

УДК 551.583.1

**МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ ПРОИЗВОДСТВА  
В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
ПРОМЫШЛЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

© 2025 Е.А. Минкинен

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 26.08.2025

Управление организацией производства предприятия с каждым годом осложняется климатическими изменениями. Бесконтрольный процесс трансформации параметров окружающей среды создаёт экологические и экономические вызовы как для страны в целом, так и для каждого отдельного предприятия. Целью данного исследования является повышение эффективности управления утилизацией отходами производства для обеспечения экологической и промышленной безопасности объекта в условиях изменения климата. Разработана модель управления комплексом обращения с отходами производства в условиях изменения климата. Предложенная модель учитывает климатогеографические параметры среды, отличительные особенности производственных линий, а также элементы искусственного интеллекта. Модель позволяет сократить количество используемых ресурсов, интегрировать методы переработки в производство предприятия, сократить количество загрязняющих веществ, возникающих вследствие утилизации отходов на предприятии.

*Ключевые слова:* климатические изменения, отходы производства, методы утилизации, оценка рисков.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-443-452

EDN: TXJOBV

**ВВЕДЕНИЕ**

Необходимость оптимизации работы с отходами на предприятии возрастает с каждым днём. Этот процесс осложняет нарастающие изменение окружающей среды, вызванное климатической дестабилизацией. Промышленные производства сталкиваются с новыми вызовами, которые приносят предприятиям искать новые способы обеспечения экологической и промышленной безопасности в современных условиях [1].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью гармонизации промышленного развития с требованиями экологической безопасности и климатической адаптивности, закрепленными в национальном проекте «Экологическое благополучие» РФ. В соответствии с Федеральным законом № 89 «Об отходах производства и потребления» ключевой задачей в настоящее время является снижение негативного воздействия отходов на окружающую среду, что требует внедрения инновационных систем управления, учитывающих растущие климатические риски. Изменение климата [2], проявляющееся в учащении экстремальных погодных явлений, дестабилизирует существующую инфраструктуру обращения с отходами, увеличивая вероятность техногенных аварий и эмиссии парниковых газов, что противоречит целям Парижского соглашения и Климатической доктрины РФ [3]. В условиях перехода к низкоуглеродной экономике, обозначенного в Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, традиционные методы утилизации отходов становятся недостаточно эффективными, что приводит к необходимости разработки адаптивных моделей, интегрирующих принципы циркулярной экономики и климатической устойчивости. Особую значимость данная проблема приобретает в контексте обеспечения промышленной безопасности, поскольку накопление отходов в зонах с повышенными климатическими рисками создает угрозу для критической инфраструктуры и здоровья населения.

Таким образом, разработка и внедрение научно обоснованных подходов к управлению отходами, учитывающих климатические изменения, становится не только инструментом выполнения международных экологических обязательств, но и стратегическим элементом обеспечения устойчивого развития промышленного сектора в долгосрочной перспективе.

*Минкинен Елизавета Алексеевна, аспирант, ассистент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.  
E-mail: elizaveta\_minkinen@mail.ru*

## МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ НА ПРЕДПРИЯТИИ

Современная промышленность сталкивается с необходимостью пересмотра традиционных подходов к утилизации отходов в связи с ужесточением экологического законодательства и изменением климатических условий [4]. На сегодняшний день в производственной сфере применяется комплекс методов обработки отходов, каждый из которых обладает специфическими характеристиками эффективности, экономической целесообразности и экологической безопасности.

Наиболее распространённым методом остаётся полигонное захоронение, которое, по данным Росприроднадзора за 2023 год, охватывает около 80% всех производственных отходов в России [5]. Этот метод привлекает предприятия своей простотой и относительно низкими операционными затратами, однако его негативные экологические последствия становятся наиболее очевидными. Основные проблемы связаны с выделением метана - мощного парникового газа, загрязнением почв и грунтовых вод токсичными соединениями, а также необратимой деградацией земельных ресурсов. В условиях изменения климата эти проблемы усугубляются: увеличение количества экстремальных погодных явлений приводит к повреждению защитных барьеров полигонов, а повышение температур ускоряет процессы разложения отходов.

Термические методы обработки, включая традиционное сжигание и более современные технологии пиролиза, представляют альтернативу захоронению. Мусоросжигательные заводы, активно используемые в Европе и некоторых регионах России, позволяют сократить объём отходов до 90% и одновременно вырабатывать электроэнергию [6]. Однако анализ выбросов таких предприятий показывает значительные концентрации диоксинов, оксидов азота и серы, что требует дополнительных затрат на систему газоочистки. Перспективным направлением считается пиролиз - термическое разложение без доступа кислорода, которое позволяет получать синтетическое топливо с меньшим объёмом вредных выбросов. Технологические и экономические барьеры пока ограничивают широкое применение этого метода, но его потенциал в рамках концепции циркулярной экономики продолжает изучаться.

Механические и химические методы переработки занимают особое место в системе обращения с производственными отходами. Основными препятствиями являются сложность сортировки смешанных отходов и высокая стоимость оборудования для глубокой переработки.

Биологические методы утилизации, включая компостирование и анаэробное сбраживание, демонстрируют высокую эффективность при обработке органических отходов сельскохозяйственных и пищевых производств [7]. Эти технологии позволяют не только уменьшить объём отходов, но и получить полезные продукты - органические удобрения и биогаз. Однако их применение ограничивается требованиями к составу отходов и необходимостью тщательного контроля технологических параметров.

Сравнительный анализ современных методов утилизации позволяет сделать вывод о том, что каждый метод утилизации отходов имеет высокие риски, усиливающиеся в условиях изменения климата (табл.1).

Представленная таблица демонстрирует, что выбор метода утилизации должен основываться на комплексной оценке всех параметров с учётом конкретных условий производства и экологических требований региона.

Оптимальный подход требует комплексного сочетания различных технологий с учётом специфики отходов, экономических факторов и экологических последствий. Перспективным направлением является развитие интеллектуальных систем управления отходами, сочетающих цифровые технологии мониторинга с принципами циркулярной экономики.

## ОЦЕНКА РИСКОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

В современных условиях промышленного производства актуальной задачей является минимизация экологических и экономических рисков, связанных с утилизацией отходов. Выбор оптимального метода переработки требует анализа потенциальных угроз. Изменение климата приводит к увеличению частоты и интенсивности экстремальных явлений, что требует переоценки устойчивости систем обращения с отходами. Ключевые риски включают:

1. термические воздействия: повышение температур ускоряет разложение органических отходов, усиливая эмиссию метана ( $\text{CH}_4$ ) на полигонах;
2. гидрологические угрозы: наводнения повышают риск размыва хранилищ токсичных отходов, а засухи увеличивают вероятность пожаров на полигонах отходов;
3. ветровые нагрузки: ураганы могут повреждать инфраструктуру мусороперерабатывающих заводов, приводя к выбросам загрязняющих веществ.

Таблица 1 – Сравнительный анализ методов утилизации производственных отходов

| Метод утилизации         | Эффективность                      | Капитальные затраты | Экологические риски                                | Энергетический потенциал             | Применимость                                       |
|--------------------------|------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Полигонное захоронение   | Низкая                             | Низкие              | Высокие (загрязнение почвы, воды, воздушной среды) | Отсутствует                          | Возможен для отходов IV и V классов опасности      |
| Сжигание (МСЗ)           | Высокая (уменьшение объема до 90%) | Очень высокие       | Средние (выбросы диоксинов, NOx, SO <sub>2</sub> ) | Высокий                              | Для несортированных отходов I-IV классов опасности |
| Пиролиз                  | Средняя                            | Высокие             | Низкие                                             | Средний (синтез-газ, жидкое топливо) | Для отходов III-IV классов опасности               |
| Механическая переработка | Средняя                            | Средние             | Минимальные                                        | Отсутствует                          | Для отходов, подлежащих к переработке              |
| Химическая переработка   | Высокая                            | Высокие             | Средние (химические реагенты)                      | Низкий                               | Для специфических материалов                       |
| Биологические методы     | Высокая для органики               | Средние             | Минимальные                                        | Средний (биогаз)                     | Только для органических отходов                    |

В связи с климатическими нарушениями повышается частота возникновения нехарактерных для географической среды явлений, например экстремальных температур, увеличения объема осадков, наводнения, засуха и т.д. Таким образом, технические системы не готовы к новым погодным вызовам, что приводит к увеличению вероятности возникновения рисков нарушения работы оборудования и как следствие к возможному возникновению чрезвычайных ситуаций и аварий. Всё это приводит к нарушению промышленной и экологической безопасности.

Неспособность технических систем противостоять климатическим изменениям приводит предприятия не только к экологической проблеме, но и ставит их в экономически уязвимое положение, снижая конкурентоспособность.

Потенциальные риски, возможные при эксплуатации технических систем утилизации отходов в условиях климатической дестабилизации указаны в таблице 2. Оценка вероятности риска рассчитывается отношением числа возникших инцидентов нарушения работы оборудования за год к общему времени работы предприятия.

Оценивая климатические риски, необходимо рассчитать интегральный показатель для каждого метода утилизации отходов. Расчёт необходим для полной комплексной оценки рисков, так как учитывает аварийность и экологическую чувствительность территории:

$$R = \sum(k_i \times P_i) \times K_a \times K_e, \quad (1)$$

где  $k_i$  – коэффициент ущерба;

$P_i$  – вероятность возникновения риска;

$K_a$  – коэффициент аварийности ( $1 + n/10$ , где  $n$  – количество аварий за период);

$K_e$  – коэффициент экологической чувствительности территории, от 1 до 2, определяется экспертным путём.

Таблица 2 – Потенциальные риски

| Метод утилизации         | Потенциальный риск                          | Причина возникновения риска                                                                     | Оценка вероятности возникновения риска $P=N/T$<br>(где N – количество инцидентов нарушения работы оборудования утилизации отходов, T – общее время работы предприятия/время оборудования в днях) |
|--------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Полигонное захоронение   | Просадка грунта                             | Таяние вечной мерзлоты, изменение гидрологического режима региона расположения                  | 0,4                                                                                                                                                                                              |
|                          | Загрязнение вод                             | Изменение гидрологического региона расположение, перенос ливневыми стоками загрязняющих веществ | 0,3                                                                                                                                                                                              |
|                          | Выброс свалочного газа                      | Разгерметизация оборудования вследствие изменения давления                                      | 0,1                                                                                                                                                                                              |
| Сжигание (МСЗ)           | Выброс загрязняющих веществ                 | Изменение переноса ЗВ в атмосфере                                                               | 0,7                                                                                                                                                                                              |
| Пиролиз                  | Возникновение пожаров                       | Засуха                                                                                          | 0,1                                                                                                                                                                                              |
|                          | Выброс токсичных веществ                    | Изменения ветрового режима и климатогеографических характеристик региона расположения           | 0,3                                                                                                                                                                                              |
| Механическая переработка | Попадание твёрдых загрязняющих веществ в ОС | -                                                                                               | 0,3                                                                                                                                                                                              |
| Химическая переработка   | Выброс загрязняющих веществ                 | Изменение ветрового режима                                                                      | 0,25                                                                                                                                                                                             |
|                          | Сброс загрязняющих веществ в сточные воды   | Изменение гидрологического режима                                                               | 0,25                                                                                                                                                                                             |
| Биологические методы     | Нарушение технологического процесса         | Экстремальные погодные условия                                                                  | 0,2                                                                                                                                                                                              |

Трактовка результатов производится в соответствии с методикой:

$R < 0,3$  – допустимый уровень риска;

$0,3 \leq R < 0,5$  – повышенный риск;

$R \geq 0,8$  – критический уровень риска [8].

Расчёт интегрального показателя риска для каждого метода утилизации отходов по формуле 1 отображён в таблице 3.

**Таблица 3** – Значение показателя интегральной оценки риска для методов утилизации отходов

| Метод утилизации         | $\Sigma(k_i \times P_i)$ | $K_a$ | $K_e$ | $R = \Sigma(k_i \times P_i) \times K_a \times K_e$ | Комментарии                                                                              |
|--------------------------|--------------------------|-------|-------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Захоронение на полигонах | 0,8                      | 1,3   | 1,6   | 1,66                                               | Высокий риск из-за просадки грунта, загрязнения подземных вод и выбросов метана          |
| Сжигание отходов         | 0,7                      | 1,2   | 1,5   | 1,26                                               | Риск выбросов диоксинов, золы и аварий при перегреве                                     |
| Пиролиз                  | 0,4                      | 1,1   | 0,9   | 0,40                                               | Меньше выбросов, но риски связаны с нестабильностью процесса                             |
| Механическая переработка | 0,3                      | 1,0   | 0,7   | 0,21                                               | Низкий риск: основная опасность – травматизм при сортировке                              |
| Химическая переработка   | 0,5                      | 1,4   | 1,2   | 0,84                                               | Риск утечек токсичных реагентов и коррозии оборудования                                  |
| Биологические методы     | 0,2                      | 0,8   | 0,5   | 0,08                                               | Минимальный риск (например, компостирование), но возможны запахи и медленная деградация. |

По таблице можно сделать вывод о том, что минимальному риску подвержены биологические методы утилизации отходов. Однако даже с учётом расчётов сложно предсказать, насколько точно возможно спрогнозировать природное воздействие на технологические системы. На данный момент отрасль обращения с отходами сталкивается с новыми вызовами – климатической дестабилизацией, которая вызывает всё большие изменения в окружающей среде, усугубляющая частоту аварийности и нарушающая тем самым экологическую и промышленную безопасность.

Несмотря на климатические сложности, предприятия обязаны соблюдать требования промышленной и экологической безопасности. Оценки рисков недостаточно для комплексного анализа возможных происшествий предприятия. Целесообразно дать оценку уязвимости объектов инфраструктуры (IVI – Infrastructure Vulnerability Index) обращения с отходами [9].

$$IVI = ((E \times S) / R) \times K, \quad (2)$$

где  $E$  – степень подверженности климатическому воздействию;  $S$  – чувствительность объекта;  $R$  – устойчивость объекта,  $K$  – поправочный коэффициент износа.

$$E = \Sigma(W_i \times C_i) / \Sigma W_i, \quad (3)$$

где  $W_i$  – значимость климатического фактора,  $C_i$  – нормированная интенсивность воздействия фактора.

$$C_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), \quad (4)$$

где  $C_i$  – фактическое значение фактора,  $X_{\max}$ ,  $X_{\min}$  – максимальное и минимальное значения факторов.

Рассчитанные значения интегрального показателя уязвимости (IVI) для объектов утилизации отходов представлены в таблице 4.

Общие результаты расчёта установили самые безопасные методы утилизации отходов – ими являются биологические методы и механическая обработка. В настоящее время не все отходы подлежат данным видам утилизации, поэтому полный переход на них не представляется возможным. Тем не менее, возможно создать комплексный метод, позволяющий задействовать как можно более безопасные методы утилизации в большем объёме. Для этого необходимо создать принципиально новую модель управления комплексом обращения с отходами производства.

**Таблица 4** – Интегральный показатель уязвимости для каждого объекта инфраструктуры утилизации отходов

| Метод утилизации                       | E   | S   | R   | K   | IVI  | Интерпретация                                                                      |
|----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Захоронение на полигонах               | 0,8 | 0,9 | 0,3 | 1,5 | 3,60 | Чрезвычайно высокая уязвимость. Критические риски: просадка почвы, выбросы метана. |
| Сжигание отходов                       | 0,7 | 0,8 | 0,5 | 1,3 | 1,46 | Высокая уязвимость. Основные угрозы: перегрев оборудования, выбросы токсинов.      |
| Механическая переработка               | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 1,1 | 0,31 | Умеренная уязвимость. Риски: повреждение оборудования при штормах.                 |
| Химическая переработка                 | 0,6 | 0,7 | 0,4 | 1,4 | 1,47 | Высокая уязвимость. Опасность утечек реагентов при наводнениях.                    |
| Биологические методы (компостирование) | 0,3 | 0,4 | 0,8 | 1,0 | 0,15 | Низкая уязвимость. Потенциальные риски: запахи при аномальной жаре.                |

*Примечание:* значения выставляются методом экспертных оценок

#### **МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОМЫШЛЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

В условиях климатической дестабилизации организация производства в привычном режиме становится маловероятной. Нарушение привычных алгоритмов функционирования, возникающих в связи с изменениями характеристик окружающей среды, ежегодно увеличивает ущерб для технических систем. Компании вынуждены повышать экономические затраты на восстановление поломок и нарушений работы оборудования. Кроме того, ужесточения штрафов существенно осложняет положение на экономической арене технических систем. Для решения проблемы выхода из строя оборудования для утилизации необходимо организовать модель управления комплексом обращения с отходами производства.

Главная черта модели заключается в комплексности использования различных методов, их компиляции между собой, экономической выгоде, а также в упоре на мониторинг для предотвращения возможных угроз и рисков. Модель учитывает все компоненты адаптации производства к современным условиям окружающей среды. В таблице 5 указаны компоненты адаптации, которые включает модель.

Разработанная модель управления комплексом обращения с отходами производства должна базироваться на принципах циркулярной экономики, климатической адаптивности, риск-ориентированного подхода и цифровой трансформации. Предлагаемая модель представлена на рисунке 1.

Модель имеет входные данные, промежуточные данные и выходные данные.

Входные данные представляют собой:

- Климатические данные региона расположения предприятия за 5-10 лет для оценки изменения климатических параметров.
- Производственные характеристики предприятия: мощность производства, время работы, срок работы предприятия, технический осмотр оборудования и т.д.
- Картографические данные: необходимы для оптимизации и репрезентации фоновых значений и расчёта загрязнения, в том числе для эмиссии и переноса веществ в окружающей среде.



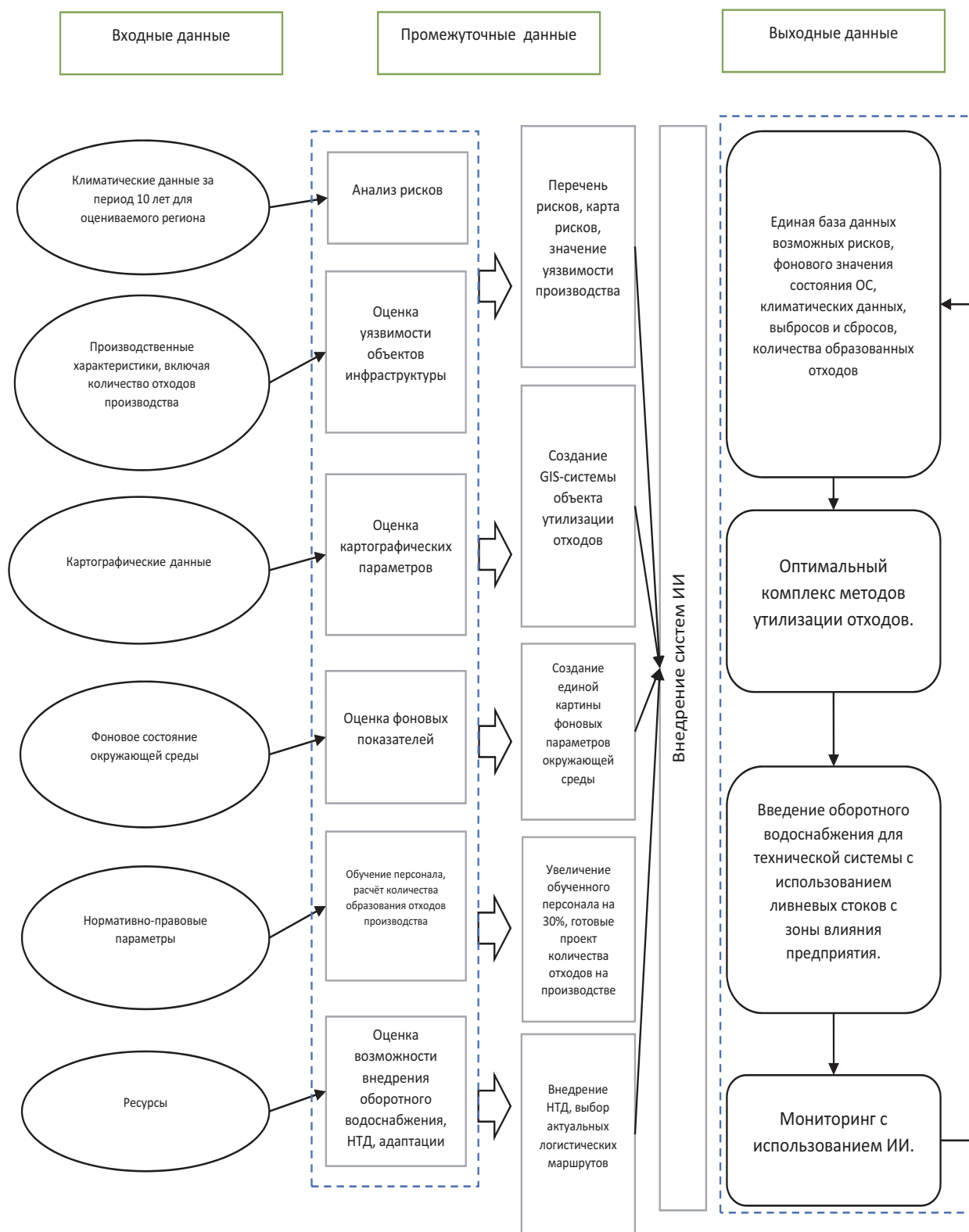
Таблица 5 – Компоненты модели для адаптации производства к изменению климата

| Компонент                      | Значение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Управление рисками             | Оценка вероятности риска позволяет предотвратить возможный ущерб, оказываемый на технические системы климатической дестабилизацией.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Мониторинг                     | Организация систем мониторинга в данный момент является выгодным решением для организации производства. Кроме плановых проверок экологических служб, предприятие благодаря внутреннему производственному мониторингу способно существенно снизить затраты на устранение последствий.                                                                                                                                                                                                                                 |
| Обучение персонала             | Обязательный инструктаж работников о состоянии климата и его влиянии на технические системы производства позволит обратить внимание сотрудников на возникающие проблемы своевременно.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Наилучшие доступные технологии | Использование отечественных современных решений позволит не только улучшить организацию производства в области утилизации отходов, но и расширить использование новых отечественных разработок путём внедрения их в производственные системы.                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Логистическая адаптация        | Выбор оптимальных, а не привычных маршрутов.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Искусственный интеллект        | Внедрение искусственного интеллекта в области мониторинга утилизации отходов позволит увеличить эффективность, снизить нагрузку на сотрудников и вовремя выявить нарушения работы оборудования.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Оборотное водоснабжение        | Использование водосбора ливневых сточных вод (снега) с последующей доочисткой для технологичности производства, необходимо не только для очистки воды, но и для её внедрения на производство в качестве технической воды, что позволяет экономить ресурсы. Ливневые стоки могут переносить загрязняющие вещества, исходящие от системы переработки отходов. Нейтрализация и доочистка этих загрязняющих веществ позволит внедрять комплекс оборотного водоснабжения и существенно экономить водные ресурсы [10, 11]. |

- Нормативно правовые параметры: количество образовавшихся отходов (т/год), способы утилизации.

Промежуточные данные являются результатом алгоритма адаптации технических систем к климатической дестабилизации. Особое значение занимают оценка рисков и оценка уязвимости объектов промышленности. Отдельным самостоятельным этапом также является внедрение искусственного интеллекта в процессы адаптации производства.

На выходе производство получает единую базу данных возможных рисков с учётом фоновых концентраций окружающей среды, климатических изменений региона, что позволит выбрать наиболее подходящий метод утилизации производственных отходов для выбранного региона. Следующим этапом будет рассмотрена возможность введения оборотного водоснабжения с исполь-



**Рисунок 1.** Графическая модель управления комплексом обращения с отходами производства

зованием ливневых и снежных стоков, которые будут подвергаться очистке непосредственно на предприятии. После очистки стоки будут использоваться как техническая вода. Заключительный этап – независимый мониторинг для актуализации данных, проводимый по внутреннему порядку предприятия.

Разработанная модель позволяет комплексно рассмотреть работу технических систем и ответственно подойти к решению проблемы утилизации отходов производства. Модель позволяет учесть климатические изменения и применить их к выбору методов утилизации отходов, что отличает её от аналогичных моделей.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена модель комплексного управления обращения с отходами производства, учитывающая климатические изменения и риски. Преимущество использования разработанной модели заключается в повышении эффективности предприятия в области утилизации отходов, сокращении количества выбросов, повышении энергоэффективности. Перспективами развития могут стать интеграция с национальной системой климатического мониторинга, разработка отраслевых стандартов адаптивного управления, введение систем блокчейн для учёта движения отходов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишкин, И. А. Концепция адаптации промышленного производства к изменениям климата / И. А. Шишкин, Н. А. Жильникова // Инновационное приборостроение. – 2025. – Т. 4, № 3. – С. 25-34. DOI 10.31799/2949-0693-2025-3-25-34 (дата обращения: 09.05.2025).
2. Will Steffen et al., Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science 347,1259855(2015). DOI:10.1126/science.1259855.
3. Минаев, А. В. Климатическая доктрина Российской Федерации по вопросам обеспечения безопасности в связи с изменением климата / А. В. Минаев // Актуальные вопросы развития экономики и юриспруденции: Сборник статей II Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 30 ноября 2023 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2023. – С. 125-129.
4. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al. – Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (дата обращения: 21.05.2024).
5. Косолапов, Н. А. Статистика ТБО в России / Н. А. Косолапов // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2014. – № Т26. – С. 562-563 (дата обращения: 11.05.2025).
6. Мамонтов А. Ю. Обоснование параметров технологической схемы «Отходы животноводства → биогаз → электроэнергия» // Вестник КРАСГАУ. 2016. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-parametrov-tehnologicheskoy-shemy-othody-zhivotnovodstva-biogaz-elektroenergiya> (дата обращения: 20.05.2025).
7. Минкинен, Е. А. Методика обращения с твердыми коммунальными отходами альтернативными методами в условиях изменения климата / Е. А. Минкинен, Н. А. Жильникова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 189-191.
8. Улисков, А. А. Интегральная оценка рисков как инструмент гибкой системы управления на предприятии / А. А. Улисков // Региональная и отраслевая экономика. 2023. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/integralnaya-otsenka-riskov-kak-instrument-gibkoy-sistemy-upravleniya-na-predpriyatii> (дата обращения: 16.06.2025).
9. Cutter, S. L. Social Vulnerability to Environmental Hazards / S. L. Cutter, B. J. Boruff, W. L. Shirley // Social Science Quarterly. — 2003. — Vol. 84, No. 2. — P. 242–261. DOI: 1111/1540-6237.8402002. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1540-6237.8402002> (дата обращения: 01.06.2025).
10. Жильникова, Н.А. Особенности управления сложными водно- ресурсными системами при изменении климата / Н. А. Жильникова, И. А. Шишкин, А. А. Баранова, Л. А. Климочкина // Компетентность. – 2023. – № 9-10. – С. 38-46. DOI 10.24412/1993-8780-2023-9-38-46.
11. Жильникова, Н.А. Метод комплексного управления водопользованием в производственных системах с учетом климатических неопределенностей / Н. А. Жильникова, И. А. Шишкин, Х. О. Барххуев, Е. А. Минкинен // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 6(122). – С. 175-184. DOI 10.37313/1990-5378-2024-26-6-175-184.

## MODEL OF INDUSTRIAL WASTE MANAGEMENT COMPLEX MANAGEMENT UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS FOR SOLVING INDUSTRIAL AND ENVIRONMENTAL SAFETY PROBLEMS

© 2025 E.A. Minkinen

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Climate change is making the management of enterprise production increasingly challenging. Uncontrolled environmental transformations pose ecological and economic challenges for both the country as a whole and for each individual enterprise. The goal of this study is to improve the efficiency of industrial waste management to ensure environmental and industrial safety in the face of climate change. A model for managing industrial waste management systems under climate change has been developed. The proposed model takes into account climatic and geographical parameters of the environment, the distinctive features of production lines, and elements of artificial intelligence. The model allows for a reduction in resource use, the integration of recycling methods into enterprise production, and a reduction in the amount of pollutants generated by waste disposal at the enterprise.

**Keywords:** climate change, industrial waste, recycling methods, risk assessment.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-443-452

EDN: TXJOB

### REFERENCES

1. *Shishkin, I. A.* Konceptiya adaptatsii promyshlennogo proizvodstva k izmeneniyam klimata / I. A. Shishkin, N. A. Zhil'nikova // *Innovacionnoe priborostroenie*. – 2025. – Т. 4, № 3. – С. 25-34. DOI 10.31799/2949-0693-2025-3-25-34 (data obrashcheniya: 09.05.2025).
2. *Will Steffen et al.*, Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347,1259855(2015). DOI:10.1126/science.1259855.
3. *Minaev, A. V.* Klimaticheskaya doktrina Rossijskoj Federacii po voprosam obespecheniya bezopasnosti v svyazi s izmeneniem klimata / A. V. Minaev // *Aktual'nye voprosy razvitiya ekonomiki i yurisprudencii: Sbornik statej II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Petrozavodsk, 30 noyabrya 2023 goda*. – Petrozavodsk: Mezhdunarodnyj centr nauchnogo partnerstva "Novaya Nauka", 2023. – С. 125-129.
4. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / ed. by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al. – Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (data obrashcheniya: 21.05.2024).
5. *Kosolapov, N.A.* Statistika TBO v Rossii / N. A. Kosolapov // *Nauchno-metodicheskij elektronnyj zhurnal "Koncept"*. – 2014. – № Т. 26. – С. 562-563 (data obrashcheniya: 11.05.2025).
6. *Mamontov A. Yu.* Obosnovanie parametrov tekhnologicheskoy skhemy «Othody zhivotnovodstva → biogaz → elektroenergiya» // *Vestnik KrasGAU*. 2016. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-parametrov-tehnologicheskoy-shemy-othody-zhivotnovodstva-biogaz-elektroenergiya> (data obrashcheniya: 20.05.2025).
7. *Minkinen, E. A.* Metodika obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi othodami al'ternativnymi metodami v usloviyah izmeneniya klimata / E. A. Minkinen, N. A. Zhil'nikova // *Matematicheskie metody i modeli v vysokotekhnologichnom proizvodstve : Sbornik tezisev dokladov IV Mezhdunarodnogo foruma. V 2-h chastyah, Sankt-Peterburg, 06 noyabrya 2024 goda*. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2024. – С. 189-191.
8. *Uliskov A. A.* Integral'naya ocenka riskov kak instrument gibkoy sistemy upravleniya na predpriyatii // *Regional'naya i otraslevaya ekonomika*. 2023. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/integralnaya-otsenka-riskov-kak-instrument-gibkoy-sistemy-upravleniya-na-predpriyatii> (data obrashcheniya: 16.06.2025).
9. *Cutter, S. L.* Social Vulnerability to Environmental Hazards / S. L. Cutter, B. J. Boruff, W. L. Shirley // *Social Science Quarterly*. – 2003. – Vol. 84, No. 2. – P. 242–261. DOI: 1111/1540-6237.8402002. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1540-6237.8402002> (data obrashcheniya: 01.06.2025).
10. *Zhil'nikova, N.A.* Osobennosti upravleniya slozhnymi vodno-resursnymi sistemami pri izmenenii klimata / N. A. Zhil'nikova, I. A. Shishkin, A. A. Baranova, L. A. Klimochkina // *Kompetentnost'*. – 2023. – № 9-10. – С. 38-46. DOI 10.24412/1993-8780-2023-9-38-46.
11. *Zhil'nikova, N.A.* Metod kompleksnogo upravleniya vodopol'zovaniem v proizvodstvennyh sistemah s uchetom klimaticheskikh neopredelennostej / N. A. Zhil'nikova, I. A. Shishkin, H. O. Barhhuev, E. A. Minkinen // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. – 2024. – Т. 26, № 6(122). – С. 175-184. DOI 10.37313/1990-5378-2024-26-6-175-184.