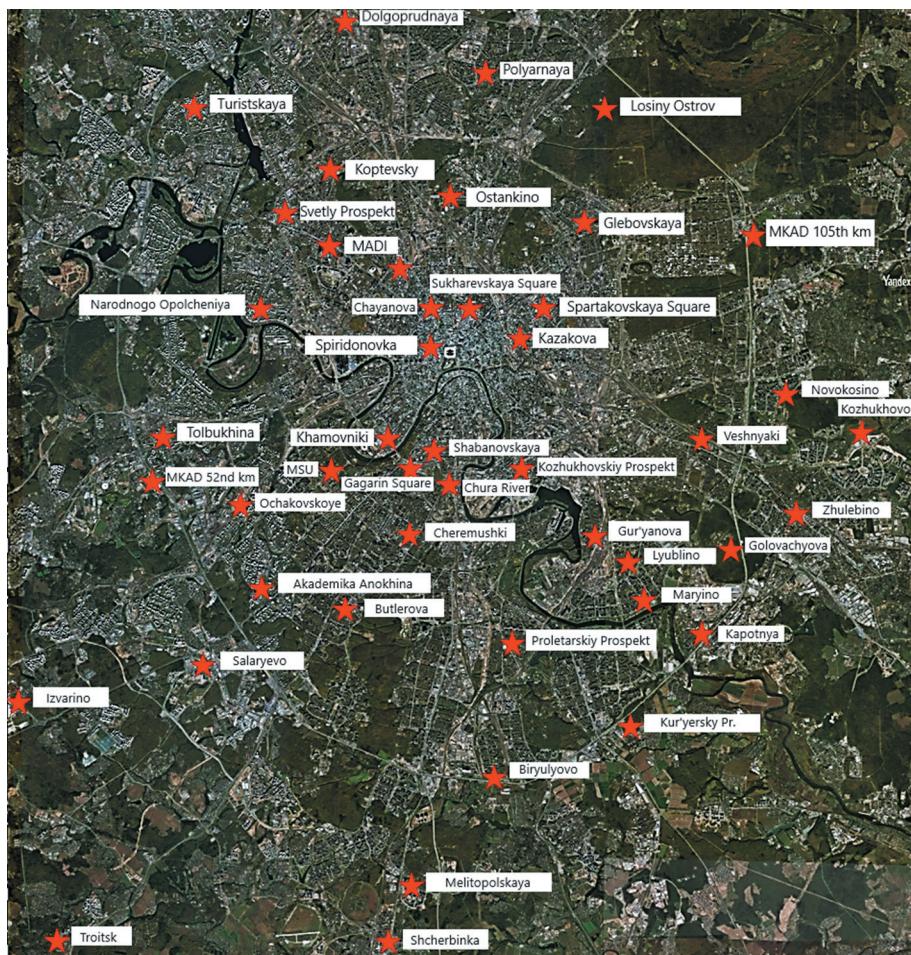


Figure 3. Locations of air quality monitoring stations in Moscow

Source: compiled by A.A. Erkhov.

Мобильные передвижные лаборатории производят отбор проб для лабораторного анализа и ведут экспресс-анализ в режиме реального времени по 20 основным загрязнителям: CO, NO, NO₂, SO₂, CH_x, CH⁻, CH₄, PM₁₀, PM_{2,5} и специфическим веществам: ароматическим углеводородам, ацетальдегиду, бензолу, ксиолу, формальдегиду, этилбензолу, H₂S, NH₃, HCl, HF. Количество обследований отдельных мест за последние 10 лет возросло в 10 раз — с 200 до более 2000 в год. Всего аналитическая лаборатория способна определять 684 показателя, в том числе 120 по атмосферному воздуху, для чего используется 300 методик количественных аналитических анализов, применяются все современные методы: спектральные, хроматографические, гравиметрия; хромато-масс-спектрометрия (табл. 1).

Анализ производственных выбросов направлен на выявление еще более специфичных веществ и соединений, номенклатура которых определяется технологией производства, и поскольку в утилизацию идут изделия различных производств различного класса опасности, выбросы МСЗ химически

особо разнообразны: обнаружение следов и анализ содержимого выбросов дымовых труб заводов сжигания коммунальных отходов направлено на переходные металлы: V, Cr, Mn, Ni, Cu, Cd, Hg¹¹, а также As и Pb и др.

Таблица 1

Вещества и методы определения

Группы веществ ⇒	Тип отбора ⇒	Метод определения
Металлы	На фильтр	Атомно-абсорбционная спектроскопия и спектроскопия со связанный плазмой
Фенол, формальдегид	В жидкие поглотители	Фотометрия — газоанализаторы передвижной экологической лаборатории
Оксиды азота, углерода, аммиак, диоксид серы, сероводород	В жидкие поглотители или прямые измерения	Фотометрия
Летучие органические соединения (бутан, ацетон, ксиолы, толуол и др.)	На металлические сорбционные трубы	Газовая хроматография
Серосодержащие органические соединения (тиолы, они же меркаптаны)	На кремниевые сорбционные трубы	Газовая хроматография
ПАУ (бензпирен)	Отбор на фильтры	Высокоэффективная жидкостная хроматография
Пыль мелкодисперсных фракций	Отбор на фильтры или прямые измерения	Гравиметрия — газоанализаторы передвижной экологической лаборатории

Источник: составлено А.А. Ерховым.

Table 1

Substances and methods of determination

Substance groups ⇒	Selection type ⇒	Determination method
Metals	Per filter	Atomic absorption spectroscopy and coupled plasma spectroscopy
Phenol, formaldehyde	Into liquid absorbers	Photometry gas analyzers (MEL) mobile environmental laboratories
Nitrogen oxides, carbon oxides, ammonia, sulfur dioxide, hydrogen sulfide	Into liquid absorbers or direct measurements	Photometry
Volatile organic compounds (butane, acetone, xylenes, toluene, etc.)	On metal sorption tubes	Gas chromatography
Sulfur-containing organic compounds (thiols, aka mercaptans)	On silicon sorption tubes	Gas chromatography
Surfactants (benzpyrene)	Filter sampling	High performance liquid chromatography
Fine dust	Selection for filters or direct measurements	Gravimetry gas analyzers (MEL) mobile environmental laboratories

Source: compiled by A.A. Erkhov.

Применяемые методы отбора учитывают направление, частоту и скорость ветра, а также рассеивание при атмосферной турбулентности и концентрации предыдущих отборов с высоким разрешением¹².

¹¹ Hg в воздухе находится в форме паров простого вещества — 7 % и хлоридов — 70 %.

¹² Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Мониторинг гидрологических, метеорологических и аэрологических условий в районах размещения объектов использования атомной энергии» (РБ-046-21).

Равновесность атмосферных процессов оценивают, как в микрометеорологии, параметром устойчивости: $\xi = z/L$, где z — высота измерения, L — длина Монина — Обухова, равная $L = \frac{u_*^3 \bar{\theta}_v}{kgq}$, где u_* — скорость трения воздуха, $\bar{\theta}_v$ — средняя виртуальная потенциальная температура, k — постоянная Кармана (0,4), g — ускорение силы тяжести, q — тепловой поток [К·м/с]; атмосфера неустойчива с интенсивным рассеиванием, если $-1000 < z \cdot L \leq -0,2$, нейтральная $-0,2 < z \cdot L \leq 0,2$ и спокойная $0,2 < z \cdot L \leq 50$. При устойчивости дымовая труба может находиться выше z , то есть выбросы над температурной инверсией не будут влиять на приземные концентрации.

Количество и оснащение станций слежения должно соответствовать не столько производственной активности в пределах и на прилегающих территориях, сколько при этом плотности населения, а расположение станций — пространственному распространению атмосферных выбросов, определяемому метеорологической ситуацией — направлением и скоростью движения воздуха, его плотностью, влажностью, температурой, альбедо, солнечной радиацией (ультрафиолетом), облачностью, осадками и т.д., то есть физическими свойствами среды, а также физической географией — формой рельефа, водными объектами, растительностью и проч. На практике число станций мониторинга зависит от множества случайных социально-экономических факторов, требующих четкого и непростого научного обоснования: суммы выделяемых средств, наличия специалистов, административного участия, активных граждан, наличия транспортных коммуникаций и др.

Результаты и обсуждение

Идентификация источника выбросов связана с их содержимым.

Глобальные экономические процессы при выстраивании между странами производственных цепочек и преимущественном распределении унифицированной готовой продукции (отличаясь пищевыми предпочтениями народов, о чем говорит различный видовой состав кишечной микробиоты) привели к однообразию химического состава выбросов МСЗ мегаполисов, при этом доступны и репрезентативны данные работы зарубежных МСЗ, имеющих большой опыт эксплуатации установок сжигания и осаждения веществ на системе фильтров перед выбросом в атмосферу.

На заводе пробы берут осаждением твердых частиц на кварцевых (при высоких температурах отбора) или фильтрах полизифирных/целлюлозных волокон (табл. 1) и после обработки плавиковой (фтористоводородной — для кварцевых) и азотной (перекисью водорода — для органических волокон) кислотами анализируют масс-спектрометрией с индуктивно связанный плазмой (ИСП-МС).

Концентрации в воздухе окружающей среды металлов As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Pt, V, Zn в PM₁₀ определяют путем отбора в пробоотборники в течение некоторого заданного времени, что позволяет обнаружить точечные

источники и определить изменения интенсивности, а полиэфирные/целлюлозные фильтры разлагают азотной кислотой; образцы крупных минеральных частиц, диоксида кремния целесообразно отбирать рукавными фильтрами.

Как показано выше, концентрации переходных металлов выбросов МСЗ находятся в последовательности $Zn > Pb > Cr > Mn > Ni > Cu > Cd > Hg > As > V$ (рис. 4), но прямыми измерениями сложно оценить, насколько они соотносятся с фоновыми и отличить от значений иных вблизи расположенных заводов металлургического/металлообрабатывающего/машиностроительного профиля, автодорог/автовокзалов/автотerminalов, вносящих количественные искажения в результаты исследования вещественного состава атмосферных примесей от сжигания мусора [5].

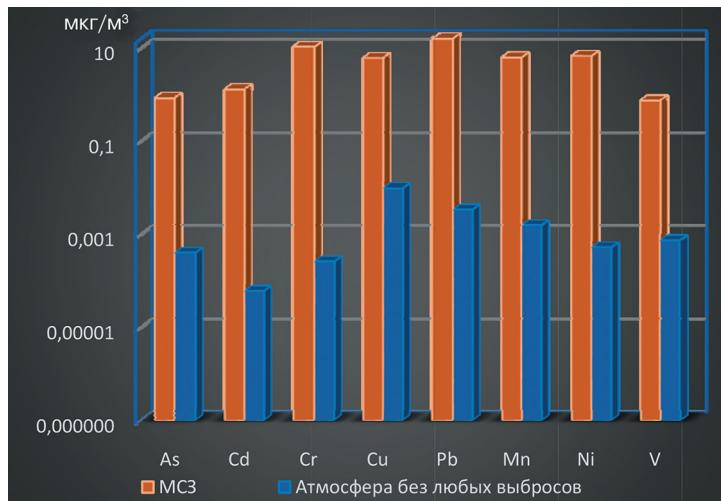


Рис. 4. Гистограммы медианных концентраций переходных металлов МСЗ и атмосферы на логарифмической шкале

Источник: составлено А.А. Ерховым.

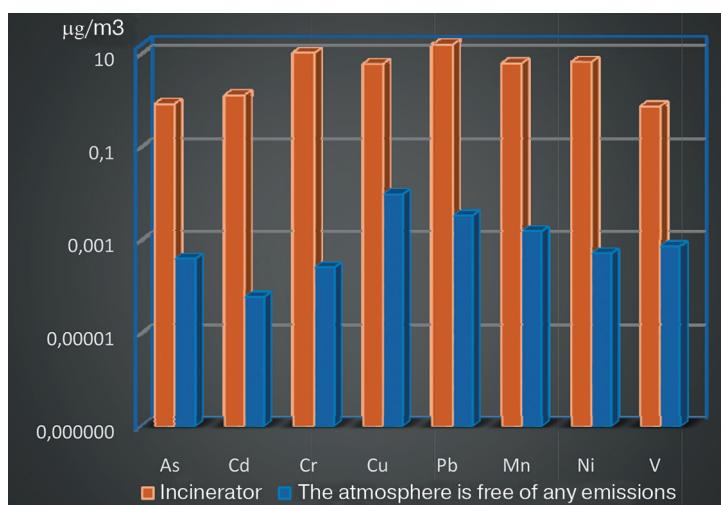


Figure 4. Histograms of the median concentrations of transition metals of the incinerator plant and atmosphere on a logarithmic scale

Source: compiled by A.A. Erkhov.

Из-за большого общего числа металлов и источников целесообразно как более информативное выделение отдельных индикаторных элементов или их групп в сочетании для выявления конкретного источника из совокупности. Например, Cr/Pb, Cu/Pb, Cd/Pb, Cd/Cu (рис. 5) в этом отношении дают показатель, позволяющий идентифицировать загрязнения МСЗ¹³, а число одновременно измеряемых отношений устанавливают исходя из преобладающего состава сжигаемых материалов: электротехника — большие концентрации Pb, Hg, Cd и Cr(VI), цветная печатная продукция и упаковочная бумага, древесина и трава, обувь и текстиль, а также полиэтиленовая пленка — Pb, Cr и Cd, пласти массы — Pb и Cd, и при этом соблюдаются условия:

а) концентрации должны быть измеримы;

б) данные можно систематизировать по дневным, недельным, сезонным и годовым изменениям (дневные колебания концентраций не отражаются в недельных выборках, тем не менее средние за неделю, вместе с метеоданными, указывают на источник);

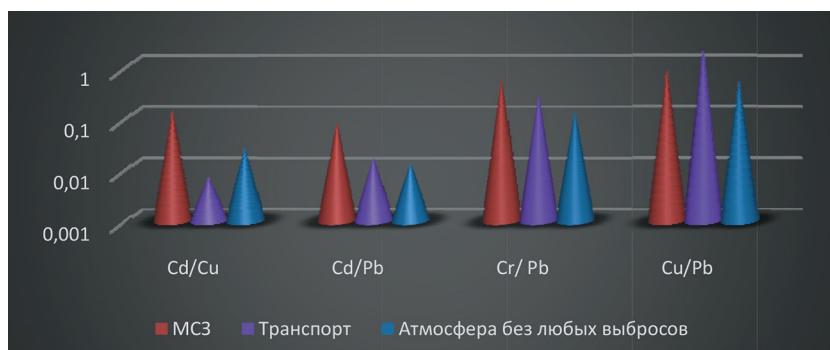


Рис. 5. Медианные значения соотношения металлов от разных источников на логарифмической шкале

Источник: составлено А.А. Ерховым.

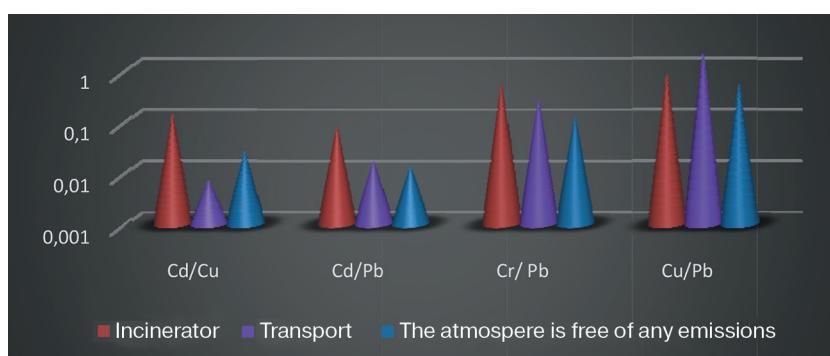


Figure 5. Median metal ratios from different sources on a log scale

Source: compiled by A.A. Erkhov.

¹³ Кроме МСЗ соотношения простых веществ можно использовать для идентификации других источников, например теплоходов, — V, Ni, S и C.

в) направление распространения выбросов в атмосфере от дымовой трубы до места измерения не меняется (на расстоянии 10 км все металлы имеют одинаковые скорости рассеивания и осаждения без уменьшения концентраций по мере удаления от МСЗ, также сохраняются их отношения в шлейфе).

От других источников тех же веществ разной интенсивности соотношение изменяется, что затрудняет их поиск. Например, Pb в основном выбрасывается автотранспортом, Cd – МСЗ, и их различные распределения представляют трудность в обнаружении МСЗ. Отличает эти металлы (Pb, Cr, Cd и Cu), делая их в указанных соотношениях индикаторными для МСЗ, высокая корреляция (св. 0,7) изменения собственных концентраций, их соотношения по времени и месту изменяются, образуя графическую осцилляцию — синусоиду с неравномерными по значениям амплитудами с относительно постоянными периодами. Cd — наиболее токсичен, с ПДК 0,000001 кг/м³, Pb — 0,00003, Cr — 0,0005 и Cu — 0,001; в указанных соотношениях они пропорциональны распределению кларков (рис. 6), и связаны аппроксимациями: Cd/Cu ≈ $\approx 0,02\ln(Cd/Pb) + 0,1 \approx 0,14\ln(Cr/Pb) + 0,6 \approx 0,4\ln(Cu/Pb) + 2,1$, Cd/Pb ≈ $\approx 0,3\ln(Cr/Pb) + 1,1 \approx 0,76\ln(Cu/Pb) + 3,5$, Cr/Pb ≈ $0,3\ln(Cu/Pb) + 1,6$.

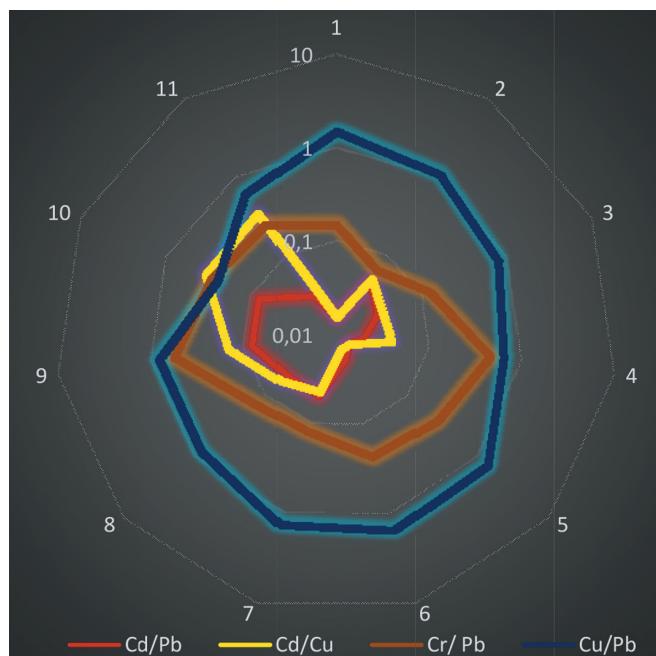


Рис. 6. Соотношения элементов выбросов различных МСЗ на логарифмической шкале

Источник: составлено А.А. Ерховым.

Figure 6. Ratios of emission elements of different incinerator plant on a logarithmic scale

Source: compiled by A.A. Erkhov.

Углеродный след МСЗ при рекуперации — выработке электроэнергии из готового тепла и горения горючих газов органических веществ отходов замечает в общей концентрации атмосферный диоксид углерода других источни-

ков, то есть пропорционально уменьшает выброс CO_2 от сжигания ископаемого топлива (газа) на предприятиях тепло- и электроэнергетики. Однако электрическая мощность [МВт], передаваемая МСЗ в сеть, может быть значительно ниже выработанной турбинами, поскольку определяется разностью произведенной и затраченной на работу завода¹⁴.

То есть установки сжигания для электросети — это «паразитная нагрузка» ($\approx 15\%$), и при отсутствии турбин они требуют внешнего источника. Рост числа МСЗ в прошлом как раз и был направлен на вытеснение газовых турбин ТЭС — перераспределение их доли в углеродном следе, однако полная декарбонизация сжиганием невозможна, ввиду высокоуглеродного состава топлива и отходов: углеродоемкость топлива ТЭС в настоящее время $260\text{--}340 \text{ гCO}_2\text{Э/кВтч}$, но в ближайшие 30 лет предполагается снижение до $25 \text{ гCO}_2\text{Э/кВтч}$, что приближает его к АЭС с фактически нулевым выбросом.

В отношении МСЗ долгосрочные прогнозы не предполагают снижения, поскольку установки мусоросжигания имеют небольшие в сравнении с ТЭС генераторы, неспособные повлиять на структуру спроса — существенно увеличить или уменьшить производство электроэнергии за минуты. Выбросы сжигания отходов в составе парниковых газов — $1,4\%$ или $6,47 \text{ млн т в год}$, из которых $6,19$ с получением электричества, что на чистую единицу энергии составляет $\approx 850 \text{ гCO}_2\text{Э/кВтч}$, то есть в три раза превышает углеродоемкость парогазовых турбин и в 23 раза — низкоуглеродных источников в виде коммерчески непривлекательных ветра и солнца.

Экономическую оценку сжигания разумно делать на стадии технико-экономического обоснования (ТЭО) выбора вариантов сопоставлением с альтернативными методами обращения с отходами:

- их общим уменьшением, включая раздельный сбор — предварительную сортировку потребителями по контейнерам;
- биостабилизацией для минимизации выбросов CH_4 и биогенного CO_2 (или в сочетании с N_2O) при захоронении;
- переработкой как «инновационным», то есть успешно внедренным методом без захоронения на полигоне с извлечением вторичного сырья (удаленные из потока отходов пищевые отбросы уменьшают долю гнилостной органики и выбросы указанных парниковых газов и увеличивают объемы продуктов переработки — топлива, масел, кормов, компоста).

Эти технологии дешевле сжигания смешанных отходов без сортировки, требующего, в первую очередь, дорогостоящих заводов, однако биологическая очистка и сортировка для биостабилизации и извлечения металлов и пластмасс предполагают наличие дорогостоящего оборудования.

¹⁴ Общую мощность должны указывать в годовом отчете МСЗ, а экспортную также в документах операторов, реальную — рассчитывать делением чистой произведенной/экспортированной электроэнергии на среднее время работы инсинераторов МСЗ, или $\text{kВт}\cdot\text{ч}/\text{т}_{\text{омх}}$.

Выводы

1. Развитие теории и методов переработки отходов невозможно без современного аналитического оборудования и организованной системы отбора проб и обработки данных измерений.
2. Определение источника загрязнений, соотнесенного с сжиганием отходов, возможно сравнением отношений концентраций, то есть химический состав загрязнений в определенных соотношениях абсолютных показателей позволяет идентифицировать источник.
3. Индикаторные соотношения элементов мусоросжигательных заводов: Cd/Cu, Cd/Pb, Cr/Pb (в 4–5 раз больше, чем в воздухе без загрязнений, и еще больше, чем от транспорта), Cu/Pb (сопоставимо с воздухом без загрязнений, но в 3 раза меньше, чем от транспорта).
4. Совершенствование технологий сжигания привело к удорожанию оборудования (отмечается непропорциональное увеличение стоимости установок по отношению к снижению выбросов), превышающему половину стоимости МСЗ, и затрат на получаемую энергию.
5. Становление рынка отходов само по себе является настораживающим фактором, поскольку способствует появлению лиц, заинтересованных в создании спроса на энергию и материалы с целью получения прибыли.

Список литературы

- [1] Ефимов Д.С., Абдуллаева А.М. Влияние выбросов мусоросжигательных заводов на окружающую среду города // Российский журнал проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2023. № 2 (46). С. 212–216. <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202302013> EDN: MHIBSH
- [2] Sakai Sh.I., Yoshida H., Hirai Ya., Asari M., Takigami H., Takahashi Sh., Tomoda K., Peeler M.V., Wejchert Ja., Schmid-Unterseh T., Douvan A.R., Hathaway R., Hylander L.D., Fischer Ch., Oh G.J., Jinhui Li., Chi N.K. International comparative study of 3R and waste management policy developments // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2011. Vol. 13. P. 86–102. <https://doi.org/10.1007/s10163-011-0009-x> EDN: ZNJUJP
- [3] Dowen J. Good Practice Guidance for Assessing the GHG Impacts of Waste Incineration // Review. 2021, July. P. 91.
- [4] Управление отходами. Механобиологическая переработка твердых бытовых отходов. Компостирование и вермикомпостирование органических отходов : монография / [Я. И. Вайсман и др.] ; под ред. Я. И. Вайсмана ; Федеральное гос. бюджет. образ. учреждение высш. проф. образования «Пермский нац. исслед. политехнический ун-т, Федеральное бюджет. учреждение науки „НИИ ЭЧ и ГОС им. А. Н. Сысина“» Минздрава РФ. Пермь : Изд-во Пермского нац. исслед. политехнического ун-та, 2012. 224 с.
- [5] Font A., de Hoogh K., Leal-Sanchez M., Ashworth D.C., Brown R.J.C., Hansell A.L., Fuller G.W. Using metal ratios to detect emissions from municipal waste incinerators in ambient air pollution data // Atmospheric Environment. 2015. Vol. 113. P. 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.002>

- [6] Ерхов А.А. Токсичность химических элементов от кларков и радиусов атомов // Ученые заметки ТОГУ. 2023. Т. 14. № 3. С. 105–133. EDN: RHWTCN
- [7] Кузнецова И.Н., Ткачева Ю.В., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А. Расчет индекса качества воздуха и оценка его информативности для российских условий по данным мониторинга в Москве // Метеорология и гидрология. 2021. № 8. С. 53–65. EDN: TBWEOU

References

- [1] Efimov DS, Abdullayeva AM. Impact of emissions from incineration plant on the environment. *Russian journal problems of veterinary sanitation, hygiene and ecology.* 2023;(2):212-216. 10.36871/vet.san.hyg.ecol.202302013 (In Russ.) <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202302013> EDN: MHIBSH
- [2] Sakai ShI, Yoshida H, Hirai Ya, Asari M, Takigami H, Takahashi Sh, To-modi K, Peeler MV, Wejchert Ja, Schmid-Unterseh T, Douvan AR, Hatha-way R, Hylander LD, Fischer Ch, Oh GJ, Jinhui Li, Chi NK. International comparative study of 3R and waste management policy developments. *Journal of Material Cycles and Waste Management.* 2011;13:86–102. <https://doi.org/10.1007/s10163-011-0009-x> EDN: ZNJUJP
- [3] Dowen J. Good Practice Guidance for Assessing the GHG Impacts of Waste Incineration. *Review.* 2021. July. P. 91.
- [4] Weissman JI (ed.). *Waste management. Mechanobiological processing of municipal solid waste. Composting and vermicomposting of organic waste: monograph.* Perm: Publishing House of Perm National Research Polytechnic University Publ; 2012. (In Russ.)
- [5] Font A, de Hoogh K, Leal-Sanchez M, Ashworth DC, Brown RJC, Hansell AL & Fuller GW. Using metal ratios to detect emissions from municipal waste incinerators in ambient air pollution data. *Atmospheric Environment.* 2015;113:177–186. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.002>
- [6] Erkhov AA. Toxicity of chemical elements from clarks and radii of atoms. *Scientists notes PNU.* 2023;14(3):105–133. (In Russ.). EDN: RHWTCN
- [7] Kuznetsova IN, Tkacheva YV, Shalygina IY, Lezina EA. Calculation of air quality index and assessment of its informativeness for Russia based on monitoring data for Moscow. *Meteorologiya i Gidrologiya.* 2021;(8):53–65. (In Russ.) EDN: TBWEOU

Сведения об авторе:

Ерхов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, Российской государственный геологоразведочный университет, Российская Федерация, 117997, Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23. ORCID: 0009-0003-5440-713X; eLIBRARY SPIN-код: 7450-1640. E-mail: a-erhov@yandex.ru

Bio note:

Alexander A. Erkhov, Ph.D., Associate Professor, Russian State Geological Prospecting University, 23 Miklukho-Maklaya St, Moscow, GSP-7, 117997, Russian Federation. ORCID: 0009-0003-5440-713X; eLIBRARY SPIN-code: 7450-1640. E-mail: a-erhov@yandex.ru