Оригинальная (исследовательская) статья
УДК 504.062
https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-57-66
https://elibrary.ru/wgtqvl

Эколого-экономическое сопровождение промышленных объектов как инновационный инструмент управления

Елена Анатольевна Цешковская[1]✉, Наталья Константиновна Цой[2], Елена Ильинична Голубева[3], Вадим Максимович Цешковский[4], Людмила Михайловна Карсанова[5], Владимир Викторович Матонин[6]
[1, 2, 4, 5] Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан
[3] Московский государственный университет имени Ломоносова, Москва, Россия
[6] ТОО «ЭкоЭксперт», Караганда, Казахстан
✉ Elena_tsesh@mail.ru

Аннотация. Постановка научной проблемы и её актуальность. В статье рассмотрен методический подход к эколого-экономическому сопровождению промышленных объектов, направленный на интеграцию экологической безопасности, экономической эффективности и технологической модернизации на различных стадиях жизненного цикла производственного объекта. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от преимущественно компенсационной модели природоохранного регулирования к превентивному управлению экологическими рисками и стимулированию внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) для снижения деградации окружающей среды и устойчивого развития. Материал и методы. В качестве объекта исследования с кейсовым подходом выбрана промышленная территории горных работ Карагандинского региона Казахстана. Исследована возможность применения трехэтапной модели эколого-экономического сопровождения, включающая начальный, проектный этапы, а также этапы строительства и эксплуатации объекта. На начальном этапе осуществляется экологическая классификация объекта, как правило – это определение его категории согласно экологическому законодательству. Далее определяется необходимость проведения полномасштабной оценки воздействия на окружающую среду, выявление чувствительных компонентов природной среды. На проектном этапе формируются природоохранные мероприятия, проводятся экологические общественные слушания и экспертиза и осуществляется выбор технологических решений. На стадии эксплуатации предусматриваются производственный экологический контроль, автоматизированный мониторинг эмиссий для крупных объектов – природопользователей и управление отходами. Результаты и их обсуждение. Авторами предложен эколого-экономический показатель эффективности внедрения «зеленых» решений, учитывающий предотвращенный экологический ущерб, капитальные и эксплуатационные затраты, а также экономический эффект от ресурсосбережения и снижения экологических платежей. Обоснован подход к ранжированию наилучших доступных технологий по критериям экологической и экономической эффективности. Проанализированы кейсы, которые отражают различные сценарии. На условном сценарии показано, что увеличение эмиссий сверх установленных нормативов приводит к непропорциональному росту финансовой нагрузки предприятия, тогда как внедрение НДТ позволяет одновременно снижать экологические риски и экономические издержки.

Ключевые слова: устойчивое развитие, эколого-экономическое сопровождение, наилучшие доступные технологии, экологическая эффективность, Карагандинский регион, Казахстан

Для цитирования: Цешковская Е.А., Цой Н.К., Голубева Е.И., Цешковский В.М., Карсанова Л.М., Матонин В.В. Эколого-экономическое сопровождение промышленных объектов как инновационный инструмент управления // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2026. Т. 12. № 2. С. 57-66. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-57-66. EDN WGTQVL.

Original Paper

Environmental and economic support for industrial facilities as an innovative management tool

Yelena A. Tseshkovskaya[1]✉, Natalya K. Tsoy[2], Elena I. Golubeva[3], Vadim M. Tseshkovskiy[4], Lyudmila M. Karsanova[5], Vladimir V. Matonin[6]
[1, 2, 4, 5] Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan
[3] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[6] "EcoExpert" LLP, Karaganda, Kazakhstan
✉ Elena_tsesh@mail.ru

© Цешковская Е.А., Цой Н.К., Голубева Е.И., Цешковский В.М., Карсанова Л.М., Матонин В.В., 2026

Abstract. Relevance and problem formulation. The article examines a methodological approach to the environmental and economic support of industrial facilities, aimed at integrating environmental safety, economic efficiency, and technological modernization at various stages of a production facility's life cycle. The relevance of the study is due to the need to transition from a predominantly compensatory model of environmental regulation to preventive management of environmental risks and to encourage the implementation of the best available technologies (BAT) to reduce environmental degradation and promote sustainable development. Materials and Methods. The industrial areas of mining operations in the Karaganda region of Kazakhstan were selected as the object of the study using a case-based approach. The possibility of applying a three-stage model of environmental and economic support was investigated, including the initial and project stages, as well as the stages of construction and operation of the facility. At the initial stage, the environmental classification of the facility is carried out typically, this involves determining its category in accordance with environmental legislation. Next, the need to conduct a full-scale environmental impact assessment and to identify sensitive components of the natural environment is determined. At the design stage, environmental protection measures are developed, environmental public hearings and expert reviews are conducted, and technological solutions are selected. At the operation stage, production environmental control, automated emission monitoring for large facilities that are users of natural resources, and waste management are provided for. Results and discussion. The authors propose an ecological and economic indicator of the effectiveness of implementing "green" solutions, which takes into account the prevented environmental damage, capital and operating costs, as well as the economic effect of resource conservation and reduced environmental payments. The approach to ranking the best available technologies based on the criteria of environmental and economic efficiency is substantiated. The article analyzes cases that reflect various scenarios. The hypothetical scenario demonstrates that an increase in emissions beyond the established standards leads to a disproportionate rise in the company's financial burden, whereas the implementation of BAT makes it possible to simultaneously reduce environmental risks and economic costs.

Keywords: sustainable development, environmental and economic support, best available technologies, environmental efficiency, Karaganda region, Kazakhstan

For citation: Tseshkovskaya Ye.A., Tsoy N.K., Golubeva E.I., Tseshkovskiy V.M., Karsanova L.M., Matonin V.V. Environmental and economic support of industrial facilities as an innovative management tool. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2026. Vol. 12. Iss. 2. P. 57-66. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-57-66. EDN WGTQVL. (in Russian)

Введение

Современная промышленная политика ориентирована не только на обеспечение экономической эффективности производства, но и на снижение негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду. Особенно актуальна данная проблема для предприятий добывающей, горно-металлургической, энергетической и перерабатывающей отраслей, характеризующихся значительными объемами выбросов, сбросов, образования отходов и потребления природных ресурсов.

Традиционный подход к природоохранной деятельности зачастую основывается на контроле уже возникшего загрязнения и компенсации причиненного экологического ущерба. Такая модель ограничивает возможности долгосрочного управления экологическими рисками, поскольку основные затраты возникают после возникновения негативного воздействия. В связи с этим возрастает значение превентивного экологического управления, предусматривающего учет экологических факторов уже на стадии проектирования и выбора технологических решений.

Одним из инструментов такого подхода является эколого-экономическое сопровождение (ЭЭС), под которым в настоящем исследовании понимается система взаимосвязанного управления техническими решениями, экологическими рисками и экономическими показателями предприятия на протяжении жизненного цикла производственного объекта.

Особое значение данный подход приобретает в условиях перехода промышленных предприятий Казахстана к принципам наилучших доступных технологий. Цель исследования заключается в разработке комплексного методологического подхода к эколого-экономическому сопровождению промышленных объектов с учетом технологий, особенностей территориального расположения индустрии, имеющихся и потенциальных экологических рисков.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- систематизировать основные этапы эколого-экономического сопровождения;
- разработать алгоритм комплексной экологической оценки промышленного объекта;
- предложить показатель оценки эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий;
- разработать критерии экономического ранжирования НДТ;
- оценить влияние роста эмиссий на финансовую нагрузку предприятия;
- определить роль НДТ в снижении экологических и экономических рисков.

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в формировании интегрированной системы эколого-экономического сопровождения, объединяющей экологическую классификацию объекта, оценку экологических рисков, прогнозирование экологического ущерба, выбор НДТ, экономическую оценку технологических решений, оценку предотвращенных экологических затрат и мониторинг фактического экологического эффекта.

Предложенный подход может применяться: на предприятиях горнодобывающей промышленности при подготовке экологической документации, при выборе НДТ, разработке программ повышения экологической эффективности, при планировании экологической модернизации, при оценке инвестиционных проектов.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составили системный, эколого-экономический и риск-ориентированный подходы. При исследовании промышленный объект рассматривается как эколого-экономическая система, в которой производственные процессы связаны с потреблением природных ресурсов, образованием эмиссий и отходов, экологическими рисками и соответствующими финансовыми затратами.

Предлагаемая система включает пять взаимосвязанных элементов: производственный процесс → воздействие на природные ресурсы → экологический риск → экономические последствия → природоохранное решение.

В качестве основных методов использованы: комплексная экологическая оценка, оценка природоохранных мероприятий, сравнительный анализ альтернативных НДТ; сценарный анализ изменения эмиссий; оценка ресурсосберегающего эффекта. Кейсовый подход проведен по следующим направлениям: добыча метана и угля. Добыча метана и угля, шахтная дегазация, хранение угля объединяют задачи экологической и промышленной безопасности (Гендлер и др., 2022; Портола и др., 2019; Федоров, Гаврилов, 2021; Janoszek et al., 2016).

Результаты исследования

Экологическая оценка последствий при добыче метана

Экологическая оценка при добыче метана представлена в виде этапов для экологического проектирования. Как правило, сопровождение экологической документации, по экологической оценке, планируемого предприятия начинается с заявления о намечаемой деятельности. Заявление о намечаемой деятельности составляется по установленному шаблону согласно Экологическому Кодексу РК и Инструкции по проведению экологической оценке[1]. Экологический эффект заключается в предотвращении прямых выбросов метана, парниковый эффект которого значительный.

Специфика источников газа:

- угольный метан: добыча из неразработанных угольных пластов. Метан находится в адсорбированном состоянии. Чтобы высвободить газ, нужно откачать пластовую воду и снизить давление (рис. 1 / fig. 1);
- шахтный метан извлекается из действующих выработок в рамках дегазации для предотвращения взрывов при добыче угля;
- биогаз / органические пласты: газ биогенного происхождения, связанный с другими осадочными породами и требующий иных подходов к извлечению.

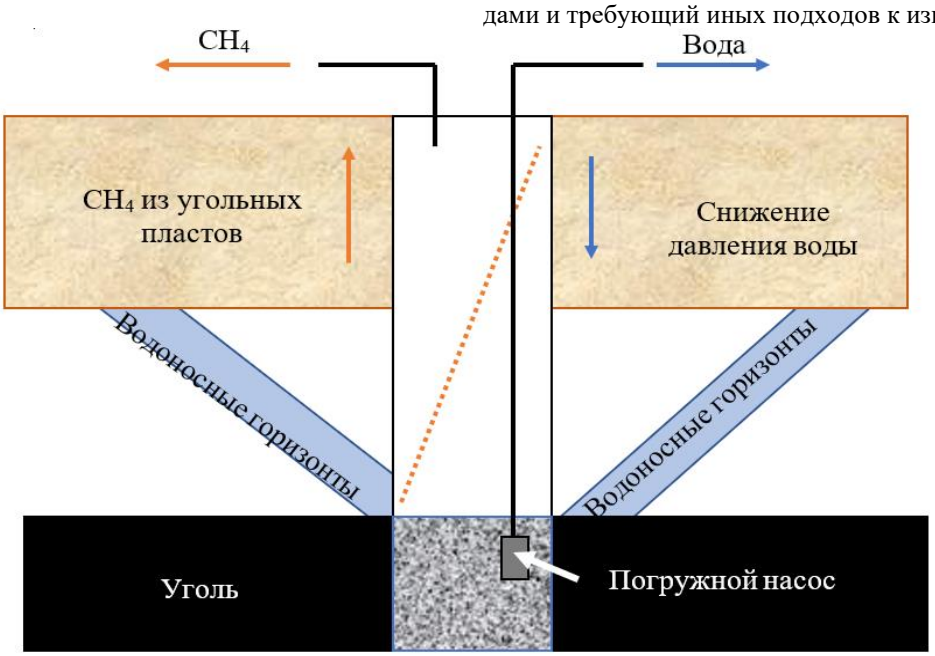


Рис. 1. Схема извлечения метана и откачки воды из угольного пласта (составлено авторами)
Fig. 1. Diagram of methane extraction and water pumping from a coal seam (compiled by the authors)

Для извлечения газа проводятся следующие виды работ:

1. Бурение и обустройство устья: локальное воздействие на рельеф и атмосферу. Изъятие 20-50 м² земель под площадку скважины. Выбросы от двигателей внутреннего сгорания буровой техники составляют около 0,5 т CO_2 за период бурения. Сопровождается локальным шумом и пылеобразованием.

2. Откачка пластовой воды: воздействие на гидросферу.

При добыче угольного метана на каждые 100 м³ извлеченного газа требуется откачивать ~0,5-2 м³/сутки минерализованной воды. Необходим анализ риска истощения смежных водоносных горизонтов.

3. Сбор, факельное сжигание или утилизация: оценка атмосферного баланса. Этот этап является основным этапом для снижения климатического урона (табл. 1 / tabl. 1). Сжигание переводит метан (CH_4) в CO_2, сокращая парниковый след объекта почти в 10 раз.

4. Демонтаж и рекультивация: завершение жизненного цикла включает ликвидационный тампонаж ствола скважины, демонтаж оборудования и полное восстановление плодородного слоя почвы.

[1] Экологический Кодекс Республики Казахстан от 02.01.2021.

Таблица 1

Сравнительный экологический баланс (на 100 м³ метана) (составлена авторами на основе расчетов)

Table 1

Comparative environmental balance (per 100 m³ of methane) (Compiled by the authors based on calculations)

Метод работы с газом // Method of working with gas	*Выбросы в CO_2-эквиваленте // Emissions in CO_2 equivalent*	*Экологические риски // Environmental risks*
Прямой выброс в атмосферу // Direct emission into the atmosphere	2,0 т CO_2-экв // 2.0 tons of CO_2 equivalent	Максимальный ущерб климату, опасность взрыва на стройплощадке // Maximum damage to the climate, explosion hazard on the site
Факельное сжигание // Flare combustion	0,18 т CO_2-экв // 0,18 tons of CO_2 equivalent	Чистый экоэффект: -1,82 т CO_2-экв/год. Утечки 1-3% добавляют до 0,06 т CO_2-экв/год // Net eco-effect: -1.82 t CO_2-eq/year. Leaks of 1-3% add up to 0.06 t CO_2-eq/year.
Мини-ГПУ (газопоршневая установка) (~1 кВт) // Mini-GPU (gas-piston unit) (~1 kW)	0,18 т CO_2-экв + энергия // 0.18 t CO_2-eq + energy	Убирает открытый факел, генерирует полезное тепло и электричество // It eliminates the open torch and generates useful heat and electricity.

Практические меры по снижению экологических рисков следующие (Zhang et al., 2023; Wei et al., 2024):

1. Защита атмосферы: установка герметичной устьевой арматуры и автоматических оптических или ультразвуковых датчиков утечек CH_4.

2. Очистка вод: оборудование замкнутого цикла очистки (обратный осмос или испарительные установки) для использования пластовой воды в технических нуждах.

3. Энергоутилизация: замена открытого факела на компактную газопоршневую установку (мини-ГПУ) на 1 кВт для закрытия собственных нужд объекта.

4. Рекультивация: поэтапное восстановление земель сразу после завершения буровых и эксплуатационных работ.

Таким образом, с точки зрения экономики отрицательный эффект будет в виде затрат на бурение скважины, обслуживание и водоочистку. Экологический эффект будет положительный и представлен сокращением парникового следа на 1,8 т CO_2-экв на каждые 100 м³ газа.

В экономике природопользования часто наблюдается «эффект масштаба»: на крупных предприятиях внедрение мощных очистных систем может давать более низкую удельную стоимость (ЭФ) за счет больших объемов очистки. В то же время на малых предприятиях те же показатели могут быть выше из-за невозможности использовать дорогостоящее, но высокопроизводительное оборудование. Однако для подтверждения этой закономерности в конкретном случае потребуются дополнительные данные.

Экологическая оценка при хранении угля

Исследования проводились на объекте Карагандинского угольного месторождения каменного угля. Объектом исследования являются штабели каменного угля, предметом исследования является процессы деградации угольного сырья под действием атмосферных факторов и техногенное воздействие складов на состояние окружающей среды и здоровье населения. Эколого-экономическое сопровождение разработано для прибортового открытого угольного склада штабельного типа угледобывающего предприятия Карагандинского региона.

Исходные данные объекта:

- склонность угля к окислению: IV группа (допустимая высота штабеля – 5 м);
- параметры угольного штабеля: высота – 5 м; ширина основания – 85 м; длина основания – 250 м;
- площадь основания одного угольного штабеля $S_ш = 85 \times 250 = 21\,250$ м^2 (2,125 га);
- вместимость одного штабеля – 100 000 т;
- проектная вместимость склада – 1 000 000 т;
- технологическое оборудование: автосамосвалы (прием угля), фронтальный колесный автопогрузчик (отгрузка).

Исследования проводились на примере каменного угля марки Д (табл. 2 / tabl. 2). Уголь хранится на открытых складах угля, которые занимают большие территории.

Хранение угля открытым способом и в штабелях обязательно сопровождается негативным воздействием на состояние окружающей среды (Гендлер и др., 2025; Гендлер и др., 2022; Шестернев, 2017; Kus, Misz-Kennan, 2016; Pan et al., 2022):

- пыление (в результате ветровой эрозии) – поступление мелких фракций угля в атмосферный воздух;
- окисление и самовозгорание угля – химическая реакция, сопровождающаяся взаимодействием органической массы угля с кислородом воздуха с выделением тепла.

Таблица 2

Фракционный состав исследуемого каменного угля марки Д (составлена авторами на основе сертификата качества угля)

Table 2

Fractional composition of the studied D-grade coal (compiled by the authors based on the coal quality certificate)

Фракция угля // Coal fraction	*Мелкая // Shallow*	*Крупная // Large*	*Негабарит // Oversized*
Размер, мм // Size, mm	0-50	> 50-300	> 300

Данные процессы создают препятствия в слаженной работе предприятия и создают определенную техногенную нагрузку на прилегающие территории. Образование угольной пыли (процесс пыления) начинается не с этапа хранения, а с добычи, транспортировки, грохочения, где угольные массы механически измельчают. При поступлении угля на открытые склады, на него начинают воздействовать факторы окружающей среды: ветер, солнце, влажность атмосферного воздуха. Так, при скорости ветра 1-5 м/с (Гендлер и др., 2022) мелкие частицы угля сдуваются с поверхности штабеля; наибольшее пыление наблюдается на узлах пересыпки угольной массы, при погрузке – разгрузке; поверхность угольного штабеля быстро высыхает и становится источником пылевыделения.

Процессы пылеобразования и самосгорания угольной пыли очень тесно связаны между собой:

- угольная пыль в атмосферном воздухе становится пылевоздушной смесью, которая является взрывоопасной;
- угольная пыль, накапливающаяся на поверхности конструкций, оборудования, аккумулирует тепло и становится источником тления;
- неравномерное распределение кислорода внутри штабеля является предпосылкой для самовозгорания.

В сухие теплые времена года с ветром возможность пылевого загрязнения и процесса самовозгорания угольного штабеля увеличивается в разы. При таком сценарии развития событий поступление угольной пыли и продуктов горения угольных штабелей повлекут за собой изменения в компонентах, экосистемах окружающей среды (рис. 2 / fig. 2).

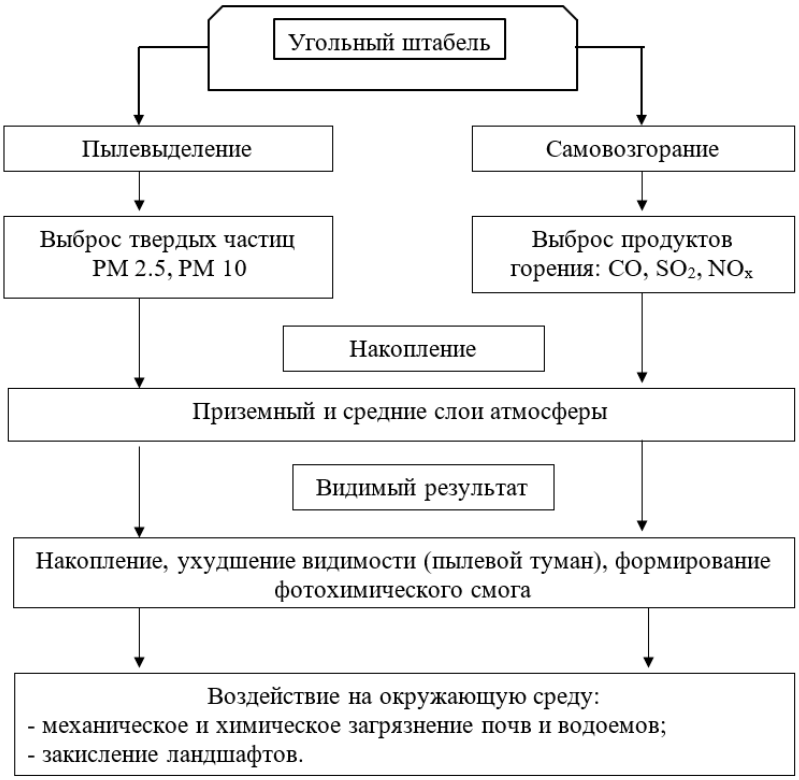


Рис. 2. Схема воздействия угольного штабеля на состояние окружающей среды (составлена авторами)
Fig. 2. Diagram of the impact of a coal pile on the environment (compiled by the authors)

В составе угольной пыли содержатся тяжелые металлы (Pb, As, Hg, Cd, V) и соединения серы. Попадая на поверхность почвы угольная пыль повышает её щелочность, уплотняется верхний слой и загрязняется тяжелыми металлами. В результате корневая система недополучает кислород, воду из-за изменения структуры земли, разрушается из-за воздействия тяжелых металлов и происходит гибель растения. При попадании угольной пыли на поверхность листьев растений образуется плотная пленка, которая закрывает устьица, задерживает солнечный свет, что приводит к гибели растений. Угольная пыль, оседая на поверхности водных источников, повышает её мутность, приводит к заиливанию дна и снижению уровня растворенного кислорода, что

приводит к деградации гидробиоценозов. Наибольшую опасность для человека представляют частицы PM 2,5 и PM 10. Они задерживаются в верхних дыхательных путях, проникают в легкие тем самым вызывают хронические заболевания.

В случае самовозгорания угольных штабелей в атмосферный воздух поступает угарный газ, оксиды серы, азота и канцерогены в виде полициклических ароматических углеводородов, в том числе бенз(а)-пирен. Такие эндогенные пожары могут по длительности продолжаться месяцами, становясь постоянным источником химического загрязнения атмосферного воздуха.

Уголь, находящийся на открытых складах, постоянно подвергается воздействию агрессивностей окружающей среды (изменение погоды, климатические особенности района расположения складов). Ветровая нагрузка, осадки (дождь, снег), перепады температуры, жара, прямые солнечные лучи все это влияет на процессы выветривания угля. В результате этого происходит разрушение: уголь теряет свой природный блеск, трескается, крошится, постепенно разрушаясь до мелкой крошки и пыли, что является внешним преобразованием угольных штабелей. Но самая большая проблема, что в результате окисления уголь теряет свои технологические качества: данные процессы приводят к потере способности угля к спеканию и коксующиеся показатели снижаются, то есть из такого сырья уже невозможно получить качественный кокс (Портола и др., 2019). Данный процесс называется окислением или выветриванием угля. По классификации выветривание бывает физическое и химическое, что зависит от климатических условий (Шестернев, 2017).

Физическое выветривание угля – это механическое разрушение угля (трескается, рассыпается) при этом химический состав не изменяется. Основной причиной физического разрушения являются резкие колебания температуры: днем угольный штабель под воздействием солнечной энергии нагревается, а в ночное время остывает, то есть штабель то расширяется, то сжимается. Это приводит к микротрещинам на поверхности штабеля, затем они превращаются в расколы и уголь постепенно рассыпается на более мелкие фракции. В регионах резко-континентальным климатом, например, Карагандинский регион, к колебаниям температуры добавляется еще вода. Атмосферные осадки (дождь, тающий снег) проникают в мелкие трещины, замерзая при снижении температуры, превращаясь в лед, т.е. происходит расширение трещин изнутри. Этот процесс многократный, цикличный в результате чего уголь начинается разламываться и измельчается, что приводит к потускнению блеска (чаще его потери), а также изменению цвета угольных масс (Ворошилов и др., 2008; Гендлер и др., 2022).

Таким образом, физическое выветривание начинается на поверхности угля, в местах контакта с внешней средой, и его действие проявляется в механическом разрушении под воздействием солнечной энергии, атмосферы и воды. Физическое выветривание вызывается разнообразными факторами. В зависимости от природы воздействующего фактора характер разрушения углей при физическом выветривании различен. В одних случаях процесс разрушения происходит внутри угля без участия внешнего механически действующего агента. Сюда относится изменение объема составных частей породы, вызываемое колебанием температуры. Такое явление может быть названо температурным выветриванием. В других случаях уголь разрушаются под механическим воздействием посторонних агентов. Такой процесс может быть условно назван механическим выветриванием.

Температурное выветривание происходит под воздействием суточных и сезонных колебаний температуры, вызывающих неравномерное нагревание и охлаждение угля. При этом минеральные зерна, слагающие угли, испытывают то расширение, при повышении температуры, то сжатие, при ее понижении. Таким образом, в углях попеременно возникают сжимающие и растягивающие усилия. Расширение и сжатие угля более интенсивно сказываются в самой приповерхностной части угля.

В результате длительного воздействия колебаний температуры и различных коэффициентов расширения взаимное сцепление отдельных минеральных зерен в угле нарушается, он растрескивается и распадается на отдельные обломки.

Химическое выветривание происходит с постоянным окислением и поглощением влаги из окружающей среды, т.е. происходит не просто потеря товарного вида угля, а его перерождение, т.е. происходит ухудшение энергетических и технологических показателей угля, таким образом происходит значительное изменение качества угля[1] (Janoszek et al., 2016; Kus, Misz-Kennan, 2016; Pan et al., 2021; Jha et al., 2014; Zhang et al., 2023; Wei et al., 2024). Результатом таких реакций и изменений в угольном массиве является образование мелкой угольной пыли, приводящее к потерям угля во время погрузочно-разгрузочных работ.

С целью снижения экологических и пожарных рисков необходим комплексный подход, который бы охватывал организационные, химические и инженерно-технические мероприятия:

- послойное уплотнение при укладке: прессование (укатывание) угля при формировании штабелей, что снижает пористость угольных массивов, перекрывая доступ кислорода во внутрь;

- применение химических пленкообразующих реагентов: обработка (орошение) поверхности угольных открытых складов (штабелей) растворами химических пленкообразующих реагентов, что создает пленку, предотвращающую пыление и перекрывающая доступ кислорода во внутрь штабеля;

- установка ветрозащитных экранов: по периметру склада устанавливаются щиты, снижающие скорость ветра;

- автоматизированный мониторинг: установка термодатчиков внутри угольного штабеля для контроля внутренней температуры с целью предотвращения самовозгорания.

Обработка поверхности угольного штабеля пленкообразующим раствором предотвращает пыление. При поэтапной обработке поверхности склада реагентами получаются следующие расчетные результаты, приведенные в табл. 3 / tabl. 3.

Таблица 3

Результаты обработки поверхности угольного штабеля (составлена авторами)

Table 3

Results of surface treatment of the coal stack (compiled by the authors)

Степень покрытия поверхности угольного штабеля // The degree of coverage of the coal stack surface	*Уменьшение площади пыления, га (м²) // Reduction in the area of dusting, ha (m²)*	*Интенсивность выброса, г/с // Emission rate, g/s*	*Валовый выброс, т/год (сокращение на, т/год) // Total emission, t/year (reduction, t/year): t/year)*
0% (базовый) // 0% (base)	0 га (0 м²)	11 452	196 901,1 (0)
10% покрытия // 10% coverage	40,9 га (409 000 м²)	10 306,8	177 210,9 (19 690,1)
25% покрытия // 25% coverage	81,8 га (818 000 м²)	9 161,6	157 520,9 (39 380,2)
50% покрытия // 50% coverage	204,5 га (2 045 000 м²)	5 726	98 450,6 (98 450,6)

Проведение мероприятия по обеспылеванию и снижению самовозгорания угля сопровождается социально- экологическим эффектом, заключающемся в:

- снижении запыленности в рабочей зоне, улучшения условий труда машинистов автопогрузчиков и водителей автосамосвалов;

- уменьшение территории рассеивания угольной пыли, следовательно, происходит снижение техногенной нагрузки на прилегающие территории в том числе селитебные зоны.

Таким образом, при покрытии поверхности угольного штабеля на 25%, 50% экономическая эффективность будет составлять более 1,5 млрд тенге/год при окупаемости оборудования в первой месяц работы. Нанесение плёнкообразующих покрытий необходимо перед началом сухих ветренных периодов с помощью поливочных машин, снабженных распылительной системой.

В Казахстане утверждены отраслевые справочники НДТ, в том числе справочник «Добыча и обогащение угля», утвержденный постановлением Правительства РК от 27 декабря 2023 г. № 1201, и справочник «Добыча и обогащение руд цветных металлов (включая драгоценные)», утвержденный постановлением от 8 декабря 2023 г. № 1101. Экономическую оценку НДТ целесообразно проводить одновременно по нескольким направлениям:

– капитальные инвестиции;

– эксплуатационные затраты;

– предотвращенный экологический ущерб;

– снижение платы за негативное воздействие;

– снижение потребления ресурсов;

– снижение вероятности аварий и экологических санкций;

– дополнительная прибыль;

– социальный эффект.

Экономический эффект предотвращения эмиссий

Особенно важным является учет нелинейного роста финансовой нагрузки при превышении установленных нормативов.

Рассмотрен условный промышленный объект с условной базовой годовой платой за эмиссии 50 млн тенге (табл. 4 // tabl. 4).

Таблица 4

Сценарная оценка роста финансовой нагрузки (составлена авторами)

Table 4

Scenario assessment of financial burden growth (compiled by the authors)

Показатель // Indicator	*Базовый уровень // Base level*	*+10%*	*+15%*	*+20%*
Объем эмиссий // The volume of emissions	100%	110%	115%	120%
Плата в пределах норматива, млн тг // Payment within the standard limit, million tenge	50	50	50	50
Условная дополнительная плата, млн тг // Conditional additional payment, million tenge	0	50	75	100
Общая финансовая нагрузка, млн тг // Total financial burden, million tenge	50	100	125	150

Данный расчет следует рассматривать как сценарную модель. Фактический размер платежей определяется действующим налоговым и экологическим законодательством, категорией объекта, видом эмиссии, наличием разрешения и конкретными нормативами. В то же время нормативная система Казахстана действительно предусматривает экономические стимулы для предприятий, внедряющих НДТ, включая нулевой коэффициент к ставкам платы при наличии комплексного экологического разрешения, тогда как для предприятий I категории без комплексного экологического разрешения предусмотрено поэтапное увеличение коэффициентов.

Таким образом, эколого-экономическое сопровождение предлагается осуществлять на протяжении четырех основных этапов жизненного цикла промышленного объекта:

– начальный этап;

– проектный этап;

– этап строительства

– этап эксплуатации.

Условно эколого-экономическое сопровождение предприятий, оказывающих влияние на компоненты природы, можно поделить на четыре этапа (табл. 5 // tabl. 5).

Таблица 5

Основные этапы эколого-экономического сопровождения экологически влияющих предприятий (составлена авторами)

Table 5

Main stages of environmental and economic support for environmentally impacting enterprises (compiled by the authors)

Этап // Stage	*Основные мероприятия // Main measures*	*Экономический результат // Economic outcome*
Начальный // Elementary	Категорирование объекта, экологический скрининг, определение чувствительных компонентов среды, предварительная оценка эмиссий // Object categorization, environmental screening, identification of sensitive environmental components, preliminary assessment of emissions.	Определение потенциальных экологических затрат и рисков // Determination of potential environmental costs and risks
Проектный // Project-based	Экологическая оценка, разработка природоохранных мероприятий, выбор НДТ, экологическая экспертиза // Environmental assessment, development of environmental protection measures, selection of BAT, environmental expertise	Оптимизация инвестиционных решений // Optimization of investment decisions
Строительство // Construction	Производственный экологический контроль, мониторинг эмиссий, управление отходами, контроль эффективности НДТ // Industrial environmental control, emissions monitoring, waste management, NDT efficiency control	Снижение экологических платежей и рисков // Reduction of environmental payments and risks
Эксплуатация // Exploitation	Производственный экологический контроль, программа управления отходами, мониторинг эмиссий, контроль эффективности НДТ // Industrial environmental control, waste management program, emission monitoring, monitoring the effectiveness of BAT.	Недопущение полной трансформации окружающей среды. Снижение экологических платежей и рисков // Preventing a complete transformation of the environment. Reducing environmental payments and risks.

Как видно, экономический механизм НДТ формирует ситуацию, при которой инвестиции в модернизацию могут рассматриваться не только как природоохранные расходы, но и как инструмент предотвращения будущего роста экологических издержек**.**

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать выводы и предложить практические рекомендации.

1. Эколого-экономическое сопровождение позволяет объединить два традиционно рассматриваемых отдельно направления – экологическую безопасность и экономическую эффективность.

2. В рамках классической природоохранной модели экологические мероприятия рассматриваются преимущественно как дополнительные расходы предприятия, однако предлагаемый подход представлен следующим**:** экологическое воздействие → риск → потенциальный ущерб → экономическая оценка → технологическое решение → предотвращенный ущерб.

3. Оценку НДТ некорректно проводить только по величине первоначальных инвестиций, так как такой подход не отражает полной картины внедрения природоохранных мероприятий.

4. Важным результатом является переход от оценки стоимости природоохранного мероприятия к оценке его полной жизненной стоимости**.**

5. Установка системы очистки эмиссий требует первоначальных капиталовложений, однако одновременно может приводить к уменьшению объема выбросов; снижению экологических платежей; снижению расхода сырья; снижению энергопотребления; сокращению количества отходов; уменьшению риска экологического ущерба; повышению экологической устойчивости предприятия.

Финансирование

Исследование выполнено за счет средств государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова «Географический подход к оптимизации природопользования в моделях устойчивого развития» (тема № 126042920511-1).

Funding

The research was funded by the state assignment for Lomonosov Moscow State University «Geographical approach to optimizing environmental management in sustainable development models» (theme No. 126042920511-1).

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Сведения об авторском вкладе
Е.А. Цешковская – постановка задачи исследования, формулировка идеи статьи, научное редактирование.
Н.К. Цой – подготовка рукописи, сбор и анализ данных;
Е.И. Голубева – систематизация сведений, подготовка отдельных частей рукописи, вычитка итоговой версии статьи.
В.М. Цешковский – обработка полученных данных, подготовка таблиц, подготовка отдельных частей рукописи.
Л.М. Карсанова – сбор, систематизация сведений.
В.В. Матонин – сбор, систематизация сведений.

Contribution of the authors
Ye.A. Tseshkovskaya – formulation of the research task, formulation of the article's idea, scientific editing;
N.K. Tsoy – preparation of the manuscript, data collection and analysis;
E.I. Golubeva – systematization of information, preparation of individual parts of the manuscript, proofreading of the final version of the article;
V.M. Tseshkovskiy – processing of the obtained data, preparation of tables, preparation of individual parts of the manuscript;
L.M. Karsanova – collection and systematization of information;
V.V. Matonin – collection and systematization of information.

Список источников
1. Ворошилов С.П., Ворошилов Я.С., Ворошилов А.С., Уварова В.А. Влияние влаги на окисление каменных углей // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности.* 2008. № 2. С. 68-82.
2. Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю., Попов М.М. Обоснование безопасной эксплуатации закрытого угольного склада по газовому фактору // *Записки Горного института*. 2025. № 272. С. 72-82.
3. Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю., Кузнецов В.С. Проблемы промышленной и экологической безопасности при использовании для временного хранения угля открытых и закрытых складов // *Известия ТулГУ. Науки о Земле.* 2022. Вып. 4. С. 134-143.
4. Кузнецов В.Г. Эволюция процессов выветривания в истории земли // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический.* 2021. Т. 96. Вып. 2. С. 52-61.
5. Портола В.А., Жданов А.Н., Бобровникова А.А. Перспектива применения антипирогенов для предотвращения самовозгорания складов угля // *Уголь*. 2019. № 4. С. 14-19 http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-4-14-19
6. Федоров В.И., Гаврилов В.Л. Оценка изменения гранулометрического состава низкометаморфизированных углей при длительном хранении // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 12–1. С. 223-232. https://doi.org/10.25018/023 6_1493_2021_121_0_223
7. Шестернев Д.М. Физическое и химическое выветривание массивов горных пород в криолитозоне // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 3. С. 350-360.
8. Janoszek T., Gogola K., Bajerski A. Influence of anti-pyrogenic materials on coal mining waste's tendency to self-ignite // *Journal of Sustainable Mining*. 2016. Vol. 15. Iss. 4. P. 170-174. https://doi.org/10.1016/j.jsm.2017.03.004
9. Jha P.K., Das T.K., Soni A.B. Effect of Weathering on Coal Quality // *International Proceedings of Economics Development and Research*. 2014. Vol. 75. P. 155-159. https://doi.org/10.7763/IPEDR.2014.V75.31
10. Kus J., Misz-Kennan,M. Coal weathering and laboratory (artificial) coal oxidation // *International Journal of Coal Geology*. 2016. Vol. 171. P. 12-36. https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.11.016
11. Pan Y., Yin C., Fernandez C., Fu L., Lin C.-T. A Systematic Review and Bibliometric Analysis of Flame-Retardant Rigid Polyurethane Foam from 1963 to 2021 // *Polymers.* 2022. Vol. 14. 3011. https://doi.org/10.3390/polym14153011
12. Wei A., Ou M., Wang S., Zou Y., Xiang C., Xu F., Sun L. Preparation of a Highly Flame-Retardant Urea–Formaldehyde Resin and Flame Retardance Mechanism // *Polymers*. 2024. Vol. 16. Iss. 13. 1761. https://doi.org/10.3390/polym16131761
13. Zhang Yu., Li W., Cheng X., Yan K., Zhao W., Yang F. Air and oxy-fuel combustion characteristics of coal gangue and weathered coal blends // *Energy*. 2023. Vol. 284. 128660. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128660

References
1. Voroshilov S.P., Voroshilov Ya.S., Voroshilov A.S., Uvarova V.A. The effect of moisture on the oxidation of coal. *Bulletin of the Scientific Center for Work Safety in the Coal Industry*. 2008. Iss. 2. P. 68-82. (in Russian)
2. Gendler S.G., Stepantsova A.Yu., Popov M.M. Justification of the safe operation of a closed coal storage facility based on the gas factor. *Notes of the Mining Institute*. 2025. Iss. 272. P. 72-82. (in Russian)

3. Gendler S.G., Stepantsova A.Yu., Kuznetsov V.S. Problems of industrial and environmental safety when using open and closed warehouses for the temporary storage of coal. *Izvestiya TulGU. Earth Sciences*. 2022. Iss. 4. P. 134-143. (in Russian)

4. Kuznetsov V.G. Evolution of weathering processes in the history of the Earth. *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological Section.* 2021. Vol. 96, Iss. 2. P. 52-61. (in Russian)

5. Portola V.A., Zhdanov A.N., Bobrovnikova A.A. Prospects for the Use of Antipyrogenics to Prevent Self-Ignition of Coal Storages. *Ugol*'. 2019. Iss. 4. P. 14-19. http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-4-14-19 (in Russian)

6. Fedorov V.I., Gavrilov V.L. Assessment of changes in the granulometric composition of low-metamorphosed coals during long-term storage. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021. Iss. 12-1. P. 223-232. http://dx.doi.org/10.25018/0236_1493_2021_121_0_223 (in Russian)

7. Shesternev D.M. Physical and chemical weathering of rock massifs in the cryolithozone. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017. Iss. 3. P. 350-360. (in Russian)

8. Janoszek T., Gogola K., Bajerski A. Influence of anti-pyrogenic materials on coal mining waste's tendency to self-ignite. *Journal of Sustainable Mining*. 2016. Vol. 15. Iss. 4. P. 170-174. https://doi.org/10.1016/j.jsm.2017.03.004

9. Jha P.K., Das T.K., Soni A.B. Effect of Weathering on Coal Quality. *International Proceedings of Economics Development and Research*. 2014. Vol. 75. P. 155-159. https://doi.org/10.7763/IPEDR.2014.V75.31

10. Kus J., Misz-Kennan,M. Coal weathering and laboratory (artificial) coal oxidation. *International Journal of Coal Geology*. 2016. Vol. 171. P. 12-36. https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.11.016

11. Pan Y., Yin C., Fernandez C., Fu L., Lin C.-T. A Systematic Review and Bibliometric Analysis of Flame-Retardant Rigid Polyurethane Foam from 1963 to 2021. *Polymers.* 2022. Vol. 14. 3011. https://doi.org/10.3390/polym14153011

12. Wei A., Ou M., Wang S., Zou Y., Xiang C., Xu F., Sun L. Preparation of a Highly Flame-Retardant Urea–Formaldehyde Resin and Flame Retardance Mechanism. *Polymers*. 2024. Vol. 16. Iss. 13. 1761. https://doi.org/10.3390/polym16131761

13. Zhang Yu., Li W., Cheng X., Yan K., Zhao W., Yang F. Air and oxy-fuel combustion characteristics of coal gangue and weathered coal blends. *Energy*. 2023. Vol. 284. 128660. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128660

Поступила в редакцию / Received: 14.09.2026
Поступила после рецензирования / Revised: 10.10.2026
Принята к публикации / Accepted: 21.10.2026