

## ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.7, 622.80

### МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ПЫЛЕНИЯ ОТВАЛОВ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Д. В. Макаров<sup>1</sup>, О. Т. Кониная<sup>1,2</sup>, А. А. Горячев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера  
Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр РАН”,  
E-mail: d.makarov@ksc.ru, ул. Ферсмана, 14а, 184209, г. Апатиты, Россия

<sup>2</sup>ООО “Берингпромуголь”, E-mail: o.konina@tig.com.ru, ул. Мандрикова, 3,  
689100, п. Беринговский, Чукотский АО, Россия

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр “Кольский научный центр РАН”,  
E-mail: a.goryachev@ksc.ru, ул. Ферсмана, 14, 184209, г. Апатиты, Россия

Представлен обзор имеющихся способов подавления эмиссии пылевых частиц при эксплуатации действующих и законсервированных хвостохранилищ. Показано, что характер и последствия воздействия минеральных пылевых частиц на окружающую среду многообразны. Определены способы подавления пыли поверхностного слоя хвостохранилищ: физико-химический — наиболее применяемый, а также механический, биологический. Выявлены требования к связующим реагентам — эффективность пылеподавления, долговечность, безопасность для окружающей среды. Установлено, что регулировать процесс пыления возможно с помощью природных климатических явлений, например путем контроля сезонных процессов промерзания-оттаивания поверхности хвостохранилища. Представлены технические решения, посвященные разработке способов и устройств для нанесения связующих реагентов с целью снижения пыления отвалов пород и хвостов обогащения горно-обогажительных предприятий.

*Пылеподавление, методы рекультивации и консервации, закрепление поверхности хвостохранилищ, связующие реагенты*

DOI: 10.15372/FTPRPI20210416

В процессе добычи и переработки полезных ископаемых образуются минеральные пылевые частицы, способные мигрировать с воздушными потоками [1]. Пыль на рудниках появляется при бурении, производстве взрывных работ, транспортировке сырья, его измельчении, сортировке и складировании.

Работа выполнена в рамках тем НИР (№ 0226-2019-0047, 0226-2019-0011) и частично поддержана средствами гранта РФФИ (проект № 19-05-50065 Микромир)

Результатом обогатительного передела является формирование значительных по площади отвалов вскрышных пород и хранилищ тонкодисперсных отходов. Хвостовые хозяйства — комплекс гидротехнических сооружений, включающих системы гидротранспорта и укладки тонкодисперсных отходов обогащения полезных ископаемых, отвода и очистки сточных вод, возврата ее в оборот после осветления. Находясь под воздействием атмосферных явлений, хвостохранилища становятся источниками интенсивного негативного воздействия на природную среду. Основная причина — высыхание поверхности пляжей хвостохранилищ в летний период, что увеличивает ее подверженность ветровой эрозии. Под действием эрозии возникает пыление, негативно влияющее на воздушный и водный бассейны, почву, экосистемы прилегающих территорий, а также на здоровье населения [1, 2, 4, 5]. Масштабы негативного влияния обусловлены значительной площадью хвостохранилищ. Например, суммарная площадь хранилищ хвостов обогащения только предприятий Мурманской области составляет свыше 6 тыс. га [3].

Экологическая проблема пыления хвостов актуальна как для Российской Федерации, так и для других стран [1, 5–11]. Важная особенность техногенной пыли — концентрирование во всех ее видах широкого круга химических элементов, содержания которых в пыли существенно превышают их кларки в природных средах [12]. Вследствие этого характер воздействия пыли на окружающую среду достаточно многообразен. В [7] представлена минералогия радиоактивной пыли из хвостов, образующихся при добыче урановых руд. Данный вид пыли способен вызывать рак легких. Высокие концентрации мышьяка зафиксированы во фракции более 8 мкм при пылении выведенных из эксплуатации хвостохранилищ в Новой Шотландии (Канада) [9]. Исследование на юго-востоке Испании показало, что фракция PM<sub>10</sub> частиц, рассеянных в окружающую среду при пылении окисленных железистых хвостов, преимущественно обогащена металлоидами, такими как мышьяк и сурьма [8].

Развиваемые в настоящее время принципы устойчивого развития горнодобывающей и обогатительной отраслей промышленности подразумевают создание условий для непрерывной работы предприятий без превышения определенного предела нагрузки на окружающую среду. В процессе организации деятельности горного предприятия следует принимать во внимание возрастающее влияние экологических факторов [13].

Принципы экономически обоснованного и экологически безопасного освоения недр включают создание системы экологического мониторинга. Внедрение мониторинга в деятельность крупных предприятий, занимающихся добычей и обогащением полезных ископаемых, позволяет установить степень их влияния на природную среду. По результатам анализа зачастую выявляется необходимость мероприятий по снижению пыления отвалов и хвостохранилищ посредством увеличения площадей рекультивации либо путем вовлечения “лежалых” хвостов в переработку. Система экологического мониторинга дает возможность предупреждать негативное воздействие конкретного вида производственной деятельности. Это способствует организации экологически безопасного производства [13–15].

Цель настоящей работы — обзор имеющихся перспективных способов пылеподавления отвалов горнопромышленных отходов, задача — анализ отечественной и зарубежной литературы, посвященной способам закрепления тонкодисперсных отходов обогащения, а также технологиям и устройствам нанесения связующих реагентов.

## СПОСОБЫ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПЫЛЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТВАЛОВ

В связи с высокой экологической опасностью, вызываемой эмиссией минеральных пылевых частиц, активно разрабатываются и совершенствуются методы рекультивации и консервации горнопромышленных отвалов прежде всего тонкодисперсных материалов. Методы консервации разделяются на механические, физико-химические и биологические [16, 17].

Суть механического метода заключается в следующем. Поверхность горнопромышленного отвала засыпают слоем инертного материала толщиной ~20 см. В качестве инертных материалов обычно используют щебень или гравий, которые устойчивы при воздействии атмосферных явлений. Физико-химический метод подразумевает обработку пылящей поверхности вяжущими реагентами. В результате на поверхности создается противозерозионное покрытие, не допускающее поднятие частиц пыли в воздух даже при высокой скорости ветра. Данный метод рекомендуется с целью кратковременного закрепления очагов пыления на действующих хвостохранилищах.

Биологический метод основан на создании почвенного и растительного покрова на территории, подверженной интенсивной ветровой нагрузке. На поверхность наносится слой плодородного грунта различной мощности (иногда свыше 40 см) с последующим посевом или посадкой растений [16, 18]. В условиях Мурманской области широко используется аборигенный вид — волоснец песчаный [19]. Биологическая рекультивация применяется на законсервированных хвостохранилищах или на участках, выведенных из эксплуатации, — дамбах обвалования, откосах. Восстановление нарушенных земель возможно осуществлять на основе естественного почвообразования. В [20] рассмотрена технология, при которой почвообразование достигается за счет формирования биологически активной среды путем создания сеяного фитотенноза под полимерным покрытием без нанесения плодородного слоя.

В [21] предлагаются следующие способы закрепления поверхностного слоя хвостохранилищ: аэродинамический, гидротехнический, технологический, механический, биологический, химический. При аэродинамическом способе регулируют направление и скорость воздушных потоков, оказывающих влияние на поверхность хвостов. Путем устройства лесозащитных полос и защитных экранов возможно снизить скорость ветра до такого уровня, при котором частицы пыли не будут переходить в аэрозольное состояние [21, 22].

Гидротехнический способ подразумевает регулярное увлажнение поверхностного слоя хвостохранилища с применением специальных установок для орошения, например дождеваль-ных машин. Увлажнение организуется путем забора воды из пруда-отстойника либо за счет регулирования схемы сброса хвостовой пульпы [21]. Для хвостохранилищ, выведенных из эксплуатации, защиту от эмиссии пылевых частиц можно обеспечить затоплением поверхности пляжа. Поддержание постоянного уровня воды над поверхностью хвостов возможно с использованием пруда-накопителя, однако данное мероприятие требует значительных энергетических затрат и расхода воды.

На хвостовом хозяйстве АО «Лебединский ГОК» борьбу с пылением осуществляют орошением водой, применяя гидравлическую завесу. Вертикальная завеса перехватывает частицы пыли, взвешенные в воздухе [22]. Поскольку эффективность пылеподавления при таком подходе определяется высотой подъема капель в воздухе, то для обеспечения максимально возможного подавления пыли используют системы подачи воды под высоким напором. Следует отметить, что применение данного метода в сухую и жаркую погоду малоэффективно.

Имеется опыт использования аэродинамического способа подавления выноса пылевых частиц, при котором с учетом розы ветров и аэродинамического режима хвостохранилища устанавливаются экраны по площади пылящей поверхности. Данный подход предложен В. С. Кузнецовым для хвостохранилища АО «Олкон» [23].

Разработана технология круглогодичной надводной укладки хвостов на пляжи для наращивания ограждающих дамб. При таком подходе снижаются материальные затраты. Существует возможность управления процессом намыва, проблема пыления решается подъемом уровня воды. Данный метод реализуется в АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» [23].

Технологический способ закрепления основан на добавлении в пульпу реагента, что позволяет закрепить хвосты в общей массе за счет связывания минеральных пылевых частиц после их отложения на поверхности [24, 25]. Этот способ можно считать разновидностью химических методов. В [26] рассмотрена возможность использования комплексных связующих реагентов для закрепления сухой наклонной поверхности пляжей хвостохранилищ. Реагент распределяется в хвостовой пульпе и аккумулируется на площади пляжей при намыве. В состав входит глина из вскрышной породы АО «Стойленский горно-обогатительный комбинат», скрепленная при мелкодисперсном помоле с макулатурой в массовом соотношении одна часть бумажных отходов и 7–10 частей глины.

Преимуществом технологического закрепления является отсутствие необходимости применения специальной техники и сложных механизмов подготовки поверхности и нанесения закрепителей. Однако при его использовании часть реагента остается в пруде-отстойнике. Кроме того, закрепление всего объема хвостов может ограничить возможность дальнейшей переработки складированных отходов [21, 26].

В случае, когда из сложенных в отвал материалов хвосто- и шламоохранилищ планируется доизвлечение ценных компонентов, предпочтительны физико-химические методы закрепления очагов пыления. Это обусловлено необходимостью соблюдать санитарно-гигиенические нормы. Используемые химические реагенты-закрепители для исключения ветровой эрозии должны обеспечивать высокую прочность (в том числе после намыва) обработанной поверхности. Важным условием является полная механизация работ при невысоком расходе реагента. Выбранный закрепитель не должен загрязнять водоемы, находящиеся в зоне влияния хвостового хозяйства, а также не должен быть дорогостоящим и дефицитным. Приоритет следует отдавать биологически разлагаемым реагентам [27].

Широко применяются методы цементации, силикатизации, битумизации. Исследования, проведенные еще в СССР Всесоюзным научно-исследовательским институтом безопасности труда в горнорудной промышленности (ВНИИБТГ), г. Кривой Рог, показали, что для закрепления сухих пляжей может быть рекомендована битумная эмульсия 20%-ной концентрации с расходом 1.1–1.2 л/м<sup>2</sup>, а для закрепления откосов дамб и плотин — 30%-ная с расходом 1.5 л/м<sup>2</sup>. Для борьбы с ветровой эрозией широко применяются водорастворимые полимеры К-4, К-6, ПАА (полиакриламид). Для промышленных испытаний ВНИИБТГ рекомендованы следующие закрепители пылящих поверхностей: госсиполовая эмульсия 20%-ной концентрации, нерозин, универсин (все с расходом 1 кг/м<sup>2</sup>) [27].

Имеется опыт реагентного пылеподавления в климатических условиях Крайнего Севера. Так, закрепление хвостов обогащения апатито-нефелиновых руд на КФ АО «Апатит» с 2003 г. осуществлялось битумной эмульсией ЭБА-3, которая перед нанесением разбавлялась горячей водой в соотношении от 1:2 до 1:10. Выбор битумной эмульсии обусловлен тем, что данный реагент имеет широкий температурный диапазон использования и не теряет свойства при замораживании. Еще одним преимуществом битумной эмульсии является срок службы, составляющий 4–6 месяцев, что позволяет использовать ее для закрепления как намывных пляжей,

так и поверхностей откосов и оснований дамб. При скорости ветра  $\geq 10$  м/с поверхностная пленка разрушалась. Наличие частиц шлама в хвостовой пульпе в единичных случаях приводило к низкой адгезии разбавленной эмульсии к поверхностному слою хвостов. Возникали очаги пыления около мест разгрузки пульпы, которые не выдерживали ветровой нагрузки [28]. Эти участки были основными источниками выносимой за пределы санитарно-защитной зоны хвостохранилища мелкодисперсной пыли. По этой причине был проведен поиск и последующие испытания новых связующих веществ [29]. По результатам проведенных испытаний выбран новый реагент Dustbind. В настоящее время этот закрепитель успешно используется для пылеподавления вместо анионной битумной эмульсии, что позволяет существенно снизить трудозатраты и сократить время обработки пылящей поверхности.

Рассмотрим некоторые предложенные связующие реагенты и способы закрепления пылящих поверхностей хвостовых отвалов. В [27] разработан пылеподавляющий состав, который обеспечивает водостойкость формируемого покрытия на поверхностях пыления, а также позволяет снизить расход реагентов. В основе состава — сульфатное мыло (омыленный талловый пек) и полиакриламид, остальное — вода.

Запатентован безопасный для окружающей среды состав на основе акриловой дисперсии (табл. 1) [30]. Состав обеспечивает повышение устойчивости поверхности хвостов к ветровой эрозии при значительном увеличении долговечности и прочности образуемого поверхностного слоя.

ТАБЛИЦА 1. Компоненты пылеподавляющего реагента

Компонент	Содержание, мас. %
Акриловая дисперсия (50–60 %)	1–28
Сополимер ацетата с виниловыми эфирами карбоновых кислот	2–10
Олигомер полиэтилена	1–5
Поверхностно-активное вещество алкилсульфат	0.8–1.8
Оксиэтилцеллюлоза	0.2–0.8
Вода	Остальное

В [31] предложен состав, который включает ~12 % пластификатора адипинового щелочного, ~17 % келловейской глины в виде порошка и техническую воду. Расход реагента от 3–4 л/м<sup>2</sup> поверхности тонкодисперсных отвалов позволяет улучшить прочностные характеристики и повысить долговечность защитных покрытий.

В качестве закрепляющего реагента предложено высокомолекулярное соединение — поливинилбутираль. Его перемешивают с хвостами, полученную смесь нагревают до температуры плавления поливинилбутираля [32, 33]. В результате на пылящей поверхности образуется прочная стеклоподобная пленка, отличающаяся устойчивостью к воздействию атмосферных явлений. Данное покрытие не разрушается под действием ветровых нагрузок, осадков, низких и высоких температур.

Согласно патенту [34], обеспыливание осуществляют водным раствором композиции, включающей 10–40 мас. % фосфолипидов, 20–80 мас. % ПАВ и 1–20 мас. % присадки, выбранной из группы, которая состоит из многоатомных спиртов, мочевины, моносахарида, полисахарида, полиакриловой кислоты, полиэтиленгликоля, полисилоксана, лигносульфонатов, микрокристаллического воска и их смесей.

Предложен способ предотвращения пыления гидроотвалов, заключающийся во введении в хвостовую пульпу совместно вяжущего материала и флокулянта [35]. В качестве вяжущего материала предлагается использовать технические лигносульфонаты в количестве 0.5–0.8 % (к твердому пульпы), а в качестве флокулянта — 0.002–0.005 % полиакриламида. Оба реагента предлагается вводить в пульпу в сухом виде в последние сутки намыва очередной карты хвостохранилища. При этом противозерозионный слой хвостовых отложений должен быть мощностью не менее 3.0 см.

В [36] запатентован способ, согласно которому на подверженную пылению поверхность последовательно наносится водный раствор сополимера акриламида с производными акриловой кислоты концентрацией не менее 0.5 %. Расход реагентов составляет 2.0–2.5 и 1.0–2.0 г/м<sup>2</sup> площади пылящей поверхности соответственно.

Для обеспечения возможности управления свойствами закрепляющего слоя в способе [37, 38] используются неорганические реагенты. На поверхность пляжа наносится меловая суспензия, после чего следует ее обработка разбавленным раствором серной кислоты. В результате образуется слой, близкий по составу к природному гипсу ( $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$ ). Для минимизации негативного воздействия на окружающую среду и регулирования прочности закрепляемой поверхности обработка поверхности раствором  $\text{H}_2\text{SO}_4$  производится в стехиометрическом отношении к внесенному мелу в виде водного раствора с концентрацией от 3 до 15 % (по массе). Толщина и сроки твердения напрямую зависят от количества вносимого мела.

Эффективным покрытием является нетоксичная корка на поверхности материала, получаемая путем смешения бентонитовой глины с грунтом или нанесения полимера гуаровой камеди на поверхность хвостов [17].

Подавление пыли на действующих хвостохранилищах горно-обогатительных предприятий предложено проводить с применением раствора природного бишофита [39]. Раствор бишофита ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) не горюч и не взрывоопасен, обладает высокой растворимостью в воде. В течение длительного времени (до 90 сут) концентрация пыли в воздухе после обработки поверхности данным реагентом не превышала ПДК, при этом скорость ветра иногда достигала 15 м/с. Оптимальным является расход раствора 1.5–2.0 л/м<sup>2</sup> поверхности. Вследствие своей низкой температуры замерзания (–35 °С) раствор бишофита может применяться для обработки поверхности хвостохранилищ круглогодично [40].

Имеется опыт закрепления подверженной пылению поверхности грунтосмесью в виде окатышей (табл. 2). Расход окатышей при укладке материала на поверхность составлял 8–10 кг на 1 м<sup>2</sup>.

ТАБЛИЦА 2. Компоненты пылеподавляющей грунтосмеси [38]

Компонент	Содержание, мас. %
Глина	68–75
Дробленая солома, камыш или опилки	3–8
Лигносульфонаты или гипан	0.3–1.0
Семена растений, вода	Остальное

Биологический способ закрепления поверхности хвостохранилищ достаточно эффективен и подразумевает нанесение в качестве закрепляющего реагента глинистого раствора. Помимо глины и воды в состав входят такие компоненты, как чернозем, опилки, гипан или лигносульфонаты, удобрения, семена растений [39]. Расход раствора 12–15 л на 1 м<sup>2</sup>.

Представляет интерес еще одно предложение, сочетающее физико-химический и биологический методы [40]. На пылящую поверхность наносится смесь, которую готовят путем соединения остатков естественного происхождения и высокомолекулярного соединения (соотношение 125:1). При постоянном увлажнении в смесь вносят семена трав, что позволяет создать основу для формирования продуктивного слоя, обеспечить связывание минеральных пылевых частиц и снизить вероятность их эмиссии.

Разработан способ закрепления поверхности пляжей с помощью экологически безопасного биоактивного вещества, основу которого составляет сапрпель [41]. Показана его эффективность в процессе биологической рекультивации тонкодисперсных отвалов. Проведенные исследования позволили установить, что при концентрации 6–15 % сапрпель повышает всхожесть семян, улучшает рост корешков и надземной части проростков, ускоряет укоренение травяной растительности. В результате эффективность подавления пыли повышается на 85 % по сравнению с орошением водой.

### СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ СВЯЗУЮЩИХ РЕАГЕНТОВ

Ряд технических решений посвящен разработке способов и конструкций для нанесения связующих реагентов. Разработана установка на основе снегогенератора для связывания пылевых аэрозолей и аэрогелей [42]. Она повышает эффективность пылеподавления по сравнению с имеющимися прототипами. Технический результат — дополнительная емкость, заполненная биоклеящим раствором и системой подвода раствора к форсункам-диспергаторам.

Запатентовано устройство для закрепления пылящих пляжей, позволяющее улучшить прочностные характеристики поверхностного слоя [43]. Оно содержит раму, специальную емкость с трубопроводами и соплами, средство для рыхления в виде вогнутых дисков, установленных на осях. Одним из новшеств данного устройства является возможность эффективно рыхлить поверхностный слой и перемешивать его с водой и реагентом, которые подаются через сопла по трубопроводам. Процесс завершается дальнейшей укаткой почвы катком.

В [44] предложено устройство на основе транспортного плавсредства. Обязательное условие для осуществления данного подхода — подтопление хвостохранилища. Плавсредство первоначально помещают на затопленной части пляжа, после чего его направляют к берегу в сектор орошения. Установленный на палубе рабочий орган прокладывает в береговой полосе канал, по которому перемещается плавсредство. Для орошения поверхности из хвостохранилища закачивают насосом воду, добавляют реагент из емкости, находящейся также на палубе, и орошают пылящий участок с помощью гидромонитора.

В [45] разработан способ закрепления поверхности пляжей и бортов дамбы намывных техногенных массивов, отличающийся высокой селективностью закрепления. Использование подвижного комплекса на воздушной подушке для оперативного подавления обеспечивает эффективное закрепление всей поверхности намывного техногенного массива. Данный подход применим для намывных пляжей, обладающих слабой несущей способностью. Существует возможность оперативного пылеподавления в зонах интенсивного пыления вне зависимости от метеорологических условий и состояния поверхности хвостохранилища в момент проведения работ.

Исследование А. В. Немировского посвящено созданию технологического подхода, заключающегося в нанесении на пылящие участки комплексных связующих реагентов на значительное расстояние от точки сброса. Дальность покрытия реагентом обеспечивается использованием напорной струи воды и инжектора. Разброс реагента возможен на расстояние до 15 м от дамбы [26]. Обосновано использование минеральных связующих агентов в виде карбонатов кальция и магния. Также возможно применение алюмосиликатов (глинистых пород). Карбонатные и глинистые породы содержатся в примесях исходной руды, поступающей на обогащение, и продуктах обогащения в количестве ~5%. Для повышения устойчивости намывного хвостохранилища к ветровым нагрузкам предусматривается удлинение распределительных пульповодов на 50 м от периферийной части хвостохранилища. Это позволяет обеспечить намыв как вглубь пруда-отстойника, так и в направлении периферийной части хвостохранилища.

Процесс пыления в районах с продолжительным периодом отрицательных температур зависит от ряда специфических факторов. Среди них можно выделить процессы зимнего промерзания и летнего оттаивания техногенных массивов [46]. В результате высыхания поверхности и последующей эмиссии частиц происходит загрязнение атмосферного воздуха и почвенного покрова в зоне влияния техногенного массива. Помимо этого, отмечается токсическое воздействие на растительные сообщества и живые организмы. Как показывает практика, для управления пылеобразованием в процессе эксплуатации отвалов и других промышленных массивов такого типа в суровых климатических условиях Центральной Сибири можно эффективно использовать криогенные процессы.

В [46] разработана технология подавления пыли, которая заключается в намыве пляжа в период с апреля по сентябрь с последующим замораживанием поверхности. Существует возможность поддерживать поверхность пляжа во влажном состоянии в течение длительного времени за счет создания ледяной теплоизоляции и контроля процесса оттаивания слоя льда, минимизируя вероятность эмиссии пылевых частиц. В результате обеспечивается прекращение пыления в период неблагоприятных метеорологических условий и снижается фильтрационная нагрузка на ограждающую дамбу, повышая устойчивость сооружения.

## ВЫВОДЫ

Исследования вещественного состава отходов горно-обогатительных производств указывают на высокую степень их дисперсности, в среднем пылеватые частицы имеют размер от 0.1 до 100 мкм. Складирование тонкодисперсных хвостов обогащения вызывает последующую миграцию частиц пыли с воздушными потоками. В результате формируются техногенные геохимические аномалии в воздушной среде, почвах, снеговом покрове.

Представленные технические решения, посвященные разработке способов и устройств для нанесения связующих реагентов, отличаются многообразием и адаптированы к локальным условиям конкретного хвостового хозяйства. Технические решения предусматривают как непрерывное орошение водой с помощью высоконапорных систем, так и возможность нанесения связующих реагентов с помощью специальной техники по всей поверхности пылящих отвалов. Основным критерий успешности пылеподавления — снижение концентрации пыли в атмосферном воздухе до уровня ниже ПДК при минимальных экономических затратах.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Noble T. L., Parbhakar-Fox A., Berry R. F., and Lottermoser B.** Mineral dust emissions at metalliferous mine sites, *Environmental Indicators in Metal Mining*, Springer Int. Publish., Switzerland, 2017. — P. 281–306.
2. **Стриженок А. В., Иванов А. В.** Совершенствование технологии закрепления пылящих поверхностей намывных техногенных массивов в период их эксплуатации // *Гидротехническое строительство*. — 2016. — № 3. — С. 19–22.
3. **Nevskaya M. A., Seleznev S. G., Masloboev V. A., Klyuchnikova E. M., and Makarov D. V.** Environmental and business challenges presented by mining and mineral processing waste in the Russian Federation, *Minerals*, 2019, Vol. 9. — P. 445.
4. **Амосов П. В., Бакланов А. А., Масlobоев В. А.** Результаты оценки загрязнения атмосферы при пылении хвостохранилища (на базе трехмерного моделирования) // *Горн. журн.* — 2017. — № 6. — С. 87–94.
5. **Айрияц А. А., Бортникова С. Б.** Хранилище сульфидсодержащих отходов обогащения как источник тяжелых металлов (Zn, Pb, Cu, Cd) в окружающей среде // *Химия в интересах устойчивого развития*. — 2000. — Т. 8. — С. 315–326.
6. **Moreno T., Higuera P., Jones T., McDonald I., and Gibbons W.** Size fractionation in mercury-bearing airborne particles (HgPM<sub>10</sub>) at Almadén, Spain: implications for inhalation hazards around old mines, *Atmos. Environ.*, 2005, Vol. 39. — P. 6409–6419.
7. **Abdelouas A.** Uranium mill tailings: geochemistry, mineralogy, and environmental impact, *Elements*, 2006, Vol. 2. — P. 335–341.
8. **Loredo J., Soto J., Álvarez R., and Ordóñez A.** Atmospheric monitoring at abandoned mercury mine sites in Asturias (NW Spain), *Environ. Monit. Assess.*, 2007, Vol. 130. — P. 201–214.
9. **Corriveau M. C., Jamieson H. E., Parsons M. B., Campbell J. L., and Lanzirotti A.** Direct characterization of airborne particles associated with arsenic-rich mine tailings: particle size, mineralogy and texture, *Appl. Geochem.*, 2011, Vol. 26. — P. 1639–1648.
10. **Lilic N., Cvjetic A., Knezevic D., Milisavljevic V., and Pantelic U.** Dust and noise environmental impact assessment and control in Serbian mining practice, *Minerals*, 2018, Vol. 8. — P. 34.
11. **Майорова Л. П., Черенцова А. А., Крупская Л. Т., Голубев Д. А., Колобанов К. А.** Оценка техногенного загрязнения воздушного бассейна при пылении хвостохранилищ // *ГИАБ*. — 2021. — № 1. — С. 5–20.
12. **Янин Е. П.** Промышленная пыль в городской среде (геохимические особенности и экологическая оценка). — М.: ИМГРЭ, 2003. — 82 с.
13. **Каплунов Д. Р., Юков В. А.** О принципах перехода горнодобывающего предприятия к устойчивому экологически сбалансированному развитию // *ГИАБ*. — 2020. — № 3. — С. 74–86.
14. **Захаров А. В., Гуман О. М., Макаров А. Б., Антонова И. А., Ли Т. И.** Экологическое состояние окружающей среды отвалов черной металлургии (по результатам мониторинга шлакового отвала НТМК) // *Известия УрГГУ*. — 2014. — № 3, Вып. 35. — С. 51–56.
15. **Чепелев О. А., Ломиворотова О. М.** Изучение пыления хвостохранилищ и отвалов Лебединского горно-обогатительного комбината при помощи оптического анализатора аэрозолей // *Проблемы региональной экологии*. — 2011. — № 2. — С. 45–48.
16. **Михайлова Т. Л., Хохряков А. В.** Рациональное землепользование в цветной металлургии // *Горн. журн.* — 1993. — № 6. — С. 97–137.

17. **Cecala A. B., O'Brien A. D., Schall J., Colinet J. F., Fox W. R., Franta R. J., Joy J., Reed W. R., Reeser P. W., Rounds J. R., and Schultz M. J.** Dust control handbook for industrial minerals mining and processing. Report of investigations 9689, National Institute for Occupational Safety and Health, 2012. — 284 p.
18. **Панов С. Н., Бутаков О. Н., Атавина Т. М.** Хвостохранилища: биологическое закрепление и ускоренная рекультивация // Экология производства. — 2014. — № 11. — С. 58–61.
19. **Переверзев В. Н., Подлесная Н. И.** Биологическая рекультивация промышленных отвалов на Крайнем Севере. — Апатиты: КФ АН СССР, 1986. — 104 с.
20. **Месяц С. П., Волкова Е. Ю.** Базовые положения стратегии возвращения нарушенных земель техногенных ландшафтов биосферному фонду // Экология ресурсопользования. ГИАБ. Спец. выпуск. — 2014. — № 12. — С. 3–11.
21. **Лычагин Е. В., Синица И. В.** Совершенствование методов закрепления пылящих поверхностей // ГИАБ. — 2007. — № 8. — С. 136–140.
22. **Кузнецов В. С.** Оценка пылевого загрязнения при ведении открытых горных работ на основе экологического риска: дисс. ... канд. техн. наук. — СПб., 2006. — 20 с.
23. **Бруев В. П.** Михайловский ГОК наращивает темпы производства // Горн. журн. — 2004. — № 1. — С. 25–28.
24. **Мелентьев В. А., Колпашников Н. П., Волнин Б. А.** Намывные гидротехнические сооружения. — М.: Энергия, 1973. — 248 с.
25. **Кретинин А. В., Борисов В. Г., Жушман В. Н.** Способ борьбы с пылью на действующих хвостохранилищах // Цв. металлургия. — 1988. — № 3. — С. 55–57.
26. **Немировский А. В.** Разработка метода формирования намывного хвостохранилища, устойчивого к ветровым потокам: дисс. ... канд. техн. наук. — М., 2016. — 19 с.
27. **Пат. 2029775 РФ.** Обеспыливающий состав / В. Ф. Мальярчук, Л. И. Тесленко, А. И. Веретенников, В. Г. Большунов, В. В. Бойко, Н. Н. Левчук // Оpubл. в БИ. — 1995. — № 6.
28. **Калугин А. И., Кони́на О. Т., Гусарь И. В.** Природоохранная деятельность АО «Апатит»: результаты и перспективы // Горн. журн. — 2014. — № 10. — С. 88–92.
29. **Маслобоев В. А., Светлов А. В., Кони́на О. Т., Митрофанова Г. В., Туртанов А. В., Макаров Д. В.** Выбор связующих реагентов для предотвращения пылеобразования на хвостохранилищах переработки апатит-нефелиновых руд // ФТПРПИ. — 2018. — № 2. — С. 161–171.
30. **Пат. 2137923 РФ.** Состав для закрепления пылящих поверхностей / Е. В. Кичигин, И. В. Тикунова, Л. А. Дейнека // Оpubл. в БИ. — 1999. — № 26.
31. **Пат. 2148720 РФ.** Состав для закрепления пылящих поверхностей / А. И. Перепелицын, В. И. Мочалов, В. И. Шмигирилов // Оpubл. в БИ. — 2000. — № 13.
32. **Браунер Е. Н.** Физико-химическое обоснование способов повышения эффективности закрепления пылящих поверхностей на объектах горнодобывающего комплекса Забайкалья: дис. ... канд. техн. наук. — Чита, 2000. — 23 с.
33. **Пат. 2151301 РФ.** Состав для закрепления пылящих поверхностей / В. В. Ушаков, Е. Н. Браунер // Оpubл. в БИ. — 2000. — № 17.
34. **Patent WO2013108057 A1.** Dust suppressant compositions, methods for making and methods for using / R. M. Devi, N. Madhavan, N. Adhavan, A. Bhattacharyya, N. Arumugam, Publication 25.07.2013.
35. **Патент Республики Казахстан № 782.** Способ предотвращения пыления промышленных гидротвалов / Д. К. Кайпбаев, А. Г. Олейников, Б. И. Свириякин, А. Ж. Куштаев, Н. Д. Стороженко, М. А. Арустамян // Оpubл. в БИ. — 1994. — № 2.

36. Пат. 2513786 РФ. Способ закрепления пылящих поверхностей / Ф. И. Лобанов, Е. М. Чукалина, Л. Н. Козлов, Е. Ю. Глоба, Ю. В. Каплунов // Оpubл. в БИ. — 2014. — № 11.
37. Пат. 2303700 РФ. Способ закрепления пылящих поверхностей хранилищ отходов обогащения железных руд / С. В. Сергеев, И. В. Сеница, Е. В. Лычагин // Оpubл. в БИ. — 2007. — № 21.
38. Сеница И. В. Разработка и исследование параметров способа закрепления пылящих поверхностей хвостохранилищ: дисс. ... канд. техн. наук. — Тула, 2008. — 23 с.
39. Гурин А. А., Ляшенко В. И., Домничев Н. В. Снижение пыления действующих хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов // Горн. журн. — 2012. — № 5. — С. 13–22.
40. Пат. 2407891 РФ. Способ закрепления пылящих поверхностей / Ю. В. Шувалов, М. А. Пашкевич, В. П. Ковшов, Ю. Д. Смирнов, С. В. Ковшов, М. М. Малышкин, А. С. Щербо // Оpubл. в БИ. — 2010. — № 36.
41. Ильченкова С. А. Снижение пылевой нагрузки на окружающую среду связыванием дисперсных материалов пылящих поверхностей на территории горных предприятий: дисс. ... канд. техн. наук. — СПб., 2005. — 20 с.
42. Пат. 2230997 РФ. Установка для связывания пыли / Ю. В. Шувалов, А. П. Бульбашев, С. А. Ильченкова, Н. А. Гаспарьян // Оpubл. в БИ. — 2004. — № 17.
43. Пат. 2175065 РФ. Устройство для закрепления пылящих поверхностей хвостохранилищ и отвалов горных пород / В. П. Мязин, В. А. Бабелло, В. Ф. Офицеров, Д. В. Ходкевич // Оpubл. в БИ. — 2001. — № 29.
44. Пат. 2272147 РФ. Способ пылеподавления на пляжах хвостохранилища и устройство для его осуществления / В. П. Бруев, В. И. Минеев, Ю. С. Спиридонов, Е. В. Кичигин, В. П. Петриченко // Оpubл. в БИ. — 2006. — № 8.
45. Стриженок А. В. Управление экологической безопасностью намывных техногенных массивов ОАО “Апатит” в процессе их формирования: дисс. ... канд. техн. наук. — СПб., 2015. — 20 с.
46. Комонов С. В. Технология пылеподавления на золоотвалах энергетических комплексов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Красноярск, 2006. — 19 с.

*Поступила в редакцию 16/II 2021*

*После доработки 29/III 2021*

*Принята к публикации 30/VI 2021*