ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(11-1):98-112
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 502.131.1 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_98

ВЛИЯНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СОСТОЯНИЕ ЗОЛООТВАЛОВ УГОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.И. Вальцева[1], Н.В. Вальцев[1], Ю.П. Морозов[2], Н.М. Барбин[1,3], М.А. Швец[1]

[1] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, e-mail: a.i.valtseva@urfu.ru
[2] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия
[3] Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Рассматриваются аварии и аварийно-опасные состояния золоотвалов угольных электростанций как результат взаимодействия инженерных, гидрологических и геохимических факторов. Показано, что наиболее типичными причинами аварий являются потеря устойчивости дамб, переполнение золоотвалов, разрушение дренажных и трубопроводных систем, фильтрационные процессы, локальные утечки и воздействие экстремальных гидрометеорологических условий. Последствия подобных инцидентов проявляются в загрязнении поверхностных и подземных вод, заилении русел, пылевом переносе золы, вторичном загрязнении почв и нарушении функционирования прилегающих экосистем. Особое внимание уделено роли геохимических процессов в развитии аварийности золоотвалов. Установлено, что после складирования золошлаковых отходов в теле золоотвала развиваются гидратация, выщелачивание, миграция элементов, вторичное минералообразование, окислительно-восстановительные преобразования железа и начальное почвообразование. Эти процессы изменяют состав поровых вод, фильтрационные свойства, степень водонасыщения, химическую агрессивность среды и пространственную неоднородность зольного массива. В результате усиливаются локальное переувлажнение, кольматация или перераспределение фильтрационных потоков, деградация дренажных элементов, коррозионное воздействие на бетонные и металлические конструкции, а также снижается устойчивость дамб. Сделан вывод, что аварийность золоотвалов определяется не только техническим состоянием сооружений, но и длительной геохимической эволюцией зольного массива. Обоснована необходимость постоянного геохимического, гидрологического и инженерного мониторинга для безопасной эксплуатации, консервации и рекультивации золоотвалов.

Ключевые слова: золоотвал, геохимические процессы, миграция элементов, тяжелые металлы, фильтрация, аварийность, дамбы, дренаж, угольная зола, техногенные риски.

Для цитирования: *Вальцева А. И., Вальцев Н. В., Морозов Ю. П., Барбин Н. М., Швец М. А.* Влияние геохимических процессов на состояние золоотвалов угольных электростанций // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11-1. – С. 98–112. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_98.

© А.И. Вальцева, Н.В. Вальцев, Ю.П. Морозов, Н.М. Барбин, М.А. Швец. 2026.

Impact of geochemical processes on ash dumps at coal-fired power plants

A.I. Valtseva[1], N.V. Valtsev[1], Yu.P. Morozov[2], N.M. Barbin[1,3], M.A. Shvets[1]

[1] Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, e-mail: a.i.valtseva@urfu.ru

[2] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

[3] Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Yekaterinburg, Russia

Abstract: The accidents and hazardous conditions at ash dumps of coal-fired power plants as a result of interaction of engineering, hydrogeological and geochemical factors are discussed. The most typical causes of the incidents are instability of dams, overfill of ash dumps, destruction of drainage and pipeline systems, seepage processes, local leaks and impact of extremal hydrometeorological conditions. The consequences of such events are contamination of surface water and groundwater, fly ash transport, secondary pollution of soil and functional failure of ecosystems in the neighborhood. Emphasis is laid on the role of geochemical processes in accident risk development at ash dumps. It is found that after ash and slag piling, hydration, leaching, migration of elements, secondary mineralization, redox alteration of iron and initial soil formation take place in the body of an ash dump. These processes change composition of pore water, permeability, level of saturation with water, chemical aggressiveness of the medium and spatial non-uniformity of ash mass. As a result, local overwetting, mudding or redistribution of seepage flows, degrading of drainage elements, corrosive attack on concrete and steel structures grows, and the stability of dams drops. It is concluded that the accident risk at ash dumps is governed not only by the technical condition of the structures but also by the long-term geochemical evolution of the ash mass. The essentiality of the continuous geochemical, hydrological and engineering monitoring is substantiated for the safe operation, deactivation and reclamation of ash dumps.

Key words: ash dump, geochemical process, migration of elements, heavy metals, seepage, accident risk, dams, drainage, coal ash, induced risks.

For citation: Valtseva A. I., Valtsev N. V., Morozov Yu. P., Barbin N. M., Shvets M. A. Impact of geochemical processes on ash dumps at coal-fired power plants. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(11-1):98-112. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_98.

Введение

Эксплуатация золоотвалов всегда сопряжена с комплексом экологических и санитарно-гигиенических рисков, поскольку золоотвалы содержат токсические компоненты, способные воздействовать одновременно на воздух, почву, поверхностные и подземные воды. По данным [1], золошлаковые отходы содержат загрязняющие вещества, включая ртуть, кадмий, мышьяк и другие тяжелые металлы, которые при ненадлежащем обращении могут загрязнять водоемы, грунтовые воды, источники питьевого водоснабжения и атмосферный воздух.

Наиболее серьезной опасностью является гидрогеохимическое загрязнение, связанное с выщелачиванием растворимых и подвижных элементов из зольной массы [1]. Для золоотвалов характерна фильтрация воды через тело отвала, в результате этого загрязняющие вещества могут проникать в почвенный профиль, грунтовые воды и в поверхностные водные объекты. Этот риск высок для объектов без достаточной противофильтрационной защиты, для старых

золоотвалов, которые создавались до ужесточения природоохранных требований. В отчете [2] указывается, что опасность загрязнения вод и питьевых источников является одной из ключевых причин серьезного контроля за золоотвалами.

Не менее существенной проблемой является пыление сухих поверхностей золоотвалов — зола состоит из мелких летучих частиц, которые при подсыхании поверхности, ветровой эрозии и механическом нарушении верхнего слоя переходят во взвешенное состояние и могут переноситься на значительные расстояния. Опасность пыления заключается не только в повышении общей запыленности, но и в переносе с пылью сорбированных токсичных элементов, что создает вторичное загрязнение почв и растительности в зоне рассеивания, а также повышает риск заболеваний дыхательной системы у людей [2].

Важно отметить опасность вторичного загрязнения почв и биоты. При длительной эксплуатации золоотвала происходит формирование зоны техногенного влияния [3], в пределах которой накапливаются токсичные элементы в верхних горизонтах почв; они вовлекаются в корнеобитаемый слой и далее переносятся по трофических цепям. Эксплуатация золоотвала не ограничивается локальным воздействием в пределах зоны золоотвала, при отсутствии рекультивации и контроля объект становится источником долговременной геохимической аномалии, следовательно, золоотвал — это не пассивное хранилище, а активная техногенная система, которая требует постоянного экологического мониторинга. На рис. 1 представлены основные процессы, протекающие на золоотвалах.

Отдельную группу рисков составляют аварийно-инженерные угрозы. Эксплуатация золоотвалов связана с необходимостью постоянного контроля устойчивости дамб, дренажных сооружений и противофильтрационных экранов; разрушение и разгерметизация подобных систем приводит к масштабному загрязнению водных объектов, повреждению инфраструктуры и значительному экономическому ущербу [4, 5].

Аварии на золоотвалах

Золоотвалы мокрого типа представляют собой поверхностные накопители, ограниченные земляными дамбами или кольцевыми ограждающими насыпями. Аварии на золоотвалах чаще всего связаны с разрушением или потерей устойчивости дамбы, аварией подземных дренажных труб под телом золоотвала и переливом либо размывом при экстремальных паводках, дополнительными негативными факторами могут быть фильтрация, неустраненные локальные утечки и недостаточность инженерной защиты.

США

Наиболее известной аварией считается прорыв дамбы золоотвала Kingston Fossil Plant (Роун-округ, Теннесси, США) 22 декабря 2008 г. В результате разрушения дамбы было высвобождено 4,2 млн м^3 золошлаковой пульпы, загрязненная масса покрыла 121,5 га территории, повредила жилые дома и вышла в систему рек Эмори и Клинч. В материалах о причинах аварии [6] основной версией названа потеря устойчивости слоя тонкой водонасыщенной золы под золоотвалом, в числе дополнительных факторов указывались терасированная конфигурация дамбы, повышенная нагрузка на ограждение золоотвала, обильные осадки и зимние температурные колебания.

Второй серьезной аварией стал разлив золоотвала на Dan River Steam Station (Эден, Северная Каролина, США)

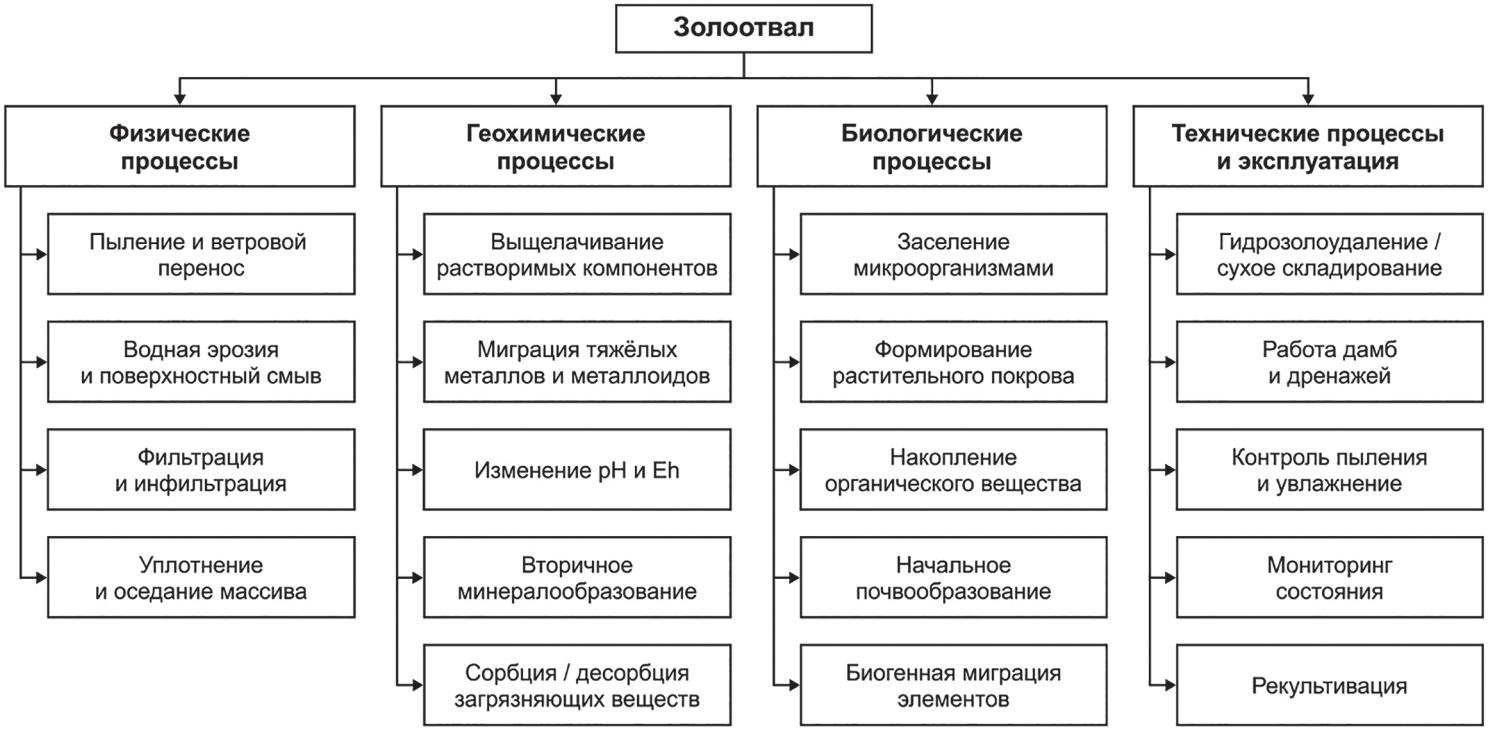


Рис. 1. Основные процессы, протекающие на золоотвале
Fig. 1. The main processes occurring at the ash dump

2 февраля 2014 г. Авария была вызвана разрушением 122-сантиметровой дренажной трубы, которая проходила под золоотвалом [7], в реку попали около 39 тыс. т золы и 102, 2 млн м^3 загрязненной воды, загрязненное пятно растянулось на 112 км вниз по течению реки. Этот случай особенно примечателен с инженерной точки зрения — он показал опасность старых подземных коммуникаций под золоотвалами без постоянного инженерного контроля.

К авариям могут привести также экстремальные гидрометеорологические условия — в октябре 2016 г. в Северной Каролине во время наводнения были затоплены вышедшие из эксплуатации золоотвалы H.F. Lee Energy Complex [5]; в отчетах указывается, что это был крупный разлив одного из золоотвалов, однако экологические последствия не представлены в открытых источниках. Во время урагана Florence в сентябре 2018 г. на золоотвале станции Cape Fear River произошло повреждение земляного ограждения и было вынесено порядка 1500 м^3 золошлаковых отходов, одновременно сообщалось о затоплении золоотвалов и прорыве дамб золоотвалов H.F. Lee в бассейн реки Ньюз. Эти аварии продемонстрировали уязвимость прибрежных и пойменных золоотвалов к экстремальным погодным условиям.

Сопоставление данных по авариям в США позволяет выделить ряд причин [5]: длительная эксплуатация золоотвалов мокрого типа, где тело дамбы и основание работают в условиях постоянного увлажнения и, следовательно, износ конструкций происходит значительно быстрее; низкое качество обслуживания, не позволяющее выявить ранние признаки фильтрации, локальные утечки и деформации, которые устранялись частично или временно и не контролировались должным образом; недооценка гидрологической опасности — для золоотвалов, расположенных в поймах рек или связанных со старыми дренажными трубами это является очень важным фактором. Конструктивно золоотвалы во многом функционируют как грунтовые дамбы, однако требования к конструкциям золоотвалов и уровень контроля гораздо менее жесткий.

Индия

В Индии аварийность золоотвалов проявляется не только в форме катастрофических прорывов дамб, но и как постоянные аварийные переливы, протечки, аварии на отводящих системах, а также вынос золы в реки, водохранилища и другие водные системы. К примеру, по данным [8], в районе Эннора на севере Ченнаи (штат Тамилнад) эксплуатация золоотвалов при недостаточном контроле привела к деградации прибрежной экосистемы. В открытых источниках [8] зафиксировано, что зола из золоотвалов North Chennai Thermal Power Station попадала в ручей Эннора, в отдельных участках отложения золы уменьшили глубину протоки с 4 до 0,6 м, что привело к серьезным нарушениям в гидрологической системе и серьезным экономическим последствиям у рыболовных сообществ. Важно отметить, что экологический мониторинг последствий не был проведен.

Еще одним примером небрежной эксплуатации золоотвалов может служить инцидент на золоотвале Bokaro Supply Company Limited (штат Джаркханд), где все шесть золоотвалов оказались заполненными, однако пульпа продолжала поступать в золоотвал, переливаясь в реку Дамодар [8]. Можно сделать вывод, что эксплуатационная аварийность золоотвалов в Индии чаще всего связана не с единичными аварийными ситуациями, а с переполнением золоотвалов, потерей резервных емкостей и выносом золы в речную сеть.

С 2010 по 2025 гг. известно порядка 76 случаев различных аварий и аварийных ситуаций на золоотвалах в Индии [9], которые связаны так или иначе с переполнением секций и аварийным сбросом пульпы; протечками и повреждением трубопроводов; выносом золы в эстуарные и речные экосистемы; накоплением осадка в руслах и лагунах с долговременным нарушением гидрологического режима. Существенно, что эти инциденты зачастую имеют не только технологическую, но и институциональную природу, поскольку сопровождаются предписаниями надзорных органов, штрафами и требованиями по усилению дамб и трубной инфраструктуры, но аварийные ситуации так или иначе продолжают происходить на золоотвалах.

Китай

При рассмотрении аварий на золоотвалах в Китае необходимо учитывать ограниченность открытой информации и отсутствие официальных сообщений об авариях или аварийных ситуациях на данных объектах.

В качестве достаточно освещенного примера можно привести аварию на станции Panxian Power Plant (провинция Гуйчжоу, Китай) в июне 2006 г., где произошло разрушение 30-метровой дамбы золоотвала, примерно 300 000 т золошлаковой пульпы вышло в реку Туочжан, вызвав серьезное загрязнение реки и водоснабжающих пунктов [4]. Причинами аварий явились недостаточный контроль за телом дамбы и слабый удерживающий стеновой элемент.

Вторым известным случаем является авария на золоотвале Shentou No. 2 Power Plant (провинция Шаньси, Китай) в августе 2010 г., когда обрушился примерно 100-метровый участок дамбы, а золошлаки затопили около 1,2 км^2 сельскохозяйственных угодий, вызвав хроническое загрязнение почв [4]. Нет информации по мерам, которые предпринимались для очистки загрязненного района, но в обзорах [1, 3, 9] подчеркивается, что угольная зола и фильтраты из мест их хранения в любом случае способны служить источником длительного неблагоприятного воздействия на водную среду, почвы и биоту, а риск определяется как химическим составом золы, так и условиями хранения. Следовательно, даже при малом количестве официально раскрытых китайских инцидентов основания для повышенного внимания к безопасности золоотвалов в Китае остаются научно обоснованными [3].

Россия

Авторами выявлены фрагментарно зафиксированные аварийно-опасные случаи инцидентов на золоотвалах в открытых источниках. Так, 22 мая 2004 г. на Партизанской ГРЭС после затяжных дождей переполнился золоотвал, произошел прорыв дамбы и селевой поток золошлаковых отходов накрыл железнодорожные пути в районе станции Лозовая ДВЖД, порядка 60 тыс. м^3 золошлаковой пульпы попало в реку Партизанская (Сучан) и озеро Теплое [9]. В исследовании [10] сделан вывод о катастрофическом влиянии аварийного сброса золы на биоту р. Ключ Лозовый.

В марте 2004 г. зафиксирован инцидент на ТЭЦ Архангельского ЦБК, где произошло обрушение одной из секций дамбы золоотвала, в результате золошлаковый поток попал в акваторию реки Северная Двина и на прилегающие территории, произошедшая авария негативно повлияла на популяцию рыб рядом с комбинатом. Вероятной причиной прорыва называют отслоение талой части дамбы золоотвала от промерзшего слоя золошлакового материала и интенсивная фильтрация воды из пруда по зоне отслоения [11].

Известен случай прорыва 10-метровой дамбы на Иркутской ТЭЦ-11 в феврале 1988 г., в результате которого золошлаковые отходы попали в реку Ангара и на прилегающие территории в радиусе 3,5 км [12]. Объем вырвавшегося потока пульпы составил 300 тыс. м^3; рядом проходил канал сброса высокотоксичных отходов другого производства, мощный поток пульпы ударил по этому каналу и разрушил его, произошло смешение пульпы с другими отходами. В результате аварии были остановлены два рыбозавода на Братском водохранилище из-за заражения рыбы токсичными отходами [11].

Аварии на золоотвалах также могут быть связаны с недостаточной обводненностью золоотвала. Так, в мае 2024 г. на Северодвинской ТЭЦ произошло обезвоживание золоотвала, в результате чего при порывистом ветре и неблагоприятных погодных условиях произошел всплеск пыления, и концентрация взвешенных веществ в воздухе превысила ПДК примерно в 4 раза. Также известно об аварии на этом золоотвале в 1979 г., когда в результате прорыва дамбы вылилось 2 млн т пульпы [12].

В литературе [3, 12—15] также отмечаются потенциально опасные ситуации с золоотвалами, например, золоотвал ТЭЦ-5 в Омске находится постоянно в подтопленном состоянии, затоплены дачные участки в соседних населенных пунктах Ульяновка и Осташково; на золоотвалах в Хабаровске и Владивостоке отмечается повышенный уровень радиации, что является постоянным источником загрязнения окружающей среды; золоотвал Рефтинской ГРЭС в Свердловской области считается потенциально опасным из-за огромного количества накопленных золошлаковых отходов.

Для понимания факторов, способствующих развитию аварий, и оптимальных путей снижения экологического воздействия на окружающую среду необходим анализ развития геохимических процессов, происходящих на золоотвале с момента запуска его в эксплуатацию.

Геохимические процессы в золоотвалах

Каждый золоотвал — это уникальная геохимическая система, в которой после складирования золы начинаются взаимосвязанные процессы выветривания, растворения, миграции веществ, минералообразования и даже почвообразования.

Исходный зольный субстрат в своей массе обычно состоит из алюмосиликатного стекла, кварца, муллита, магнетита, гематита и других высокотемпературных фаз [16]; в золах бурых углей существенную роль играют известь, периклаз, ангидрит и другие минералы, быстро изменяющиеся при контакте с водой и атмосферой, следовательно, эволюция золоотвала начинается практически сразу после отложения минерала и продолжается в течение десятилетий, постепенно переводя золу в состояние технозема [17]. На рис. 2 представлены основные геохимические процессы и миграция тяжелых металлов в теле золоотвала.

На начальной стадии в золоотвале преобладают процессы гидратации и растворения наиболее реакционноспособных фаз, сопровождающиеся формированием сильнощелочной среды. Содержание кальция во многом определяет pH системы «зола–вода», а подвижность большинства элементов достаточно сильно зависит от pH [18]. В свежей щелочной золе подвижность катионов тяжелых металлов снижается вследствие осаждения гидроксидов и включения в другие фазы, в то время как для оксианионных форм характерно возрастание миграционной способности As, B, Cr, Mo, Sb, Se, V и W. Также на интенсив-

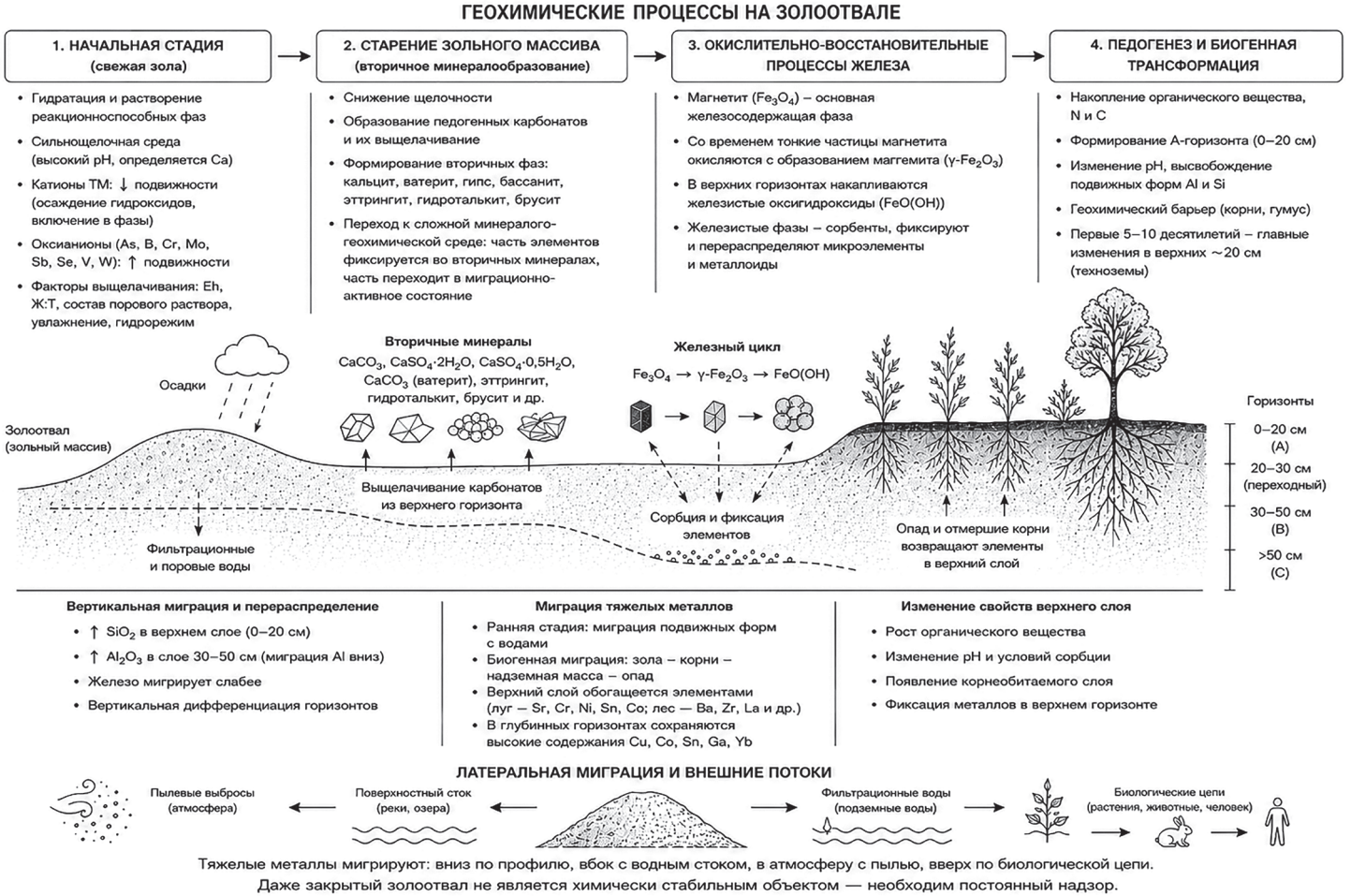


Рис. 2. Совокупность процессов, происходящих в теле золоотвала

Fig. 2. A set of processes occurring in the ash dump body

ность выщелачивания дополнительно влияет редокс-потенциал, соотношение Ж:Т, состав порового раствора, сезонное увлажнение и гидрологический режим золоотвала.

По мере старения зольного массива усиливаются процессы вторичного минералообразования, происходит снижение исходной щелочности, образование педогенных карбонатов и их последующее выщелачивание из верхнего горизонта, а также формирование спектра вторичных фаз — кальцита, ватерита, гипса, бассанита, эттрингита, гидротальката и брусита. В зольных субстратах буроугольного происхождения эти процессы протекают наиболее интенсивно, так как в данных углях содержатся более реакционноспособные минералы [17]. В геохимическом отношении это постепенный переход от первичной высокощелочной системы к сложной и более дифференцированной минералого-геохимической среде, где часть загрязняющих элементов фиксируется во вторичных минералах, а часть переходит в миграционно-активное состояние [1].

Одновременно происходят окислительно-восстановительные процессы железа. Магнетит является одной из основных железосодержащих фаз, но со временем его тонкие частицы подвергаются поверхностному окислению с образованием маггемита, в верхних горизонтах также могут накапливаться железистые оксигидроксиды [19]. Эти преобразования играют важную роль в геохимическом цикле золоотвала — железистые фазы выступают сорбентами и могут участвовать в фиксации и перераспределении ряда микроэлементов и металлоидов. Железистый цикл на золоотвале является одним из ключевых механизмов изменения свойств техногенного субстрата.

В более длительной перспективе большое значение приобретают процессы педогенеза и биогенной трансформации. После закрепления растительности в верхнем слое в процессе рекультивации начинается накопление органического вещества, азота и углерода, формирование структуры А-горизонта, изменение реакции среды, высвобождение подвижных форм Al и Si и развитие геохимического барьера, связанного с корневыми системами и гумусированием. В работе [20] показано, что первые 5–10 десятилетий наиболее выраженная трансформация охватывает главным образом верхние 20 см, где формируются маломощные техноземы.

Наряду с этим сохраняются процессы вертикальной миграции и внутрипрофильного перераспределения элементов. В работах [18, 21] установлено относительное увеличение доли SiO_2 в верхнем слое (20 см) и рост доли Al_2O_3 в слое 30–50 см, что можно интерпретировать как проявление выщелачивания и миграции алюминия в глубину при гумидных условиях, в то время как миграция железистых форм выражена значительно слабее. Со временем на золоотвале возникает вертикальная дифференциация: верхний горизонт сильнее вовлечен в биологический круговорот и накопление органического вещества, а нижележащие слои в большей степени подвержены процессам выщелачивания, иллювиального накопления и минеральной перестройки.

Отдельно необходимо рассмотреть процессы миграции тяжелых металлов на золоотвалах, которые представляют собой длительный геохимический процесс. На ранних этапах преобладает миграция наиболее подвижных форм элементов с фильтрующими и поровыми водами, в течение первых лет наиболее интенсивно перераспределяются не все металлы, а те формы, которые находятся в растворимом, обменном или слабофиксированном состоянии [1].

Со временем формируется вертикальная геохимическая дифференциация; в исследовании [20] установлено, что растительность влияет на верхний слой (20 см), в то время как в глубоких горизонтах сохраняются высокие содержания Cu, Co, Sn, Ga, Yb. Важным механизмом является биогенная миграция, то есть вовлечение металлов в систему «зола — корни — наземная масса — опад». В исследованиях [20, 21] показано, что в зависимости от типа растительности верхний слой обогащается различными элементами: под луговыми сообществами фиксировались высокие содержания Sr, Cr, Ni, Sn, Co, а под лесными — Ba, Zr, La. Можно сделать вывод, что часть элементов растения извлекают из субстрата, временно удерживают в биомассе, а затем они возвращаются в верхний слой с опадом и отмирающими корнями. По мере развития технозема усиливается внутрипочвенное перераспределение металлов на фоне изменения свойств верхнего слоя, это связано с ростом органического вещества, изменением реакции среды и появлением корнеобитаемого слоя, которые в свою очередь изменяют условия сорбции, комплексообразования и фиксации тяжелых металлов в верхнем горизонте.

Наряду с вертикальным и биогенным переносом также сохраняется латеральная миграция. В обзоре [1] показано, что загрязнение окружающей среды происходит за счет попадания компонентов золы в воздух и водные объекты с поверхностными стоками, фильтрационными водами и пылевыми частицами. На протяжении всего жизненного цикла золоотвала тяжелые металлы мигрируют в нескольких направлениях: вниз по профилю, вбок с водным стоком, в атмосферу в составе пылевых фракций и вверх по биологической цепи через растительность.

Даже закрытый золоотвал нельзя считать химически стабильным объектом — спустя десятилетия в нем продолжаются процессы перераспределения металлов между глубинными слоями, поверхностным горизонтом, растительностью и сопредельными компонентами среды, что делает золоотвал опасным техногенным объектом, которому необходим постоянный надзор.

Влияние геохимических процессов на аварийность золоотвалов

Золоотвал является длительно эволюционирующей геохимической системой, в которой изменение состава поровых вод и твердой фазы постепенно влияет на состояние конструктивных элементов и уровень аварийного риска.

Важным механизмом влияния геохимических процессов является миграция элементов и старение зольного массива. Как уже было отмечено выше, рекультивационные мероприятия затрагивают в первые 50–60 лет верхние 20 см золоотвала, в то время как глубокие горизонты остаются под воздействием физико-химических процессов. С точки зрения инженерной оценки это означает, что тело золоотвала со временем становится все более неоднородным по химическому составу, гранулометрии, водоудерживающей способности и фильтрационным свойствам [20]. Такая неоднородность опасна тем, что изменяет траектории фильтрации, локализует зоны переувлажнения и способствует неравномерному распределению порового давления в теле золоотвала и дамбах.

Геохимические процессы также влияют на прочностное состояние намывных и обвалованных элементов. Длительное мокрое хранение золы, фильтрация и насыщение тонкодисперсного материала уменьшают его структурную устойчивость и создают условия для потери

сдвиговой прочности в водонасыщенных зонах. Деформации конструкции золоотвалов часто предшествует гидрологическое старение массива — многолетние протечки и фильтрации способны привести к разрушению дамбы [5]. Таким образом геохимически опосредованное переувлажнение дамбы и длительная фильтрационная деградация выступают системообразующими факторами аварийности.

Химическая агрессивность фильтратов по отношению к бетону, железобетону и металлическим элементам является также важным фактором в вопросе аварийности золоотвалов. Зольные воды и фильтраты часто содержат сульфаты, а иногда и хлориды, их контакт с конструкциями дренажных камер, труб, колодцев, укреплений и подпорных элементов может вызвать химическую деградацию материалов [5]. Для бетона сульфатная агрессия выражается в реакции с алюминатными фазами цементного камня и ведет к образованию эттрингита и гипса, которые вызывают впоследствии внутреннее расширение, растрескивание, потерю сцепления и снижение долговечности. Хлориды опасны тем, что могут инициировать точечную коррозию стальной арматуры, а коррозионное растрескивание также ускоряет проникновение агрессивной среды внутрь конструкции. Можно сделать вывод, что геохимическая среда золоотвала способна со временем снижать надежность дренажных и удерживающих сооружений. Особенно уязвимыми являются поддамбовые и подотвальные дренажные коммуникации, поскольку они работают в постоянном контакте с агрессивной зольной средой и одновременно испытывают механическую нагрузку от массива.

Необходимо учитывать локальное засорение и перераспределение фильтрационных потоков: в химически активной среде золоотвала одни зоны могут испытывать уплотнение и кольматацию за счет накопления мелких частиц и вторичных образований, а другие, напротив, переходят в состояние повышенной трещиноватости и проницаемости [20]. В бетоне подобные процессы проявляются через заполнение пор продуктами реакции с последующим растрескиванием, это ведет к неравномерности работы дренажа; часть потока может быть блокирована, а часть может концентрироваться в отдельных каналах. Для золоотвалов такая неравномерность особенно опасна, так как она повышает вероятность внутренней эрозии, локального размыва, концентрации напоров и внезапного выхода фильтрации на откос или в зону подземной коммуникации.

Геохимические процессы повышают аварийность золоотвала и косвенно, через усложнение мониторинга. По мере старения объекта изменяется pH, распределение элементов по глубине, состав поровой воды и свойства поверхностного технозема [20]. Это означает, что данные разовых обследований достаточно быстро теряют свою репрезентативность, конструкция может оставаться внешне стабильной даже тогда, когда ее геохимический режим уже смещен в сторону аварийного. Реальная надежность золоотвала определяется не только расчетом дамбы как стандартного гидротехнического сооружения, но и учетом геохимического старения золоотвала, коррозионной агрессивности среды, состояния дренажей и химико-гидравлической неоднородности массива.

На рис. 3 представлена схема влияния геохимических процессов на конструкции золоотвала.

Снижение аварийности возможно лишь при интеграции геохимического мониторинга в систему технической эксплуатации золоотвала: контроль pH

и состава фильтратов, наблюдение за фильтрацией и состоянием подземных коммуникаций, диагностика сульфатной и хлоридной составляющей по отношению к бетону и металлу.

Выводы

1. Золоотвалы следует рассматривать как динамичные техногенные геохимические системы, в которых после складирования золошлаковых отходов развиваются длительные процессы гидратации, выщелачивания, вторичного минералообразования, внутрипрофильного перераспределения элементов и начального почвообразования. По мере старения зольного массива его химические и минеральные свойства существенно изменяются, что определяет эволюцию экологических рисков во времени. Геохимическая трансформация золоотвалов сопровождается постепенным переходом от свежего высокощелочного субстрата к более сложной системе с выраженной вертикальной дифференциацией. В верхнем слое усиливаются процессы биогенной трансформации, накопления органического вещества и формирования технозема, тогда как в более глубоких горизонтах дольше сохраняются исходные свойства золы и продолжаются процессы выщелачивания и перераспределения минеральных компонентов.

2. Существенную роль в геохимической эволюции золоотвалов играют вторичные минералы и сорбционные барьеры, формирующиеся в процессе старения золы. Именно они определяют степень фиксации либо повторной мобилизации ряда элементов, а следовательно, влияют на изменение подвижности загрязняющих веществ в долгосрочной перспективе. С течением времени верхний слой золоотвала становится зоной наиболее активного геохимического и биологического перераспределения загрязняющих веществ. Растительность



Рис. 3. Схема влияния геохимических процессов на конструкции золоотвала

Fig. 3. Diagram of the influence of geochemical processes on the ash dump structures

выполняет двойственную функцию: с одной стороны, она ограничивает пыление и снижает латеральный вынос загрязнителей, с другой — вовлекает их в биологический круговорот и тем самым изменяет характер их локализации в системе.

3. Аварии на золоотвалах и аварийно-опасные ситуации, связанные с их эксплуатацией, подтверждают, что данные объекты не являются пассивными хранилищами отходов, а представляют собой источники потенциального масштабного техногенного воздействия. Наиболее типичными причинами аварий выступают переполнение золоотвалов, потеря устойчивости дамб, разрушение дренажных и трубопроводных систем, фильтрационные процессы и экстремальные гидрометеорологические воздействия.

4. Последствия аварий на золоотвалах носят комплексный характер и включают загрязнение поверхностных и грунтовых вод, заиление и перекрытие русел, пылевое загрязнение прилегающих территорий, вторичное загрязнение почв, нарушение экосистемных связей и значительный социально-экономический ущерб. В ряде случаев последствия аварий приобретают долговременный

характер и требуют многолетнего мониторинга и дорогостоящих природоохранных мероприятий.

5. Анализ геохимических процессов и аварийности показывает, что главная опасность золоотвалов связана не только с возможностью редких катастрофических событий, но и с хроническим длительным воздействием на окружающую среду. Даже при отсутствии аварий золоотвал остается источником пыления, выщелачивания и постепенного переноса загрязняющих веществ в сопряженные природные среды.

6. В связи с этим эксплуатация, консервация и рекультивация золоотвалов должны базироваться на комплексном подходе, учитывающем геохимическую эволюцию зольного массива, состояние гидротехнических сооружений и необходимость постоянного экологического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wang N., Sun X., Zhao Q., Yang Y., Wang P.* Leachability and adverse effects of coal fly ash: A review // Journal of Hazardous Materials. 2020, vol. 396, article 122725. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122725.

2. *Harkness J. S., Sulkin B., Vengosh A.* Evidence for coal ash ponds leaking in the Southeastern United States // Environmental Science & Technology. 2016, vol. 50, no. 12, pp. 6583—6592. DOI: 10.1021/acs.est.6b01727.

3. *Petrović M., Fiket Ž.* Environmental damage caused by coal combustion residue disposal: A critical review of risk assessment methodologies // Chemosphere. 2022, vol. 299, article 134410. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134410.

4. *Chen Y., Fan Y., Huang Y., Liao X., Xu W., Zhang T.* A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2024, vol. 269, article 115905. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115905.

5. *Tian Q., Guo B., Nakama S., Sasaki K.* Distributions and leaching behaviors of toxic elements in fly ash // ACS Omega. 2018, vol. 3, no. 10, pp. 13055—13064. DOI: 10.1021/acsomega.8b02096.

6. *Khudyakova L. I., Garkusheva N. M., Paleev P. L., Kotova I. Yu., Khomoksonova D. P., Gulyashinov P. A., Antropova I. G.* Revegetation of thermal power plant ash dumps or sustainable urban development // Urban Science. 2025, vol. 9, no. 6, article 210. DOI: 10.3390/urbansci9060210.

7. *Lemly A. D.* Damage cost of the Dan River coal ash spill // Environmental Pollution. 2015, vol. 197, pp. 55—61. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.11.027.

8. *Santamarina J. C., Torres-Cruz L. A., Bachus R. C.* Why coal ash and tailings dam disasters occur // Science. 2019, vol. 364, no. 6440, pp. 526—528. DOI: 10.1126/science.aax1927.

9. *Banda M. F., Matabane D. L., Munyengabe A.* A phytoremediation approach for the restoration of coal fly ash polluted sites: a review // Heliyon. 2024, vol. 10, no. 23, article e40741. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40741.

10. *Вшивкова Т. С., Омельченко М. В., Бурухина Е. В., Самчинская Л. П., Сибирская Е. К.* Оценка влияния Партизанской ГРЭС на экологическое состояние р. Партизанская и р. Ключ Лозовый // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. — 2005. — № 3. — С. 139—155.

11. *Душкова Д. О., Евсеев А. В.* Анализ техногенного воздействия на геосистемы Европейского Севера России // Арктика и Север. — 2011. — № 4. — С. 162—195.

12. *Крылов Д., Путинцева В., Крылов Е.* Экологические последствия использования угля вместо природного газа в энергетике // Бюллетень по атомной энергии. — 2001. — № 9. — С. 6—16.

13. *Парфенова А. Е.* Фиторемедиация почвенных покровов, загрязненных солями тяжелых металлов. Аналитический обзор // Экосистемы. — 2023. — № 35. — С. 64—73.

14. *Сиротюк В. В.* Некоторые особенности состава и свойств золошлака и золы-уноса от сжигания экибастузских углей // Вестник СибАДИ. — 2025. — Т. 22. — № 3. — С. 460—477. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-3-460-477.

15. *Uzarowicz Ł., Zagórski Z., Mendak E., Bartmiński P., Szara E., Kondras M., Oktaba L., Wendland A., Rogoziński R.* Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part I. Properties, classification, and indicators of early pedogenesis // Catena. 2017, vol. 157, pp. 75—89. DOI: 10.1016/j.catena.2017.05.010.

16. *Uzarowicz Ł., Skiba M., Leue M., Zagórski Z., Gąsiński A., Trzciński J.* Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bitu-

minous coal and lignite. Part II. Mineral transformations and soil evolution // Catena. 2018, vol. 162, pp. 255–269. DOI: 10.1016/j.catena.2017.11.005.

17. *Izquierdo M., Querol X.* Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview // International Journal of Coal Geology. 2012, vol. 94, pp. 54–66. DOI: 10.1016/j.coal.2011.10.006.

18. *Uzarowicz Ł., Górka-Kostrubiec B., Dudzisz K., Rachwał M., Zagórski Z.* Magnetic characterization and iron oxide transformations in Technosols developed from thermal power station ash // Catena. 2021, vol. 202, article 105292. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105292.

19. *Dergacheva M., Trunova V., Nekrasova O., Siromlya T., Uchaev A., Bazhina N., Radchenko T., Betekhtina A.* Assessment of the macro- and microelement composition of fly ash from 50-year-old ash dumps in the Middle Urals (Russia) // Metals. 2021, vol. 11, no. 10, article 1589. DOI: 10.3390/met11101589.

20. *Nekrasova O., Radchenko T., Betekhtina A., Petrova T., Uchaev A., Dergacheva M.* Carbon sequestration by soils of ash dump forest areas in the Middle Urals (Russia) // Forests. 2023, vol. 14, no. 11, article 2178. DOI: 10.3390/f14112178. ГИАБ

REFERENCES

1. Wang N., Sun X., Zhao Q., Yang Y., Wang P. Leachability and adverse effects of coal fly ash: A review. *Journal of Hazardous Materials*. 2020, vol. 396, article 122725. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122725.

2. Harkness J. S., Sulkin B., Vengosh A. Evidence for coal ash ponds leaking in the Southeastern United States. *Environmental Science & Technology*. 2016, vol. 50, no. 12, pp. 6583–6592. DOI: 10.1021/acs.est.6b01727.

3. Petrović M., Fiket Ž. Environmental damage caused by coal combustion residue disposal: A critical review of risk assessment methodologies. *Chemosphere*. 2022, vol. 299, article 134410. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134410.

4. Chen Y., Fan Y., Huang Y., Liao X., Xu W., Zhang T. A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024, vol. 269, article 115905. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115905.

5. Tian Q., Guo B., Nakama S., Sasaki K. Distributions and leaching behaviors of toxic elements in fly ash. *ACS Omega*. 2018, vol. 3, no. 10, pp. 13055–13064. DOI: 10.1021/acsomega.8b02096.

6. Khudyakova L. I., Garkusheva N. M., Paleev P. L., Kotova I. Yu., Khomoksonova D. P., Gulyashinov P. A., Antropova I. G. Revegetation of thermal power plant ash dumps or sustainable urban development. *Urban Science*. 2025, vol. 9, no. 6, article 210. DOI: 10.3390/urbansci9060210.

7. Lemly A. D. Damage cost of the Dan River coal ash spill. *Environmental Pollution*. 2015, vol. 197, pp. 55–61. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.11.027.

8. Santamarina J. C., Torres-Cruz L. A., Bachus R. C. Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*. 2019, vol. 364, no. 6440, pp. 526–528. DOI: 10.1126/science.aax1927.

9. Banda M. F., Matabane D. L., Munyengabe A. A phytoremediation approach for the restoration of coal fly ash polluted sites: a review. *Heliyon*. 2024, vol. 10, no. 23, article e40741. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40741.

10. Vshivkova T. S., Omelchenko M. V., Burukhina E. V., Samchinskaya L. P., Sibirskaya E. K. Assessment of the impact of Partizanskaya GRES on the ecological state of the Partizanskaya River and the Klyuch Lozovy River. *Vladimir Ya. Levanidov's biennial memorial meetings*. 2005, no. 3, pp. 139–155. [In Russ].

11. Dushkova D. O., Evseev A. V. Analisys of technogenic impact on geosystems of the European Russian North. *Arctic and North*. 2011, no. 4, pp. 162–195. [In Russ].

12. Krylov D., Putintseva V., Krylov E. Environmental consequences of using coal instead of natural gas in the energy sector. *Bulletin on Atomic Energy*. 2001, no. 9, pp. 6–16. [In Russ].

13. Parfenova A. E. Phytoremediation of soil covers contaminated with heavy metal salts. Analytical review. *Ecosystemy*. 2023, no. 35, pp. 64–73. [In Russ].

14. Sirotyuk V. V. Some features of the composition and properties of ash and slag and fly ash from burning Ekibastuz coals. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025, vol. 22, no. 3, pp. 460–477. [In Russ]. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-3-460-477.

15. Uzarowicz Ł., Zagórski Z., Mendak E., Bartmiński P., Szara E., Kondras M., Oktaba L., Wendland A., Rogoziński R. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part I. Properties, classification, and indicators of early pedogenesis. *Catena*. 2017, vol. 157, pp. 75–89. DOI: 10.1016/j.catena.2017.05.010.

16. Uzarowicz Ł., Skiba M., Leue M., Zagórski Z., Gąsiński A., Trzciński J. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bitu-

minous coal and lignite. Part II. Mineral transformations and soil evolution. *Catena*. 2018, vol. 162, pp. 255 – 269. DOI: 10.1016/j.catena.2017.11.005.

17. Izquierdo M., Querol X. Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview. *International Journal of Coal Geology.* 2012, vol. 94, pp. 54 – 66. DOI: 10.1016/j.coal.2011.10.006.

18. Uzarowicz Ł., Górka-Kostrubiec B., Dudzisz K., Rachwał M., Zagórski Z. Magnetic characterization and iron oxide transformations in Technosols developed from thermal power station ash. *Catena*. 2021, vol. 202, article 105292. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105292.

19. Dergacheva M., Trunova V., Nekrasova O., Siromlya T., Uchaev A., Bazhina N., Radchenko T., Betekhtina A. Assessment of the macro- and microelement composition of fly ash from 50-year-old ash dumps in the Middle Urals (Russia). *Metals*. 2021, vol. 11, no. 10, article 1589. DOI: 10.3390/met11101589.

20. Nekrasova O., Radchenko T., Betekhtina A., Petrova T., Uchaev A., Dergacheva M. Carbon sequestration by soils of ash dump forest areas in the Middle Urals (Russia). *Forests*. 2023, vol. 14, no. 11, article 2178. DOI: 10.3390/f14112178.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вальцева Александра Игоревна[1] – канд. техн. наук, доцент,
e-mail: a.i.valtseva@urfu.ru, ORCID ID: 0000-0003-0094-0775,
Вальцев Николай Владимирович[1] – старший преподаватель,
e-mail: n.v.valtsev@urfu.ru, ORCID ID: 0009-0008-3001-5103,
Морозов Юрий Петрович – д-р техн. наук, профессор,
Уральский государственный горный университет,
e-mail: tails2002@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0003-0554-5176,
Барбин Николай Михайлович[1] – д-р техн. наук, профессор;
Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий,
e-mail: n.m.barbin@urfu.ru, ORCID ID: 0000-0002-6709-4334,
Швец Михаил Алексеевич[1] – ведущий программист,
e-mail: m.a.shvets@urfu.ru, ORCID ID: 0009-0000-8972-2947,
[1] Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.
Для контактов: Вальцева А.И., e-mail: a.i.valtseva@urfu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.I. Valtseva[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: a.i.valtseva@urfu.ru, ORCID ID: 0000-0003-0094-0775,
N.V. Valtsev[1], Senior Lecturer, e-mail: n.v.valtsev@urfu.ru,
ORCID ID: 0009-0008-3001-5103,
Yu.P. Morozov, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Ural State Mining University, 620144, Yekaterinburg, Russia,
e-mail: tails2002@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0003-0554-5176,
N.M. Barbin[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor; Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 620062, Yekaterinburg, Russia,
e-mail: n.m.barbin@urfu.ru, ORCID ID: 0000-0002-6709-4334,
M.A. Shvets[1], Leading Programmer, e-mail: m.a.shvets@urfu.ru,
ORCID ID: 0009-0000-8972-2947,
[1] Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, 620062, Yekaterinburg, Russia.
Corresponding author: A.I. Valtseva, e-mail: a.i.valtseva@urfu.ru.

Получена редакцией 08.07.2026; получена после рецензии 23.07.2026; принята к печати 20.10.2026.
Received by the editors 08.07.2026; received after the review 23.07.2026; accepted for printing 20.10.2026.