ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Комплексная ресурсно-экологическая оценка возможности утилизации техногенных отходов

Е.В.Колодежная✉, И.В.Шадрунова, О.Е.Горлова, Н.Н.Орехова
Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Колодежная Е.В., Шадрунова И.В., Горлова О.Е., Орехова Н.Н. Комплексная ресурсно-экологическая оценка возможности утилизации техногенных отходов // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 69-80. EDN MREQNK

Аннотация
Приведены результаты анализа характеристик и параметров отходов высокотемпературной переработки минерального сырья – доменных и сталеплавильных шлаков, отвальных шлаков от выплавки меди и производства феррохрома, шлака мусоросжигательного завода. Проведен детальный анализ вещественного состава объектов исследования, выделены основные ресурсно и экологически значимые показатели химического состава и физических характеристик отходов и приняты в качестве индикаторов ресурсно-экологического потенциала шлаков. Рассмотрены подходы для разделения сырьевых объектов техногенного происхождения на группы схожих по ресурсной ценности и экологической опасности объектов. В качестве альтернативы для классификации отходов высокотемпературных процессов предложено использование кластерного подхода, позволяющего создать систему категорий техногенного сырья согласно их характеристикам и ограничить количество признаков при осуществлении выборки без утраты достаточного охвата объектов классификации. В результате стандартизации и проверки мультиколлинеарности выбранных индикаторов ресурсно-экологического потенциала шлаков в изучаемом массиве данных установлено, что большинство выбранных индикаторов имеет невысокую, отсутствующую либо случайную корреляцию. В программе Statistica проведено ранжирование объектов исследования методом нечеткой кластеризации С-средних. На основе полученного распределения сформулированы три кластерные группы утилизации – ресурсно-инертные; ресурсно-ценные с умеренной экологической нагрузкой; экологически опасные, требующие глубокой переработки. Определено, что гранулированные доменные шлаки, доменный кусковой шлак и шлак производства феррохрома пригодны для производства строительных материалов без предварительного обогащения при подтверждении соответствия продукции требованиям по экологической безопасности. Сталеплавильные шлаки являются ресурсно-ценным материалом с умеренной экологической нагрузкой, пригодным для получения металлоконцентрата. Медьсодержащие шлаки и шлак мусоросжигательных установок – экологически опасные шлаки, требующие глубокой переработки с извлечением металлов, а хвосты обогащения – стабилизации и обезвреживания. Полученные результаты являются основой для дальнейшей разработки методики комплексной ресурсно-экологической оценки техногенных минеральных объектов, необходимой для перехода к замкнутым технологическим циклам.

Ключевые слова
отходы высокотемпературных процессов; шлаки от сжигания ТКО; ресурсно-экологическая оценка; циркулярная экономика; корреляционный анализ; метод нечеткой кластеризации; ранжирование техногенных объектов

Финансирование
Отсутствует.

Поступила: 07.04.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 18.09.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

На протяжении долгого исторического периода до середины XX в. мировая и российская горно-металлургическая промышленность существовала по линейному принципу «добыча исходного сырья – обогащение и выплавка готовой продукции – складирование отходов», что неминуемо привело к накоплению на территории Российской Федерации не менее 100 млрд т отходов производства [1] и формированию техногенной нагрузки на окружающую среду прилегающих территорий. Альтернативной концепцией, способной изменить сложившуюся ситуацию, является реализация парадигмы замкнутых технологических циклов «от колыбели до колыбели» [2, 3], при которых отходы производства, образующиеся на всех этапах технологического процесса, возвращаются в исходный технологический процесс либо служат сырьем для получения продукции

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

в других отраслях промышленного производства [1]. Это позволяет сократить потребление первичных природных ресурсов, продлить жизненный цикл уже добытых ресурсов подобно круговой природной системе, максимально полно использовать все продукты производства, снизить количество полигонов захоронения и объектов размещения отходов [4, 5]. Цель данной концепции заключается в достижении экологического равновесия при экономико-социальном росте благосостояния населения планеты [6, 7].

Высокотемпературный металлургический передел характеризуется максимальной ресурсоемкостью и, соответственно, генерирует наибольший объем отходов, что требует особого внимания к вопросам управления отходами и минимизации экологического воздействия. На металлургических предприятиях России удельное образование отходов на 1 т продукции составляет 8-10 т, что в 1,5-3 раза выше, чем в развитых странах [8, 9]. На каждый 1 млн т выплавленной стали образуется 800 тыс. т шлаков, 100 тыс. т пыли и 30 тыс. т шламов [4], при депонировании которых нарушается баланс естественных геохимических циклов территорий их складирования.

Отходы металлургического производства в виде шлаковых отвалов, т.е. техногенных массивов на территориях промышленных предприятий [10], в настоящее время являются активными источниками ухудшения качества окружающей среды, оказывающими комплексное и долгосрочное воздействие на все элементы биосферы [10-12]. Уральская металлургическая база – крупнейшая в России по производству черных и цветных металлов. Основные центры черной металлургии и металлургии тяжелых цветных металлов, расположенные в Магнитогорске, Челябинске, Нижнем Тагиле, Новотроицке, Екатеринбурге, Серове, Златоусте, характеризуются высоким уровнем концентрации складированных отходов производства, наиболее многотоннажными из которых являются металлургические шлаки. В шлаковых отвалах основных металлургических предприятий Урала накоплено, по разным оценкам, от 350 до 550 млн т шлаков доменного, сталеплавильного, литейного и ферросплавного производств, представляющих собой искусственные минеральные системы, основные характеристики и свойства которых предопределены техногенезом их получения, и содержащих около 40-50 млн т черных, цветных, а также благородных металлов [1].

К отходам высокотемпературной переработки относится достаточно новый для отечественного производства вид отходов – шлак мусоросжигательных установок (МСУ). Термическое обезвреживание отходов является одним из наиболее распространенных способов утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) за рубежом, так как позволяет уменьшить их массу на 70 % и объем – до 90 %, а также вырабатывать тепло- и электроэнергию за счет использования отходящих газов [13]. В странах ЕС термически перерабатывается примерно 96 млн т ТКО в год, что составляет 29 % общего количества образующихся отходов, а в мире эксплуатируются примерно 2450 предприятий для термической переработки ТКО общей производительностью 368 млн т отходов в год [14]. Выход шлаков при сжигании ТКО составляет 15-25 % от массы исходного сырья [12], что при распространении данной технологии на территории России и реализации проектных показателей целевых программ приведет к образованию многотоннажных отходов. Отходы сжигания ТКО в настоящее время определяются как ресурсы, потенциал которых используется не в полной мере, при этом по физико-химическим характеристикам шлаки МСУ схожи с металлургическими шлаками и при разработке технологий их утилизации может быть полностью использован накопленный опыт обращения с отходами высокотемпературных металлургических процессов [15].

Как показано в работе [14], остатки от сжигания ТКО содержат основные элементы Si, Ca, Al, O в тех фазах, которые относятся к трехкомпонентной системе SiO_2-CaO-Al_2O_3, составляющей также и основу большинства металлургических шлаков. Минеральная основа шлаков мусоросжигательных установок аналогична минеральному составу доменных шлаков и представлена кальцийсодержащими силикатами, алюмосиликатами, алюминатами, кварцем, кальцитом, ангидритом, сульфатами и хлоридами в меньшем количестве. Однако по содержанию тяжелых металлов шлаки близки к шлакам от выплавки меди.

Изучению вопросов вовлечения в повторное использование и продления жизненного цикла крупнотоннажных отходов высокотемпературных процессов посвящены работы В.А.Чантурии, К.Н.Трубецкого, Л.А.Вайсберга, И.В.Шадруновой, М.А.Пашкевич, Е.Г.Ожогиной, О.Б.Котовой, Т.Н.Александровой, М.Н.Сабановой, Л.Б.Хорошавина и др. В российской и зарубежной практике металлургические шлаки, как правило, перерабатываются для получения вторичной металлсодержащей

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

продукции или строительных материалов, реже используются в качестве сырьевых источников железистых или силикатных компонентов [16-18]. Много исследований посвящено изучению влияния шлаковых отвалов черной металлургии на водные экосистемы [19, 20]. Значительно меньше внимания уделено загрязнению почв и растений вблизи металлургических производств, а также формированию почвенно-растительного покрова на самих отвалах [21, 22]. Предлагается способ утилизации доменного шлака совместно с фильтратом полигонов ТКО методом литификации [23], однако практика реализации таких исследований имеет единичный характер, сосредоточена на решении острых геоэкологических ситуаций, и, как правило, не прорабатываются комплексно ресурсно-экологические перспективы организации замкнутых циклов. Опыт реализованных проектов недостаточно проанализирован как с точки зрения ресурсной ценности продукции, полученной из шлаков, так и с позиций экологической опасности для окружающей среды этой продукции, самих технологических процессов переработки шлаков и вторичных, вновь образующихся отходов. Отсутствует возможность комплексной ресурсно-экологической оценки перспектив вовлечения в повторную переработку техногенных сырьевых материалов.

Анализ показателей удельного объема образования и химического состава шлаков различного генезиса [24, 25] свидетельствует о том, что наиболее крупнотоннажные отходы образуются в черной металлургии и энергетике, при этом наиболее токсичными и сложными для утилизации являются отходы цветной металлургии и мусоросжигательных установок. Многократно установлено систематическое и значительное (в разы и на порядки) превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) тяжелых металлов в компонентах окружающей среды в зоне влияния отвалов [26-28].

Приведенные данные свидетельствуют о необходимости смещения приоритета при утилизации шлаков в сторону их комплексной и глубокой переработки, а не техногенного депонирования, с соблюдением условий организации мониторинга технологических процессов переработки шлаков и разработке мер контроля рисков для здоровья населения при использовании продукции на основе техногенного сырья. Исследование показывает, что текущие методы обращения с крупнотоннажными отходами высокотемпературных процессов не могут эффективно учитывать их ресурсный потенциал (наличие металлов и возможность вторичного использования) и экологическую опасность (токсичность, превышение ПДК, воздействие на компоненты окружающей среды). В связи с этим при классификации или группировке отходов необходимо использовать два отдельных показателя – ресурсный (оценка возможности их повторного использования) и экологический (оценка рисков для природы и здоровья людей). Эффективные технологии переработки шлаков должны выстраиваться на основании полной ресурсно-экологической оценки техногенного сырья и обеспечивать экономически выгодную и экологически безопасную интеграцию отходов производства в природные геосферные циклы. Только комплексный подход, учитывающий оба этих аспекта, может обеспечить глубокую переработку отходов вместо их техногенного захоронения.

Оценка ресурсного потенциала шлака – это комплексный анализ, целью которого является прогноз технологической возможности переработки шлака в продукцию, востребованную в условиях современных экономических моделей металлургической отрасли. Ресурсный потенциал шлаков является функцией от следующего ряда переменных: объем шлака, качественные характеристики, гранулометрический состав, технологии переработки, востребованность продукции, доступность переработки и экологическая нагрузка. При этом приоритетное значение при принятии решения, определяющего целесообразность переработки шлаков, отдается качественным характеристикам или вещественному составу. Это наиболее технически и материально затратный и информативный этап оценки ресурсного потенциала любого техногенного сырья, так как он сопряжен с анализом большого количества разнородных данных, актуальность и стабильность воспроизведения которых также подвергаются критической оценке. Наличие минералов силикатного ряда, переходных форм минералов и разнородных микроскопических примесей одних минералов в других в совокупности с трансформацией состава шлаков в процессе хранения делает оценку их химического и минерального составов многоитерационной [29]. Отправной точкой ресурсной оценки шлаков является лабораторное определение химического состава (элементного), которое осуществляется с помощью рентгенофлуоресцентного (РФА) или атомно-эмиссионного методов анализа, позволяющих установить наличие и содержание широкого спектра элементов. Данные

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

методы являются наиболее распространенными для валового анализа многокомпонентных техногенных объектов, в отдельных случаях для подтверждения содержания Pb, Cr применялась атомно-абсорбционная спектрометрия.

Оценка экологической опасности процесса переработки техногенного сырья заключается в определении уровня воздействия на окружающую среду самого технологического цикла путем замеров пылегазовых выбросов, сбросов в водные объекты, а также анализа вторичных отходов (хвостов обогащения) на токсичность. Современные технологии переработки шлака не являются завершенными, и в результате переработки образуются вторичные хвосты, также подлежащие размещению. Причем в большинстве случаев хвосты переработки шлаков приобретают дополнительную токсичность из-за снижения дисперсности или обводненности вновь образуемых отходов [30, 31]. Поэтому оценка объема и качества вторичных отходов является важным элементом оценки экологической опасности переработки шлаков.

При этом вновь выстраиваемая методология управления шлаковыми отходами должна функционировать на основании системы ресурсных и экологических индикаторов, позволяющих координировать шлаки по кластерам готовой продукции и экологической опасности переработки, интегрировать отходы в технологические цепочки производства продукции в современных быстроменяющихся рыночных условиях и при возникновении новых геоэкологических вызовов [32]. С этой целью были проведены исследования химического и гранулометрического составов, физических параметров доменного и сталеплавильного шлаков ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») и ОАО «Южно-Уральская горнопромышленная компания» (ОАО «ЮУГПК»), отвальных шлаков от выплавки меди ЗАО «Карабашмедь», шлака производства феррохрома ПАО «Ключевский завод ферросплавов» (ПАО «КЗФ»), шлака Московского мусоросжигательного завода № 3 «ЕФН-Экотехпром МСЗ 3» (МСУ). Для исследований были отобраны представительные пробы материала со шлакоотвалов, определен их гранулометрический состав методом ситового анализа, далее шлаки были стадиально раздроблены с удалением металлических включений и измельчены для определения элементного состава рентгенофлуоресцентным методом.

При постановке задачи особое внимание было уделено изучению следующих компонентов:

• характеризующие потенциал получения металлосодержащего концентрата из шлаков выбранной группы – массовая доля металлического железа, массовые доли FeO, Cu, Zn, Ni;

• определяющие пригодность шлака для цементной промышленности и при производстве строительных материалов – массовая доля гидравлически активных фаз, содержание аморфных фаз, модуль основности ($CaO + MgO/SiO_2 + Al_2O_3$), массовая доля свободного CaO, содержание материала фракций 5-70 и 0-5 мм (данные классы крупности являются релевантными для ресурсной и экологической оценок, так как определяют возможность получения щебня и песка, а также возможность пылевой нагрузки шлака), истинная и насыпная плотности;

• обуславливающие основные проявления экологической опасности для шлаков выбранной группы – массовые доли токсичных металлов (Pb, Cr), массовые доли S и P как вредных примесей для многих видов продукции, содержание пылевых фракций.

Выбранные индикаторы соответствуют трем критериям – значимости для оценки ресурсного потенциала (возможность извлечения металлов, пригодность для строительной индустрии), значимости для оценки экологической опасности (токсичность, пылевая нагрузка, способность к выщелачиванию), возможности определения стандартными методами анализа (РФА, ситовой анализ, рентгеновская дифракция), что обеспечивает воспроизводимость результатов.

Методы

Обозначенный подход к управлению шлаковыми отходами предусматривает необходимость создания комплексной классификации техногенных объектов не только по экологической опасности, но и с учетом их ресурсной ценности. Разработка практического инструмента, обеспечивающего упорядоченный набор информации о физико-химических характеристиках техногенного объекта, позволит максимально учитывать ресурсосберегающую ценность утилизации шлаков и минимизировать экологическое воздействие на окружающую среду. Анализ результатов исследований шлаков различного генезиса показывает широкий диапазон содержания основных химических компонентов и физико-технологических характеристик объектов исследования, что не позволяет провести ресурсно-

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

экологическую оценку переработки шлаков и определить перспективные направления их утилизации без предварительной статистической обработки.

Существующие классификации техногенных минеральных объектов [33], как правило, используют традиционный иерархический подход, который, несмотря на интуитивную понятность и простоту реализации, не позволяет анализировать объекты по нескольким аспектам, находящимся на разных уровнях, вводить в систему новые объекты, обладающие отличными от принятых характеристиками, формировать структуру классификации под новые направления утилизации. Наряду с этим предпринимаются попытки применения искусственного интеллекта (ИИ) в сфере управления отходами и систематизации методов обращения с отходами для понимания эффективности различных технологий на основе ИИ [34].

Решение поставленной задачи ранжирования техногенных минеральных объектов реализуемо с помощью кластерного подхода [35-37], позволяющего создать гибкую систему категорий техногенного сырья согласно их характеристикам и распределить объекты между кластерами по принадлежности, без утраты достаточного охвата объектов, что особенно актуально для сырья, пригодного для нескольких направлений использования.

Так, например, при выборе технологии утилизации или снижения негативного воздействия на окружающую среду медьсодержащих шлаков они могут ранжироваться по содержанию металлического железа, меди и цинка для переработки с целью получения вторичной металлсодержащей продукции; гранулометрическому составу, наличию гидравлически активных фаз для получения продукции строительного, сельскохозяйственного и геотехнологического назначения из минеральной части шлаков; а также по содержанию серы, свинца и других токсичных элементов, являющихся вредными примесями для широкого круга продукции. Описанные характеристики и их комбинации могут являться пригодными для классификации и других видов отходов высокотемпературных процессов, а некоторые подходят исключительно для шлаков цветной металлургии. Методы кластерного анализа позволяют разделить изучаемую совокупность техногенных объектов на группы схожих между собой по какому-либо параметру или группе параметров компактных подмножеств, называемых кластерами.

При ранжировании техногенных объектов по кластерам наиболее целесообразным является использование методов нечеткой кластеризации [38], при которых один и тот же объект может принадлежать одновременно нескольким (или даже всем) кластерам, но с различной степенью принадлежности.

Кластер в n-мерном пространстве признаков характеризуется центром (среднее геометрическое точек) и радиусом (максимальное расстояние точек от центра). Объект относится к кластеру, если расстояние от объекта до центра кластера меньше радиуса. Если это условие выполняется для двух и более кластеров, объект является спорным.

В качестве индикаторов, определяющих ресурсно-экологические перспективы переработки техногенного объекта, были использованы данные химического состава, химические и физические характеристики шлаков. Причем одни и те же индикаторы могут отвечать и за ресурсную ценность шлаков, и являться неблагоприятными токсичными компонентами для окружающей среды.

Переработка шлаков с получением металлоконцентратов является ключевым элементом современных ресурсосберегающих технологий [39-41], поэтому в качестве индикаторов ресурсного потенциала шлаков выбраны массовые доли металлического железа $Fe_{мет}$, Cu, Ni, Zn, концентраты которых имеют стабильно высокую стоимость (относительно других участников рынка), и с которыми, как правило, связано содержание благородных металлов и металлов платиновой группы, что повышает ликвидность техногенных отходов как ресурса. Оксиды железа определяют возможность получения корректирующей добавки к сырьевой смеси и балластного щебня. Модуль основности и степень кристалличности косвенно определяют возможность использования шлака в качестве гидравлической добавки к цементу. Содержание зерен фракции 5-70 мм в шлаках определяет возможность получения щебня и фракционированных заполнителей.

При оценке экологической опасности шлаков присутствие $Fe_{мет}$ и интерметаллидов относится к неблагоприятным факторам, так как способствует протеканию окислительного выщелачивания при контакте с водой и кислородом воздуха. В общем случае экологическая опасность содержания Pb-Cr-Zn-Cu-Ni-Mn определяется их выщелачиваемостью и снижается в приведенном ряду [41].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Высокая степень кристалличности и низкий модуль основности шлака свидетельствует о стабильности его минеральных фаз. Шлаки с высокой кристалличностью образованы стабильными минералами. Риск загрязнения окружающей среды при правильном складировании таких шлаков минимален. Содержание в шлаках зерен размером менее 5 мм усложняет технологические операции его складирования, транспортировки и переработки.

Для проведения кластерного анализа использована программа Statistica, так как данная система является одним из наиболее известных в мировой практике пакетов статистической обработки в среде Windows. Для кластерного анализа выбранных отходов высокотемпературных процессов был выбран наиболее известный и часто применяемый метод решения этой задачи – алгоритм нечетких С-средних, в основу которого положен метод неопределенных множителей Лагранжа [42-44].

Базовый алгоритм нечетких С-средних для классификации техногенных объектов по ресурсному потенциалу и экологической опасности:

1. Выбрать параметры, характеризующие перспективность утилизации техногенного объекта в качестве сырья для получения вторичной продукции и параметры, обуславливающие потенциальную экологическую опасность при его хранении и переработке.

2. Провести нормирование и проверку мультиколлинеарности выбранных переменных.

3. Выбрать количество кластеров на основании априорной информации об объектах исследования и установить параметры алгоритма: c – количество кластеров; m – экспоненциальный вес; ε – точность, при которой вычисления будут остановлены. Для проведения анализа принимаем $c = 3$, $m = 2$, $\varepsilon = 0{,}05$.

4. Случайным образом сгенерировать матрицу нечеткого разбиения.

5. Рассчитать центры кластеров v_i.

6. Рассчитать расстояния между объектами из X и центрами кластеров через стандартную евклидову норму $D_{ij} = \sqrt{\left\| x_j - c_i \right\|^2}$.

7. Пересчитать элементы матрицы нечеткого разбиения:

если $D_{ij} > 0$, $u_{ij} = 1 \Big/ \left[D_{ij}^2 \sum_{i=1}^{c} \frac{1}{D_{ij}^2} \right]^{\frac{1}{m-1}}$;

если $D_{ij} = 0$, $u_{ij} = \begin{cases} 1, i = j; \\ 0, i \neq j. \end{cases}$

8. Проверить условие $\left\| U - U^* \right\|^2 < \varepsilon$, где U^* – матрица нечеткого разбиения на предыдущей итерации алгоритма. Если «да», то закончить вычисления, иначе вернуться к пункту 3 алгоритма.

Число кластеров принято $c = 3$ на основе содержательного анализа сложившейся практики управления отходами высокотемпературных процессов, в которой выделяются три принципиально различные стратегии: прямое использование без обогащения (ресурсно-инертные отходы), переработка с извлечением полезных компонентов (ресурсно-ценные), а также захоронение либо размещение после стабилизации (экологически опасные).

Обсуждение результатов

Химический состав и физические характеристики объектов исследования представлены в табл.1, 2. Представленная выборка из семи типов шлаков ограничена текущим разнообразием крупнотоннажных отходов высокотемпературных процессов в Уральском промышленном регионе. Полученные кластерные структуры носят иллюстративный характер и требуют подтверждения на расширенной базе данных (не менее 20-30 типов).

Качество кластерного анализа напрямую зависит от представительности исходных данных. Поэтому на начальном этапе работы проведена стандартизация исходных данных и проверка мультиколлинеарности выбранных ресурсных и экологических индикаторов в изучаемом массиве данных. Для сравнения разнородных индикаторных показателей их числовые значения приведены к безразмерному виду и одинаковой области их изменения методом нормализации данных min-max (деления на среднее по выборке).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 1

Химический состав шлаков различного генезиса*

Шлак	Массовая доля, %									
	$Fe_{мет}$	FeO	Cu	Zn	Ni	Pb	MnO	Cr	S	P
Гранулированный доменный, ОАО «ЮУГПК»	0,3	0,7	Менее 0,002	Менее 0,002	0,001	Менее 0,002	0,90	Менее 0,002	1,140	0,045
Доменный кусковой, ПАО «ММК»	4,5	2,2	0,001	0,001	0,003	Менее 0,002	9,67	Менее 0,002	1,690	0,036
Сталеплавильный, ПАО «ММК»	21,0	23,7	0	0	0,023	Менее 0,002	6,30	0,010	0,100	1,980
Электросталеплавильный, ПАО «ММК»	13,0	24,6	0,120	1,540	0,038	Менее 0,002	7,20	0,010	0,087	1,340
Медьсодержащий, ЗАО «Карабашмедь»	3,5	41,8	1,100	0,670	0,018	0,70	1,24	0,038	1,430	0,200
Производства феррохрома, ПАО «КЗФ»	0,8	3,2	0,013	0,003	Менее 0,002	0,01	1,17	5,230	0,210	0,067
МСУ	5,4	13,1	0,340	0,820	0,051	0,45	0,41	0,020	0,530	0,760

* Погрешность результатов анализа элементов при доверительной вероятности 0,95 не превышает указанные в ГОСТ 30510-97 «Шлаки металлургического производства. Метод рентгенофлуоресцентного анализа».

Таблица 2

Физические характеристики шлаков различного генезиса

Шлак	Степень кристалличности	Модуль основности	$CaO_{своб}$, %	Плотность		Содержание зерен разного размера, %	
				истинная, г/см^3	насыпная, т/м^3	Менее 5 мм	5-70 мм
Гранулированный доменный, ОАО «ЮУГПК»	8,2	1,1	0,3	2,8	1,2	84,3	15,7
Доменный кусковой, ПАО «ММК»	87,4	1,2	0,2	3,2	1,5	8,4	91,6
Сталеплавильный, ПАО «ММК»	81,2	3,1	8,2	3,5	1,7	26,5	73,5
Электросталеплавильный, ПАО «ММК»	92,3	2,8	7,4	3,4	1,6	18,4	81,6
Медьсодержащий, ЗАО «Карабашмедь»	73,5	0,6	0,1	3,7	2,2	76,4	23,6
Производства феррохрома, ПАО «КЗФ»	83,6	0,9	0,2	2,9	1,4	13,2	86,8
МСУ	63,9	0,4	0,3	2,6	1,0	55,7	44,3

На силу связи между переменными указывает абсолютное значение коэффициента корреляции r, однако при оценке связей также следует учитывать их значимость, характеризующуюся коэффициентом p. Значение коэффициента p показывает вероятность получить наблюдаемую корреляцию случайно, при отсутствии реальной связи между переменными. Чем меньше значение коэффициента p, тем больше значимость корреляции. При $p \leq 0{,}05$ вероятность наблюдения случайной корреляции составляет менее 5 %.

Результаты корреляционного анализа (рис.1, 2) изучались для выявления пар переменных с коэффициентами корреляции $r > 0{,}7$ при значении $p \leq 0{,}05$. Представленные данные показывают в основном низкую, отсутствующую либо случайную корреляцию как для ресурсных, так и для экологических индикаторов. Статистически значимая корреляция установлена для следующих индикаторов:

• ресурсных – между модулем основности и массовой долей металлического железа в шлаках (r = 0,88; p = 0,009); массовыми долями Cu и FeO (r = 0,78; p = 0,039); степенью кристалличности и содержанием зерен фракции 5-70 мм (r = 0,88; p = 0,009); массовыми долями Ni и Zn (r = 0,76; p = 0,047);

• экологических – между массовыми долями Cu и Pb (r = 0,94; p = 0,001).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Индикаторы	abc(r) ≥ 0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1
	$Fe_{мет}$	FeO	Cu	Zn	Ni	Степень кристалличности, %	Модуль основности	Содержание зерен фракции 5-70 мм, %			
$Fe_{мет}$	1,00	0,42	0,20	0,21	0,45	0,44	0,88	0,37			
FeO	0,42	1,00	0,78	0,53	0,45	0,35	0,22	0,25			
Cu	0,20	0,78	1,00	0,35	0,24	0,07	0,43	0,55			
Zn	0,21	0,53	0,35	1,00	0,76	0,30	0,17	0,02			
Ni	0,45	0,45	0,24	0,76	1,00	0,25	0,16	0,06			
Степень кристалличности, %	0,44	0,35	0,07	0,30	0,25	1,00	0,33	0,78			
Модуль основности	0,88	0,22	0,43	0,17	0,16	0,33	1,00	0,46			
Содержание зерен фракции 5-70 мм, %	0,37	0,25	0,55	0,02	0,06	0,78	0,46	1,00			

Рис.1. Тепловая карта абсолютных корреляций ресурсных индикаторов n = 7

Индикаторы	p ≤ 0,001	0,010	0,025	0,050	0,100	0,150	0,200	0,350	0,500	1
	$Fe_{мет}$	FeO	Cu	Zn	Ni	Степень кристалличности, %	Модуль основности	Содержание зерен фракции 5-70 мм, %		
$Fe_{мет}$		0,344	0,667	0,646	0,309	0,319	0,009	0,413		
FeO	0,344		0,039	0,220	0,310	0,444	0,640	0,594		
Cu	0,667	0,039		0,436	0,603	0,888	0,332	0,203		
Zn	0,646	0,220	0,436		0,047	0,507	0,711	0,961		
Ni	0,309	0,310	0,603	0,047		0,593	0,732	0,900		
Степень кристалличности, %	0,319	0,444	0,888	0,507	0,593		0,463	0,037		
Модуль основности	0,009	0,640	0,332	0,711	0,732	0,463		0,304		
Содержание зерен фракции 5-70 мм, %	0,413	0,594	0,203	0,961	0,900	0,037	0,304			

Рис.2. Тепловая карта значимости корреляций ресурсных индикаторов n = 7

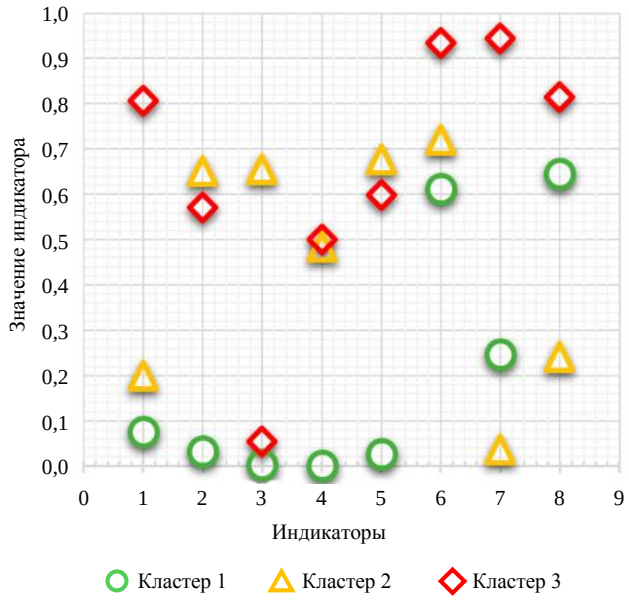
Для кластерного анализа отсутствие сильной мультиколлинеарности важнее, чем точная оценка каждой корреляции. Подавляющее большинство пар переменных (более 85 %) имеют $r < 0,7$, что позволяет использовать евклидову метрику без искажений. Ввиду ограниченного объема выборки эти интерпретации следует рассматривать как предварительные. Для окончательного подтверждения физического смысла корреляций требуется расширение базы данных.

В результате кластерного анализа каждый техногенный объект представляется как точка в n-мерном пространстве, n – количество выбранных индикаторов, при оценке ресурсного потенциала шлаков n = 8, а при оценке экологической опасности n = 11. Каждый техногенный объект относится к одному кластеру, который характеризуется центром кластера (рассчитанные средние значения выбранных индикаторов) (рис.3, 4) и расстоянием между центрами кластеров.

Полученные данные позволяют разделить объекты исследования на кластеры по выбранным ресурсным и экологическим индикаторам (табл.3). Полученные кластерные структуры устойчивы при c = 2; 3; 4 относительно распределения доменных и сталеплавильных шлаков, однако именно трехкластерная модель дает максимальную содержательную интерпретацию и подтверждается индексом силуэта $S > 0,5$.

Полученное несовпадение кластеров (например, сталеплавильные шлаки – кластер 3 по ресурсным индикаторам, но кластер 2 по экологическим) невозможно выявить при традиционном литературном обзоре, где обычно описывается либо ресурсный потенциал, либо экологическая опасность, но не их соотношение на одних и тех же образцах. Именно это несовпадение составляет главный научный результат – оно количественно доказывает, что высокая ресурсная ценность отхода не гарантирует его экологической безопасности, и наоборот. Следовательно, для корректной оценки перспектив утилизации отхода необходимо одновременное использование обеих групп индикаторов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

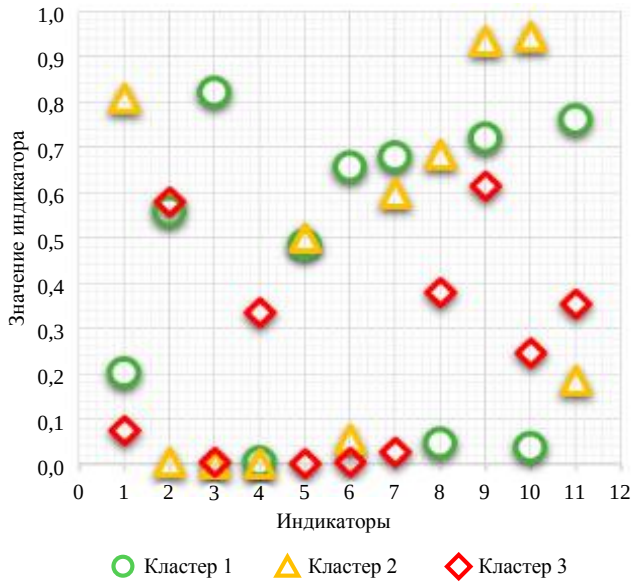


Кластер 1 – прямое использование. Объекты характеризуются минимальным содержанием цветных металлов, невысокой кристалличностью и средним гранулометрическим составом

Кластер 2 – требуют специальной переработки. Основная ресурсная ценность обусловлена наличием цветных металлов, объект сложный для переработки. Хвосты обогащения потребуют стабилизации

Кластер 3 – требуют обогащения. Объекты характеризуются наличием металлического железа и низким содержанием цветных металлов при стабильной кристаллической структуре. Прочный кусковой материал

Рис.3. Средние значения ресурсных индикаторов для различных кластеров: 1 – $Fe_{мет}$; 2 – FeO; 3 – Cu; 4 – Zn; 5 – Ni; 6 – степень кристалличности, %; 7 – модуль основности; 8 – содержание зерен фракции 5-70 мм, %



Кластер 1 – высокая опасность. Объекты характеризуются высокой вероятностью выщелачивания и загрязнения продукции тяжелыми металлами. Требуются тщательный контроль производства и стабилизация. Наиболее токсичный материал

Кластер 2 – низкая опасность. Обладает стабильной силикатной структурой, несет невысокую пылевую нагрузку. Производственные процессы должны осуществляться при контроле содержания металлического железа

Кластер 3 – средняя опасность. Риск загрязнения тяжелыми металлами ниже, чем в первом кластере. После переработки и перевода металлов в готовую продукцию потребуется повторный анализ на соответствие нормам продукции из шлаков

Рис.4. Средние значения экологических индикаторов для различных кластеров: 1 – $Fe_{мет}$; 2 – S; 3 – Pb; 4 – Cr; 5 – Zn; 6 – Cu; 7 – Ni; 8 – MnO; 9 – степень кристалличности; 10 – модуль основности; 11 – содержание зерен фракции 0-5 мм, %

Таблица 3

Ранжирование объектов исследования по кластерам

Шлак	Кластер	
	Ресурсные индикаторы	Экологические индикаторы
Гранулированный доменный, ПАО «ММК»	1	3
Доменный кусковой, ОАО «ЮУГПК»	1	3
Сталеплавильный, ПАО «ММК», ОАО «ЮУГПК»	3	2
Электросталеплавильный, ПАО «ММК»	3	2
Медьсодержащий, ЗАО «Карабашмедь»	2	1
Производства феррохрома, ПАО «КЗФ»	1	3
МСУ	2	1

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Анализ полученных соотношений «ресурсный потенциал – экологическая опасность» для шлаков различного генезиса позволяет сделать следующие выводы о перспективах их утилизации:

• Гранулированные доменные шлаки, доменный кусковой шлак и шлак производства феррохрома характеризуются минимальным содержанием цветных металлов, невысокой кристалличностью и средним гранулометрическим составом, поэтому могут быть использованы без предварительного обогащения либо в результате сортировки.

• Сталеплавильные и электросталеплавильные шлаки были выделены в отдельную группу материалов, обладающих наиболее стабильной, инертной силикатной структурой, имеющих невысокую пылевую нагрузку вследствие высокой степени кристалличности и низкого модуля основности.

• Медьсодержащий шлак и шлак МСУ являются наиболее проблемным сырьем для утилизации и требуют особого внимания и контроля технологических процессов. Извлечение металлов потребует глубокой переработки, а хвосты обогащения – стабилизации и обезвреживания.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили, что существующие линейные подходы к обращению с отходами высокотемпературных процессов не позволяют одновременно учесть их ресурсную ценность и экологическую опасность. В работе впервые предложено и обосновано введение двух независимых групп индикаторов – ресурсных (массовые доли $Fe_{мет}$, Cu, Zn, Ni, модуль основности, степень кристалличности, гранулометрический состав) и экологических (массовые доли Pb, Cr, S, P, доля пылевых фракций, выщелачиваемость токсичных элементов). Именно такое разделение и использование кластерного подхода позволяет перейти от общих принципов управления отходами высокотемпературных процессов к эффективной и безопасной их утилизации.

Применение метода нечеткой кластеризации С-средних к массиву данных по семи типам шлаков (доменные, сталеплавильные, электросталеплавильные, медьсодержащие, феррохромовые, шлаки мусоросжигательной установки) показало, что ранжирование объектов по ресурсным и экологическим индикаторам дает несовпадающие кластерные структуры. Это доказывает, что высокая ресурсная ценность отхода не гарантирует его экологическую безопасность, и наоборот. Это делает невозможной корректную оценку перспектив утилизации без одновременного учета обеих групп факторов. В отличие от существующих качественных классификаций техногенных отходов, в работе впервые предложен количественный двухкритериальный подход к их ранжированию на основе независимых наборов ресурсных и экологических индикаторов. Предложенный подход формализует принятие решений и может быть положен в основу цифровых систем управления отходами, а также выявляет скрытые экологические риски при традиционных способах утилизации (например при производстве абразива из медьсодержащих шлаков).

На основе полученного распределения сформулированы три кластерные группы утилизации:

• Ресурсно-инертные (кластер 1 по ресурсным, кластер 3 по экологическим индикаторам) – гранулированные и кусковые доменные шлаки, шлак феррохромового производства. Они пригодны для прямого использования в цементной промышленности, в производстве щебня и силикатных материалов без глубокого обогащения, при этом экологические риски минимальны (стабильная силикатная матрица, низкое содержание токсичных элементов).

• Ресурсно-ценные с умеренной экологической нагрузкой (кластер 3 по ресурсным, кластер 2 по экологическим индикаторам) – сталеплавильные и электросталеплавильные шлаки. Высокое содержание металлического железа (13-21 %) и инертная кристаллическая структура позволяют эффективно извлекать металлоконцентрат для возврата в передел, а хвосты переработки использовать в дорожном строительстве и геотехнических барьерах. Требуется контроль пылевыделения и выщелачивания остаточных тяжелых металлов.

• Экологически опасные, требующие глубокой переработки (кластер 2 по ресурсным, кластер 1 по экологическим индикаторам) – медьсодержащий шлак и шлак МСУ. Высокие концентрации Cu, Zn, Pb, Cr в сочетании с низким модулем основности и высокой долей пылевых фракций создают систематическое превышение ПДК тяжелых металлов в компонентах окружающей среды. Утилизация таких шлаков возможна только при условии комплексной металлургической переработки с извлечением цветных металлов и последующей стабилизацией или обезвреживанием хвостов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таким образом, предложенный в работе кластерный подход с введением раздельных ресурсных и экологических индикаторов позволяет не только классифицировать накопленные техногенные отходы, но и прогнозировать наиболее эффективные и безопасные направления их утилизации. Полученные результаты являются основой для дальнейшей разработки методики комплексной ресурсно-экологической оценки техногенных минеральных объектов, необходимой для перехода к замкнутым технологическим циклам. Предложенный подход следует рассматривать как пилотный методологический инструмент, пригодный для классификации техногенных объектов в условиях ограниченной исходной информации. Дальнейшие исследования будут направлены на создание открытой базы данных по физико-химическим характеристикам шлаков с применением методов машинного обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Игнатьева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В., Стровский В.Е.* Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к циркулярной экономике // Горные науки и технологии. 2021. Т. 6. № 2. С. 73-89. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-2-73-89

2. *Варавин Е.В., Маковецкий М.Ю., Комарова А.С.* Проблемы обеспечения перехода к экономике замкнутого цикла // Вестник Московского университета им. С.Ю.Витте. Серия 1. Экономика и управление. 2022. № 1 (40). С. 42-51. DOI: 10.21777/2587-554X-2022-1-42-51

3. *Lopes P.P., da Cunha Rodovalho E., El Hajj T.M.* Brazilian mining sector and its environmental impact: a review of cradle-to-cradle options applied to residues, waste and tailings // Holos. 2022. Vol. 6. № e9413. DOI: 10.15628/holos.2022.9413

4. *Чантурия В.А., Шадрунова И.В., Горлова О.Е.* Инновационные процессы глубокой и экологически безопасной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 2 (48). С. 224-237. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-224-237

5. *Чантурия В.А., Маслобоев В.А., Суворова О.В. и др.* Обоснование технологий переработки и снижения экологической опасности отходов горных предприятий: основные результаты и перспективы научного сотрудничества // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2022. Т. 1. № 2. С. 9-19. DOI: 10.37614/2949-1185.2022.1.2.002

6. *Шадрунова И.В., Зелинская Е.В., Орехова Н.Н. и др.* ESG-трансформации в сфере переработки техногенного минерального сырья // Горная промышленность. 2023. № 1. С. 71-78. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-1-71-78

7. *Ерзнкян Б.А., Фонтана К.А.* Потенциал циркулярной экономики и «природных решений» – возможность достижения устойчивого развития // Экономический анализ: теория и практика. 2022. Т. 21. № 4 (523). С. 616-642. DOI: 10.24891/ea.21.4.616

8. *Волынкина Е.П.* Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 2 (20). С. 43-49.

9. *Иванков С.И., Шубов Л.Я., Троицкий А.В. и др.* Рациональные запатентованные технологии переработки и утилизации твердых промышленных отходов (обзор) (часть 1) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2021. № 5. С. 2-100. DOI: 10.36535/0869-1002-2021-05-1

10. *Скобелев Д.О., Марьев В.А., Шубов Л.Я. и др.* Отходы горно-металлургической отрасли: систематизация технологических решений экологических задач. Часть I // Экологические системы и приборы. 2018. № 12. С. 29-37. DOI: 10.25791/esip.12.2018.305

11. *Ярусова С.Б., Макарова В.Н.* Загрязнение воздушной среды в местах хранения металлургических шлаков в Днепропетровской области (Украина) // География и природные ресурсы. 2020. № 2. С. 168-172. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-2(168-172)

12. *Семенова Ю.Е., Мамина К.Р., Воронько В.Д.* Влияние металлургических предприятий на окружающую среду // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 10 (112). С. 88-90.

13. *Юганова Т.И., Путилина В.С.* Остатки от сжигания твердых коммунальных отходов: состав, выщелачивание загрязняющих веществ, обработка для уменьшения воздействия на окружающую среду // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2023. № 5. С. 65-78. DOI: 10.31857/S0869780923040094

14. *Тугов А.Н.* Энергетическая утилизация ТКО: мировой и отечественный опыт (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 12. С. 5-22. DOI: 10.56304/S0040363622120098

15. *Шадрунова И.В., Колодежная Е.В., Горлова О.Е., Воробьев К.А.* Разработка концепции комплексной переработки отходов мусоросжигательных установок // Экология и промышленность России. 2025. Т. 29. № 2. С. 4-11. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-2-4-11

16. *Chunyin Zhang, Yingyi Zhang, Zhenghao Zhang, Guangqiang Zhang.* Effective separation and recovery of valuable metals from copper slag: A comprehensive review // Environmental Research. 2025. Vol. 283. № 122145. DOI: 10.1016/j.envres.2025.122145

17. *Захарова И.В., Янбекова О.Ю., Велюжинец Г.А., Дзансолов И.В.* Исследования обогащения отвальных металлургических шлаков ЗФ ПАО «ГМК Норильский никель» методом радиоизотопной сепарации // Цветные металлы. 2025. № 6. С. 24-30. DOI: 10.17580/tsm.2025.06.04

18. *Mansourkiyaei S., Golzary A.* Innovative approaches to circular economy in copper slag management: Maximizing resource efficiency and sustainability // Results in Engineering. 2025. Vol. 27. № 106903. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106903

19. *Mal U., Adhikari K., Tripathi A.* Steel plant slag dumps: A potential source of groundwater contamination // Journal of Earth System Science. 2002. Vol. 131. Iss. 1. № 45. DOI: 10.1007/s12040-021-01776-y

20. *Wróbel M., Pieśniewska A., Zeynalli F. et al.* Is the Slag Heap of a Former Ferrochromium Plant a Significant Environmental Hazard? // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 3. № 2001. DOI: 10.3390/app13032001

21. *Степанова Л.П., Писарева А.В., Циканавичуте В.Э.* Токсикологическая оценка воздействия отходов металлургической промышленности на экологические свойства светло-серых лесных почв // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 6. С. 54-59. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-6-54-59

22. *Золотова Е.С.* Исследования почвенно-растительного покрова в зоне влияния шлаковых отвалов черной металлургии // Известия Уральского государственного горного университета. 2024. Вып. 1 (73). С. 97-105. DOI: 10.21440/2307-2091-2024-1-97-105

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

23. *Пашкевич М.А., Куликова Ю.А.* Литификация доменным шлаком фильтрата полигонов ТКО // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 477-487.

24. *Piatak N.M., Ettler V., Hoppe D.* Geochemistry and Mineralogy of Slags // Metallurgical Slags: Environmental Geochemistry and Resource Potential. Royal Society of Chemistry, 2021. P. 59-124. DOI: 10.1039/9781839164576-00059

25. *Power G.* Use of Residues from the Metallurgical Industry in Construction // Advances in Mechanics of Materials for Environmental and Civil Engineering. Springer, 2023. P. 53-63. DOI: 10.1007/978-3-031-37101-1_4

26. *Hongxia Hu, Hongguang Zheng, Fengping Liu et al.* Heavy metal contamination assessment and source attribution in the Vicinity of an iron slag pile in Hechi, China: Integrating multi-medium analysis // Environmental Research. 2024. Vol. 263. Part 3. № 120206. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120206

27. *Da Ding, Lingya Kong, Dengdeng Jiang et al.* Source apportionment and health risk assessment of chemicals of concern in soil, water and sediment at a large strontium slag pile area // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 304. № 114228. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114228

28. *Макаров Д.В., Конина О.Т., Горячев А.А.* Методы снижения пыления отвалов горнопромышленных отходов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 4. С. 160-170. DOI: 10.15372/FTPRPI20210416

29. *Горлова О.Е., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В. и др.* Обоснование интегративного критерия для прогноза возможности селективной дезинтеграции техногенного сложноструктурного сырья // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. № 3. С. 15-26. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-15-26

30. *Zolotova E., Kotelnikova A.* Elements Migration from the Flotation Tailings of Copper Smelter Slags after Leaching to the Soil and Plant // Pollution. 2025. Vol. 11. Iss. 1. P. 161-174. DOI: 10.22059/poll.2024.377322.2400

31. *Zhu Xiaomin, Yao Bo, Jiang Xi et al.* Study on Leaching Characteristics of Heavy Metals from a Magnetic Separation Tailings Yard of Steel Slag in Yunnan Province Under Simulated Rainfall // Journal of Kunming Metallurgy College. 2024. Vol. 40. № 2. P. 63-72. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0479.2024.02.010

32. *Данилов А.С., Лозовая А.С.* Критериально-оценочный инструментарий для инвентаризации объектов накопленного вреда окружающей среде // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 3. С. 861-872. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-861-872

33. *Прохоров Д.О., Кухарь В.Д., Сарычев В.И., Подколзин А.А.* Совершенствование классификации техногенных минеральных образований // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. Вып. 1. С. 501-512. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-501-512

34. *Yevle D.V., Mann P.S.* Artificial intelligence-based classification for waste management: a systematic review and future direction // Iran Journal of Computer Science. 2025. Vol. 8. Iss. 4. P. 1291-1330. DOI: 10.1007/s42044-025-00336-7

35. *Прохоров Д.О., Стась Г.В., Болгова А.И., Овсянников С.М.* Ранжирование техногенных минеральных образований по степени влияния на окружающие земли // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. Вып. 1. С. 113-124. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-113-124

36. *Французов Б.В., Игнатьева М.Н., Моор И.А.* Техногенные месторождения: кластерный подход к освоению // Дискуссия. 2025. № 8 (141). С. 180-188. DOI: 10.46320/2077-7639-2025-8-141-180-188

37. *Bezdek J.C.* Elementary Cluster Analysis. Four Basic Methods that (Usually) Work. New York: River Publishers, 2021. 550 p. DOI: 10.1201/9781003338086

38. *Нгуен Т.Т.З., Черненькая Л.В.* Модель анализа факторов на основе нечеткой кластеризации С-средних // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 1. С. 329-337. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-329-337

39. *Колесников А.С., Серикбаев Б.Е., Золкин А.Л. и др.* Переработка отвального шлака цветной металлургии с целью его комплексной утилизации в качестве вторичного минерального сырья // Новые огнеупоры. 2021. № 8. С. 3-9. DOI: 10.17073/1683-4518-2021-8-3-9

40. *Yücel O., Turan A., Benzeşik K. et al.* Combined Evaluation of EAF Steel and Aluminum Smelting Wastes // Energy Technology 2025. Springer, 2025. P. 27-35. DOI: 10.1007/978-3-031-80688-9_3

41. *Смирнов Л.А., Демин Б.А., Сорокин Ю.В.* Перспективные направления переработки шлаков черной металлургии // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2024. Т. 80. № 8. С. 66-80. DOI: 10.32339/0135-5910-2024-8-66-80

42. *Хоботова Э.Б., Игнатенко М.И., Калюжная Ю.С. и др.* Токсические свойства и гидравлическая активность отвального доменного шлака // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 9. С. 693-698. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-9-693-698

43. *Sreevalsan-Nair J.* Fuzzy C-Means Clustering // Encyclopedia of Mathematical Geosciences. Springer, 2023. P. 447-449. DOI: 10.1007/978-3-030-85040-1_129

44. *Баданина Н.Д., Зинченко А.А., Судаков В.А.* Ранжирование объектов на основе нечеткой кластеризации // Препринты Института прикладной математики им. М.В. Келдыша. 2022. № 68. DOI: 10.20948/prepr-2022-68

***Авторы*: Екатерина Владимировна Колодежная,** *канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник* (*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия*), *kev@uralomega.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-0252-4479*, **Ирина Владимировна Шадрунова,** *д-р техн. наук, заведующий отделом* (*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-3520-2705*, **Ольга Евгеньевна Горлова,** *д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник* (*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-1142-0652*, **Наталья Николаевна Орехова,** *д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник* (*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-3507-5198*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0