



DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-494-510

EDN: IORKRU

УДК 628.474.3

Научная статья / Research article

«Экологическое детектирование» продуктов сгорания отходов на основе концентраций полициклических ароматических углеводородов**А.П. Хаустов^{iD}, М.М. Редина^{iD}✉***Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва,**Российская Федерация**✉khaustov_ap@pfur.ru*

Аннотация. Проектирование и строительство объектов термической утилизации отходов (в том числе в целях получения энергии) сталкивается с рядом ограничений при выборе применяемых технологий. Одно из важнейших экологических требований — предотвращение выбросов токсичных соединений, которые содержатся в продуктах сгорания бытовых отходов, включая канцерогенные вещества. Одна из групп этих соединений — полициклические ароматические углеводороды (ПАУ): стойкие в окружающей среде токсичные углеводородные соединения, которые присутствуют в продуктах сгорания многих материалов, а также могут иметь петрогенную природу (образуются при низкотемпературных процессах, не связанных с горением). Важное свойство ПАУ — маркерные качества: их присутствие в изучаемых объектах свидетельствует об определенном источнике их происхождения (привязано к определенным природным или техногенным процессам). Соотношения концентраций ПАУ используются во многих отечественных и зарубежных исследованиях для идентификации источника загрязнений. Однако используемые граничные значения индикаторных соотношений не всегда в полной мере однозначно характеризуют источник загрязнения, а сами соотношения в различной степени информативны для разных сред и различных природных условий. Цель исследования — обосновать применение индикаторных соотношений ПАУ для контроля загрязнений в результате сжигания различных категорий отходов. Материалы для исследования — результаты аналитических определений концентраций полиаренов в продуктах сжигания отходов на отечественных и зарубежных объектах термической утилизации. Для этих объектов апробированы индикаторные соотношения ПАУ (широко известный в зарубежной практике метод «экологического детектирования» источников загрязнения). С применением методов многомерного анализа данных (метод главных компонент) определены наиболее информативные индикаторные соотношения, которые могут быть рекомендованы для использования. Идентификация генезиса ПАУ позволяет контролировать объемы загрязнений в компонентах природных сред, обусловленных выбросами и отходами при сжигании материалов, что способствует более объективному контролю антропогенных нагрузок.

© Хаустов А.П., Редина М.М., 2025

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

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), индикаторные соотношения, петrogenные ПАУ, пирогенные ПАУ, факторный анализ, отходы, сжигание

Благодарности и финансирование. Материал подготовлен при финансировании за счет средств темы НИР 202700-0-000.

Вклад авторов. Хаустов А.П. — концептуализация, методология, проведение исследования. Редина М.М. — проведение исследования, администрирование данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 31.07.2025; доработана после рецензирования 20.08.2025; принята к публикации 10.09.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Хаустов А.П., Редина М.М. «Экологическое детектирование» продуктов сгорания отходов на основе концентраций полициклических ароматических углеводородов // Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 494–510. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-494-510>

“Environmental fingerprinting” of waste combustion products based on polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations

Aleksandr P. Khaustov^{ID}, Margarita M. Redina^{ID}✉

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉lkhastov_ap@pfur.ru

Abstract. The design and construction of thermal waste disposal facilities (including energy production) faces a number of limitations when choosing the technologies used. One of the most important environmental requirements is to prevent the release of toxic compounds contained in the combustion products of household waste, including carcinogenic substances. One of the groups of these compounds is polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): toxic hydrocarbon compounds that are persistent in the environment, which are present in the combustion products of many materials and may also be petrogenic in nature (they are formed during low-temperature processes not related to burning). An important property of PAHs is marker qualities: their presence in the studied objects indicates a certain source of their origin (linked to certain natural or man-made processes). PAH concentration ratios are used in many domestic and foreign studies to identify the source of contamination. However, the boundary values of the indicator ratios used do not always fully unambiguously characterize the source of pollution, and the ratios themselves are informative to varying degrees for different environments and different natural conditions. The purpose of the article is to substantiate the use of PAH indicator ratios for pollution control as a result of incineration of various categories of waste. The materials for the study are the results of analytical determinations of polyarene concentrations in waste incineration products at domestic and foreign thermal recycling facilities. Indicator ratios of PAHs (a method of “environmental fingerprinting” of pollution sources widely known in foreign practice) have been tested for these objects. Using the methods of multidimensional

data analysis (the principal component method), the most informative indicator ratios that can be recommended for use have been determined. Identification of the genesis of PAHs makes it possible to control the amount of pollution in the components of natural environments caused by emissions and waste from the combustion of materials, which contributes to a more objective control of anthropogenic loads.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), indicator ratios, petrogenic PAH, pyrogenic PAH, factor analyses, waste, combustion

Acknowledgements and Funding. The material was prepared with funding from the research project 202700-0-000.

Authors' contribution. A.P. Khaustov — conceptualization, methodology, investigation. M.M. Redina — investigation, data curation. All authors were familiarized with the final version of the article and approved it.

Article history: received 31.07.2025; revised 20.08.2025; accepted 10.09.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Khaustov AP, Redina MM. “Environmental fingerprinting” of waste combustion products based on polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):494–510. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-494-510>

Введение

В настоящее время во многих странах практикуется сжигание отходов с одновременным производством электроэнергии и теплоты. Эта тенденция стала генеральным направлением большинства программ по обращению с отходами в экономически развитых странах мира. Становится реальным запрет на захоронение тех отходов, которые можно сжечь, и на сжигание тех отходов, которые можно переработать. К отходам, которые можно сжечь, относится большая часть ТБО, а к отходам, для которых сжигание признано единственным цивилизованным методом уничтожения, — медицинские, биологические и отходы ветеринарии. В этой связи возникла проблема достоверной идентификации и диагностики токсичных ароматических углеводородных соединений (в частности ПАУ) в окружающей среде. В России технологии термической переработки бытовых отходов не нашли широкого распространения; гораздо чаще практикуется захоронение на полигонах. Однако емкость многих полигонов находится на грани исчерпания, и термическая утилизация становится практически неизбежной перспективой.

Зарубежная литература содержит многочисленные количественные оценки токсичных выбросов мусоросжигательных заводов и отдельных инсинераторных установок, причем интерес к этой тематике не ослабевает уже несколько десятилетий [9; 10; 15]. Так, для многих технологий установлены значения эмиссионных факторов ПАУ (по крайней мере по наиболее распространенным веществам). В разных странах мира осуществляется мониторинг данных соединений (в США — 16 соединений ПАУ, в РФ — лишь 3,4-бензпирен),

а также жесткое нормативное регулирование их образования и присутствия в окружающей среде. В связи с этим весьма актуальны вопросы анализа про-исхождения ПАУ, их поведения в окружающей среде. Зная процессы трансформации и миграции данных веществ, возможно достаточно достоверно идентифицировать источники загрязнений, вплоть до решения проблемы поиска виновника экологических ущербов. В таком случае ПАУ выступают в роли геохимических маркеров загрязнений.

Цель исследования — сравнительный анализ и оценка возможностей адаптации зарубежного опыта применения индикаторных соотношений на основе концентраций ПАУ для идентификации источников загрязнений в природных и техногенных объектах. В качестве объектов исследования выбраны продукты сгорания различных материалов, что позволяет рассмотреть спектр соотношений концентраций ПАУ в зависимости от условий сжигания.

Материалы и методы

Как и многие соединения в окружающей среде, ПАУ, помимо искусственного генезиса, могут являться природными. Условно ПАУ подразделяют на пирогенные (образовавшиеся в результате процессов горения), петрогенные (продукты многих геохимических процессов с участием углеводородов, не связанные с горением) и биогенные. Состав и строение ПАУ, а также их стабильность зависят от их генезиса, температуры и обстановки, в которую они попадают.

Установление природы ПАУ — актуальнейшая экологическая проблема, поскольку остро стоит вопрос установления виновников загрязнения. Истинную оценку опасности выбросов и их регулирование эффективно проводить на основе сведений о маркерах — наиболее репрезентативных характеристиках выбросов продуктов сгорания. В качестве маркеров обычно выступают вещества, которые являются источниками максимальных рисков для человека и биоты. В целях выявления источников УВ-загрязнений компонентов окружающей среды используют отношения пар УВ-изомеров [21], отдельные коэффициенты и биомаркеры.

Преимущества использования индикаторных соотношений — относительная простота расчета и быстрота оценок; использование данных об относительно широком спектре токсичных соединений (ПАУ); наглядность представления данных. Однако используемые коэффициенты в ряде случаев недостаточно информативны, а ряд коэффициентов, введенных ранее российскими и зарубежными исследователями, до настоящего времени используется недостаточно активно. Часто это делается механически, без оценки температур и условий сжигания субстратов и их физико-химических свойств.

Для установления закономерностей присутствия ПАУ в продуктах сжигания различных видов отходов были рассмотрены образцы золы сжигания различных отходов. Помимо «настройки метода» экологического детектиро-

вания (установления оптимальных информативных индикаторных соотношений) актуальность исследования концентраций ПАУ в зольных остатках связана с тем, что продукты сгорания должны впоследствии вывозиться для захоронения на полигон.

В настоящем исследовании рассматриваются, прежде всего, ПАУ, сорбированные на частицах сажи. Такие формы связи наиболее устойчивы при достаточно мощном одновременном окислении. Подтверждение этому — подача при сжигании медицинских отходов дополнительно в инсинераторы воздуха или кислорода, что обеспечивает более полное сгорание. Также весьма важны время удерживания отходов в камере сгорания и содержание кислорода. Регулируя эти параметры, возможно оптимизировать объемы выбросов и концентрации веществ в отходящих газах, летучей золе и зольном остатке, в том числе содержания ПАУ.

Зола московского МСЗ № 2. Технологии сжигания ТБО предполагали температуру 850 °C. Характерная особенность процесса при этом — наличие в летучей золе установок по сжиганию отходов максимального количества ПАУ (на 8 порядков выше, чем в зольном остатке). Это обусловлено как технологией сжигания, так и свойствами ПАУ: способность сорбироваться на фракциях малого диаметра [2]. В литературе существует мнение, что при высоких температурах (более 1200 °C) сгоранию подвергаются практически все ПАУ. В действительности данные свидетельствуют об их сорбции на летучей фракции золы и возможности образования ядер конденсации в атмосфере при более низких температурах.

Зольный остаток инсинераторов для сжигания муниципальных отходов производства Японии. Температура сжигания составляла здесь 850–900 °C, после чего предусмотрено дожигание отходящих газов при температуре 900–1200 °C. В исследовании [3] представлены характеристики 10 наиболее типичных установок, которые и послужили материалом для анализа:

- а) с фиксированной решеткой;
- б) полунепрерывные печи, мощность от 9,6 до 600 т отходов/сут.

Зола инсинератора по уничтожению медицинских отходов в Тайване [14]. Рассмотрены характеристики сжигания общих и специфических медицинских отходов с использованием двух типов инсинераторов периодического действия:

— с механической решеткой применяется для уничтожения культур и штаммов, крови и продуктов на ее основе, использованных и неиспользованных режущих инструментов, изолирующих материалов (общие медицинские отходы). Отходы предварительно осушаются и сжигаются в передней камере при температуре 750–1000 °C, а затем транспортируются с помощью механической решетки во вторую камеру для дожига при температуре 1000–1200 °C;

— с фиксированной решеткой для уничтожения патогенных отходов и животных отходов (специальные медицинские отходы). Специальные отходы

размещаются в центре первой сжигательной камеры и уничтожаются при 700–1000 °С без перемешивания. Отходящие газы непосредственно направляются во вторую сжигательную камеру с температурой 1000–1200 °С. Зольный остаток обнаруживается лишь в первой сжигательной камере.

Состав продуктов горения различен. Анализируются пробы зольных остатков из передней камеры и второй камеры инсинераторов с механической решеткой, а также летучей золы, осевшей на электрофильтре и скруббере влажной очистки. В обоих случаях в качестве вспомогательной основы для горения применяют дизтопливо, что также может вносить вклад в возможность образования дополнительных количеств ПАУ.

Зола инсинераторов, используемых для получения энергии (Нью-Йорк). В доступных материалах характеристики технологий сжигания не приводятся. Скорее всего, технологии аналогичны применяемым в японских инсинераторах для муниципальных отходов [5].

Зола инсинератора по сжиганию осадков биологических очистных сооружений, применяемого для удаления шлама нефтехимического производства [20]. Оценены характеристики двух инсинераторов с технологией сжигания в кипящем слое (температура сжигания — 870 и 800 °С) и одного — с неподвижным слоем (температура сжигания отходов 800 °С). В качестве вспомогательного топлива в указанных трех случаях использован мазут. Утилизируемый здесь биошлам содержит ПАУ 1 и 10 мг/кг; он формируется в процессе использования культур микроорганизмов для утилизации нефтехимических отходов.

Золы низкотемпературного сжигания материалов в бытовых печах: аэрозоли сжигания угля и торфобрикета; брикетов и дров; летучая зола и сажи дров, загрязненной лаком древесины (со стенок дымохода); зола и сажа при сжигании листового опада, лесной подстилки, сельскохозяйственных отходов; зола и сажа при пожаре на торфянике [2]. Наибольшие концентрации ПАУ зафиксированы для фенантрена и флуорена, высокие — для флуорантина и антрацена. Даже при низкотемпературном сжигании сельскохозяйственных отходов в дымовых газах содержится в десятки раз меньше ПАУ, чем в летучей золе и саже.

Исходя из концентраций ПАУ, самой «чистой» оказалась зола инсинераторов по утилизации биошламов. Низкотемпературное сжигание материалов в среднем несколько уступает содержаниям ПАУ в золах МСЗ, но, казалось бы, «безобидное» сжигание дров и травы может оказаться источником количеств ПАУ, сопоставимых с выбросами высокотемпературных процессов

С точки зрения содержаний полиаренов ПАУ явно лидируют золы МСЗ № 2, а также некоторые пробы инсинераторных установок с максимумами концентраций также в летучей золе. Принимая во внимание высокую активность сорбции ПАУ на взвеси, можно утверждать, что летучая зола — идеальный сорбент при высоких температурах. Особенно ярко это проявляется в случае золы с электрофильтра установки по сжиганию медицинских

отходов с фиксированной решеткой (Тайвань): электрическое поле обеспечивает максимально возможный захват полиаренов частицами, а концентрации отдельных соединений достигают рекордных значений по сравнению с иными пробами и технологиями. Также высокие концентрации ПАУ были характерны и для летучей золы МСЗ № 2.

По канцерогенности отходов из всех рассмотренных проб максимальным эффектом должна обладать летучая зора МСЗ № 2 (содержания 3,4-бензпирена максимальны по сравнению со всеми прочими пробами в остальных установках). Учитывая канцерогенный эффект антрацена, высокой канцерогенной активностью отличается также летучая зора, осаждаемая на электрофильтре тайваньской установки по сжиганию медицинских отходов.

В связи с различной способностью ПАУ к трансформации в окружающей среде, при обосновании индикаторных соотношений ПАУ для целей «экологического детектирования» («environmental fingerprinting» в зарубежной практике) необходимо учитывать относительную термодинамическую стабильность различных исходных ПАУ. Чтобы минимизировать число влияющих факторов (различия в летучести, растворимости в воде, адсорбции и т.д.), зачастую рассчитываются индикаторные соотношения ПАУ одной молекулярной массы, то есть изомеров. Природу ПАУ (естественное или техногенное происхождение) можно установить по увеличению доли менее стабильных изомеров ПАУ по сравнению с более стабильными изомерами.

Для более крупных молекул ПАУ в работе [21] была оценена относительная стабильность изомеров по относительной теплоте образования. Этот подход позволил расположить вещества в соответствии с их степенью стабильности в ряд: 276; 202; 252; 178; 278; 228. Иными словами, изомеры ПАУ с молекулярными массами 276 (бенз(ghi)перилен, антантрен, индено(1,2,3-cd)пирен, индено(7,1,2,3-cdef)хризен) и 202 (пирен, флуорантен, ацефенантрилен) имеют наибольшую степень стабильности и, следовательно, обладают хорошими перспективами для рассмотрения их в качестве индикаторов петрогенности или пирогенности, а вещества с молекулярными массами 278 (дибенз(a,h)антрацен, пицен, дибенз(a,j)антрацен, дибенз(a,c)антрацен, бенз(b)хризен, пентафен) и 228 (трифенилен, хризен, бенз(a)антрацен) гораздо менее пригодны для этого.

Доказано, что ПАУ легко реагируют с атомарным кислородом, радикалами и другими активными окислителями. Однако при этих процессах образуются мутагенные и канцерогенные вещества за счет взаимодействия, например, 3,4-бензпирена с озоном или оксидами азота и другими оксидами. Помимо этого, ПАУ взаимодействуют с компонентами клеток живых организмов, что может провоцировать мутагенные и канцерогенные эффекты. Канцерогенность ПАУ распределяется в ряду: 3,4-бензпирен > антрацен > 2,3-бензфлуорантен > ортофенилпирен > 11,12-бензфлуорантен > 11,12-бензфлуорантен.

Пиролитическое образование ПАУ при высоких температурах 650–900 °C происходит в пламени при недостатке кислорода. Для отдельных ПАУ, например 3,4-бензпирена, зафиксированы более низкие температуры образования в относительно узком диапазоне (300–350 °C), которые происходят по иному механизму. Кроме того, при относительно более низких температурах формируются производные ПАУ (с боковыми заместителями). Так, сажа, образующаяся при лесных пожарах, по химическому составу значительно отличается от сажи антропогенных источников высоким содержанием аккумулированных ПАУ вследствие низких температур горения древесины и травы.

Изменения концентраций в средах могут быть обусловлены как свойствами самих ПАУ, так и способами их экстракции при анализе проб, применяемыми технологиями сжигания отходов (а следовательно, — химических процессов образования ПАУ). Обычно в процессах сжигания выделяют два этапа образования ПАУ:

- 1) происходит термическая деструкция топлива с образованием относительно простых «осколков» молекул свободно радикального типа;
- 2) рекомбинация радикалов с образованием ПАУ [4].

Состав образующихся соединений определяется условиями сжигания. В окружающей среде поведение ПАУ в составе эмиссий, их стабильность будут определяться также географическими особенностями местности. По сути, приведенные в первой части табл. 1 коэффициенты отражают процессы перехода нестабильных изомеров углеводородов в стабильные, а рассчитываемые соотношения определяют, на какой стадии перехода они находятся в данный момент.

Таблица 1. Индикаторные соотношения ПАУ

Значение для петрогенных ПАУ	Значение для пирогенных ПАУ
Фенантрен / антрацен (Ph / An)	
$Ph / An > 10$ [19]	<ul style="list-style-type: none"> • $Ph / An < 10$ [19]; • $Ph / A \approx 3$ при горении дерева и угля [4]
Антрацен / (сумма изомеров массой 178), $An / (Ph + An)$ или $An / 178$	
$An / (Ph + An) > 0,10 \Rightarrow$ дизельное масло, сланцевое масло, уголь, образцы сырой нефти [21]	<ul style="list-style-type: none"> • $An / (Ph + An) < 0,10 \Rightarrow$ лигнит, выбросы дизельного топлива и мазута [21]
Флуорантен / пирен, Flu / Py^*	
$Flu / Py > 1$ нефтяная природа ПАУ [21] $Flu / Py > 0,4$ сжигание [19]	<ul style="list-style-type: none"> • $Flu / Py < 1$ пирогенные источники [21] • $Flu / Py < 1,4$ сжигание угля; • $Flu / Py < 1,0$ сжигание древесины [21]; • $Flu / Py < 0,4$ — нефтяная природа [19]
Флуорантен / (флуорантен + пирен), $Fl / (Fl + Py)^*$	
$Fl / (Fl + Py) < 0,50 \Rightarrow$ большинство нефтепродуктов и продуктов их сгорания [21]	$Fl / (Fl + Py) > 0,50 \Rightarrow$ сжигание керосина и травы, большинства углей и древесины; креозот [21]
Бенз(а)антрацен / (бенз(а)антрацен + хризен (трифенилен)), $BaA / 228$	
$BaA / 228 < 0,20$ [18]	<ul style="list-style-type: none"> • $BaA / 228 > 0,50$ [18] • $BaA / 228 > 0,35$ [21]
Индено(1,2,3-cd)пирен / индено(1,2,3-cd)пирен + бенз(ghi)перилен, $IP / (IP + Bghi)$	
Менее ≈ 0,20 [21 и др.]	<ul style="list-style-type: none"> • $IP / IP + Bghi > 0,5$ сжигание травы, древесной сажи, креозота, древесины и угля, кустарниковые пожары • $IP / IP + Bghi < 0,5$ пожары в саванне; продукты сгорания НП и сырой нефти [18; 21]

Окончание табл. 1

Значение для петрогенных ПАУ	Значение для пирогенных ПАУ
Сумма пирена и флуорантена к сумме хризена и фенантрена ($Py + Flu$) / ($Chr + Ph$)	
<0,5 [21]	>0,5 [21]
Соотношение концентраций низкомолекулярных (НМ) и высокомолекулярных (ВМ) ПАУ	
НМ / ВМ > 1 [18; 21]	НМ / ВМ < 1 [18; 21]
<i>Пирен / 3,4-бензпирен, Py / BaP</i>	
• 1,0–484,8 сырья нефть [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 2,3...36,1 — шлам [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 0,0–7,3 — почвы [1; 3; 5; 12; 13; 16]	• 0,3–16 — сажи печей домашнего отопления; • до 23 — катализитический крекинг; • до 1000 — в выбросах ТЭС; • до 50 — выбросы грузовиков на дизтопливе; • до 90 — выбросы грузовиков на бензине; • 4...24 — выбросы легковых автомобилей; • 0,18...8,17 — зола при сжигании различных категорий отходов [1–6, 11–14, 16–17; 20]
<i>Фенантрен / 3,4-бензпирен, Ph / BaP</i>	
• 69,0...3040,0 — сырья нефть [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 3,3–300,5 — шлам [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 1,92–12,01 — почвы [1; 3; 5; 12; 13; 16]	• 1,8 — сажа (сжигание древесины); • 10,6 — сажа (сжигание бурого угля); • 10,6...17,4 — выхлопные газы • 0,49...22,65 — зола при сжигании различных категорий отходов [1–6; 11–14; 16–17; 20]
<i>Флуорантен / 3,4-бензпирен, Flu / BaP</i>	
• 0,0–303,0 — сырья нефть [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 0,0–114,4 — шлам [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 0,64–2,38 — почвы [1; 3; 5; 12; 13; 16]	• 1,8 — сажа (сжигание древесины); • 17,7 — сажа (сжигание бурого угля); • 8,6 ...10,9 — выхлопные газы; • 0,16 ... 8,97 — зола при сжигании различных категорий отходов [1–6; 11–14; 16–17; 20]
<i>Хризен / 3,4-бензпирен, Chr / BaP</i>	
• 0,0–1454,5 — сырья нефть [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 0,0–143,9 — шлам [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 0,01 — 2,12 — почвы [1; 3; 5; 12; 13; 16]	• 4,9 — сажа (сжигание древесины); • 21 — сажа (сжигание бурого угля); • 4,3...6,8 — выхлопные газы; • 0,44...4,03 — зола при сжигании различных категорий отходов [1–6; 11–14; 16–17; 20]

Источник: составлено А.П. Хаустовым, М.М. Рединой.

В нижней части табл. 1 приведены значения индикаторных соотношений для ПАУ с различными молекулярными массами. В зарубежной и отечественной литературе преобладание низкомолекулярных ПАУ приписывают петрогенным источникам. Очевидно, на этом принципе основан подход, рассматривающий соотношения различных ПАУ и 3,4-бензпирена (последние 4 коэффициента в табл. 1). В отличие от ПАУ одной молекулярной массы для последних четырех индикаторных соотношений не установлены граничные значения, что затрудняет их применение. Кроме того, как будет показано, для различных объектов информативность коэффициентов неодинакова.

Учитывая особенности объектов исследования, можно выделить шесть типов технологий сжигания различных по генезису видов отходов. На выходе получаем различные значения концентраций ПАУ, а также различные коэффициенты на основе их соотношений: диапазон изменений и средние значения приведены в табл. 2.

В табл. 2 затонированы значения индикаторных соотношений ПАУ, для которых выдерживаются приведенные в табл. 1 границы. Как видно, несмот-

ря на явно пирогенную природу данных ПАУ, ряд широко используемых коэффициентов для них «не сработал».

**Таблица 2. Индикаторные соотношения для идентификации природы ПАУ
(в числителе – диапазон данных, в знаменателе – среднее значение)**

Соотношение	Летучая зола московского МСЗ № 2	Зола инснераторов по сжиганию муниципальных отходов, Япония	Зольный остаток инснераторов для получения энергии, Нью-Йорк	Зола инснераторов по сжиганию медицинских отходов, Тайвань	Зола инснераторов по сжиганию биошлама, Тайвань	Низкотемпературное сжигание биоматериалов
Ph / An	8,38–20,6 14,8	5,5–10,8 7,8	4,75–5,31 5,03	0,23–2,43 1,20	1,15–9,80 5,83	1,46–6,84 4,7
Flu / Py	0,92–1,9 1,33	0,5–1,4 1,20	1,09–1,26 1,18	1,00–8,28 3,05	0,60–6,32 2,12	1,16–2,57 1,96
An / (An + Ph)	0,05–0,11 0,07	0,08–0,15 0,12	0,16–0,17 0,17	0,29–0,82 0,51	0,09–0,47 0,23	0,13–0,41 0,21
Flu / (Flu + Py)	0,48–0,66 0,57	0,34–0,58 0,53	0,52–0,56 0,54	0,50–0,89 0,67	0,38–0,86 0,58	0,54–0,72 0,65
(Py + Flu) / (Chr + Ph)	0,24–0,39 0,31	0,40–1,64 0,85	1,26–1,31 1,29	0,33–2,33 1,29	0,18–0,38 0,32	1,06–2,28 1,86
BaA / (BaA + Chr)	0,14–0,26 0,18	0,30–0,51 0,41	0,46–0,47 0,47	0,71–0,89 0,83	0,35–0,89 0,65	0,52–0,68 0,61
IP / (IP + B(ghi)P)	0,14–0,61 0,51	0,33–0,53 0,44	0,50–0,51 0,50	0,23–0,65 0,44	0,00–0,94 0,43	0,38–0,56 0,49
Py / BaP	0,37–1,25 0,58	3,70–13,9 8,17	1,65–1,75 1,70	0,19–6,72 2,67	0,01–0,59 0,18	0,84–4,75 2,43
Ph / BaP	0,26–0,72 0,49	4,08–72,6 22,6	1,68–2,14 1,91	1,86–5,40 3,57	0,17–0,91 0,54	0,38–28,75 11,02
Flu / BaP	0,40–1,76 0,78	4,38–18,0 8,97	1,80–2,21 2,00	1,55–7,86 4,31	0,06–0,35 0,16	1,16–6,49 4,46
Chr / BaP	2,19–11,4 4,03	0,84–6,60 3,29	0,95–1,00 0,97	0,37–3,40 1,66	0,00–1,71 0,44	0,74–2,00 1,40

Источник: составлено А.П. Хаустовым, М.М. Рединой.

Оценим информативность следующей группы индикаторных соотношений. В России при мониторинге ПАУ одним из наиболее «популярных» соединений является 3,4-бензпирен, который практически не задействован в индикаторных соотношениях, приведенных в первой части табл. 1. Это единственное ПАУ-соединение в России, обязательное для контроля. Ранее в работе [14] были сделаны попытки установления реперных значений для соединений пирогенной природы, однако для соединений петрогенного генезиса этих данные не были представлены. В отсутствие мониторинговых данных о прочих ПАУ проблема установления их генезиса и оценки информативности индикаторных соотношений с участием 3,4-бензпирена является одной из центральных при идентификации источников загрязнения природных сред. Для уточнения реперных значений соотношений ПАУ был проведен расчет для различных проб явной нефтяной природы (24 пробы, в том числе смеси нефтей Волго-Уральской провинции, Западно-Сибирской НГП, 48 нефтей США, пробы шламов из амбаров и резервуаров). Такой широкий спектр условий

вий существования углеводородов позволяет предположить, что полученные соотношения будут охватывать все возможные значения, характерные для *петрогенных* условий формирования ПАУ.

Соотношение (*Py / BaP*) для петрогенных проб имеет весьма широкие пределы изменений и в значительной степени «пересекается» с диапазоном значений, характерных для пирогенных ПАУ. Однако приведенное в работе [14] максимальное значение данного соотношения для ТЭС (до 1000), скорее всего, обусловлено ошибкой. Наши поиски в зарубежной и отечественной литературе показали, что этот коэффициент при высокотемпературных процессах не превышает 100 при сжигании углей самого разнообразного химического состава (значения изменяются от 0 до 97,4 при среднем 7,42). Таким образом, данный коэффициент можно считать слабо информативным в отношении пирогенных и петрогенных ПАУ как в образцах золы, так и в нефтесодержащих пробах.

Следующее соотношение, *Ph / BaP*, изменяется для нефтесодержащих проб диапазоне от 1,92 до 3040,0. Минимальные значения характерны для проб чистой почвы и одной из проб из шламового амбара. Это может быть обусловлено либо полным отсутствием нефтяного загрязнения в чистых почвах и минимумом нефтепродуктов в отходах, попавших в шламовый амбар. При этом для нефтеи и шламов характерны средние значения этого соотношения, значительно превышающие показатели для пирогенной природы. Таким образом, индикаторное соотношение, по сравнению с первым, более информативно при разделении ПАУ пирогенной и петрогенной природы.

Для соотношения *Flu / BaP* характерна аналогичная картина и схожая степень информативности для разделения ПАУ. Данный коэффициент также имеет в случае петрогенных ПАУ заметно более высокие значения по сравнению с их концентрациями в продуктах сжигания различных материалов.

Еще более яркая картина характерна для индикаторного соотношения *хризен / 3,4-бензпирен*. Его значения для петрогенных ПАУ значительно превышают аналогичные значения для пирогенных ПАУ. Данный коэффициент можно считать наиболее информативным из рассмотренных соотношений. Отметим, что средние значения данного коэффициента для сырой нефти превышают значения для пирогенных ПАУ в 28 (для сажи при сжигании бурого угля) — 600 раз (зола инсинераторов ТБО).

Еще одно индикаторное соотношение, (*Py + BaP*) / (*Ph + Chr*), не показало значимых различий для петрогенных и пирогенных образцов: все его значения для проб сажи и летучей золы находятся в интервале от 0,16 до 0,34; для петрогенных — от 0,00 до 0,76.

Результаты и обсуждение

С целью анализа поведения рассматриваемых коэффициентов, рассчитанных для пирогенных и петрогенных образований, был проведен факторный анализ, позволяющий выделить и сгруппировать сходные по дисперсии при-

знаки с объединением их в факторы. Признаки, попавшие в один фактор, имеют примерно одинаковую дисперсию и, следовательно, генезис. При различных по знаку факторных значениях (коэффициент корреляции признака с фактором) расположение точки относительно координатной оси указывает на противоположные процессы. Существует несколько модификаций факторного анализа с процедурами вращения ортогональных факторных осей, вплоть до косоугольного. Посредством таких процедур удается выявить максимум сходства или различия между признаками в многомерном пространстве. Наиболее популярные методы реализации процедур факторного анализа — метод главных компонент, который предполагает максимизацию общей дисперсии на первые главные ортогональные компоненты (факторы). Сами же процедуры вращения в факторном анализе не требуют столь жесткой регламентации, как в методе главных компонент. Основным критерием для процедур вращения является максимизация факторных нагрузок на оси. С этой целью нами применялось несколько процедур вращения, из которых были выбраны соответствующие указанному выше критерию. Расчеты проведены для пирогенных (табл. 3) и петрогенных (табл. 4) соединений.

Таблица 3. Факторные нагрузки для 12 индикаторных соотношений ПАУ в продуктах сгорания

Соотношение	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
<i>Ph / An</i>	-0,19	-0,92	0,07	0,03
<i>Flu / Py</i>	-0,12	0,25	0,02	-0,92
<i>An / (An + Ph)</i>	-0,10	0,89	0,14	-0,20
<i>Flu / (Flu + Py)</i>	-0,16	0,18	0,02	-0,93
<i>(Py + Flu) / (Chr + Ph)</i>	0,73	0,06	-0,45	0,00
<i>BaA / (BaA + Chr)</i>	0,11	0,85	-0,33	-0,22
<i>Ip / (Ip + BghiP)</i>	-0,28	0,18	0,77	0,02
<i>Py / BaP</i>	0,95	0,01	0,05	0,20
<i>Ph / BaP</i>	0,89	-0,03	0,16	0,06
<i>Flu / BaP</i>	0,95	0,11	0,08	0,01
<i>Chr / BaP</i>	0,22	-0,47	0,65	0,02
<i>(Py + BaP) / (Ph + Chr)</i>	-0,27	0,21	-0,77	0,08
<i>Expl. Var</i>	3,42	2,76	1,97	1,86
<i>Prp. Totl</i>	0,29	0,23	0,16	0,15

Источник: составлено А.П. Хаустовым, М.М. Рединой.

Первый фактор сформирован соотношением *Py + Flu / Chr + Ph* и соотношениями пирена, фенантрена и флуорантена к 3,4-бензпирену. Интересно, что отношение хризена к 3,4-бензпирену ушло на последующие факторы, что свидетельствует о его самостоятельном поведении, что подтверждается оценками из табл. 1 (максимальные различия для пирогенных и петрогенных ПАУ среди всех рассмотренных соотношений ПАУ с 3,4-бензпиреном).

Второй фактор можно интерпретировать как сформированный преимущественно соотношениями легких ПАУ. Тем не менее в эту же группу попал и бенз(а)антрацен. При этом противоположные знаки нагрузок коэффициентов Ph / An и $\text{An} / (\text{Ph} + \text{An})$ обусловлены техникой расчета (концентрация антрацена — в знаменателе).

Третий фактор для пирогенных ПАУ образован соотношением хризена с 3,4-бензпиреном, коэффициентами $\text{IP} / (\text{IP} + \text{Bghi})$ и $(\text{Py} + \text{BaP}) / (\text{Ph} + \text{Chr})$. Таким образом, фактор сформирован соотношениями наиболее «тяжелых» ПАУ. Отдельный *четвертый фактор* для пирогенных ПАУ составили популярные в зарубежной литературе коэффициенты на основе концентраций *Flu* и *Py*, а также Ph / Py . Очевидно, структура этого фактора определяется концентрацией пирена.

Принципиальные отличия имеет факторная структура матрицы индикаторных соотношений для петрогенных объектов (табл. 4).

Таблица 4. Факторные нагрузки для 13 индикаторных соотношений ПАУ в нефтесодержащих пробах (вращение Varimax raw)

Индикаторное соотношение	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Ph / An	0,07	-0,46	0,46	-0,70	-0,08
Flu / Py	0,37	-0,11	-0,13	0,01	0,89
$\text{An} / (\text{An} + \text{Ph})$	-0,06	0,92	0,00	-0,04	0,06
$\text{Flu} / (\text{Flu} + \text{Py})$	0,18	0,43	0,07	-0,09	0,78
$(\text{Py} + \text{Flu}) / (\text{Chr} + \text{Ph})$	-0,17	-0,33	0,80	0,21	-0,16
$\text{BaA} / (\text{BaA} + \text{Chr})$	-0,14	0,19	0,94	0,00	0,04
$\text{Ip} / (\text{Ip} + \text{BghiP})$	0,12	-0,22	0,32	0,86	-0,08
Py / BaP	0,84	0,07	-0,08	-0,02	-0,45
Ph / BaP	0,90	-0,15	-0,10	0,03	0,37
Flu / BaP	0,84	0,12	-0,04	0,00	0,48
Chr / BaP	0,94	-0,08	-0,14	0,04	0,25
$(\text{Py} + \text{BaP}) / (\text{Ph} + \text{Chr})$	-0,33	0,34	0,08	0,27	-0,16
<i>Expl. Var</i>	3,46	1,61	1,90	1,36	2,12
<i>Prp. Totl</i>	0,29	0,13	0,16	0,11	0,18

Источник: составлено А.П. Хаустовым, М.М. Рединой.

Первый фактор сформировали все соотношения с участием 3,4-бензпирена. По нашему мнению, такая факторная структура сформировалась вследствие изначально иного состава ПАУ по сравнению с пирогенными. *Второй фактор* сформировало единственное индикаторное соотношение антрацена к его сумме с пиреном. *Третий, четвертый и пятый факторы* сформированы преимущественно индикаторными соотношениями на основе легких ПАУ.

Как видно из результатов факторного анализа, матрицы индикаторных соотношений ПАУ пирогенной и петрогенной природы имеют принципиально разную структуру. Это свидетельствует о том, что широко применяемые на практике индикаторы, как и соотношения с участием концентрации 3,4-бензпирена, могут быть достаточно информативны. В результате обе матрицы отражают различия процессов формирования ПАУ, что выражается в различии соотношений их концентраций.

Заключение

Повышенное внимание к проблемам сжигания отходов как одному из способов их утилизации требует использования различных методов геоэкологических исследований для установления зоны влияния мусороперерабатывающих предприятий. Использование индикаторных соотношений для этих целей может представлять существенный интерес для подтверждения роли объектов термической утилизации отходов в загрязнении природных сред. Однако точность этих методов может и должна быть улучшена за счет как более точных методов идентификации самих полиаренов в средах, так и за счет уточненных процедур обработки данных аналитических определений.

1. Рассмотренные индикаторные соотношения могут эффективно использоваться для идентификации генезиса ПАУ, но их информативность различна. Часть индикаторных соотношений (например на основе концентраций ПАУ с четырьмя и более кольцами) не позволяет уверенно различать пирогенные или петрогенные ПАУ, что не дает возможности на практике обосновать границы влияния изучаемого объекта (сжигательной установки) на окружающую территорию.

2. Из рассмотренных индикаторов наиболее четко позволяют идентифицировать генезис ПАУ в продуктах сгорания различных категорий отходов *Py / Flu* и *Py / (Flu + Py)*. Эти же коэффициенты наиболее чувствительны при разделении пирогенных и петрогенных ПАУ. Однако максимальный эффект достигается при рассмотрении комплекса коэффициентов.

3. Для разных сред невозможно предложить универсальные (единые) граничные значения индикаторных соотношений. Попытки перенести приведенные в табл. 1 границы значений коэффициентов для идентификации происхождения ПАУ в разных объектах показали, что в каждом случае необходима их «индивидуальная настройка» [8]. В противном случае возможны значительные искажения и ошибки в определении источников загрязнений.

4. Несмотря на значительно большую доступность данных по анализу 3,4-бензпирена в различных природных и техногенных объектах, индикаторные соотношения с его участием менее информативны, чем соотношения изомеров ПАУ в рамках одной молекулярной массы (*An/178*, *BaA/228* и др.).

5. Характер, состав и технологии утилизации отходов определяют не просто общий уровень содержания ПАУ в продуктах сгорания, но и значения индикаторов генезиса ПАУ. В ряде случаев оказывается невозможным однозначно отнести ПАУ к петрогенным либо пирогенным. Как показали расчеты, продукты низкотемпературных процессов не всегда могут быть достаточно четко отделены от высокотемпературных.

6. Метод «экологического детектирования», основанный на идентификации источников ПАУ, позволяет контролировать объемы загрязнений в компонентах природных сред, обусловленных выбросами и отходами при сжигании материалов, что способствует более объективному контролю антропогенных нагрузок.

7. При низкотемпературном сжигании растительности, несмотря на полноценный доступ кислорода, в продуктах сгорания могут генерироваться ПАУ в концентрациях, превышающих нормативы для специализированных установок по утилизации отходов (включая биомассу). Это требует более детального анализа и экологического обоснования применения данных способов утилизации отходов.

Список литературы

- [1] Анчугова Е.М., Маркарова М.Ю., Щемелинина Т.Н., Володин В.В. Особенности вертикального распределения углеводородов в почвенных субстратах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1 (5). С. 1203–1207.
- [2] Какарека С.В., Кухарчик Т.И., Хомич В.С. Стойкие органические загрязнители : источники и оценка выбросов / Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т проблем использования природ. ресурсов и экологии. Минск : РУП Минсктиппроект, 2003. 219 с.
- [3] Ожегов Э.А., Гадышев В.А., Щербаков О.В. Изучение возможности использования полиароматических углеводородов нефти для идентификации нефтяных загрязнений // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России». 2013. № 2. С. 22–28. URL: <https://journals.igps.ru/ru/nauka/article/67963/view> (дата обращения: 11.08.2025).
- [4] Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг поликлинических ароматических углеводородов. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1988. 223 с.
- [5] Соромотин А.В., Самсонов Д.П., Гертер О.В., Пислегин Д.В. Методические подходы к совместному анализу полиароматических соединений и суммы углеводородов в донных отложениях старых шламовых амбаров геологоразведочных скважин // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2010. № 7. С. 210–217. EDN: OXDETВ
- [6] Фандеева Е.А., Семенов С.Ю. Разработка метода определения полициклических ароматических углеводородов в летучей золе // Актуальные проблемы экологии и природопользования : сб. науч. трудов. Вып. 11. Москва : ИД ЭНЕРГИЯ, 2009. С. 256–258.
- [7] Хаустов А.П., Редина М.М. «Отходы — в энергию»: оценка экологических последствий с учётом супертоксичных выбросов // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 1. С. 18–24. EDN: TKCFQR

- [8] Хаустов А.П., Редина М.М. Трансформация нефтепродуктов как источник токсичных загрязнений природных сред // Экология и промышленность России. 2012. № 12. С. 38–44. EDN: PJBFEF
- [9] Hsu Y.C., Chang S.H., Chang M.B. Emissions of PAHs, PCDD/Fs, dl-PCBs, chlorophenols and chlorobenzenes from municipal waste incinerator cofiring industrial waste // Chemosphere. 2021. Vol. 280. P. 130645. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130645> EDN: YTKGNW
- [10] Iamiceli A. L., Abate V., Bena A., De Filippis S.P., De Luca S., Iacovella N., Farina E., Gandini M., Orengia M., De Felip E., Abballe A., Dellatte E., Ferri F., Fulgenzi A.R., Ingelido A.M., Ivaldi C., Marra V., Miniero R., Crosetto L., Procopio E., Salamina G. The longitudinal biomonitoring of residents living near the waste incinerator of Turin: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon metabolites after three years from the plant start-up // Environmental Pollution. 2022. Vol. 314. Article no. 120199. EDN: CJXYKN
- [11] Incinerator Monitoring Program. 2012 Screening Summary for Organic Constituents. URL: <http://www.ongov.net/health/documents/2012IncineratorReport-Organics.pdf>. (дата обращения: 15.02.2025).
- [12] Inengite A.K., Oforka N.C., Osuji Leo C. Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in an environment urbanised by crude oil exploration // Environment and Natural Resources Research. 2012. Vol. 2. № 3. <https://doi.org/10.5539/enrr.v2n3p62>
- [13] Kerr JM, Melton HR, McMillen SJ, Magaw RI, Naughton G. Polyaromatic hydrocarbon content in crude oils around the world // SPE/EPA exploration and production environmental conference. 1999. P. 359–368.
- [14] Lee W.-J., Liow M.-C., Tsai P.-J., Hsieh L.-T. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from medical waste incinerators // Atmospheric Environment. 2002. Vol. 36. Iss. 5. P. 781–790. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00533-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00533-7) EDN: ASMUEF
- [15] Nguyen H.T., Pham V.Q., Nguyen T.Ph.M., Nguyen T.T.T., Tu B.M., Le Ph.T. Emission and distribution profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons in solid residues of municipal and industrial waste incinerators, Northern Vietnam // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. No. 13. Article no. 38255–38268. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24680-4> EDN: SFBSWT
- [16] Pampanin D.M., Sydnes M.O. Polycyclic aromatic hydrocarbons a constituent of petroleum: presence and influence in the aquatic environment. 2013. <https://doi.org/10.5772/48176>
- [17] Sato M., Tojo Y., Matsuo T., Matsuto T. Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) content in bottom ashes from some Japanese waste incinerators and simple estimation of their fate in landfill // Sustain. Environ. Res. 2011. Vol. 21. No. 4. P. 216–227.
- [18] Soclo H.H., Garrigues P., Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas // Marine Pollution Bulletin. 2000. Vol. 40. Iss. 5. P. 387–396. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00200-3](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00200-3) EDN: AFLYFT
- [19] Tigănuș D., Coatu V., Lazăr L., Oros A., Spînu A.D. Identification of the Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments from the Romanian Black Sea Sector // Cercetări Marine. 2013. Iss. 43. P. 187–196.
- [20] Wang L.-C., Lin L.-F., Lai S.-O. Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from fluidized and fixed bed incinerators disposing petrochemical industrial biological sludge // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 168. Iss. 1. P. 438–444. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.054>
- [21] Yunker M.B., Macdonald R.W., Vingarzan R., Mitchell R.H., Goyette D., Sylvestre S. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition // Organic Geochemistry. 2002. Vol. 33. P. 489–515. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00002-5) EDN: LRXJLN

Сведения об авторах:

Хаустов Александр Петрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий специалист, Институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-5338-3960; eLIBRARY SPIN-код: 7358-5798. E-mail: khaustov-ap@rudn.ru

Редина Маргарита Михайловна, доктор экономических наук, доцент, профессор департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции, Институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-3169-0142; eLIBRARY SPIN-код: 2496-8157. E-mail: redina-mm@rudn.ru