

Тульский государственный университет  
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева  
Российское химическое общество им. Д.И. Менделеева  
Тульское отделение Российского химического общества им. Д.И. Менделеева  
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический  
университет)  
ТООО Научно-технический центр  
ООО «ТУЛЬСКИЙ ДНТ»

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ**

### **XXXV ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

Сборник докладов

Тула  
Издательство ТулГУ  
2026

УДК 502/504(062)  
ББК 20.1я431  
С56

**Рецензенты:**

*Вольхин Сергей Николаевич*, доктор педагогических наук, профессор, ректор  
АНО ДПО «Академия профессионального развития»;

*Рылеева Евгения Михайловна*, кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры охраны труда и окружающей среды ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет».

С 56 **Современные проблемы экологии** : сб. докладов по материалам XXXV  
Всероссийской науч.-практич. конф. / под общ. ред. В.М. Панарина; техн.  
ред. Н.Н. Жукова, Л.П. Путилина. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2026. – 162 с.

ISBN

Сборник содержит материалы по проблемам состояния и оценки экологической ситуации, рационального природопользования, экологически чистых химических технологий, очистке газовых выбросов в атмосферу, применению новых методов очистки, утилизации промышленных и бытовых отходов жизнедеятельности людей, вопросам радиологической безопасности, путям и методам решения других вопросов экологии.

Выделены приоритетные направления природопользования: экономика, право, образование, а также перспективы устойчивого развития: взаимодействие органов власти, общества и бизнеса в решении экологических проблем. Даны решения некоторых практических задач охраны окружающей среды.

Материалы предназначены для научных сотрудников, преподавателей высших учебных заведений, аспирантов, студентов и специалистов, занимающихся проблемами экологии и медицины.

**Редакционная коллегия:**

*академик РАН В.П. Мешалкин; проф., д.т.н. В.М. Панарин; доц., д.т.н. А.А. Маслова; проф., д.т.н. Л.Э. Шейнкман, доц., к.т.н. А.Е. Коряков.*

УДК 502/504(062)  
ББК 20.1я431

ISBN

© Авторы докладов, 2026  
© Издательство ТулГУ, 2026

# РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

## АЛГОРИТМЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ВЫБРОСОВ

В.М. Панарин, А.А. Маслова, В.А. Кондрашов  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

*Аннотация.* В статье рассмотрены алгоритмы пространственно-временного анализа данных экологического мониторинга для выявления несанкционированных выбросов, применение которых позволяет обеспечить повышение точности экологической диагностики и эффективности природоохранных мероприятий. Развитие данных методов в сочетании с цифровыми технологиями мониторинга создаёт научную основу для формирования интеллектуальных систем экологического контроля на предприятиях промышленно развитых регионов Российской Федерации.

Современный экологический мониторинг атмосферного воздуха является ключевым элементом системы обеспечения экологической безопасности и охраны здоровья населения. Эффективность мониторинга определяется не только плотностью измерительной сети, но и уровнем развития математических методов обработки данных, позволяющих выявлять аномальные концентрации загрязняющих веществ и устанавливать возможные источники их происхождения.

Особую значимость в условиях промышленно развитых регионов приобретают алгоритмы пространственно-временного анализа, обеспечивающие выявление несанкционированных или аварийных выбросов загрязняющих веществ. Актуальность данного направления подтверждается результатами исследований в рамках федерального проекта «Чистый воздух», где отмечается необходимость совершенствования методов анализа мониторинговых данных для повышения объективности экологической оценки [1].

Пространственно-временной анализ представляет собой совокупность методов, направленных на исследование распределения концентраций загрязняющих веществ в пространстве и их изменения во времени. В рамках экологического мониторинга такие методы позволяют:

- выявлять тенденции изменения концентраций;
- определять локальные аномалии;
- устанавливать возможные зоны влияния промышленных источников.

Исследования показывают, что анализ пространственной и временной динамики взвешенных частиц позволяет выявлять устойчивые закономерности формирования загрязнённого воздуха в городской среде [4].

Пространственная составляющая анализа основана на изучении корреляционных зависимостей между пунктами наблюдений, тогда как временная – на обработке рядов измерений и выявлении трендов, сезонности и экстремальных отклонений.

Для построения пространственно-временных моделей используются:

- данные стационарных постов наблюдения;
- мобильные измерительные комплексы;
- результаты спутникового мониторинга;
- метеорологические данные.

Как показано в исследованиях по мониторингу атмосферного воздуха в регионах Российской Федерации, существующая система наблюдений нуждается в модернизации и интеграции информационных потоков [1].

Дополнительные данные дистанционного зондирования позволяют уточнять пространственную структуру загрязнений, что особенно важно при недостаточной плотности наземной сети [6].

### **Алгоритмические методы анализа**

#### *Геостатистические методы*

Геостатистический подход предполагает использование интерполяционных алгоритмов (метод обратных расстояний, кригинг) для построения непрерывных полей распределения загрязняющих веществ.

В работах по исследованию динамики взвешенных частиц в Красноярске продемонстрирована эффективность построения пространственных карт загрязнения для выявления зон повышенной концентрации [4].

Применение геостатистики позволяет:

- локализовать потенциальные источники выбросов;
- выявлять участки с превышением ПДК;
- оценивать радиус распространения загрязняющих веществ.

#### *Анализ временных рядов*

Для выявления несанкционированных выбросов применяются методы анализа временных рядов:

- сглаживание и фильтрация шумов;
- метод скользящего среднего;
- статистический контроль отклонений;
- выявление экстремальных выбросов.

Исследования в области мониторинга загрязнения атмосферного воздуха показывают, что анализ динамики концентраций позволяет выявлять кратковременные пиковые значения, характерные для аварийных выбросов [3].

#### *Комплексные информационные системы*

Интеграция пространственного и временного анализа осуществляется в рамках геоинформационных систем. Современные информационные платформы обеспечивают объединение мониторинговых данных, их визуализацию и автоматическое выявление аномалий.

Развитие теории мониторинга токсичных загрязнений подчёркивает необходимость комплексного подхода к обработке многомерных данных окружающей среды [5].

Метеорологические параметры оказывают существенное влияние на перенос и рассеивание загрязняющих веществ. Скорость и направление ветра, температурная стратификация, влажность воздуха определяют характер форми-

рования пространственного поля загрязнения.

В современных исследованиях используются как данные наземных станций, так и источники реанализа атмосферы, что позволяет повысить точность пространственно-временных моделей [6].

Игнорирование метеофакторов приводит к ошибочной интерпретации результатов анализа и затрудняет идентификацию источников выбросов.

Применение алгоритмов пространственно-временного анализа позволяет:

- оперативно выявлять аномальные концентрации;
- определять возможные зоны размещения источников;
- прогнозировать развитие загрязняющей ситуации;
- обеспечивать информационную поддержку экологического контроля.

Результаты исследований в рамках федеральных программ свидетельствуют о необходимости совершенствования автоматизированных методов анализа данных мониторинга [1].

Перспективным направлением является интеграция методов машинного обучения и нейросетевого анализа, способных учитывать нелинейные зависимости в многомерных массивах данных.

Алгоритмы пространственно-временного анализа являются фундаментальным инструментом выявления несанкционированных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Их применение обеспечивает повышение точности экологической диагностики и эффективности природоохранных мероприятий.

Развитие данных методов в сочетании с цифровыми технологиями мониторинга создаёт научную основу для формирования интеллектуальных систем экологического контроля на предприятиях промышленно развитых регионов Российской Федерации.

### Список литературы

1. Федоров В.Н. Мониторинг качества атмосферного воздуха в городах – участниках федерального проекта «Чистый воздух» / В.Н. Федоров, А.А. Ковшов, Н.А. Тихонова [и др.] // Гигиена и санитария. – 2024. – Т. 103, № 6. – С. 510-518. DOI:10.47470/0016-9900-2024-103-6-510-518.

2. Пластинина П.А. Современное загрязнение атмосферного воздуха в городах России / П.А. Пластинина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 12 (138).

3. Чёрная В.В. Мониторинг загрязнения атмосферного воздуха и поверхностных вод в Рязанской области / В.В. Чёрная, Р.М. Воронин, И.А. Сучков [и др.] // Экология человека. – 2021. – Т. 28, № 8. – С. 28-35.

4. Тасейко О.В. Изучение пространственной и временной динамики взвешенных частиц в атмосферном воздухе г. Красноярск / О.В. Тасейко, Е.Н. Бельская, У.С. Постников // Экология и промышленность России. – 2023. – Т. 27, № 3. – С. 60-65.

5. Общие подходы к развитию теории мониторинга токсичных загрязнений биосферы и её практическому применению // Известия Самарского научного центра РАН. – 2023.

6. Документы по пространственно-временным закономерностям уровня загрязнения воздуха РФ // Российский научный фонд, проект № 24-27-00156.

# СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ЗАВЕРШЕНИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ ТКО

В.М. Панарин  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

*Аннотация.* В статье рассматривается структура автоматизированной системы обеспечения экологической безопасности природно-технических систем при завершении эксплуатации объектов захоронения ТКО, которая включает подсистему мониторинга, контроля и информационного обеспечения, а также подсистему оценки экологических рисков на территориях захоронения отходов на постэксплуатационном этапе.

Захоронение твердых коммунальных отходов (ТКО) является неотъемлемым элементом систем обращения с отходами. В каждом регионе России насчитываются сотни объектов захоронения ТКО, находящихся на разных этапах жизненного цикла и оказывающих воздействие на окружающую среду. Техногенные образования, к которым относятся полигоны захоронения ТКО, остаются источниками негативного воздействия на окружающую среду на протяжении сотен лет после их закрытия [1].

Разработана автоматизированная система обеспечения экологической безопасности природно-технических систем при завершении эксплуатации объектов захоронения ТКО, которая реализует математические модели и методы, описываемые в [2, 3], позволяющие расчетным путем получить необходимые данные. Не отрицая необходимость проведения натурных исследований на полигонах ТКО, разработка системы позволит при минимальных затратах получить крайне важную информацию, необходимую для планирования природоохранных мероприятий.

С помощью разработанной автоматизированной системы обеспечения экологической безопасности природно-технических систем при завершении эксплуатации объектов захоронения ТКО осуществляли мониторинг концентрации газов, таких как метан и углекислый газ, выделяемых при разложении отходов, а также температуры в теле полигона [4]. Автоматизированная система необходима для эффективного контроля за процессами, происходящими на полигонах, и предотвращения потенциальных экологических и экономических рисков.

Функционирование системы осуществляется в следующем порядке:

- сбор данных – все датчики непрерывно передают данные на центральную станцию, частота передачи данных варьируется в зависимости от важности конкретного показателя и возможностей системы;
- анализ данных – программное обеспечение анализирует собранные данные, сравнивает их с установленными пороговыми значениями и формирует отчеты;
- оповещения и тревоги – при обнаружении отклонений от нормы система

генерирует оповещения и/или активирует тревогу. Это может включать звуковое и световое сигнализирование, а также уведомления через SMS, электронную почту или мобильное приложение.

- принятие решений – операторы на основе полученной информации принимают решения о необходимости вмешательства, таких как активация системы дегазации, изменение режимов работы оборудования или проведение ремонтных работ.

- хранение и архивирование данных – данные сохраняются в базах данных для последующего анализа и отчетности. Это позволяет оценивать долгосрочные тенденции и прогнозировать будущие изменения.

Система включает в себя несколько подсистем:

1. Подсистема мониторинга, контроля и информационного обеспечения обеспечивает постоянное дистанционное наблюдение за состоянием полигонов ТКО на постэксплуатационном этапе и прилегающих районов, в том числе регулярный сбор данных о качестве атмосферного воздуха, а также своевременное выявление отклонений от заданных показателей. Система направлена на сбор, хранение, обработку и систематизацию данных, необходимых для принятия управленческих решений в области экологической безопасности; поддержание базы данных по результатам мониторинга и оценки рисков; предоставление информации заинтересованным сторонам (государственным органам, общественным организациям, населению).

Основные компоненты подсистемы мониторинга, контроля и информационного обеспечения [4]:

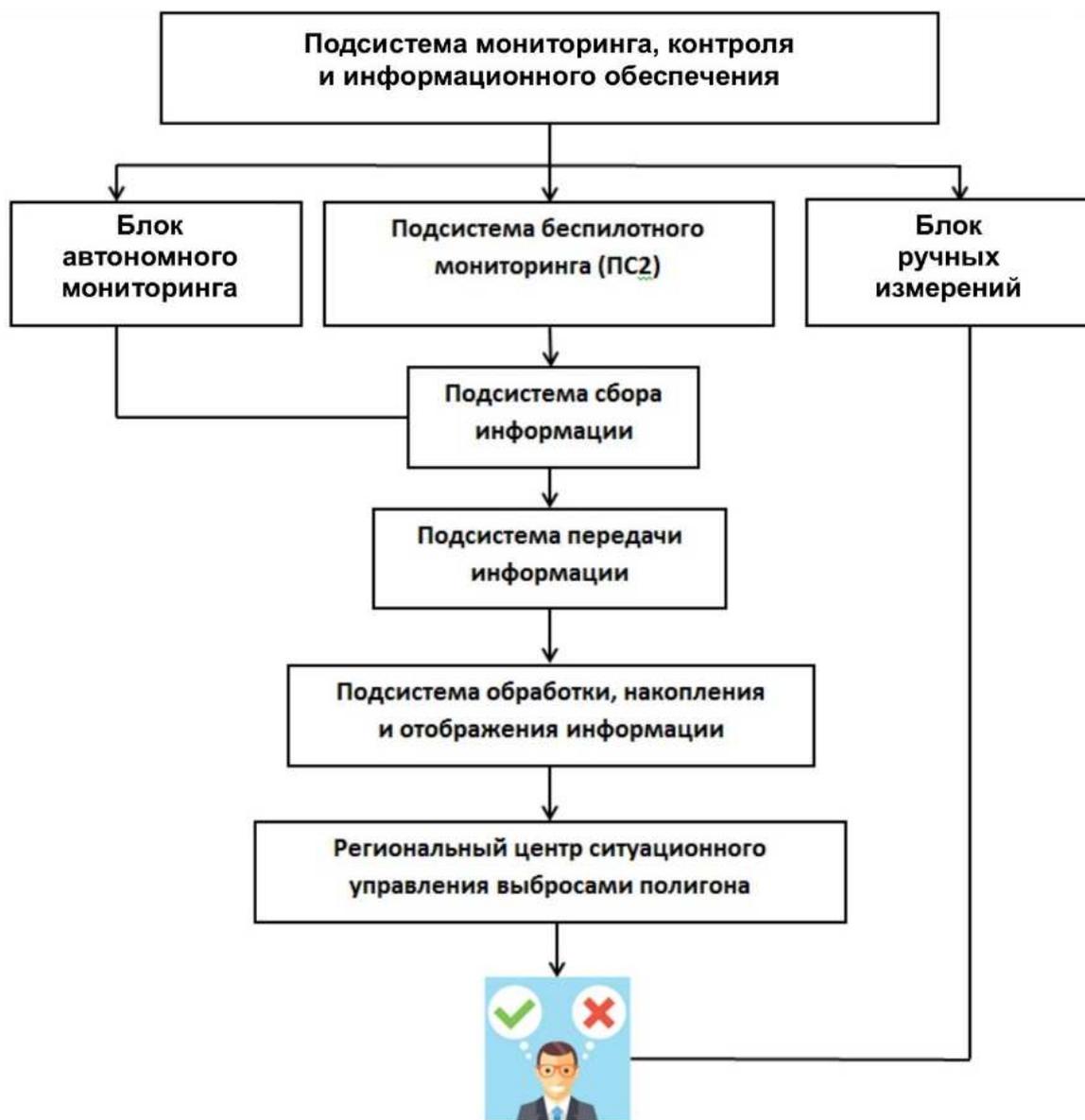
- датчики температуры – используются для измерения температуры внутри тела полигона, что позволяет отслеживать процессы разложения отходов и возможные очаги самовозгорания. Применение предлагаемой системы на протяжении года после вывода из эксплуатации полигона ТКО показало, что температура в теле полигона изменялась в пределах 55-60°C, что свидетельствует о появлении воздуха в теле полигона;

- анализаторы состава газа – применяются для определения концентрации метана, углекислого газа и других газов, что важно для оценки экологической безопасности и эффективности дегазации;

- центральная станция обработки данных (сервер) – объединяет сигналы от всех датчиков и устройств, обрабатывает полученные данные и передает их оператору или системе управления.

Подсистема мониторинга, контроля и информационного обеспечения позволяет в режиме реального времени контролировать состояние объекта и своевременно принимать управленческие решения по минимизации неблагоприятного воздействия на окружающую среду. Внедрение подсистемы позволит осуществлять непрерывный оперативный контроль в реальном масштабе времени на полигоне за счет установленных датчиков температуры и газа, позволив предотвратить развитие негативных ситуаций на полигоне.

На рисунке представлена структура подсистемы мониторинга, контроля и информационного обеспечения [5].



Структура подсистемы мониторинга, контроля и информационного обеспечения

## 2. Подсистема формирования баз данных и отображения информации.

В настоящее время используется разработанное программное обеспечение для автоматического контроля температуры и загазованности в отводящей трубе для дистанционного мониторинга состояния полигона ТКО на постэксплуатационном этапе [5]. Все данные, которые поступают на сервер, отображаются на сайте. Принцип работы подсистемы заключается в накоплении экологических данных на сервере с помощью стационарных постов, соединенных с сервером с помощью сетей сотовой связи. Информационные модули, входящие в подсистему мониторинга: подсистема сбора информации; подсистема передачи информации; подсистема обработки информации и её отображения. Область применения: мониторинг состояния объектов полигонов ТБО и свалок.

3. Подсистема моделирования распространения загрязнений в атмосферном воздухе прилегающих территорий на основе методов расчетов

рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе в соответствии с Приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273.

4. Подсистема корректировки фоновых значений загрязнений атмосферного воздуха на прилегающих к полигону ТКО территориях.

5. Подсистема оценки экологических рисков, которая предназначена для анализа потенциальных угроз здоровью человека и состоянию окружающей среды после завершения эксплуатации полигона, в том числе оценки остаточного загрязнения воздуха; прогнозирование возможного распространения загрязнений; определение вероятности возникновения негативных экологических событий; разработку рекомендаций по снижению рисков. Основной задачей этой подсистемы является определение уровня экологической опасности для здоровья человека и экосистем после завершения эксплуатации полигона. Это важно для выбора дальнейшего назначения рассматриваемых территорий (капитальное строительство, посадка высокоствольной растительности и др.).

Структура автоматизированной системы обеспечения экологической безопасности при завершении эксплуатации объектов захоронения ТКО включает взаимосвязанные подсистемы, каждая из которых выполняет свою функцию в общей цепочке управления рисками и обеспечением устойчивого развития территорий. Применение данной системы с использованием станций мониторинга на территории полигонов ТКО обеспечит контроль за концентрацией газа и температурой, позволив предотвратить развитие негативных ситуаций на полигоне. Подсистема оценки экологических рисков играет ключевую роль в принятии обоснованных решений относительно будущего использования полигонов ТКО после вывода их из эксплуатации.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-24-20012, <https://rscf.ru/project/25-24-20012/>, а также по соглашению о предоставлении из бюджета Тульской области гранта в форме субсидий №30-2025-000524 от 03.04.2025.*

### **Список литературы**

1. Аналитический бюллетень «Актуальное в ESG-новостке». СИСТЕМА ОБРАЩЕНИЯ С ТКО: НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ / «ЭКОЛОГИЯ». АПРЕЛЬ. 2023 г. [https://inveb-docs.ru/attachments/article/2023\\_05/Aktualnoe-v-ESG-rovostke-ТКО.pdf](https://inveb-docs.ru/attachments/article/2023_05/Aktualnoe-v-ESG-rovostke-ТКО.pdf) (дата обращения 12.12.2025 г.).

2. Механизм и модель оценки данных системы автоматизированного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха промышленно развитых регионов / В.М. Панарин, А.А. Маслова, К.В. Гришаков, О.В. Гришаква // Экология и промышленность России, 2023. – Т. 27, № 3. – С. 40-45.

3. Панарин В.М. Разработка математической модели прогноза загрязнения окружающей среды промышленно развитых регионов / В.М. Панарин, А.А. Маслова, К.В. Гришаков, О.В. Гришаква, Д.В. Трещев // Экологические системы и приборы, № 1. 2023 г. – С.17-24.

4. Маслова А. Система автоматизированного контроля температуры и загазованности для дистанционного мониторинга состояния утилизированной свалки коммунальных отходов / А. Маслова, В. Панарин, К. Гришаков, Н. Рыбка, Д. Селезнева // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 11. – С. 14-18. 2018;22(11):14-18.

5. Мешалкин В.П. Цифровизированная система мониторинга газовых выбросов полигонов промышленно-бытовых отходов с использованием летательных беспилотников / В.П. Мешалкин, В.М. Панарин, А.А. Маслова, С.А. Савинкова // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26, № 8. – С. 4-9.

## **РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ТЕРРИТОРИЙ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ЭТАПЕ**

А.А. Маслова  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

***Аннотация.** В статье рассматривается подсистема оценки экологических рисков, основной целью которой является оценка текущего состояния загрязненных земель, выявление потенциальных угроз здоровью человека и экосистемам, разработка мер по минимизации негативных последствий и последующему использованию территорий после их рекультивации. Результаты оценки экологических рисков служат основой для принятия решения о допустимом виде использования территорий полигонов ТКО на постэксплуатационном этапе.*

Многие действующие объекты захоронения отходов, особенно построенные десятки лет назад, характеризуются отсутствием современных инженерных защитных конструкций и барьеров, предотвращающих загрязнение окружающей среды. Как следствие, возникают такие негативные последствия, как возможность загрязнения грунтовых вод химическими соединениями, содержащимися в фильтрате, образующемся вследствие разложения отходов; риск распространения инфекционных заболеваний и паразитарных инфекций среди местного населения и животных; нарушение естественной структуры почвы, препятствующее восстановлению плодородия и способности удерживать влагу; угроза выброса токсичных газов, выделяемых при разложении органических материалов, приводящих к ухудшению качества воздуха и влияющих на здоровье жителей прилегающих районов [3].

При этом важно отметить, что старые свалки и полигоны продолжают оказывать влияние на природу длительное время после своего официального закрытия.

Этапами оценки экологических рисков являются:

1. Идентификация источников риска, т.е. определение всех факторов, которые могут представлять угрозу для окружающей среды и здоровья человека.

2. Анализ воздействия. На данном этапе проводится оценка степени влияния идентифицированных источников риска на здоровье человека и экосистемы.

3. Оценка уязвимости. Здесь определяются группы населения и элементов экосистем, наиболее подверженных воздействию идентифицированных рисков.

4. Качественная и количественная оценка риска. Проводится расчет вероятностных показателей, характеризующих вероятность наступления неблагоприятных событий и степень их последствий.

5. Разработка стратегии управления рисками. На основе проведённой оценки разрабатывается стратегия управления рисками, направленная на их минимизацию или устранение.

6. Принятие управленческих решений на основании полученных результатов оценки, которые могут касаться ограничения или запрета на определённые виды деятельности на территории полигона ТКО; установления режима особого экологического контроля; проведения дополнительных исследований и наблюдений.

Для предотвращения указанных явлений разрабатываются специальные методы мониторинга состояния бывших полигонов, проводятся регулярные проверки качества грунта, воды и атмосферного воздуха, принимаются решения о мерах по снижению риска и оптимизации дальнейшего использования территорий.

Разработана система автоматизированного мониторинга полигонов ТКО, которая включает подсистему оценки экологических рисков, что является важным этапом комплексной программы реабилитации загрязнённых зон, направленной на обеспечение устойчивого развития и охрану жизни и здоровья граждан страны.

Подсистема оценки экологических рисков предназначена для анализа потенциальных угроз здоровью человека и состоянию окружающей среды после завершения эксплуатации полигона, в том числе [8]:

- оценки остаточного загрязнения воздуха и водных ресурсов;
- прогнозирования возможного распространения загрязнений;
- определения вероятности возникновения негативных экологических событий;
- разработки рекомендаций по снижению рисков.

Основной задачей этой подсистемы является определение уровня экологической опасности для здоровья человека и экосистем после завершения эксплуатации полигона. Это важно для выбора дальнейшего назначения рассматриваемых территорий (капитальное строительство, посадка высокоствольной растительности и др.).

Подсистема оценки экологических рисков для последующего использования территорий рекультивированных полигонов состоит из двух частей: автоматическая подсистема в реальном времени и подсистема мониторинга с отбором проб и последующим анализом, что отражает комплексный подход к оценке рисков (рис. 1) [9].

Рассмотрим эти подсистемы:

1. Часть подсистемы, работающая в реальном времени в автоматическом режиме мониторинга (автоматическая подсистема) предназначена для оперативного выявления и предупреждения возможных нарушений норм и стандартов экологической безопасности. Её ключевые особенности:

- постоянный контроль. Датчики непрерывно отслеживают важные параметры окружающей среды, такие как концентрация опасных веществ в почве, воде и атмосфере, температура, влажность и др.;

- быстрая реакция. При возникновении отклонений система мгновенно сигнализирует операторам, позволяя своевременно предпринять необходимые меры;

- интеграция с другими системами. Данные, собираемые системой, могут передаваться другим подразделениям для анализа и подготовки рекомендаций по улучшению экологической обстановки.

- экономичность. Позволяет сократить затраты на проведение регулярных замеров вручную, снижает вероятность ошибок и ускоряет реагирование на критические ситуации.



Рис. 1. Комплексный подход при построении подсистемы оценки экологических рисков для последующего использования территорий рекультивированных полигонов ТКО

2. Часть подсистемы, работающая в ручном режиме с периодическим отбором проб (подсистема мониторинга с отбором проб и последующим анализом). Этот элемент необходим для подтверждения показателей, измеряемых автоматической системой, а также для углубленного изучения

сложных ситуаций, когда необходимы дополнительные аналитические исследования. К ее особенностям можно отнести:

- регулярный отбор проб, который проводится периодически (например, один раз в месяц или квартал) специалистами-экологами с целью дополнительного анализа ключевых параметров окружающей среды;

- комплексный анализ. Отобранные пробы подвергаются тщательному лабораторному исследованию, позволяющему определить точные концентрации потенциально опасных веществ и оценить динамику изменений;

- дополнительные исследования обеспечивают детализацию наблюдений, позволяя учитывать факторы, которые не фиксируются автоматическими датчиками;

- независимость результатов. Анализ проводится независимо от показаний автоматических систем, что повышает надежность итогового заключения о состоянии окружающей среды.

В нашем случае используется совместное применение обеих частей, что позволяет достичь оптимального баланса между скоростью реакции и точностью диагностики. Благодаря такому подходу обеспечивается высокий уровень информированности специалистов и органов власти о реальной экологической обстановке на территории полигона, что способствует принятию эффективных решений по дальнейшему использованию рекультивированной территории.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-24-20012, <https://rscf.ru/project/25-24-20012/>, а также по соглашению о предоставлении из бюджета Тульской области гранта в форме субсидий №30-2025-000524 от 03.04.2025.*

### **Список литературы**

1. Калюжина Е.А., Самарская Н.С. Экологические особенности воздействия полигонов твердых бытовых отходов на состояние окружающей среды в районах их расположения // ИВД. 2014. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-osobennosti-vozdeystviya-poligonov-tverdyh-bytovyh-othodov-na-sostoyanie-okruzhayuschey-sredy-v-rayonah-ih> (дата обращения: 25.01.2026).

2. Панарин В.М. Механизм и модель оценки данных системы автоматизированного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха промышленно развитых регионов / В.М. Панарин, А.А. Маслова, К.В. Гришаков, О.В. Гришакова // Экология и промышленность России, 2023. – Т. 27, № 3. – С. 40-45. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-3-40-45.

9. Маслова А. Система автоматизированного контроля температуры и загазованности для дистанционного мониторинга состояния утилизированной свалки коммунальных отходов / А. Маслова, В. Панарин, К. Гришаков, Н. Рыбка, Д. Селезнева // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 11. – С. 14-18. 2018;22(11):14-18.

# ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ КАК ИНДИКАТОР ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ: МЕТОДЫ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ И РЕГРЕССИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.М. Панарин, Е.М. Рылеева, С.П. Туляков, А.Е. Коряков  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

*Аннотация.* Настоящая работа посвящена систематизации знаний о роли донных отложений как индикатора техногенной нагрузки на поверхностные водные объекты. Рассмотрены механизмы аккумуляции загрязняющих веществ в донных осадках, методы оценки уровня загрязнения, включая геохимические индексы и регрессионное моделирование. Особое внимание уделено российским исследованиям, выполненным на различных водных объектах: озере Имандра (Кольский полуостров), реках Иртыш, Северский Донец, Силинка, Балаклавской бухте, восточной части Финского залива и Северном Каспии.

Проблема оценки и прогнозирования техногенной нагрузки на поверхностные водные объекты промышленно развитых регионов Российской Федерации приобретает в последние десятилетия особую актуальность. Традиционный подход к контролю качества вод, основанный на периодическом отборе проб воды и их лабораторном анализе, имеет существенный недостаток: он фиксирует лишь кратковременное состояние водной среды на момент отбора и не позволяет в полной мере оценить долговременные тенденции загрязнения, особенно в условиях залповых сбросов и сезонных колебаний гидрохимических параметров [1, 3, 9].

В этой связи все больше внимания исследователей привлекают донные отложения (ДО) как природный архив, аккумулирующий информацию о многолетнем поступлении загрязняющих веществ в водный объект. Как справедливо отмечает В.Е. Закруткин в проекте, поддержанном Российским научным фондом, донные отложения занимают важное место в биогеохимических циклах пресноводных экосистем [9]. С одной стороны, они аккумулируют загрязняющие вещества, выполняя роль индикатора загрязненности воды, а с другой – при определенных условиях служат потенциальным источником вторичного загрязнения водной среды. Являясь конечным звеном ландшафтно-геохимических сопряжений, донные отложения в значительной степени отражают геохимические особенности не только водной толщи, но и водосборной площади в целом, что позволяет по их составу выделить техногенные потоки и оценить степень техногенной нагрузки на речные системы [9].

Целью настоящей работы является систематизация знаний о роли донных отложений как индикатора техногенной нагрузки на поверхностные водные объекты, анализ российских исследований в этой области, а также обзор методов оценки загрязнения донных отложений, включая геохимические индексы и математическое моделирование.

На сегодняшний день поступление загрязняющих веществ в донные отложения представляет собой сложный многостадийный процесс, включающий

следующие основные этапы [2, 7, 9]:

1. Поступление поллютантов в водный объект с точечными (промышленные и коммунально-бытовые стоки) и диффузными (поверхностный сток с водосбора, атмосферные выпадения) источниками.

2. Трансформация химических форм элементов в водной толще под влиянием физико-химических и биологических процессов.

3. Седиментация – осаждение взвешенных веществ, сорбирующих загрязнители, на дно.

4. Диагенез – преобразование осадка под влиянием физико-химических и микробиологических процессов, приводящее к перераспределению элементов по вертикальному разрезу.

Как отмечается в работе Папиной Т.С. [цит. по 7], транспорт тяжелых металлов в ряду «вода – взвешенное вещество – донные отложения» определяется комплексом факторов, среди которых важнейшую роль играют гранулометрический состав взвесей, содержание органического вещества, окислительно-восстановительные условия и pH среды.

Исследования, выполненные на реке Иртыш, показали, что валовые концентрации металлов и металлоидов находятся в тесной корреляционной зависимости от содержания в речных отложениях различных гранулометрических фракций. Авторами получены уравнения множественной регрессии, отражающие математическую зависимость концентрации различных элементов от двух предикторов – доли глинистых и илистых частиц в донных отложениях [2].

Накопление загрязняющих веществ в донных отложениях контролируется совокупностью природных и антропогенных факторов [3, 4, 6].

Таблица 1

Факторы, влияющие на накопление загрязнителей в донных отложениях

<b>Группа факторов</b>	<b>Конкретные факторы</b>	<b>Характер влияния</b>
Гидродинамические	Скорость течения, волновое воздействие, уровень воды	Определяют зоны аккумуляции и транзита осадков
Гранулометрические	Содержание глинисто-илистой фракции	Тонкодисперсные частицы обладают максимальной сорбционной емкостью
Геохимические	Содержание органического вещества, оксидов Fe и Mn, pH, Eh	Органическое вещество и оксиды металлов – основные сорбенты
Техногенные	Интенсивность поступления, состав сточных вод, дальность переноса	Определяют масштабы и состав техногенной аномалии

Представленная в таблице 1 систематизация факторов позволяет перейти от общего теоретического понимания процессов накопления загрязнителей к анализу конкретных ситуаций, демонстрирующих сложное взаимодействие этих факторов в реальных условиях. Особый интерес представляют случаи, когда

техногенное вмешательство коренным образом изменяет сложившиеся природные закономерности седиментации, создавая новые зоны аккумуляции и потенциального накопления поллютантов. Характерным примером такого рода служат процессы, происходящие в восточной части Финского залива.

Исследования в восточной части Финского залива показали, что даже в условиях активной волновой переработки осадков в техногенных выработках (подводных карьерах) наблюдается активное накопление алевропелитовых илов, ранее нехарактерных для этой акватории. Эти илы выступают как потенциально активные аккумуляторы загрязняющих веществ [6].

Для количественной оценки уровня загрязнения донных отложений в российской и мировой практике применяется система геохимических индексов, позволяющих нивелировать влияние гранулометрического и минералогического состава осадков [3, 7].

В работе Гурова К.И. с соавторами (2025) по Балаклавской бухте для оценки вклада антропогенных источников в загрязнение донных отложений относительно фонового содержания металлов в прибрежной зоне шельфа Крымского полуострова использовались следующие показатели [3]:

Коэффициент обогащения рассчитывается по формуле:

$$EF = \frac{(C_x/C_{ref})_{\text{образца}}}{(C_x/C_{ref})_{\text{фона}}}$$

где  $C_x$  – концентрация определяемого элемента,  $C_{ref}$  – концентрация элемента-репера (обычно Fe, Al или Sc), нормирующего вклад литогенной составляющей.

Индекс геоаккумуляции предложен Мюллером и рассчитывается как:

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_x}{1.5 \cdot B_x} \right)$$

где  $C_x$  – концентрация элемента в исследуемой пробе,  $B_x$  – геохимический фон, коэффициент 1.5 введен для учета возможных вариаций фона [цит. по 3, 7].

Согласно оценкам степени загрязнения донных отложений Балаклавской бухты в 2005-2019 гг., уровень загрязнения изменялся от низкого для V, Cr и Ni до высокого для Cu, Zn и Pb. Наиболее загрязненные участки отмечены для северного бассейна в его центральной и некоторых частях, что является результатом комплексного воздействия природных и антропогенных факторов. Локализация загрязнения на территориях, расположенных вблизи источников коммунально-ливневых стоков и стоянок яхт, позволяет сделать вывод о преобладании антропогенного вклада над естественным [3].

В рамках проекта РНФ под руководством В.Е. Закруткина (Южный федеральный университет) разработаны методические подходы к интегральной оценке уровня загрязнения донных отложений на примере рек бассейна Северского Донца [9]. Предлагаемый интегральный показатель загрязненности донных отложений учитывает коэффициенты опасности элементов для водных экосистем и долю пелитовой фракции. Это позволяет отразить не только уровень

накопления загрязнителей в донных отложениях, но и учесть опасность вторичного загрязнения воды материалом донных осадков.

Апробация методики произведена для углепромышленной территории Восточного Донбасса (Ростовская область), где донные отложения формируются за счет совокупного влияния природных факторов и техногенных шахтных вод, а также продуктов физико-химической трансформации породных отвалов [9].

Таблица 2

Классификация уровней загрязнения донных отложений на основе интегральных показателей

Уровень загрязнения	Краткая характеристика	Примеры водных объектов
Низкий	Концентрации не превышают фоновых значений или незначительно превышают фон	Южный бассейн Балаклавской бухты; большая часть акватории Северного Каспия [3, 7]
Средний	Умеренное превышение фона для отдельных элементов; локальные аномалии	Река Иртыш (нижнее течение) – для Pb и As; отдельные участки р. Силинка [2, 5]
Высокий	Значительное превышение фона для ряда элементов; устойчивые техногенные аномалии	Северный бассейн Балаклавской бухты (Cu, Zn, Pb); оз. Имандра (зона влияния комбината «Североникель») [1, 3, 10]
Экстремальный	Превышение фона на 2-3 порядка; формирование техногенных «геохимических барьеров»	Акватория поступления стоков комбината «Североникель» (оз. Имандра) – Ni, Cu до 3 % и 0.6 % [10]

Представленная в таблице 2 классификация позволяет систематизировать наблюдаемые уровни загрязнения донных отложений и выделить водные объекты, требующие первоочередного внимания природоохранных органов. Однако для эффективного управления качеством водной среды недостаточно простой констатации факта загрязнения – необходимо понимание механизмов, контролирующих распределение поллютантов, и возможность прогнозирования их концентраций при изменении внешних условий. Решение этих задач требует применения количественных методов анализа, позволяющих перейти от качественных оценок к выявлению математических зависимостей между содержанием загрязняющих веществ и факторами среды.

Важным направлением современных исследований является применение методов математической статистики и регрессионного анализа для выявления закономерностей накопления загрязняющих веществ и прогнозирования их концентраций.

В исследовании реки Иртыш (Тюменская область) на основе данных атомно-эмиссионного анализа получены уравнения множественной регрессии, отражающие зависимость концентрации различных элементов от доли глинистых и илистых частиц. Определив процентное содержание различных гранулометрических фракций в грунтах, можно предсказать наиболее вероятные значения концентрации металла в анализируемом образце [2].

В работе Иващенко Т.И. и Архипова Е.А. (2023) на примере реки Силинка (г. Комсомольск-на-Амуре) оценивалось влияние различных факторов (осадки, растворенные вещества, валовая форма цинка) на процессы образования и транспортировки донных отложений. Использована модель множественной регрессии для выявления влияния внешних факторов на уровень загрязнения донных отложений цинком. Полученные результаты численного моделирования позволяют оценить изменения в системе «вода – донные отложения» под воздействием различных факторов и могут быть использованы для разработки методов управления водными ресурсами [5].

Исследования Левковой А.Н. в Нижневартовском районе показали, что регрессионный анализ токсичности донных отложений по биологическим и химическим показателям свидетельствует о слабой взаимосвязи токсикологических и химических параметров исследуемых проб, но высокой регрессионной зависимости концентраций химических веществ между собой [8].

Наиболее ярким примером техногенной трансформации донных отложений в Российской Федерации служит озеро Имандра – крупнейший водоем Мурманской области, более 80 лет испытывающий загрязнение промышленными сточными водами горнодобывающих и металлургических предприятий [1, 10].

Исследования В.А. Даувальтера [1] показали, что в вертикальном распределении ртути в донных отложениях станций, близко расположенных к акватории поступления стоков разработки апатито-нефелиновых месторождений, отмечается приповерхностный максимум на глубинах от 7 до 14 см колонок седиментов от 0.6 до 2.3 мкг/г, что в десятки раз больше среднего фонового содержания (0.044 мкг/г). Эти значения были на порядок выше нормативных показателей, разработанных Министерством окружающей среды Канады. Акватория плеса Большая Имандра классифицируется как третий класс загрязнения согласно классификации Норвежского управления по борьбе с загрязнением [1].

Комплексные исследования химического состава донных отложений оз. Имандра [10] позволили установить, что наиболее значительные преобразования произошли на акватории поступления стоков металлургического комбината «Североникель», где в поверхностных слоях донных отложений наблюдается лавинное увеличение концентраций всех исследуемых тяжелых металлов. Концентрации Ni и Cu увеличились на три и два порядка соответственно по сравнению с глубокими фоновыми слоями – до 3 % и 0.6 %. Увеличение содержания более чем на порядок зафиксировано и для остальных тяжелых металлов – Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Cr, которые являются сопутствующими металлами в медно-никелевой руде [10].

Влияние стоков предприятий ОАО «Апатит» сказалось в увеличении концентраций элементов, содержащихся в апатитонефелиновых рудах и вскрышных породах (Ca, P, Na, K, Al, Sr). Обнаружено также аномальное увеличение содержания Hg, связанное с проведением взрывных работ на рудниках [1, 10].

Масштабное исследование, выполненное коллективом Морского гидрофизического института РАН (Гуров К.И., Котельянец Е.А., Гурова Ю.С.), охватило период 2005-2019 гг. и позволило оценить пространственное распределение концентраций тяжелых металлов в донных отложениях Балаклавской бухты [3].

Пробы поверхностного слоя донных отложений (0-5 см) отбирались с помощью дночерпателя Петерсона, валовое содержание элементов определялось методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием спектрометра «Спектроскан Макс-G». Установлено, что повышенный уровень загрязнения донных отложений в северном бассейне бухты является результатом комплексного воздействия природных и антропогенных факторов, при этом антропогенный вклад превышает естественный, и со временем этот вклад только растет [3].

Исследование нижнего течения реки Иртыш [2] представляет особый интерес с методической точки зрения. Атомно-эмиссионным методом определено валовое содержание Al, Co, Fe, Mn, Pb, Cu, Zn, Sr, As, Cr и Ni в образцах донных отложений, представляющих собой пески, суглинистые пески, песчанистые суглинки, суглинки илистые и суглинки.

Установленные концентрации не превысили фоновые показатели, за исключением Pb и As, максимальные значения которых составили соответственно 138 и 7,2 мг/кг. Валовые концентрации металлов и металлоидов находились в тесной корреляционной зависимости от содержания в речных отложениях различных гранулометрических фракций. Предложен способ оценки степени загрязнения грунтов с учетом гранулометрического состава донных отложений, получены уравнения множественной регрессии, связывающие концентрации элементов с долей глинистых и илистых частиц [2].

Определено содержание нефтепродуктов в донных отложениях методом ИК-спектрометрии. В 24 % исследуемых образцов концентрации нефтепродуктов не превысили предельно допустимый уровень (20 мг/кг), в остальных образцах варьировали от 21 до 73 мг/кг. Выявлены статистически значимые корреляционные связи валовых концентраций элементов с содержанием железа, марганца, органического вещества и нефтепродуктов [2].

В рамках проекта Российского научного фонда (2022-2023 гг.) под руководством В.Е. Закруткина выполнено детальное исследование донных отложений рек бассейна Северского Донца как индикатора антропогенного воздействия и качества водной среды [9].

Создан массив данных, включающий более 3500 определений по 20 створам 8 рек бассейна. Установлено, что донные отложения исследуемого района крайне неоднородны с точки зрения гранулометрического, химического и минерального состава и формируются за счет совокупного влияния природных и антропогенных факторов. Среди последних определенную роль играют техногенные шахтные воды и продукты физико-химической трансформации породных отвалов в виде техногенного делювия и пролювия.

Процессы аутигенного минералообразования, протекающие в стадию

диагенеза, способствуют переводу железа и сопутствующих ему металлов в относительно инертные формы. Наиболее ярким примером подобных процессов являются новообразования магнетита за счет гидроокислов железа под восстанавливающим влиянием разлагающегося органического вещества [9].

Исследования Светашевой Д.Р., Очеретного М.А. и Бакун О.И. (2024) представляют пример производственного экологического мониторинга на лицензионном участке недропользования в северной части Каспийского моря [7].

На основе данных за период 2012-2021 гг. определены диапазоны концентраций Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Fe и Mn, отмечена высокая пространственная и временная изменчивость. Показано, что содержание исследуемых металлов в осадках в среднем не превышает зарубежные нормативы качества донных отложений. Осадки Северного Каспия в целом слабо загрязнены тяжелыми металлами, хотя можно выделить районы с их высоким содержанием: северо-западный район с повышенным содержанием железа и центральный район с максимальными концентрациями свинца и кадмия [7].

Исследования Лисецкого Ф.Н., Морабандза К.Б. и Родионовой М.Е. (2024) выполнены по результатам масштабных исследований донных отложений в реках и водоемах Белгородской области в рамках региональной программы расчистки водных объектов [4].

Установлены различия превышения геохимического фона в донных отложениях (по содержанию свинца, цинка, меди и марганца) между среднеобластными показателями и для рек, которые испытывают воздействие железорудной промышленности в зоне Курской магнитной аномалии. Определен ранжированный ряд превышений концентраций тяжелых металлов/металлоидов над региональным геохимическим фоном [4].

Представленные исследования охватывают широкий спектр водных объектов – от арктических озер до южных морей, от малых рек до крупных водохранилищ. Объединяет их общая методологическая основа: донные отложения рассматриваются как интегральный показатель долговременной техногенной нагрузки, позволяющий не только оценить современный уровень загрязнения, но и реконструировать историю антропогенного воздействия.

Работы российских научных коллективов [1-10] демонстрируют впечатляющие возможности методов геохимического анализа и математического моделирования при изучении донных отложений. Очевидно, что донные осадки являются информативным и надежным индикатором техногенной нагрузки, аккумулирующим информацию о воздействии промышленных предприятий.

Однако, несмотря на многочисленные достоинства, использование донных отложений в качестве индикатора техногенной нагрузки сопряжено с рядом серьезных ограничений. Эти ограничения носят как методический, так и интерпретационный характер и напрямую влияют на достоверность выводов об экологическом состоянии водных объектов. Перейдем к детальному рассмотрению преимуществ, которые делают этот подход привлекательным, и

недостатков, которые необходимо учитывать при планировании исследований и интерпретации их результатов.

Основные преимущества:

1. Интегральность во времени. В отличие от воды, состав которой может меняться в течение часов или суток, донные отложения накапливают загрязняющие вещества на протяжении длительных периодов (годы, десятилетия, столетия). Это позволяет выявить долговременные тренды техногенной нагрузки и реконструировать историю загрязнения [1, 6, 9, 10].

2. Высокая информативность вертикального распределения. Послойный анализ колонок донных отложений дает возможность датировать отдельные горизонты (с использованием  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и других изотопов) и связывать пики концентраций с конкретными событиями – пуском предприятий, внедрением очистных сооружений, аварийными сбросами [1, 6, 10].

3. Концентрирование загрязнителей. Концентрации многих поллютантов в донных отложениях на порядки выше, чем в воде, что облегчает их аналитическое определение и снижает требования к чувствительности методов анализа [2, 7].

4. Возможность выявления источников загрязнения. Анализ ассоциаций элементов-индикаторов позволяет идентифицировать конкретные типы производств, влияющие на водный объект. Например, ассоциация Ni-Cu-Co характерна для медно-никелевого производства [1, 10], Ca-P-Na-Sr – для апатитовой промышленности [1, 10], Pb-Zn-Cd – для горнорудных районов [3, 4].

5. Прогностическая ценность для оценки вторичного загрязнения. Донные отложения являются потенциальным источником вторичного загрязнения водной среды при изменении физико-химических условий (pH, Eh, гидродинамики). Оценка содержания загрязнителей в ДО позволяет прогнозировать риски таких ситуаций [9].

6. Развитый математический аппарат. Существующие методы множественной регрессии позволяют количественно связать содержание загрязнителей с гранулометрическими и геохимическими параметрами [2, 5] и прогнозировать концентрации при различных сценариях.

Недостатки и ограничения:

1. Пространственная неоднородность. Донные отложения крайне неоднородны по гранулометрическому, минералогическому и химическому составу даже в пределах одного водного объекта. Это требует тщательного выбора станций отбора и большого количества проб для получения репрезентативных данных [2, 3, 9].

2. Влияние гранулометрического фактора. Сравнение содержания загрязнителей в пробах с разным гранулометрическим составом некорректно без применения процедур нормирования (на элемент-репер, на долю пелитовой фракции). Как показано в работе [2], валовые концентрации находятся в тесной зависимости от содержания глинистых и илистых частиц.

3. Сложность датирования осадков. Точное определение возраста отдельных горизонтов требует применения сложных радиоизотопных методов

( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ), доступных не для всех исследовательских групп. В условиях перемешивания осадков биотурбацией или гидродинамическими процессами датировка может быть затруднена [6].

4. Постседиментационные изменения (диагенез). В процессе диагенеза происходит перераспределение элементов по вертикальному разрезу, что может искажать первоначальную картину поступления загрязнителей. Особенно это касается элементов с переменной валентностью (Fe, Mn, As), чувствительных к окислительно-восстановительным условиям [6, 9].

5. Отсутствие единых нормативов. В Российской Федерации отсутствуют утвержденные нормативы качества донных отложений (ПДК, ОДК). Исследователи вынуждены использовать либо региональные геохимические фоны, либо зарубежные критерии, что затрудняет сопоставление результатов [1, 3, 7].

6. Трудоемкость отбора и анализа. Отбор колонок донных отложений с ненарушенной стратификацией требует специального оборудования (стратиметры, пробоотборники с поршнем) и высокой квалификации исполнителей. Лабораторный анализ большого количества проб дорог и длителен.

Анализ современных российских исследований позволяет выделить следующие перспективные направления развития методов оценки техногенной нагрузки на основе изучения донных отложений:

1. Разработка единой методической базы. Необходима унификация подходов к отбору проб, их подготовке и анализу, а также к расчету интегральных показателей загрязнения. Опыт работ Закруткина В.Е. с соавторами [9] по созданию интегрального показателя с учетом доли пелитовой фракции и коэффициентов опасности элементов заслуживает распространения на другие регионы.

2. Совершенствование методов датирования. Расширение доступа исследовательских групп к радиоизотопным методам ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) позволит повысить надежность хронологической привязки горизонтов и точность реконструкции истории загрязнения [6].

3. Развитие регрессионного моделирования. Применение методов множественной регрессии, продемонстрированное в работах [2, 5, 8], открывает возможности для прогнозирования концентраций загрязнителей на основе более доступных для измерения параметров (гранулометрический состав, содержание органического вещества, Fe, Mn).

4. Создание геоинформационных систем загрязнения донных отложений. Накопленные за десятилетия данные по химическому составу донных отложений нуждаются в систематизации и картографической визуализации для выявления пространственных закономерностей и мониторинга изменений во времени.

5. Разработка нормативной базы. Назрела необходимость создания российских нормативов качества донных отложений, адаптированных к геохимическим особенностям различных регионов и учитывающих токсичность элементов для гидробионтов.

6. Интеграция с методами биотестирования. Сопряженный анализ химического загрязнения и токсичности донных отложений для тест-объектов позволит перейти от констатации загрязнения к оценке реальных экологических рисков [8].

Донные отложения являются информативным и надежным индикатором техногенной нагрузки на поверхностные водные объекты промышленно развитых регионов. Аккумулируя загрязняющие вещества на протяжении длительных периодов, они позволяют не только оценить современный уровень загрязнения, но и реконструировать историю антропогенного воздействия, выявить основные источники поступления поллютантов и прогнозировать риски вторичного загрязнения водной среды.

Вместе с тем, широкому внедрению методов оценки техногенной нагрузки по донным отложениям в практику российского экологического мониторинга препятствуют отсутствие единой методической базы, утвержденных нормативов качества, а также высокая стоимость и трудоемкость исследований. Преодоление этих барьеров требует консолидации усилий научного сообщества, природоохранных органов и недропользователей.

Таким образом, донные отложения являются не просто «архивом» загрязнения, но и активным компонентом водных экосистем, определяющим направленность биогеохимических процессов и потенциально влияющим на качество водной среды. Дальнейшее развитие методов их исследования и интерпретации полученных данных будет способствовать повышению эффективности экологического мониторинга и обоснованности управленческих решений в области охраны водных объектов промышленно развитых территорий Российской Федерации.

### Список литературы

1. Даувальтер В.А. Влияние стоков горно-перерабатывающих предприятий на содержание ртути в арктических озерных донных отложениях / В.А. Даувальтер // Труды Карельского научного центра РАН. – 2019. – № 4. – С. 45-58. DOI: 10.17076/lm18463.

2. Земцова Е.С. Химико-экологическая оценка состояния донных отложений реки Иртыш на территории Тюменской области РФ / Е.С. Земцова [и др.] // Вестник МГТУ. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 177-187.

3. Гуров К.И. Накопление тяжелых металлов и распределение областей техногенных нагрузок в Балаклавской бухте: результаты многолетних исследований / К.И. Гуров, Е.А. Котельянец, Ю.С. Гурова // Морской гидрофизический журнал. – 2025. – Т. 41, № 3. – С. 310-330.

4. Лисецкий Ф.Н. Геохимические особенности донных отложений при различиях гидроэкологических ситуаций (по результатам региональной программы расчистки водных объектов Белгородской области) / Ф.Н. Лисецкий, К.Б. Морабандза, М.Е. Родионова // Куражсковские чтения: материалы III международной науч.-практ. конф. – Астрахань: АГУ, 2024. – С. 104-110.

5. Иващенко Т.И. Моделирование взаимосвязи загрязнения донных отложений с внешними факторами на примере р. Силинка, г. Комсомольск-на-

Амуре / Т.И. Иващенко, Е.А. Архипов // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 1.

6. Рябчук Д.В. Воздействие техногенных процессов на геологическую среду и подводные ландшафты восточной части Финского залива / Д.В. Рябчук, В.А. Жамойда, Д.В. Прищепенко, А.Ю. Сергеев, А.Г. Григорьев, Т.Р. Еремина // Окружающая среда Санкт-Петербурга. – 2025. – 19 марта.

7. Светашева Д.Р. Тяжелые металлы в донных отложениях Северного Каспия в 2012-2021 гг. / Д.Р. Светашева, М.А. Очеретный, О.И. Бакун // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2024. – Т. 166, № 3. – С. 495-512. DOI: 10.26907/2542-064X.2024.3.495-512.

8. Левкова А.Н. Анализ и прогноз миграции антропогенных примесей в пробах донных отложений поверхностных вод Нижневартковского района / А.Н. Левкова // В мире научных открытий. – 2017. – № 4-2. – С. 180-185.

9. Закруткин В.Е. Донные отложения рек как индикатор антропогенного воздействия и качества водной среды в бассейне Северского Донца (в пределах Ростовской области): отчет о НИР (проект РНФ № 22-27-00305) / В.Е. Закруткин // Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону, 2023. – 156 с.

10. Даувальтер В.А. Влияние деятельности горнометаллургических предприятий на химический состав донных отложений озера Имандра, Мурманская область / В.А. Даувальтер, Н.А. Кашулин // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». – 2015. – № 3 Т.7 – С. 295-308.

## **МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ В АНАЛИЗЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННО РАЗВИТЫХ ТЕРРИТОРИЙ: ПРЕИМУЩЕСТВА, НЕДОСТАТКИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ**

В.М. Панарин, Е.М. Рылеева, С.П. Туляков  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

***Аннотация.** В статье приводится анализ применения метода наименьших квадратов (МНК) и его модификаций для количественного определения загрязняющих веществ в поверхностных водах, рассматриваются теоретические основы метода, включая построение регрессионных моделей связи концентраций поллютантов с косвенными показателями. Особое внимание уделено сравнительному анализу преимуществ (простота, вычислительная эффективность, интерпретируемость) и недостатков (чувствительность к выбросам, проблемы мультиколлинеарности) классического МНК.*

Поверхностные водные объекты, расположенные в границах промышленно развитых территорий Российской Федерации, таких как Свердловская, Тульская, Кемеровская, Челябинская области, подвергаются комплексному воздействию поллютантов различной природы: тяжелых металлов, нефтепродуктов, поверхностно-активных веществ, фенолов.

Традиционный подход к оценке качества воды, основанный на дискретном отборе проб и последующем лабораторном анализе с использованием утвержденных методик, регламентируемых РД 52.24.309 и другими нормативными документами Росгидромета [2], является ресурсоемким и зачастую не позволяет получить оперативную картину пространственно-временной динамики загрязнения, особенно в условиях залповых сбросов или аварийных ситуаций.

В этой связи актуальным направлением, активно развиваемым в отечественной науке, является разработка расчетно-аналитических методов, базирующихся на построении математических моделей, связывающих концентрации загрязняющих веществ с более доступными для автоматического измерения показателями (мутность, электропроводность, рН, оптическая плотность). Одним из фундаментальных инструментов для построения таких зависимостей является метод наименьших квадратов (МНК).

На сегодняшний день значительный вклад внесли исследования лаборатории профессора А.В. Легина в Санкт-Петербургском государственном университете, где разрабатываются мультисенсорные системы типа «электронный язык» для интегральной оценки качества вод [5]. Фундаментальные работы профессора И.В. Власовой в Уральском федеральном университете заложили основы систематического применения множественной линейной регрессии (МЛР) и PLS-регрессии для спектрофотометрического анализа многокомпонентных смесей, включая природные воды [7]. Современные исследования К.Ю. Массалова и Е.Ю. Мощенской (Самарский государственный технический университет) демонстрируют новые подходы к построению прогностических моделей состава водных растворов с использованием комбинации PLS-регрессии и методов отбора информативных признаков [1, 3, 4].

Целью данной работы является систематизация знаний о применении МНК для оценки загрязнения поверхностных вод, детальный анализ его преимуществ и недостатков с опорой исключительно на российские исследования, а также определение условий, при которых использование данного метода является методологически оправданным в практике отечественного экологического мониторинга.

Рассмотрим математический аппарат и специфику применения метода в контексте мониторинга водных объектов. Классический МНК служит фундаментом, на котором строятся более сложные модификации, адаптированные к специфике гидрохимических данных. Например, требуется оценить зависимость концентрации загрязняющего вещества  $y$  (например, химическое потребление кислорода (ХПК), мг/л) от одного или нескольких факторов  $x_1, x_2, \dots, x_p$  (например, оптическая плотность при разных длинах волн, мутность, электропроводность). Предполагается, что связь между ними может быть описана линейной моделью:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i$$

где  $y_i$  – значение зависимой переменной для  $i$ -го наблюдения (пробы);  $x_{ij}$  – значение  $j$ -го фактора;  $\beta_j$  – неизвестные параметры модели (коэффициенты регрессии);  $\varepsilon_i$  – случайная ошибка модели (шум). В векторно-матричной форме уравнение имеет вид:  $\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}$ .

Основная идея классического МНК заключается в минимизации суммы квадратов остатков:

$$Q = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \left( \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} \right) \right)^2 \rightarrow \min_{\boldsymbol{\beta}}$$

Выражение является ключевым для понимания вычислительной простоты метода, но оно же указывает и на его потенциальные проблемы. Как отмечается в фундаментальных работах по хемометрике [4], устойчивость этого решения напрямую зависит от обусловленности матрицы исходных данных.

В контексте мониторинга водных объектов МНК чаще всего используется для решения двух основных задач:

1. Калибровка моделей «признак-концентрация». Устанавливается количественная связь между показаниями автоматических датчиков (косвенные измерения) и фактической концентрацией загрязнителя, определяемой по стандартным методикам в лаборатории. Примером может служить работа А.О. Ферубко (МГУ), где PLS-регрессия применялась для флуоресцентного определения общего содержания гуминовых веществ в водах [7].

2. Моделирование процессов рассеяния. Оценка параметров полуэмпирических уравнений, описывающих снижение концентрации примеси по мере удаления от источника сброса.

Однако, как будет показано далее, прямое применение классического МНК к многомерным данным спектрального анализа или к временным рядам концентраций часто наталкивается на серьезные ограничения, что стимулировало развитие специализированных модификаций метода в российских научных коллективах.

Классический МНК основывается на ряде предпосылок (условия Гаусса-Маркова), которые часто нарушаются при работе с реальными данными качества воды. Основные проблемы – это, например, сильная корреляция между оптическими сигналами на соседних длинах волн, наличие выбросов. Для смягчения этих ограничений были разработаны специализированные модификации, и российские научные коллективы внесли в это направление существенный вклад.

Так, исследования под руководством проф. И.В. Власовой в Уральском федеральном университете на протяжении многих лет были посвящены систематическому применению метода множественной линейной регрессии (МЛР) и PLS-регрессии для спектрофотометрического анализа многокомпонентных смесей, в том числе природных вод [8]. Работы ее группы

убедительно показали, что прямое использование МЛР в условиях сильного перекрытия спектров компонентов затруднительно, в то время как PLS-алгоритмы позволяют успешно решать задачу [8].

Особого внимания заслуживает деятельность лаборатории проф. А.В. Легина в Санкт-Петербургском государственном университете. Его коллектив разрабатывает мультисенсорные системы типа «электронный язык» и «электронный глаз» для оценки интегральных показателей качества воды. В своих работах они активно применяют PLS-регрессию для обработки сигналов с массива потенциометрических и оптических сенсоров. В недавнем исследовании (2024 г.) для прямого количественного определения индекса загрязнения воды (WPI) по сигналам трех различных сенсорных устройств использовались как линейные (PLS), так и нелинейные (KRLS) хемометрические алгоритмы. Было показано, что PLS-модели позволяют достичь высокой точности прогноза [5].

Значительный прогресс в области оптических методов анализа продемонстрирован в недавней работе К.Ю. Массалова и Е.Ю. Мощенской (2025 г.) [1, 3, 4]. Ими был разработан алгоритм, реализованный на языке Python, для построения прогностических моделей состава водных растворов солей металлов (двух- и трехкомпонентные системы Ni, Co, Cu) на основе данных спектрального анализа. Ключевой особенностью работы стало комбинирование PLS-регрессии с методом отбора информативных спектральных интервалов на основе значений Шепли (Shapley values). Этот подход позволил не только создать точную модель, но и существенно упростить возможную аппаратную реализацию за счет использования ограниченного числа светодиодов вместо полного спектрометра [3, 4].

В Таблице 1 систематизированы основные модификации МНК, используемые в российской практике гидрохимического мониторинга.

Таблица 1

Основные модификации МНК в российских исследованиях качества вод

<b>Модификация</b>	<b>Краткое описание</b>	<b>Основное применение в анализе вод</b>	<b>Российские научные группы и источники</b>
PLS	Проецирует исходные переменные в пространство латентных факторов, максимизируя ковариацию с откликом.	Калибровка моделей по данным многоканальной спектроскопии (УФ, видимая, флуоресценция) для определения металлов, ХПК, гуминовых веществ.	Лаборатория Легина А.В. (СПбГУ) [5], группа Власовой И.В. (УрФУ) [8], Массалов К.Ю., Мощенская Е.Ю. (СамГТУ) [1, 3, 4], работа Ферубко А.О. (МГУ) [7].
Множественная линейная регрессия (МЛР)	Классический МНК для случая нескольких предикторов.	Анализ простых смесей с неперекрывающимися спектрами, оценка влияния отдельных факторов.	Фундаментальные работы Власовой И.В. по применению МЛР в спектрофотометрии

Продолжение таблицы			
Робастные модификации (IRLS, WLS)	Используют итеративное перевзвешивание наблюдений для уменьшения влияния выбросов.	Анализ данных с резкими аномальными всплесками концентраций (залповые сбросы, аварийные ситуации).	Упомянуты в теоретических работах, в частности, в обзорах методов обработки данных [4].
МНК с отбором переменных	Комбинация регрессии с методами выбора наиболее информативных предикторов (например, на основе значений Шепли).	Оптимизация мультисенсорных систем, снижение стоимости анализатора при сохранении точности.	Работа Массалова К.Ю. и Мощенской Е.Ю. (2025), где для водных растворов солей применен отбор длин волн на основе значений Шепли [3, 4].

После рассмотрения теоретических основ и существующих модификаций, детально проанализируем сильные и слабые стороны применения МНК в контексте мониторинга промышленных загрязнений, опираясь на результаты российских исследований.

Основные преимущества:

1. Математическая и статистическая обоснованность. МНК является методом получения несмещенных и эффективных (имеющих наименьшую дисперсию) оценок при выполнении условий Гаусса-Маркова. Это позволяет строить доверительные интервалы для прогнозов и проверять статистические гипотезы о значимости связи.

2. Вычислительная простота и скорость. В отличие от градиентных методов обучения нейронных сетей, оценки МНК вычисляются аналитически. Это критически важно для создания систем оперативного мониторинга (online) и обработки больших массивов данных, что подчеркивается, например, в контексте разработки программного обеспечения для анализа спектральных данных на Python [1, 3].

3. Прозрачность и интерпретируемость. Коэффициенты регрессии имеют четкий физический смысл:  $\beta_j$  показывает, на сколько единиц изменится концентрация упри изменении фактора  $x_j$  на единицу при фиксированных прочих факторах. Это позволяет ранжировать факторы по степени их влияния на загрязнение.

4. Эффективность при «хороших» данных. Исследования многомерной калибровки в РФЭА (TXRF) показывают, что использование PLS-регрессии позволяет существенно улучшить результаты по сравнению с классической унивариантной калибровкой, обеспечивая высокие коэффициенты детерминации для ряда элементов [9].

Несмотря на перечисленные достоинства, практическое применение МНК сопряжено с рядом серьезных ограничений, которые необходимо учитывать:

1. Чувствительность к выбросам. Критерий минимизации квадратов остатков приводит к тому, что точки, сильно отклоняющиеся от общей

зависимости, оказывают непропорционально большое влияние на оценки коэффициентов.

2. Проблема мультиколлинеарности. В данных мониторинга часто присутствуют сильно коррелированные признаки. Матрица  $X^T X$  становится плохо обусловленной, что делает оценки коэффициентов неустойчивыми. Именно эта проблема стимулировала широкое внедрение PLS-регрессии в работах российских хемометриков [3, 4, 5, 8].

3. Нарушение гомоскедастичности. Дисперсия ошибки часто непостоянна. Например, ошибка измерения может быть пропорциональна концентрации. В таких случаях классический МНК перестает быть эффективным методом.

4. Автокорреляция остатков. При анализе временных рядов качества воды значения поллютантов в соседние моменты времени часто коррелированы. Нарушение предпосылки о независимости ошибок ведет к некорректной оценке точности модели.

5. Ограниченная форма связи. Классический МНК предполагает линейную зависимость. Однако процессы трансформации загрязнителей в воде часто описываются нелинейными законами. В таких случаях, как отмечают исследователи лаборатории Легина, может потребоваться применение нелинейных ядерных методов [5].

В Таблице 2 представлены основные преимущества и недостатки МНК применительно к задачам гидрохимического мониторинга.

Таблица 2  
Анализ применения МНК для оценки загрязнения вод

	Преимущества	Недостатки
Технические аспекты	Простота реализации; высокая скорость вычислений; наличие открытых библиотек (Python).	Чувствительность к мультиколлинеарности; чувствительность к выбросам; неустойчивость при малом числе наблюдений.
Интерпретируемость	Прозрачность модели; четкий физический смысл коэффициентов.	Ограниченность линейными зависимостями; сложность интерпретации латентных переменных в PLS.
Аспекты данных	Эффективен для данных с низким уровнем шума и слабой корреляцией предикторов.	Требует выполнения статистических предпосылок, часто нарушаемых в реальных данных.

Логическим продолжением анализа преимуществ и недостатков является вопрос о том, в каких конкретных ситуациях применение МНК и его модификаций наиболее оправдано и какие перспективы развития этих методов существуют в российской науке.

На основе анализа литературных данных [1-9] можно выделить условия, при которых применение МНК является предпочтительным:

- Наличие длительных и репрезентативных рядов наблюдений (богатая калибровочная выборка позволяет сгладить влияние случайных ошибок);

- Минимизация систематических ошибок (важно, чтобы модель правильно отражала физику процесса, а входные данные были точными);
- Предварительная обработка данных (обязательным этапом является удаление явных выбросов, трансформация переменных и проверка на мультиколлинеарность);
- Задачи многомерной калибровки (как показывают работы Массалова и Мощенской [3, 4] и Шулюмовой с соавторами [9], PLS-регрессия является эффективным инструментом для обработки сигналов от многоканальных сенсоров и спектрометров).

В настоящее время перспективным направлением развития, активно разрабатываемым в России, является интеграция МНК с методами отбора признаков (например, на основе значений Шепли [3, 4]), что позволяет создавать более экономичные и целенаправленные аналитические системы. Также развивается гибридизация линейных методов с элементами искусственного интеллекта для учета нелинейностей, как показано в работах лаборатории Легина [5].

Резюмируя, нужно отметить, что метод наименьших квадратов занимает важное место в арсенале средств математического моделирования загрязнения поверхностных вод, используемых в российской практике экологического мониторинга. Его главные преимущества – простота, скорость получения результатов и статистическая прозрачность – делают его незаменимым на этапе предварительного анализа данных и в системах оперативного контроля. Существующие модификации, в разработку и адаптацию которых значительный вклад внесли российские научные коллективы (лаборатории Легина А.В., Власовой И.В., Мощенской Е.Ю. и др.), существенно расширяют область его применимости, позволяя работать с многомерными, сильно коррелированными данными от мультисенсорных систем и спектрометров.

Однако, применение классического МНК требует от исследователя понимания его ограничений. Использование метода без проверки предпосылок может привести к построению неадекватных моделей и ошибочным выводам об экологическом состоянии водного объекта. Таким образом, МНК является эффективным, но не универсальным инструментом, требующим вдумчивого подхода и предварительного анализа качества исходных данных, что и подтверждается всем массивом современных российских исследований.

### Список литературы

1. Массалов К.Ю. Построение модели для прогнозирования двух- и трехкомпонентных неорганических систем в водных растворах спектральным анализом / К.Ю. Массалов, Е.Ю. Мощенская // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2025. – Т. 29, № 1. – С. 174-186.
2. ГОСТ Р 51232-98 "Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества" (принят постановлением Госстандарта РФ от 17 декабря 1998 г. N 449). Приложение В (справочное)..
3. Богомолов А.Ю. Оптические мультисенсорные системы в аналитической спектроскопии / А.Ю. Богомолов // Рос. хим. ж., 2022. – Т. 77,

№3. – С. 227-247. EDN: MFSPES. DOI: [https://doi.org/ 10.31857/S0044450222030033](https://doi.org/10.31857/S0044450222030033).

4. Мощенская Е.Ю. Моделирование диаграмм "состав-свойство" для системы "алюминий-кремний" / Е.Ю. Мощенская, Б.М. Стифатов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2023. – Т. 16, №1. – С. 107-115. EDN: JWRAGD.

5. Родионова О.Е. Хемометрический подход к исследованию больших массивов химических данных // Рос. хим. ж., 2006. Т. 50, №2. С. 128-144. EDN: HTUUSZ

6. Galyanin V. Selecting optimal wavelength intervals for an optical sensor: A case study of milk fat and total protein analysis in the region 400-1100 nm / V. Galyanin, A. Melenteva, A. Bogomolov // Sens. Actuat. B: Chem., 2015. – Vol.218. – Pp. 97-104. EDN: UFYADR. DOI: [https://doi.org/ 10.1016/j.snb.2015.03.101](https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.03.101).

7. Ферубко А.О. Флуоресцентное определение общего содержания гуминов в водах с использованием многомерных градуировочных моделей / А.О. Ферубко // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2021». – М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021.

8. Власова И.В. Формирование градуировочных наборов для спектрофотометрического анализа многокомпонентных смесей с применением метода множественной линейной регрессии / И.В. Власова, А.С. Шелпакова, С.М. Добровольский, А.В. Фисенко // Вестн. Ом. ун-та. – 2010. № 2. – С. 99-105.

9. Shulyumova A. Multivariate calibration in TXRF analysis of water / A. Shulyumova, A. Maltsev, N. Umarova // X-Ray Spectrometry. – 2018. – Vol. 47, Iss. 6. – P. 1-10. DOI: 10.1002/xrs.2958.

## **СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

В.М. Панарин, Е.М. Рылеева, С.П. Туляков  
Тульский государственный университет  
г. Тула

*Аннотация.* В статье приводится систематизация знаний о применении спектральных и оптических методов для экспресс-контроля качества поверхностных вод, рассматриваются физико-химические основы методов, проанализированы достоинства и ограничения видимой (УФ-ВиД) спектрофотометрии, флуоресцентных методов и мультисенсорных систем. Особое внимание уделено хемометрическим подходам к обработке многомерных спектральных данных, включая PLS-регрессию и методы отбора информативных длин волн. Представлен обзор современных российских разработок в этой области.

Проблема оперативного контроля качества поверхностных водных объектов, расположенных в границах промышленно развитых территорий Российской Федерации, приобретает в последние годы особую остроту.

Традиционный подход, основанный на дискретном отборе проб с последующим лабораторным анализом с использованием утвержденных методик (РД 52.24.309 и др.) [2], обладает рядом существенных недостатков: высокая трудоемкость, значительная временная задержка между отбором пробы и получением результата, невозможность выявления кратковременных залповых сбросов, а также высокие эксплуатационные затраты на реактивы и обслуживание.

В этой связи все более актуальным становится разработка и внедрение методов оперативного (экспрессного) контроля, позволяющих получать информацию о качестве воды в режиме, близком к реальному времени. Среди таких методов особое место занимают спектральные и оптические методы анализа, которые характеризуются высоким быстродействием, возможностью автоматизации, отсутствием или минимальным расходом реактивов и пригодностью для создания автоматических станций мониторинга [2, 4].

Спектрофотометрия в ультрафиолетовой и видимой области (УФ-Вид) давно зарекомендовала себя как надежный инструмент для определения широкого круга загрязнителей – от нитратов и органических веществ до ионов металлов [2, 4]. Однако интерпретация спектральных данных, особенно при анализе многокомпонентных природных вод, сталкивается с проблемой перекрывания спектров и низкой селективностью. Решение этой проблемы лежит в плоскости применения методов хемометрики – многомерной калибровки, регрессионного анализа и машинного обучения [3, 5].

Целью настоящей работы является систематизация знаний о современных спектральных и оптических методах оперативного контроля качества поверхностных вод, анализ их преимуществ и ограничений, а также обзор российских научных разработок в этой области, определяющих перспективы импортозамещения и технологического развития отечественной системы экологического мониторинга.

Спектральные методы анализа основаны на взаимодействии электромагнитного излучения с молекулами и ионами растворенных и взвешенных веществ. Для задач контроля качества воды наиболее информативными являются два диапазона: ультрафиолетовый (200-400 нм) и видимый (400-800 нм) [2, 4].

В УФ-области поглощение обусловлено преимущественно электронными переходами в молекулах органических соединений, содержащих хромофорные группы (карбонильные, карбоксильные, нитро-группы, ароматические кольца). Именно поэтому УФ-спектроскопия чрезвычайно информативна для оценки содержания растворенного органического вещества (РОВ), гуминовых и фульвокислот, фенолов, нефтепродуктов [4, 7]. Нитрат-ионы также имеют характерное поглощение в области 200-220 нм, что позволяет использовать УФ-спектроскопию для их количественного определения [2].

Видимая область поглощения связана с переходами в ионах переходных металлов ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  и др.), а также с окрашенными органическими соединениями. Многие ионы металлов образуют окрашенные комплексы, что делает возможным их прямое спектрофотометрическое определение [3, 4].

На основе анализа литературных данных [2, 4, 5, 7] можно выделить следующие группы загрязнителей, для определения которых успешно применяются спектральные методы (таблица 1).

Таблица 1

Загрязнители поверхностных вод, определяемые спектральными методами

Группа загрязнителей	Типичные представители	Диапазон	Особенности определения
Органические вещества	Растворенный органический углерод (РОУ), гуминовые вещества, фенолы, нефтепродукты	УФ (250-350 нм)	Сильное перекрытие спектров различных компонентов
Биогенные элементы	Нитраты, нитриты	УФ (200-220 нм)	Мешающее влияние органики требует коррекции
Ионы металлов	$\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Co}^{2+}$ , $\text{Cr}^{3+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ , $\text{Pb}^{2+}$ , $\text{Cd}^{2+}$	Видимый (400-800 нм)	Часто требуется комплексообразование для усиления сигнала; возможно прямое определение
Интегральные показатели	ХПК, БПК, ТОС	УФ-Вид	Определяются по корреляции с оптической плотностью

Ключевым ограничением спектральных методов является низкая селективность в сложных матрицах. Как отмечается в обзоре [2], спектры различных соединений перекрываются, что делает невозможным прямое определение компонентов с использованием калибровки. Это ограничение преодолевается применением методов многомерной калибровки.

Особое место среди оптических методов занимает флуоресцентная спектроскопия. Ряд органических соединений (ароматические углеводороды, гуминовые вещества, некоторые белки) обладают собственной флуоресценцией, что позволяет определять их с высокой чувствительностью. В работе Ферубко А.О. (МГУ) [7] продемонстрировано применение многомерных градуировочных моделей для флуоресцентного определения общего содержания гуминовых веществ в природных водах. Флуоресцентные методы характеризуются более высокой селективностью по сравнению с абсорбционной спектроскопией, однако также требуют применения хемометрических подходов при анализе многокомпонентных смесей [7].

Наиболее широкое распространение для обработки спектральных данных получил метод проекции на латентные структуры (PLS-регрессия). PLS позволяет строить прогностические модели в условиях сильной коррелированности предикторов, что является типичной ситуацией для спектральных данных, где соседние длины волн сильно скоррелированы [3, 5].

Математическая постановка задачи PLS включает одновременное разложение матрицы предикторов  $X$  (спектры) и матрицы откликов  $Y$  (концентрации) на произведение матриц счетов и нагрузок с последующим установлением регрессионной связи между счетами [3]. В работе лаборатории А.В. Легина (СПбГУ) [5] PLS-регрессия успешно применена для обработки сигналов мультисенсорной системы при определении индекса загрязнения воды, что позволило достичь среднеквадратичной ошибки прогноза порядка 0.14 в диапазоне от 1 до 4.

Для повышения качества прогностических моделей применяются различные методы предобработки спектров [2, 3]:

- Сглаживание (метод Савицкого-Голея) – для уменьшения шумов;
- Производные (первая и вторая) – для устранения аддитивных и мультипликативных эффектов, повышения разрешения перекрывающихся пиков;
- Масштабирование и центрирование – для приведения переменных к единому масштабу;
- Коррекция мультипликативного рассеяния – для учета влияния взвешенных частиц.

Применение производных спектров, как отмечается в работе [2], позволяет выявить скрытые особенности спектральной кривой и повысить селективность анализа.

На сегодняшний день перспективным направлением развития хемометрических методов является не просто использование всего спектра, а целенаправленный отбор наиболее информативных спектральных интервалов. Это позволяет упростить аппаратную реализацию (замена дорогостоящих спектрометров на наборы светодиодов с узкими полосами излучения) и повысить робастность моделей [3, 4].

Значительный вклад в развитие этого направления внесен в работе К.Ю. Массалова и Е.Ю. Мощенской (2025 г.) [3, 4]. Ими разработан алгоритм, реализованный на языке Python, для построения прогностических моделей состава водных растворов солей металлов ( $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ) на основе данных спектрального анализа в диапазоне 360-1100 нм. Ключевой особенностью работы стало комбинирование PLS-регрессии с методом отбора информативных спектральных интервалов на основе значений Шепли. Значения Шепли, заимствованные из теории кооперативных игр, позволяют оценить вклад каждой длины волны в прогностическую способность модели [3]. Результаты показали, что модель, построенная на отобранных оптимальных спектральных интервалах, демонстрирует точность, сопоставимую с полноспектральными аналогами.

Научная группа под руководством профессора А.В. Легина на протяжении многих лет разрабатывает мультисенсорные системы для анализа жидких сред, включая природные и сточные воды [1, 5]. Принцип действия таких систем основан на использовании массивов потенциометрических, вольтамперометрических или оптических сенсоров с перекрестной чувствительностью в сочетании с хемометрической обработкой сигналов.

В работе [5] представлен подход к прямой количественной оценке индекса загрязнения воды с использованием трех различных сенсорных устройств: оптического сенсора на кадмий, вольтамперометрического сенсора на свинец и потенциометрической мультисенсорной системы. Применение линейных (PLS) и нелинейных (KRLS) хемометрических алгоритмов позволило построить прогностические модели для оценки содержания отдельных металлов и интегрального показателя в сложных водных матрицах, содержащих гуминовые вещества. Важным результатом работы является демонстрация возможности слияния данных на различных уровнях для повышения точности прогноза [5].

Исследования самарских ученых [3, 4] представляют собой пример успешного сочетания экспериментальной химии, математического моделирования и программирования. Разработанный алгоритм решает задачу, актуальную для создания специализированных аналитических систем: как, используя ограниченное число спектральных каналов, сохранить точность, сопоставимую с полноспектральным анализом. Экспериментальная часть работы включала измерение спектров поглощения двух- и трехкомпонентных растворов солей  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  и  $Cu^{2+}$ . Для обработки данных применялись:

- PLS-регрессия и множественная линейная регрессия;
- расчет значений Шепли для каждой длины волны;
- переборный алгоритм для поиска оптимальной комбинации интервалов.

Полученные результаты (средняя абсолютная процентная ошибка на уровне 5-7 % для различных систем) подтверждают адекватность предложенного подхода и его практическую применимость для создания мультисенсорных систем на основе светодиодов [3].

В работе Ферубко А.О. (МГУ, 2020) [7] исследована возможность применения многомерных градуировочных моделей для флуоресцентного определения общего содержания гуминовых веществ в водах. Показано, что использование PLS-регрессии позволяет учитывать мешающее влияние неопределенного состава гуминовых веществ разного происхождения и получать корректные оценки их суммарного содержания.

Исследования под руководством проф. И.В. Власовой (УрФУ) [8] заложили основы систематического применения множественной линейной регрессии и PLS-регрессии для спектрофотометрического анализа многокомпонентных смесей в природных водах. Работы уральской школы демонстрируют, что прямое использование классической МЛР в условиях сильного перекрытия спектров затруднительно, в то время как PLS-алгоритмы позволяют успешно решать задачу количественного анализа.

Представленные в таблице 2 исследования демонстрируют широкий спектр возможностей спектральных и оптических методов – от оценки интегральных показателей качества вод до высокоточного количественного анализа многокомпонентных смесей ионов металлов. Работы ведущих российских научных групп [1, 3, 5, 7, 8] формируют солидную теоретическую и практическую базу для внедрения этих подходов в систему экологического мониторинга. Очевидно, что комбинация оптических измерений с

современными хемометрическими алгоритмами позволяет решать задачи, недоступные традиционным методам анализа. Однако, несмотря на впечатляющие результаты, полученные в лабораторных условиях и на модельных системах, практическая реализация спектральных методов для оперативного контроля природных вод сопряжена с рядом серьезных ограничений. Эти ограничения носят как инструментальный, так и методологический характер и напрямую влияют на возможность массового внедрения разработок в реальную практику экологического мониторинга. Детально рассмотрим преимущества, которые делают эти методы привлекательными, и недостатки, которые сдерживают их повсеместное использование.

Таблица 2

Сравнительная характеристика российских исследований в области оптических методов контроля качества вод

Научный коллектив	Объекты анализа	Используемые методы	Ключевые достижения
Лаборатория Легина А.В. (СПбГУ)	Природные воды, модельные смеси, сточные воды	Потенциометрические и оптические сенсоры, PLS, KRLS, data fusion	Оценка WPI с RMSE 0.14; анализ отработанного ядерного топлива; системы без электрода сравнения
Массалов К.Ю., Мощенская Е.Ю. (СамГТУ, НИЯУ МИФИ)	Растворы солей металлов (Ni, Co, Cu)	УФ-Вид спектроскопия, PLS, отбор признаков на основе значений Шепли	Оптимизация спектральных интервалов для LED-сенсоров; снижение размерности без потери точности
Власова И.В. (УрФУ)	Многокомпонентные смеси, природные воды	МЛР, PLS, спектрофотометрия	Систематизация подходов к многомерной калибровке в анализе вод
Ферубко А.О. (МГУ)	Гуминовые вещества в природных водах	Флуоресцентная спектроскопия, PLS	Определение общего содержания гуминов с учетом вариабельности состава

Основные преимущества:

1. Высокое быстродействие (измерение спектра занимает от долей секунды до нескольких минут, что позволяет организовать непрерывный мониторинг [2]).
2. Отсутствие или минимизация расхода реактивов (большинство спектральных методов не требуют химической пробоподготовки, что снижает эксплуатационные затраты и экологическую нагрузку [4]).

3. Возможность автоматизации (спектральные сенсоры легко интегрируются в автоматические станции мониторинга и системы передачи данных [1, 5]).

4. Многокомпонентность (при использовании хемометрических моделей по одному спектру можно определить несколько показателей одновременно (например, нитраты и органический углерод) [2, 5]).

5. Пригодность для портативных устройств (современная элементная база позволяет создавать компактные спектрометры и мультисенсорные системы для полевых условий [3, 4]).

Основные ограничения и проблемы:

1. Низкая селективность в сложных матрицах (перекрывание спектров различных компонентов требует обязательного применения хемометрических методов, что усложняет обработку данных [2]).

2. Влияние взвешенных веществ и мутности (частицы вызывают рассеяние света, искажающее спектры поглощения, требуется либо предварительная фильтрация, либо математическая коррекция [2]).

3. Калибровочная проблема (качество прогноза напрямую зависит от репрезентативности калибровочной выборки. Модели, построенные на одном типе вод, могут давать систематические ошибки на других [3, 5]).

4. Ограниченная чувствительность (для микроконцентраций (на уровне ПДК) многих загрязнителей спектральные методы могут быть недостаточно чувствительны без предварительного концентрирования [2]).

5. Отсутствие утвержденных методик (в российской нормативной базе пока недостаточно методик выполнения измерений (МВИ), основанных на спектральных методах в сочетании с хемометрикой, что затрудняет их официальное применение в контрольно-надзорной деятельности).

Анализ современных российских исследований позволяет выделить следующие перспективные направления развития и внедрения спектральных методов оперативного контроля качества вод:

1. Создание автоматических станций мониторинга. Интеграция УФ-Вид спектрометров и мультисенсорных систем в существующую сеть наблюдений Росгидромета позволит повысить оперативность выявления залповых сбросов и аварийных загрязнений [1, 5].

2. Разработка отечественных портативных анализаторов. Опыт работ Массалова и Мощенской [3, 4] демонстрирует возможность создания недорогих LED-анализаторов для ограниченного круга задач (например, контроль эффективности очистки сточных вод металлургических предприятий).

3. Совершенствование нормативно-методической базы. Необходима разработка и валидация МВИ, основанных на спектральных методах и хемометрической обработке, с последующим внесением в реестр методик измерений. Это требует проведения межлабораторных испытаний и метрологической аттестации.

4. Развитие гибридных подходов. Комбинирование спектральных методов с другими типами сенсоров (электрохимическими, флуоресцентными) и

применение методов слияния данных позволяет повысить надежность и информативность контроля [5, 1].

Резюмируя, можно отметить, что спектральные и оптические методы в сочетании с современными хемометрическими алгоритмами представляют собой одно из наиболее перспективных направлений развития оперативного контроля качества поверхностных вод. Высокое быстродействие, возможность автоматизации и многокомпонентного анализа делают эти методы незаменимыми для создания систем раннего предупреждения о загрязнениях и непрерывного экологического мониторинга.

Российские научные коллективы вносят существенный вклад в развитие этого направления. Исследования лаборатории А.В. Легина (СПбГУ) демонстрируют возможности мультисенсорных систем для интегральной оценки качества вод [1, 5]. Работы К.Ю. Массалова и Е.Ю. Мощенской (СамГТУ, НИЯУ МИФИ) открывают путь к созданию экономичных LED-анализаторов на основе оптимально выбранных спектральных интервалов [3, 4]. Исследования уральской и московской школ закладывают теоретическую базу для применения методов многомерной калибровки [7, 8]. Вместе с тем, широкому внедрению спектральных методов в практику российского экологического мониторинга препятствуют недостаточная развитость нормативно-методической базы и ограниченная чувствительность для ряда загрязнителей. Преодоление этих барьеров требует консолидации усилий научного сообщества, производителей аналитического оборудования и природоохранных органов.

Таким образом, спектральные и оптические методы оперативного контроля, подкрепленные современными достижениями российской хемометрики, имеют значительный потенциал для модернизации системы наблюдения за состоянием поверхностных водных объектов промышленно развитых территорий Российской Федерации.

### Список литературы

1. Головач А.П. Спектрометрические методы в исследованиях природных вод / А.П. Головач // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2004. – №2 – С 32-34.

2. Некрасова Л.П. Применение абсорбционной и флуоресцентной спектроскопии для решения задач контроля качества воды / Л.П. Некрасова, М.Г. Кочеткова, И.Н. Рыжова, Р.И. Михайлова // Системные технологии 4(№37) 2020. – С. 53-57.

3. Массалов К.Ю. Построение модели для прогнозирования двух- и трехкомпонентных неорганических систем в водных растворах спектральным анализом / К.Ю. Массалов, Е.Ю. Мощенская // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2025. – Т. 29, № 1. – С. 174-186.

4. Клименко О.А. К усовершенствованию гидрохимических наблюдений и расчета массопереноса (выноса) химических веществ с речным водным стоком / О.А. Клименко, В.Ф. Греков // Сборник статей, посвященный 100-летию со дня образования Гидрохимического института «Современные проблемы

гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод» Часть 2. – Ростов-на-Дону, 2020. – С. 7-13

5. Семенова И.В. Анализ использования автоматизированных методов наблюдения для мониторинга загрязнения трансграничных рек / И.В. Семенова // Сборник статей, посвященный 100-летию со дня образования Гидрохимического института «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод» Часть 2. – Ростов-на-Дону, 2020. – С. 13-19

6. ГОСТ Р 51232-98 "Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества" (принят постановлением Госстандарта РФ от 17 декабря 1998 г. N 449). Приложение В (справочное).

7. Ферубко А.О. Флуоресцентное определение общего содержания гуминов в водах с использованием многомерных градуировочных моделей / А.О. Ферубко // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2021». – М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021.

8. Власова И.В. Новые подходы к применению метода множественной линейной регрессии в спектрофотометрическом анализе многокомпонентных смесей / И.В. Власова, А.С. Шелпакова, С.М. Добровольский, А.В. Фисенко // Аналитика и контроль. Электронный научный архив УрФУ. – 2009. – С. 153-157.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ТОПЛИВА С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

В.П. Зайцев, Г.С. Юр, Б.В. Палагушкин

Новосибирский государственный университет водного транспорта,  
г. Новосибирск

*Аннотация.* Проведены исследования рабочего процесса дизеля на топливе с присадкой высокомолекулярного спирта гексанола-1, насыщенного водой. Наличие воды в топливе, в виде истинного раствора, приводит к снижению в выхлопном газе концентрации окиси углерода до 20 %, оксидов азота до 10 %.

Известно, что применение присадки воды к топливу способствует существенному улучшению экологических показателей двигателя внутреннего сгорания.

Смеси воды с топливом могут существовать в виде эмульсий, в мицеллярном состоянии, а также в виде истинных растворов.

Объектом настоящего исследования выбрана топливно-спиртовая смесь, насыщенная водой. В качестве присадки использовался высокомолекулярный спирт гексанол-1. Насыщение дизельного топлива водой проводили в делительной воронке посредством смешения фаз при соотношении объемов  $V_{\text{орг}} : V_{\text{в}} = 1000 : 100$ . После расслаивания фаз водную фазу удаляли. Содержание воды в смеси топлива с гексанола-1, которое определялось реактивом Фишера [1],

приведено на рис. 1 и не превышало 1 об. %. Смеси топлива с водой существует в виде гомогенных растворов и во времени не расслаивалась на водную и органическую фазы.

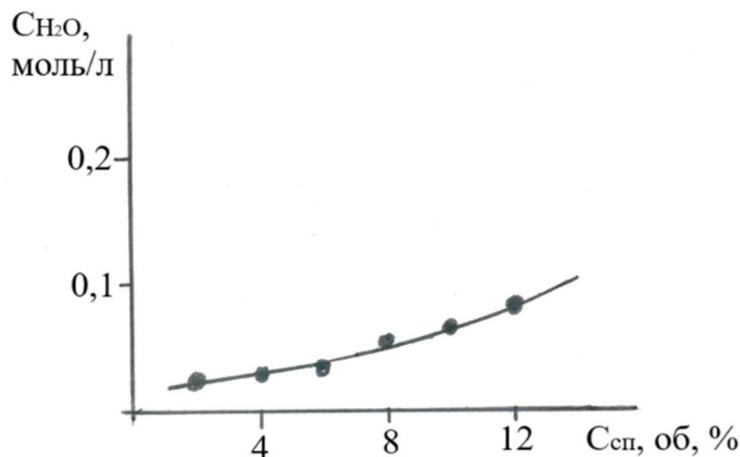


Рис. 1. Растворимость воды в дизельном топливе в зависимости от концентрации гексанола-1

Исследования модифицированного топлива проводились в лаборатории СДВС ФБОУ ВПО «СГУВТ» на отсеке дизеля Ч 10.5/12, по характеристике при частоте вращения коленчатого вала равном 1500 об./мин.

Концентрации газообразных загрязняющих веществ измерялись газоанализатором «ЭКСПЕРТ МТ ПРО». Дымность, отработавших газов – дымомером «МЕТА-0,1 МП 0,1». Расход топлива определялся весовым способом с помощью электронных весов марки «МК-6.2-А22». Частота вращения коленчатого вала контролировалась прибором «Декарт» с точность 1 об./мин.

На рис. 2 приведена нагрузочная характеристика дизеля Ч 10.5/12.

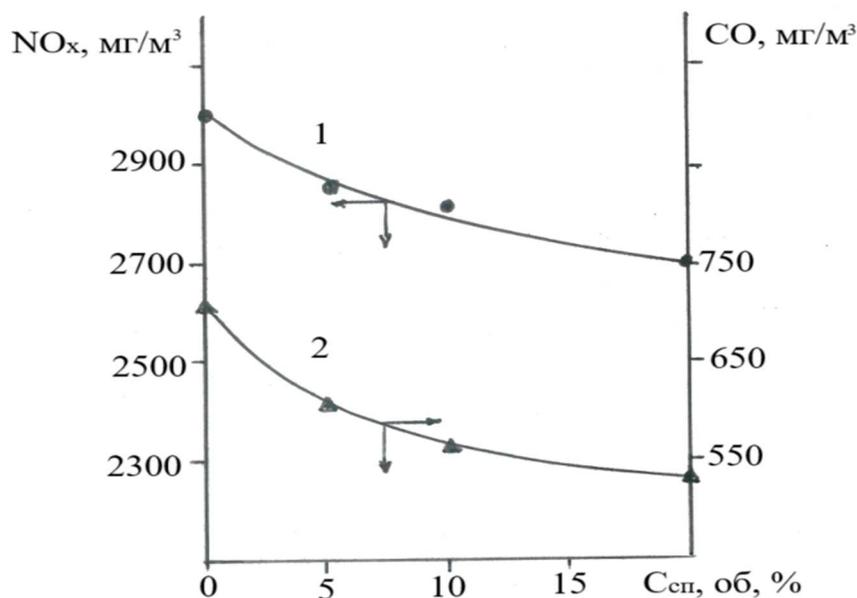


Рис. 2. Зависимость изменение концентрации оксидов азота (NO<sub>x</sub>) и угарного газа (СО), содержащихся в отработавших газах дизеля от концентрации гексанола-1 насыщенного водой в дизельном топливе

Анализ полученных результатов показал, что добавление в качестве присадки высокомолекулярного спирта гексанол-1 насыщенного водой приводит к уменьшению концентрации оксида азота до 10 %, а оксида углерода до 20 %. Дымность и температура отработавших газов, а также удельный эффективный расход топлива не изменились.

На основании экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- наличие воды в топливе служит катализатором дальнейшего окисления угарного газа до безвредного углекислого газа;
- снижение концентрации оксидов азота обусловлено уменьшением количества кислорода участвующего в реакции окисления азота в камере сгорания двигателя.

### Список литературы

1. Митчелл Д. Аквометрия / Д. Митчелл, Д. Смит. – М.: ИЛ, 1952. – 426 с.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДОВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ И ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

А.У. Аетов, И.Ш. Хабриев, А.А. Маннанова, Л.Л. Закирова  
Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
г. Казань

***Аннотация.** В работе рассмотрены возможности применения сверхкритических флюидных технологий для решения актуальных задач рационального природопользования, связанных с утилизацией отходов лесопромышленного комплекса. Особое внимание уделено термохимической конверсии трудноутилизируемых компонентов (лигнина, черного щелока) в среде сверхкритической воды. Приведена сравнительная характеристика традиционных и сверхкритических методов переработки отходов. Показано, что применение сверхкритических сред позволяет не только снизить экологическую нагрузку от накопления отходов, но и вовлечь их в повторный хозяйственный оборот с получением энергоносителей и ценных химических соединений. Выделены ключевые барьеры промышленного внедрения и предложены пути их преодоления.*

***Ключевые слова:** сверхкритические флюиды, переработка отходов, утилизация лигнина, черный щелок, водоочистка, зеленая химия.*

В структуре лесопромышленного комплекса России ежегодно образуются миллионы тонн отходов переработки древесины. Традиционные методы обращения с ними (складирование в отвалах, сжигание в котлах-утилизаторах) зачастую не отвечают современным экологическим требованиям. Накопление гидролизного лигнина, коры и шламов целлюлозно-бумажных комбинатов создает риск загрязнения почв и водных объектов [1, 2]. В соответствии с принципами рационального природопользования необходимы технологии, позволяющие перерабатывать эти отходы с максимальным извлечением полезных компонентов и минимальным воздействием на среду. К

числу таких технологий относится обработка в сверхкритических флюидных (СКФ) средах.

В таблице 1 представлено сравнение традиционных методов утилизации основных отходов лесопромышленного комплекса и альтернативных подходов с использованием сверхкритических флюидов.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов утилизации отходов ЛПК

Вид отхода	Традиционный подход (проблемы)	СКФ-технология (решение)	Ключевой результат
Лигнин (гидролизный, технический)	Сжигание или складирование: низкая теплотворность влажного лигнина, загрязнение почв и вод фильтратом, эмиссия CO <sub>2</sub>	Сверхкритическая газификация/сжижение в среде СКВ	Полная конверсия в синтез-газ или бионефть; получение фенольных соединений [3, 4]
Черный щелок	Сжигание в содорегенерационных котлах: высокие затраты, дымовые газы, необходимость очистки	Сверхкритическая газификация СКВ	Высокий КПД получения синтез-газа для газотурбин; компактность; отсутствие расплава солей [5]
Органические сточные воды	Биологическая или реагентная очистка: низкая эффективность для трудноокисляемых соединений, избыточный ил	Сверхкритическое водное окисление (СКВО)	Полное окисление любых загрязнителей до H <sub>2</sub> O и CO <sub>2</sub> за секунды; рекуперация тепла
Кора, древесные отходы	Сжигание, щепка, захоронение: низкая маржинальность, образование золы и шлаков	СКФ-экстракция (СК-CO <sub>2</sub> ) ценных компонентов	Извлечение антиоксидантов, восков; остаток пригоден для топливных гранул [6]

Как видно из таблицы, применение сверхкритических флюидов позволяет комплексно подойти к переработке отходов, одновременно решая экологические проблемы и повышая экономическую эффективность производства. Особенно важно, что такие процессы, как сверхкритическая газификация черного щелока

и сверхкритическое водное окисление сточных вод, могут быть встроены в существующие технологические цепочки целлюлозно-бумажных комбинатов, замещая устаревшее и экологически опасное оборудование.

Основным сдерживающим фактором внедрения СКФ-технологий остается высокая стоимость оборудования. Реакторы и трубопроводы должны выдерживать экстремальные давления и температуры, что требует применения легированных сталей и специальных конструктивных решений. Тем не менее, современные тенденции показывают, что переход от периодических схем к непрерывным позволяет значительно повысить рентабельность переработки жидких отходов. Кроме того, снижение энергозатрат возможно за счет использования теплоты реакций и применения каталитических систем, снижающих температуру процесса [5].

Сверхкритические флюидные технологии представляют собой действенный инструмент реализации стратегии рационального природопользования в лесопромышленном секторе. Их применение позволяет решать широкий спектр экологических задач: от утилизации твердых лигниновых отложений до глубокой очистки сточных вод и регенерации технологических растворов. Сравнительный анализ показывает значительные преимущества СКФ-методов перед традиционными с точки зрения экологичности, полноты переработки и потенциала получения ценных продуктов. Основные барьеры внедрения (высокая стоимость оборудования) могут быть преодолены за счет разработки непрерывных процессов и использования каталитических систем. Внедрение таких установок будет способствовать снижению антропогенной нагрузки и переходу отрасли к малоотходным технологическим циклам.

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан (соглашение №25).

### Список литературы

1. Кряжев А.М. *Наилучшие доступные технологии – основа развития целлюлозно-бумажной промышленности и лесопромышленного комплекса России в XXI веке* / А.М. Кряжев. – М.: Айколорит, 2020. – 285 с.

2. Боголицын К.Г. *Сверхкритические флюидные технологии в химии древесины и ее компонентов* / К.Г. Боголицын, А.А. Красикова, М.А. Гусакова // *Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика*. – 2014. – Т. 9. – № 3. – С. 83-95.

3. Peterson A.A. *Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: a review of sub-and supercritical water technologies* / A.A. Peterson, F. Vogel, R.P. Lachance, M. Fröling, J.M. Antal Jr., J.W. Tester // *Energy & Environmental Science*. – 2008. – Vol. 1. – No. 1. – P. 32-65.

4. Yang T. *Antioxidant properties of lignin extracted from cotton stalks by ethanol solution-assisted liquid hot water before and after adding supercritical CO<sub>2</sub>* /

T. Yang, X. Zhang, Y. Liu, J. Wang // *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*. – 2022. – Vol. 58. – P. 101892.

5. Аетов А.У. *Сверхкритические флюидные технологии как инструмент «зеленой» химии в лесопромышленном комплексе* / А.У. Аетов, И.Ш. Хабриев, К.В. Саерова // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2025. – № 4. – С. 34-47.

6. Rout P.K. *Supercritical CO<sub>2</sub> fractionation of bio-oil produced from mixed biomass of wheat and wood sawdust* / P.K. Rout, M.K. Naik, S.N. Naik, U. Garg, A.K. Dalai // *Energy & Fuels*. – 2009. – Vol. 23, No. 12. – P. 6181-6188.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В ХАБАРОВСКЕ И ПРИГРАНИЧНОМ КИТАЕ

Ван Шуюй, О.А. Мищенко  
Тихоокеанский государственный университет,  
г. Хабаровск

**Аннотация.** Утилизация твердых бытовых отходов является одной из ключевых экологических проблем современного мира. Эта проблема особенно остро стоит перед крупными городами и регионами, такими как Хабаровск и приграничные территории Китая. Настоящая статья посвящена сравнению подходов и методов утилизации ТБО в двух регионах. Рассматриваются основные методы обращения с отходами, включая полигонные захоронения и переработку. Особое внимание уделяется современным технологиям, применяемым в Китае, таким как производство биотоплива и плазменные установки, а также предлагаются рекомендации по улучшению ситуации в Хабаровском крае.

**Ключевые слова:** экология, отходы, полигон захоронения отходов, загрязнение окружающей среды, экологические риски, методы утилизации.

Образование и накопление отходов требует грамотного и экономически обоснованного подхода к утилизации и обезвреживанию. Объективной реальностью сегодня являются экологические риски накопления отходов, которые приводят к изменениям окружающей среды и снижению качества жизни населения. К таким рискам относятся:

– загрязнение воздуха – органические вещества и химические соединения, содержащиеся в мусоре, выделяют вредные газы (например, метан и сероводород). Эти выбросы негативно влияют на качество воздуха и способствуют глобальному потеплению;

– загрязнение воды – мусор, попадая в водоемы, загрязняет поверхностные и подземные воды тяжелыми металлами, химическими соединениями и патогенными микроорганизмами. Вода становится непригодной для питья и вызывает заболевания у животных и растений;

– разрушение почвенного покрова – отходы содержат соли тяжелых металлов, пластмассу и синтетику, которые разрушают структуру почвы, снижают плодородие земель и препятствуют росту растительности.

– распространение инфекционных заболеваний – некачественно обработанные отходы становятся источниками инфекций и паразитов, способствуя распространению болезней среди людей и животных.

– потеря природных ресурсов – накопление отходов ведет к утрате территорий, пригодных для сельского хозяйства, строительства жилья и рекреации.

Хабаровск – крупный административный центр Дальнего Востока России, численность населения которого превышает полмиллиона человек. Город производит значительное количество твердых бытовых отходов, объем которых ежегодно растет. Традиционным способом утилизации ТБО в Хабаровске остается захоронение на специально оборудованных полигонах.

Согласно [1] в Хабаровском крае организовано несколько полигонов размещения (табл. 1).

Таблица 1  
Структура полигонов Хабаровского края

Наименование полигона	Адрес размещения полигона
Полигон ТБО АО «Спецавтохозяйство города Хабаровска»	Хабаровский край, муниципальный район имени Лазо, Ситинское сельское поселение (вблизи 61 км автодороги Хабаровск – Находка)
Полигон ТБО ООО «Охотская горно-геологическая компания»	Хабаровский край, Охотский муниципальный район, в 92 км к северо-западу от районного центра - поселка Охотск, в междуречье ручья Ягодный и реки Хаканджа (ГМК «Хаканджинский»)
Полигон промышленных и бытовых отходов экспортного нефтеотгрузочного терминала Де-Кастри ООО «Аксесс-А.С.К.»	Хабаровский край, Ульчский муниципальный район, в районе п. Де-Кастри. Юридический адрес организации: Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Рыночная, д. 1
Полигон промышленных отходов и ТБО ООО «Светлое»	Хабаровский край, Охотский муниципальный район, квартал № 181 (выделы 8 (часть), 9 (часть)) Ульинского участкового лесничества Охотского лесничества (полигон промышленных и твердых бытовых отходов)
Полигон ТБО и промышленных отходов ООО «Ресурсы Албазино»	Хабаровский край, муниципальный район имени Полины Осипенко, в 100 км с востока от п. Херпучи, Албазинский горно-обогатительный комбинат
Районный полигон по утилизации отходов производства и потребления г. Советская Гавань ООО «Полигон Сервис»	Хабаровский край, Советско-Гаванский муниципальный район, 16-й км автодороги «Советская Гавань – Монгохто»
«Площадка компостирования и хранения твердых бытовых отходов» Артель старателей «Восток» с. Аян	Хабаровский край, Аяно-Майский район
1 Полигон ТБО НГК «Ресурс»	Хабаровский край, Николаевский муниципальный район. Юридический адрес организации: Хабаровский край, г. Николаевск-на-Амуре, ул. Советская, д. 126

Несмотря на усилия властей по модернизации существующих полигонов и созданию новых объектов, эта практика имеет ряд недостатков:

- недостаточная изоляция свалочных масс от окружающей среды;
- возможность загрязнения подземных вод и почвы токсичными веществами;
- отсутствие эффективной системы контроля за состоянием полигонов.

Кроме того, большая часть отходов попадает на полигоны, минуя сортировку и переработку, что значительно снижает эффективность мероприятий по снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Переработка отходов также активно развивается в Хабаровске. В городе функционируют предприятия по переработке бумаги, пластика, стекла и металла. Однако объемы переработки остаются недостаточными из-за отсутствия инфраструктуры и недостаточной информированности населения о важности раздельного сбора мусора.

Китайские города, расположенные вблизи границы с Россией, сталкиваются с аналогичной проблемой увеличения объемов ТБО. Китайская сторона активно внедряет современные технологии и подходы к обращению с отходами, направленные на повышение уровня экологической безопасности и ресурсосбережения.

Китай ввозил мусор из-за рубежа начиная 1980-х годов и за это время стал крупнейшим импортером отходов в мире. С 2017 года руководство КНР начало принимать шаги по снижению импорта мусора из других стран.

Вначале, был утвержден перечень, который состоял из 24 видов отходов на которые накладывалось ограничение на ввоз, в число таких отходов вошли неотсортированная бумага, текстиль и ванадиевый шлак. В 2018 году Китай объявил о запрете на ввоз в страну пластиковых отходов. В результате объем импорта твердых отходов начал быстро снижаться. В 2018 году объем импорта составлял 22,6 млн тонн, а в 2019 году сократился до 13,5 млн тонн. Министерство торговли и главное таможенное управление Китая, а также Министерство экологии и окружающей среды, объявили, что с 1 января 2021 года страна перестанет импортировать для переработки любые твердые бытовые отходы. Это говорит о том, что мусороперерабатывающие заводы Китая будут работать исключительно на нужды самого Китая.

Одним из основных направлений китайской стратегии управления отходами является внедрение системы раздельного сбора мусора. Это позволяет существенно увеличить долю перерабатываемых материалов и снизить нагрузку на полигоны. Современные заводы по переработке отходов оснащены оборудованием для извлечения ценных компонентов из смешанных потоков отходов. Кроме того, Китай активно развивает инновационные технологии в области утилизации ТБО. Среди наиболее перспективных решений можно выделить следующие:

- производство биотоплива из органических отходов;
- применение плазменных технологий для уничтожения опасных веществ;
- использование энергии, выделяемой при разложении отходов, для

производства электроэнергии.

Китай обладает богатым и разнообразным органическим сырьём: остатки зерновых культур (солома, стебли), побочные продукты переработки сахарного тростника и сахарной свёклы, отходы пищевой промышленности. Из органических отходов в Китае сегодня производят биогаз, биодизель, биоэтанол, компост. Правительство Китая поддерживает развитие производства биотоплива из органических отходов, например вводятся субсидии, налоговые льготы. Также Китай уделяет внимание экологически ответственному производству биотоплива, используя интегрированные подходы к землепользованию и стремясь минимизировать воздействие на окружающую среду [3].

В Китае существует закон «О предупреждении загрязнения воды», который был принят еще 11.05.1984 г. В статье 102 закона предусмотрено, что поступление вещества в водные объекты, которое повлекло изменение физических, химических, биологических или радиоактивных характеристик, оказывает негативное влияние на здоровье человека либо окружающую среду, ухудшает качество воды. Сейчас внедрение плазменных технологий в Китае базируется на принципах данного закона.

Применение плазменных технологий связано с развитием технологий высокотемпературной переработки отходов, которые позволяют разрушать органические загрязнители с образованием безвредных веществ, а неорганические отходы – охлаждаться с образованием стекловидного вещества, которое впоследствии может применяться в качестве дорожного или строительного материала [4]. Например, установка плазменной газификации Westinghouse (в Ухане), способна перерабатывать около 100 тонн отходов биомассы в день и преобразовывать их в чистый синтез-газ. Затем этот синтез-газ перерабатывают в дизельное топливо и другие транспортные виды топлива на заводе Kaidi. Проект корпорации CGN первый в Китае проект по плазменной переработке опасных отходов, который прошёл стадию экспертного заключения в 2018г. Технология предназначена для переработки медицинских детритов, бытового мусора и минеральных масел, а также для переработки радиоактивных отходов.

Энергия, выделяемая при разложении отходов в Китае, используется для производства электроэнергии в рамках проектов по переработке отходов. Это помогает решить проблему утилизации отходов, сократить выбросы парниковых газов и снизить зависимость от ископаемого топлива. Например, промышленный парк «Фушань» в городе Гуанчжоу. Государственная корпорация GRANDTOP управляет 14 мусоросжигательными заводами, которые позволяют перерабатывать свыше 30 000 тонн отходов в сутки, генерируя около 5 миллиардов кВт·ч в год. Основным продуктом переработки – электроэнергия, которая продается в национальную энергосистему [5].

Таким образом, сравнение подходов к утилизации ТБО в Хабаровске и приграничных территориях Китая показывает значительные различия в методах и технологиях. Если Хабаровск продолжает полагаться преимущественно на традиционные методы захоронения, то китайские регионы активно внедряют

современные решения, ориентированные на снижение нагрузки на природу и эффективное использование ресурсов.

Для улучшения ситуации в Хабаровске необходимы дополнительные инвестиции в инфраструктуру, развитие культуры раздельного сбора отходов среди населения и применение инновационных технологий.

Развитие переработки отходов в Хабаровском крае требует комплексного подхода, включающего законодательные инициативы, инфраструктурные проекты и образовательные программы.

Среди законодательных мер можно отметить это: принятие законов и постановлений, регулирующих порядок организации раздельного сбора отходов; предоставление налоговых льгот и субсидий компаниям, занимающимся переработкой отходов, а также создание условий для привлечения инвестиций в отрасль; введение механизма расширенной ответственности производителя, обязывающего компании оплачивать переработку своей продукции после окончания срока службы.

Среди инфраструктурных мер можно отметить: строительство заводов по переработке вторсырья, оснащённых современными технологиями для повышения качества переработки и снижения энергозатрат; обустройство специальных контейнерных площадок для раздельного сбора отходов, установка удобных баков для разных видов мусора; организация специализированных маршрутов для вывоза отдельных фракций отходов, сокращение количества транспортных операций и уменьшение нагрузок на дороги.

Среди образовательных и просветительных мер это: регулярное проведение образовательных мероприятий, направленных на повышение осведомленности населения о пользе раздельного сбора и переработки отходов; поддержка общественных организаций и волонтеров, участвующих в акциях по уборке территорий и пропаганде здорового образа жизни; включение тематики охраны окружающей среды и бережного отношения к природе в учебные планы школ как обязательной общеобразовательной дисциплины.

Кроме того, немаловажную роль занимает международное сотрудничество: изучение лучших практик стран Европы и Азии, адаптация зарубежных моделей к местным условиям; привлечение грантов и кредитов международных фондов для реализации проектов по строительству и модернизации инфраструктуры.

Реализация предложенных мер обеспечит переход Хабаровского края к модели экономики замкнутого цикла, снизит нагрузку на природные ресурсы и улучшит экологическое состояние региона.

### **Список литературы**

*1. Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами Хабаровского края (с изменениями на 6 декабря 2024 года. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/823301038/titles/1BVOTNE> (дата обращения: 16.02.2026).*

2. С 2021 года Китай запретит ввоз любых твердых отходов. – URL: [https://english.mee.gov.cn/News\\_service/media\\_news/202011/t20201130\\_810429.shtml](https://english.mee.gov.cn/News_service/media_news/202011/t20201130_810429.shtml) (дата обращения: 16.02.2026).

3. Ученые превратили пищевые отходы в зеленое топливо для судов в. – URL: [Kumae https://dzen.ru/a/aYZW-NSrMzjMySRy](https://dzen.ru/a/aYZW-NSrMzjMySRy) (дата обращения: 17.02.2026).

4. Цай Чуньшэн. Современные экологические технологии Китая. – URL: <http://www.atominfo.ru/> (дата обращения: 17.02.2026).

5. Как Китай превращает мусор в золото – URL: <https://inbusiness.kz/ru/news/kak-kitaj-prevrashaet-musor-v-zoloto> (дата обращения: 17.02.2026).

## **ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ И УДАЛЕНИЕ АСФАЛЬТО-СМОЛО-ПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВНУТРИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДОВ**

И.Ш. Хабриев, Р.Р. Кабиров, Л.И. Ганиева,  
В.Ф. Хайрутдинов, И.М. Абдулагатов

Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
г. Казань

***Аннотация.** В статье представлены результаты исследования процесса очистки нефтяных скважин от асфальто-смоло-парафиновых отложений (АСПО) с использованием метода сверхкритической экстракции. Образец АСПО был отобран на Оренбургском нефтяном месторождении и характеризовался высоким содержанием парафинов (33.7 %), смол (30.55%) и асфальтенов (3.9%). Экстракция тяжелых углеводородов из АСПО проводилась с использованием сверхкритической бинарной смеси растворителей пропан/н-бутан в интервале температур от 398 до 433 К и давлений от 5 до 13 МПа. Полученные результаты могут быть использованы для предотвращения отложений тяжелых компонентов нефти в добывающих скважинах.*

### **Введение**

Образование асфальто-смоло-парафиновых отложений в добывающих нефтяных скважинах является серьезной проблемой, оказывающей значительное экономическое влияние на нефтяную промышленность. Выпадение в осадок тяжелых углеводородов, таких как асфальтены, парафины и смолы, происходит вследствие изменения термодинамических условий (температуры и давления) при движении нефти по стволу скважины или трубопроводу [1].

Существуют различные методы предотвращения АСПО, включая механические, термические, физические методы и использование защитных покрытий. Однако многие из них являются дорогостоящими, недостаточно эффективными или экологически небезопасными. Перспективным подходом является использование сверхкритических флюидных (СКФ) технологий. Сверхкритические флюиды обладают уникальными термофизическими свойствами: высокой проникающей способностью, отсутствием поверхностного

натяжения и возможностью регулирования растворяющей способности путем изменения давления и температуры [2].

Для нефтедобывающей промышленности наиболее предпочтительными растворителями являются легкие н-алканы в сверхкритическом состоянии, в частности пропан, н-бутан и их смеси. Они обладают химическим сродством к нефти и относительно низкими критическими параметрами.

### Экспериментальная часть

Образец АСПО, использованный в работе, был получен с Оренбургского нефтяного месторождения.

Для исследования процесса сверхкритической экстракции была разработана экспериментальная установка, включающая системы создания и регулирования давления и температуры. Основными элементами являются: баллон с экстрагентом, насос, экстрактор объемом 5 литров с электрическим нагревателем, сепаратор и регулирующая арматура. Подробная методика проведения эксперимента приведена на наших предыдущих работах [3].

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлено сравнение выхода тяжелых углеводородов из образца АСПО при использовании различных растворителей в разных термодинамических условиях. Видно, что эффективность процесса с использованием сверхкритической смеси пропан/н-бутан ( $P=10.0$  МПа,  $T=403.15$  К) значительно выше, чем при использовании жидкого н-гексана (в 3 раза), жидкой смеси пропан/н-бутан (в 2 раза) и сверхкритического  $CO_2$  (в 9 раз). Это наглядно демонстрирует преимущества применения выбранного растворителя для удаления АСПО.

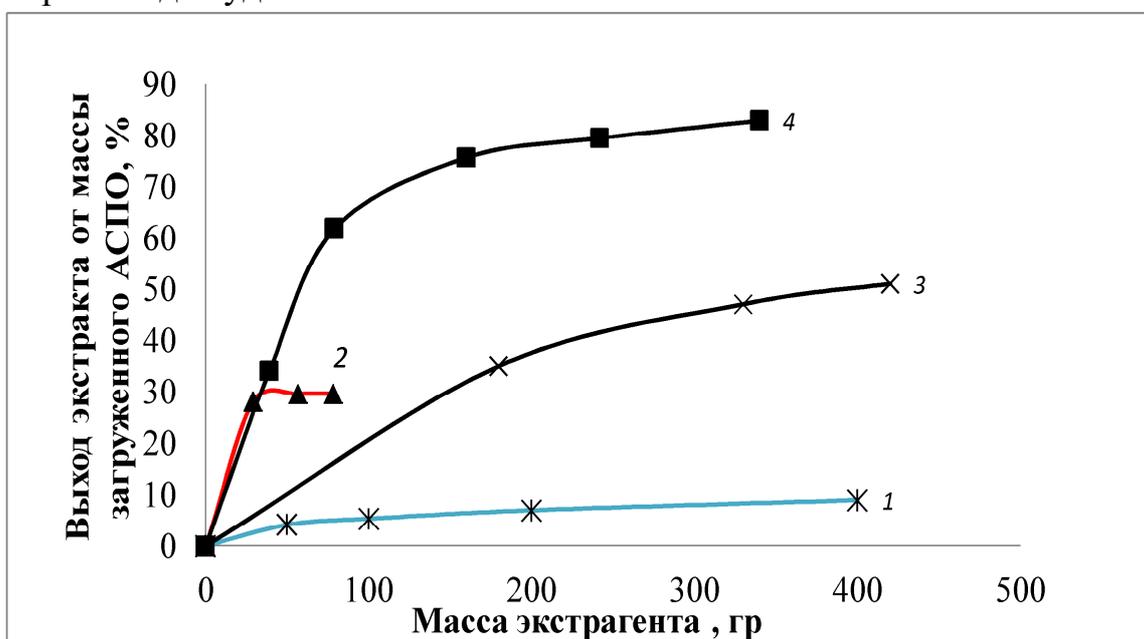


Рис. 1. Выход углеводородов из образца АСПО при использовании различных экстрагентов

Сверхкритический растворитель (смесь пропан/н-бутан) растворяет и удаляет из АСПО тяжелые углеводороды (парафины, ароматические углеводороды). После обработки структура отложений изменяется:

нерастворившаяся часть (асфальтены, механические примеси, сера) превращается в рыхлый порошок, который может быть легко удален из скважины продувкой.

На рис. 2 показано влияние температуры и давления на выход углеводородов при экстракции сверхкритической смесью пропан/н-бутан. Растворимость АСПО в сверхкритическом растворителе подчиняется следующим закономерностям:

1. При относительно низких давлениях (5-7 МПа) растворяющая способность экстрагента падает с ростом температуры.

2. При средних давлениях (10-13 МПа) растворяющая способность незначительно снижается с ростом температуры.

3. При более высоких давлениях растворяющая способность должна снижаться.

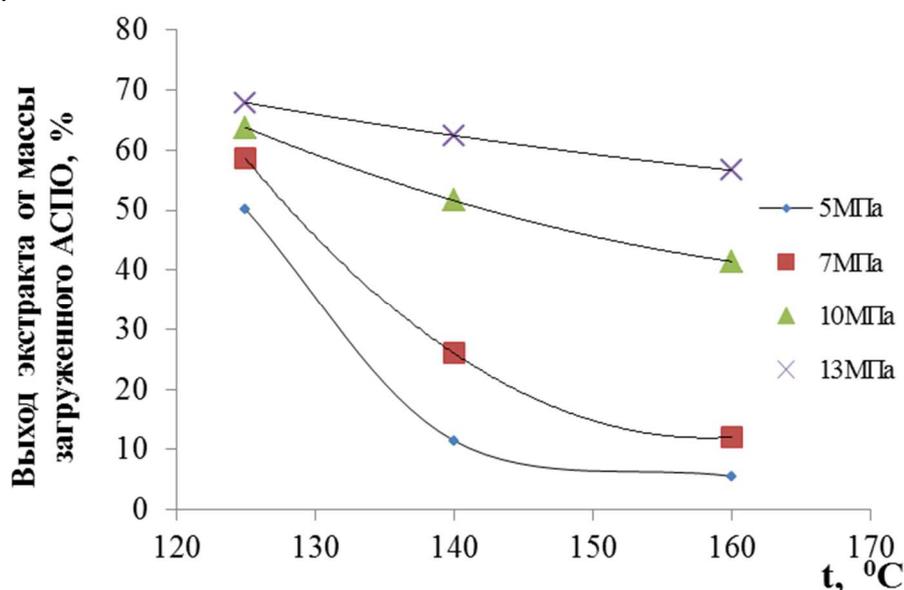


Рис. 2. Влияние температуры на выход углеводородов из АСПО при различных давлениях

## Выводы

Экспериментально определены оптимальные термодинамические параметры процесса сверхкритической экстракции АСПО: давление в интервале 5-7 МПа и температура от 398.15 до 413.15 К. Установлено, что выход тяжелых углеводородов увеличивается с ростом давления и уменьшается с повышением температуры при прочих равных условиях. Получены кинетические зависимости выхода углеводородов от массы экстрагента, позволяющие определить рабочие параметры процесса для очистки нефтяных скважин и трубопроводов от АСПО.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-79-10129-П, <https://rscf.ru/project/22-79-10129-П/>.*

## Список литературы

1. Rastgoo A. Investigation of Asphaltene Deposition and Precipitation in Production Tubing / A. Rastgoo, R. Kharrat, / *International Journal of Clean Coal and Energy*, 2017. – Vol. 6. – С. 14-29.

2. Moore E.W. Hendrickson, A. R. Formation, Effect and Prevention of Asphaltene Sludges during Stimulation Treatments / E.W. Moore, C.W. Crowe / J Pet Technol. – 1965. – Vol. 17. – С. 1023-1028.

3. Khabriev I.Sh. Experimental study of phase-equilibrium properties of binary mixtures of supercritical solvents with the main component of asphaltene – resin paraffin deposits for the preventing and removing inside oil wells / I.Sh. Khabriev, V.F. Khairutdinov, T.R. Akhmetzyanov, I.R. Gabitov, F.N. Shamsetdinov, I.M. Abdulagatov / Journal of Supercritical Fluids. – 2025. – Vol. 225. Art.Num. 106707.

## ОСОБЕННОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДА ПИВОВАРЕНИЯ ПИВНОЙ ДРОБИНЫ МЕТОДОМ ПРОКАТКИ ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ МАТРИЦУ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

В.И. Назаров<sup>1</sup>, Д.А. Макаренков<sup>1</sup>, С.А. Родина<sup>2</sup>, К.С. Костяева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт»,

г. Москва

<sup>2</sup> РХТУ им. Д.И. Менделеева,

г. Москва

**Аннотация.** При проведении процесса получения пива образуется большое количество пищевого отхода в виде пивной дробины. Пивная дробина в гранулированном виде часто используется в качестве кормовой добавки в комбикормах. Приведены результаты исследований по гранулированию пивной дробины методом прокатки в роторном грануляторе с плоской матрицей. Для повышения качества гранул использовалась матрица с каналами переменного сечения. Была разработана физическая и математическая модель процесса прокатки. Получены уравнения для определения сил, действующих в канале переменного сечения плоской матрицы. Для получаемых гранул построены эпюры распределения сил по длине канала в плоской матрице, что позволило прогнозировать поведение порошков с различной морфологией.

**Ключевые слова:** пивная дробина, комбикорм, роторный гранулятор, метод прокатки, плоская матрица, эпюры распределения сил.

**Введение.** На предприятиях пивоваренной промышленности России ежегодно образуется большое количество сырых влажных отходов, таких как пивная дробина (ПД) и кизельгур. В настоящее время они практически не утилизируются, а их переработка требует значительных затрат как на транспортировку, так и на их преобразование в товарный продукт. Пивная дробина представляет собой гущу светло-коричневого цвета со специфическим запахом и вкусом ячменного солода. Её твёрдая часть состоит из оболочки и нерастворимой фракции зерна. На производствах она образуется в качестве остатка после отделения жидкой фазы, пивного сусла, в процессе фильтрации затора. ПД является хорошей кормовой добавкой, которую часто используют в комбикормах [1]. Однако в жидком виде она долго не хранится и быстро прокисает (за трое суток). Для перевода ПД в порошки или гранулы часто

используют сушку с помощью распылительных сушилок или сушилок в кипящем слое. В гранулированном виде она не слеживается, хранится долго и сохраняет свои питательные свойства. Однако эти процессы энергоемкие и при высокой стоимости требуют больших площадей для размещения собственного оборудования. Известна также технология получения гранулированных комбикормов на валковых прессах или роторных грануляторах с кольцевой или плоской матрицей.

**Методология и методы исследования.** В НИЦ «Курчатовский институт» разработан процесс гранулирования пивной дробины на роторном грануляторе с плоской матрицей [2]. Особенностью её конструкции является использование цилиндроконических каналов. Они обеспечивают процесс образования цилиндрических гранул (пеллет). Исследования гранулируемости и прессуемости ПД проводили в закрытой матрице с получением таблетированного продукта.

**Экспериментальная часть.** В работе приводятся результаты компрессионных испытаний ПД в закрытой матрице с различными связующими и добавками. В качестве связующих использовали отходы целлюлозно-бумажной промышленности (лигно-сульфанат и водные растворы ПВА), а также водный раствор сахара. Были исследованы три типа смесей, состав которых приведен в таблице.

Состав смесей на основе пивной дробины

№	Компонент смеси, % масс.	Номер смеси		
		1	2	3
1	Сухая дробина	100	75	75
2	Сахар	-	12,5	-
3	50 % раствор ПВА	-	-	12,5
4	25 % раствор ЛСТ	-	12,5	12,5
5	Влажность	8	11	12

### Результаты и обсуждение

В результате проведенных компрессионных испытаний получены зависимости изменения плотности гранул от удельного давления прессования и влажности (рис.1). Из рисунка видно, что плотность полученных прессовок изменялась в диапазоне от 300 до 1200 кг/м<sup>3</sup>. При этом было установлено, что плотно-прочные прессовки начинают образовываться при удельном давлении в диапазоне от 20 до 100 МПа. Дальнейшее увеличение удельного давления прессования не приводит к росту плотности гранул. Прочность получаемых прессовок изменялась в диапазоне от 1 до 2 МПа.

Ранее нами была разработана комбинированная матрица, состоящая из двух дисков, с нагревательными гибкими элементами, которые позволяют регулировать температуру смеси в каналах проходного прессования [3]. Каналы в матрицах могут выполняться как цилиндрическими, так и

цилиндроконическими. При движении вращающихся роликов над поверхностью матрицы происходит послойная и порционная запрессовка сырья в каналы. В результате на выходе из каналов образуются цилиндрические пеллеты в виде твердого пористого тела.

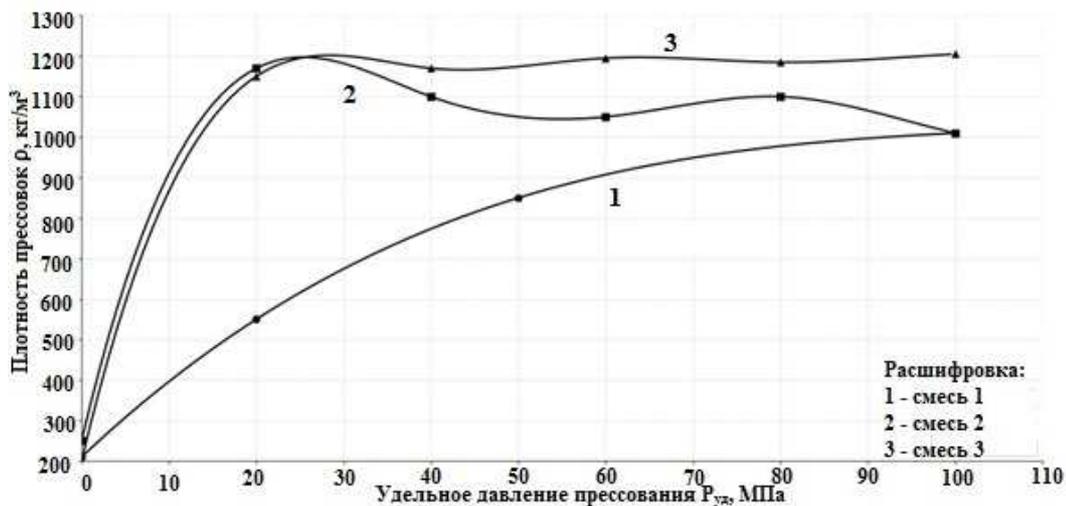


Рис. 1. Зависимость изменения плотности прессовок пивной дробины от удельного давления прессования  $P_{уд}$ , содержания твердой фазы  $G_{сд}$  и исходной влажности  $W_{исх}$ :  
 1 – смесь №1,  $G_{сд} = 100\%$ ;  $W_{исх} = 8\%$ ; 2 – смесь №2,  $G_{сд} = 75\%$ ;  
 $W_{исх} = 11\%$ ; 3 – смесь №3,  $G_{сд} = 75\%$ ;  $W_{исх} = 12\%$

Далее было рассмотрено движение материала в цилиндрическом канале и условия равновесия сил в цилиндрическом канале длиной  $h_{вх}$  (см. рис. 2). Приняв за положительное направление действие сил прессования для элемента длиной  $dh$  на различных участках, получены следующие уравнения удельных давлений для цилиндрического канала:

$$p \cdot \frac{\pi \cdot D_{вх}^2}{4} - T = (p - dp) \cdot \frac{\pi \cdot D_{вх}^2}{4} \quad (1)$$

$$p_1 = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{4}{D_{вх}} \cdot f \cdot \xi \cdot h_{вх}\right) \quad (2)$$

$$p_3 = p_2 \cdot \exp\left(-\frac{4}{D_0} \cdot f \cdot \xi \cdot h_3\right), \quad (3)$$

где  $\xi$  – коэффициент бокового давления;  $f$  – коэффициент внешнего трения;  $T$  – сила трения; остальные обозначения соответствуют рис. 2.

Удельное давление на выходе из конической части участка определяется по зависимости:

$$p_2 = p_n \frac{D_n^2}{D_0^2} \quad (4)$$

При расчете эпюры изменения давления по длине канала были приняты следующие размеры канала:  $D_{вх}=8$  мм;  $D_0=6$  мм;  $h_{вх}=19$  мм;  $h_1=19,5$  мм;  $h_2=7,5$  мм;  $h_3=4$  мм;  $f=0,1$ . В качестве исследуемого материала для получения пеллет была выбрана смесь №2.

На выходе материала из цилиндрического канала (длиной  $h_3$ ) прессовка под действием упругих деформаций расширяется, увеличивает свои размеры, а давление  $p$  падает до нуля. При решении уравнений изменения

давления по длине канала использовали язык программирования Python [4], среда разработки IDE PyCharm [5]. При этом в качестве исходных данных вводили параметры гранулятора, геометрические размеры канала, характеристики среды и режимные параметры. На рис. 3 приведено меню ввода данных.

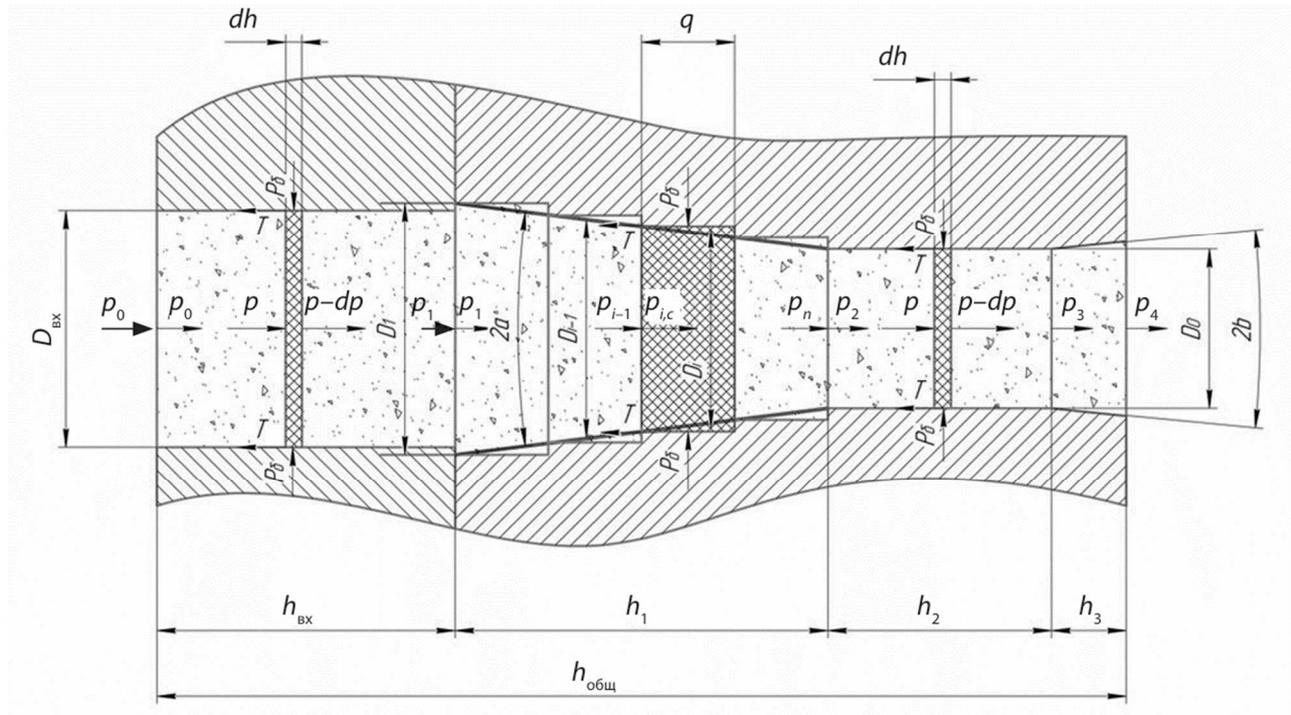


Рис. 2. Схема сил, действующих на материал в канале проходного прессования

Модель давления гранулятора

### Параметры гранулятора

**Геометрия канала**

Двх (мм):	16.0
Двых (мм):	14.0
hвх (мм):	19.0
h <sub>1</sub> (мм):	19.5
h <sub>2</sub> (мм):	7.5
h <sub>3</sub> (мм):	4.0

**Физические параметры**

Коеф. трения f:	0.25
Плотность (кг/м <sup>3</sup> ):	1200

**Коэффициенты бокового давления**

ξ при P <sub>0</sub> =40 МПа:	0.63
ξ при P <sub>0</sub> =70 МПа:	0.72

**Текущие параметры**

Геометрия канала:  
Двх = 16.0 мм, Двых = 14.0 мм  
hвх = 19.0 мм, h<sub>1</sub> = 19.5 мм  
h<sub>2</sub> = 7.5 мм, h<sub>3</sub> = 4.0 мм  
Общая длина: 50.0 мм

физические параметры:  
f = 0.25, ρ = 1200.0 кг/м<sup>3</sup>

Рис. 3. Меню ввода данных в среде разработки IDE PyCharm

Используя полученные уравнения с соответствующими значениями коэффициента  $\xi$  для определения изменения давления по длине каналов ( $p_0, p_1, p_2, p_3$ ), а также программное обеспечение, были получены эпюры распределения давлений по длине канала с учетом изменения конусности канала. При этом учитывалось влияние угла конусности и исходное давление прессования. Из приведенных на рис. 4 эпюр следует, что в цилиндрической части канала давление от входа к выходу падает, а в конической части, за счет увеличения коэффициента бокового давления, давление растет. На участках  $h_2$  и  $h_3$  давление падает за счет выхода материала в свободное пространство. Установлено, что при больших углах конусности на длине  $h_1$  давление растет и могут образовываться пробки в канале, что приводит к остановке технологического процесса.

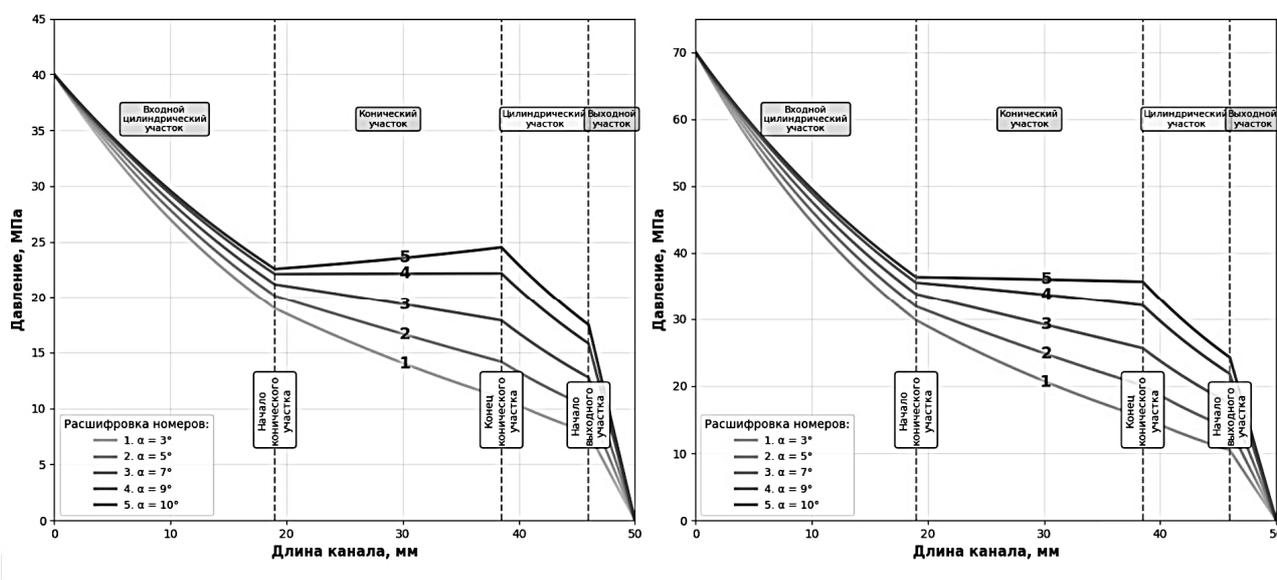


Рис. 4. Эпюры распределения давления в цилиндроконическом канале плоской матрицы в зависимости от угла конусности на втором участке и исходного удельного давления прессования (смесь №2) с углом конуса  $2\alpha$  ( $a - p=40$  МПа;  $b - p=70$  МПа):  
 1 -  $\alpha=3^\circ$ ; 2 -  $\alpha=5^\circ$ ; 3 -  $\alpha=7^\circ$ ; 4 -  $\alpha=9^\circ$ ; 5 -  $\alpha=10^\circ$

## Выводы

Предложено описание механизма гранулирования пивной дробины в цилиндроконическом канале плоской матрицы при воздействии на материал прессующего вала. Получены уравнения для определения сил, действующих в канале переменного сечения плоской матрицы, и на их основе построены эпюры распределения давления в канале переменного сечения плоской матрицы.

## Список литературы

1. Чохатариди Г.Н. Качество мяса свиней при использовании пивной дробины в их рационах / Г.Н. Чохатариди, В.Ю. Кабулов, И.Г. Доева // Все о мясе. – 2007. – №2. – С. 38-39.
2. Макаренков, Д.А. Техника и технология гранулирования многокомпонентных полидисперсных материалов с использованием совмещенных процессов их подготовки: монография. / Д.А. Макаренков, В.И. Назаров. – М.: ИНФРА-М, 2023. – 297 с.

3. Назаров В.И. Исследование процесса гранулирования дисперсных отходов на роторных прессах с плоской матрицей / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, И.А. Булатов // Вестник МИТХТ. – 2010. – Т. 5, № 6. – С. 13-16.

4. <https://www.python.org/>

5. <https://www.jetbrains.com/>

## **АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА И КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА МЕХАНОАКТИВАЦИИ ТВЁРДЫХ ЧАСТИЦ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С РАСЧЁТОМ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА ПОДВОДИМОЙ ЭНЕРГИИ**

В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, А.П. Попов  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
г. Москва

***Аннотация.** При исследовании процессов переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов большое значение играют механические методы: измельчение и помол. При этом в процессе помола в энергонапряжённых аппаратах, таких как шаровая мельница и дезинтегратор, происходит механическое воздействие на материал, приводящее к изменению физико-химических свойств твёрдых веществ. Для анализа механизма и кинетики процессов механоактивации частиц литий-ионных аккумуляторов рассмотрены две гипотезы процесса механохимической активации. Согласно первой гипотезе, механическую активацию предложено как процесс трансформирования механической энергии в другие формы. Согласно второй гипотезе – процессы механоактивации основаны на теории «короткоживущих центров», которая описывается распределением энергии Максвелла-Больцмана. На основании рассмотренных теоретических моделей процесса механоактивации предложена усовершенствованная расчётно-теоретическая модель подвода энергии в шаровой барабанной мельнице, учитывающая потери энергии при соударении шаров и частиц материала ЛИА, а также соударении шаров со стенкой барабана мельницы. Это позволяет прогнозировать количество вводимой энергии для получения механоактивированных частиц литий-ионных аккумуляторов с заданными характеристиками, обеспечивающими их эффективную переработку механическими методами.*

***Ключевые слова:** механохимическая активация, литий-ионные аккумуляторы, теория короткоживущих центров, шаровая мельница, расчёт подводимой энергии.*

**Введение.** В ряде технологических процессов, таких как дробление, помол и прессовое гранулирование (на валковых прессах и роторных грануляторах) происходит механическое воздействие на материал в виде комбинации давления, сдвига, истирания и ударных взаимодействий частиц с мелющими телами в рабочем объёме шаровой мельницы или дезинтегратора. Каждый из этих факторов приводит к изменению физико-химических свойств твёрдых веществ. При этом в результате механических воздействий происходят изменения и внутри самих частиц. При этом также происходит механохимическая деструкция и образуется измельчённый продукт с повышенной удельной поверхностью [1]. Основные закономерности механохимических превращений определяются глубиной разупорядочения структуры, процессами её релаксации с

освобождением запасённой энергии и подвижностью атомов. Характер внутренних изменений зависит от типа твёрдого вещества и от условий механического нагружения.

Изменения структуры не могут не влиять на его реакционную способность, диффузию, теплопроводность, электропроводность и др. Для задач механохимической деструкции в этих изменениях важно разупорядочение структуры вещества.

Появление вакансий, межузельных атомов, дислокаций, являющихся центрами развития топохимических превращений и разрывов связей, инициирующих различные реакции, в том числе за счёт активных свежесформированных поверхностей. При этом происходит деформирование и изменение структуры вещества и стадия протекания химических реакций. Эти стадии разделены значительным промежутком времени. В нашем случае учитывается фактор существования изменённой структуры вещества.

**Методология и методы исследования.** Для анализа механизма и кинетики процесса механохимической активации в качестве объекта исследования рассматривается процесс помола частиц литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) в шаровой барабанной мельнице (ШБМ). Рассмотрены теоретические основы процесса механохимической активации. Кроме того, представлена расчётно-теоретическая модель для расчёта необходимого количества энергии, обеспечивающего протекание процесса механоактивации.

**Теоретические основы процесса механохимической активации.** Рассмотрим некоторые аспекты механохимической активации измельчённых частиц в энергонапряжённых аппаратах. Известно, что механические воздействия, реализуемые в процессах измельчения и помола, влияют на полноту протекания физических и химических процессов.

При тонком помоле принимают, что изменения в материале проходят как по поверхности и влияют на качественные свойства материала. Изменённая структура материала за счёт механоактивации широко используется в различных технологических процессах. К ним относятся увеличение растворимости диспергированного материала в воде, снижение температуры и уменьшение теплоты его термической диссоциации [2].

Можно также отметить эффективность механоактивации в процессах стекловарения из компактированных шихт. При получении компактированных шихт при давлениях  $P_{уд.} = (50-150)$  МПа на валковых прессах происходит механохимическая активация компонентов шихты. В результате происходят твердофазные реакции с образованием новых соединений. При использовании таких механоактивированных шихт сокращается время процесса стекловарения и унос порошкообразных компонентов из печи [3].

Рассмотрим некоторые теоретические модели описания механизма и кинетики, и термодинамические характеристики процессов механоактивации. При этом используется допущение, что при воздействии на материал часть подводимой энергии поглощается материалом, что повышает его активность. Во

многих работах механическую активацию описывают, как процесс трансформирования механической энергии в другие формы [4].

При анализе силового воздействия на материал его условно делят на два периода: первый протекает с увеличением свободной энергии и повышением активности обрабатываемой системы; второй сопровождается изменением структуры поверхности материала за счёт протекания процессов активации, релаксации и спада активности.

Термодинамическую характеристику процесса активации можно описать, как изменение свободной энергии системы. Используя первый и второй законы термодинамики, можно записать [5]:

$$\Delta f = \Delta U - T\Delta S = \sigma\Delta l = \Delta L \quad (1)$$

где  $f$  – свободная энергия;  $U$  – внутренняя энергия;  $T$  – абсолютная температура;  $S$  – энтропия;  $\Delta l$  – деформация;  $\Delta L$  – механическая работа, использованная при деформации;  $\sigma$  – напряжение.

Эта зависимость справедлива для обратимой изотермической деформации материала, то есть до его разрушения. В этом случае часть накопленной энергии переходит в энергию вновь образованной поверхности, другая – в тепло, что описывается зависимостью:

$$\Delta f_{max} = C\Delta T + \frac{E_F}{\Delta\Omega} \quad (2)$$

где  $C$  – среднее значение теплоёмкости материала в диапазоне температур  $\Delta T$ ;  $E_F$  – удельная поверхностная энергия;  $\Delta\Omega$  – прирост поверхности.

Зависимость (1) позволяет простую упругую деформацию считать аналогом механической активации. Кроме того, из уравнения (2) следует, что в момент разрыва связи в материале происходит выделение тепла, приводящее к изменению в структуре материала. Использование «теплового подхода» позволяет объяснить наличие разных фаз и стадий протекания механоактивационных процессов.

В процессе механической обработки происходит изменение состояния материала. В случае механического измельчения изменяется только поверхность вещества:

$$\Delta L = E_F\Delta\Omega \quad (3)$$

Если проводится поверхностная активация, то изменяется и удельная поверхностная энергия:

$$\Delta L = \Delta(E_F\Delta\Omega) \quad (4)$$

При интенсивном вводе энергии измельчающим агрегатом возникают качественно новые эффекты. Происходит увеличение поверхности и поверхностной энергии, а также появляются дефекты в структуре кристаллической решётки, и меняется её энергия  $E_u$ :

$$\Delta L = E_F\Delta\Omega + E_u \quad (5)$$

Частным случаем механоактивации является состояние, когда вся подведённая энергия сосредоточена в дефектах структуры. Тогда изменение свободной энергии, рассчитанное по уравнению (1) определяется только энтропийным слагаемым:

$$\Delta f = -T\Delta S = -kT\ln W_D \quad (6)$$

где:  $W_D$  – термодинамическая вероятность, равная числу способов, с помощью которых можно создать дефекты в объёме кристалла;  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Другая гипотеза, используемая при описании механической активации, основана на теории «коротко живущих активных центров» [4]. В этом случае образование активных центров описывается распределением энергии Максвелла-Больцмана. Тогда рождение центров характеризуется константой скорости и интенсивностью поглощения энергии веществом. По этой модели для стационарного случая происходит зарождение центров, их гибель в результате как самопроизвольная, так и в результате реакции. При этом используется зависимость:

$$G^* I - \left\{ \frac{N(\tau)}{\tau_{\phi}} + \frac{N(\tau)}{\tau_x} \right\} = 0 \quad (7)$$

где:  $G^*$  – выход образующихся активных центров;  $I$  – интенсивность поглощения энергии веществом;  $N(\tau)$  – концентрация активных центров;  $\tau_{\phi}$ ,  $\tau_x$  – время жизни активных центров до самопроизвольной гибели и в результате реакции соответственно.

Для проведения процессов механоактивации измельчённых материалов и использования полученных порошков в различных технологических процессах необходимо определять количество вводимой энергии в систему. На практике для этого используются шаровые мельницы, дезинтеграторы, планетарные мельницы и другие энергонапряжённые агрегаты. Эффективность работы этого оборудования в первую очередь определяется величиной количества вводимой энергии, приводящей к получению механоактивированных порошков с заданными характеристиками.

Рассмотрим особенности применения помольных агрегатов, обеспечивающих механоактивацию применительно к измельчённым частицам отработанных литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Ниже приведена сравнительная характеристика процессов помола, протекающих в шаровой мельнице и дезинтеграторе.

**Сравнительная характеристика процесса помола частиц литий-ионных аккумуляторов в энергонапряжённых агрегатах.** Рассмотрим процессы помола частиц ЛИА в шаровой мельнице и дезинтеграторе. Для сравнительного анализа энергетических и технологических параметров необходимо рассчитывать мощность шаровой мельницы или дезинтегратора. В барабанной шаровой мельнице измельчение проходит при стесненном движении шаров и измельчаемого материала при частоте вращения барабана до 150 об/мин. В дезинтеграторах материал преимущественно измельчается ударным (короткоимпульсным) воздействием. При этом частоты вращения роторов дезинтегратора в среднем варьируются от 1000 до 6000 об/мин. Во время соударения ударных элементов (ряда пальцев) ротора с частицей измельченного материала происходит деформация как частицы, так и ударного элемента [6]. При этом деформация пальцев в месте соударения с частицей значительно меньше, чем деформация измельчаемой частицы, что объясняется разными

размерами пальцев и частиц. Фактически пальцы дезинтеграторов являются абсолютно жесткими, а сама частица может быть пластичной или упругой.

Для сравнения эффективности действия этого фактора необходимо знать энергетический выход соответствующих процессов, поскольку только в единицах энергии можно оценить вероятность химических превращений. Можно констатировать, что энергетический фактор (количество энергии) является количественной мерой механохимической деструкции [7].

Далее рассматривается предложенная нами усовершенствованная расчётно-теоретическая модель подвода энергии в шаровой мельнице.

**Расчётно-теоретическая модель подвода энергии в шаровой барабанной мельнице.** С учётом процессов, протекающих при помоле частиц ЛИА в шаровой мельнице был рассмотрен алгоритм расчёта подводимой энергии удара к материалу с использованием зависимостей работы [8]. При этом дополнительно учитывались следующие факторы: 1) режим работы мельницы (водопадный); 2) взаимодействие частиц с шарами происходит в области упругих деформаций; 3) учёт взаимодействия активируемых частиц с шарами, а также со стенкой барабана.

Расчёт подводимой энергии для шаровой мельницы по уточнённой методике проводится в следующей последовательности:

1. Расчёт скорости движения мелющих тел:

$$U = \left\{ 4 \cdot g \cdot \left( \frac{D_6}{2} \right) \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{n_{кр}}{n_p} \right) - 1 \right] + \left[ \pi \cdot \left( \frac{n_{кр}}{30} \right) \cdot \left( \frac{D_6}{2} \right)^2 \right] \right\}^{0,5} \quad (8)$$

2. Определение времени взаимодействия двух упругих тел:

$$\tau = 0,7358 \left\{ \left[ \frac{10 \cdot \pi \cdot \rho_q \cdot \rho_{ш} \cdot (\theta_1 + \theta_2)}{(\rho_q \cdot d_{ш}^3 + \rho_{ш} \cdot d_q^3)} \right]^2 \cdot \frac{d_q + d_{ш}}{U} \right\}^{0,2} \quad (9)$$

3. Определение максимальной силы взаимодействия между шарами и измельчаемыми частицами:

$$F_{max} = \frac{2}{3} \left[ \left( \frac{10 \cdot \pi \cdot \rho_q \cdot \rho_{ш}}{\rho_q \cdot d_{ш}^3 + \rho_{ш} \cdot d_q^3} \right) \cdot \frac{U^6}{(d_q + d_{ш}) \cdot (\theta_1 + \theta_2)} \right]^{0,2} \quad (10)$$

4. Определение максимального напряжения в центре площади контакта:

$$P_{max} = 4 \cdot \left[ \frac{10}{\pi^4} \cdot \frac{\rho_q \cdot \rho_{ш} \cdot U^2}{(\rho_q \cdot d_{ш}^3 + \rho_{ш} \cdot d_q^3)} \cdot \frac{(d_q + d_{ш})}{(\theta_1 + \theta_2)} \right]^{0,2} \quad (11)$$

5. Расчёт общей деформации соударяющихся тел:

$$\alpha = \frac{1}{4} \cdot \left[ \frac{9}{4} \cdot (\theta_1 + \theta_2)^2 \cdot (d_q + d_{ш}) \cdot F_{max}^2 \right]^{0,33} \quad (12)$$

6. Расчёт энергии удара, подводимой к составу активируемого материала:

$$E_T = \frac{F_{max} \cdot \alpha}{m_{см}} \quad (13)$$

7. Расчёт потерь энергии при соударении шаров с измельчаемыми частицами:

$$\delta_{соуд} = (1 - k^2) \cdot \frac{m^2}{2 \cdot m} \cdot \frac{(2 \cdot U)^2}{2} \cdot \frac{N_{ш}}{2} \quad (14)$$

8. Расчёт потерь энергии при ударе шаров с частицами о стенку шаровой барабанной мельницы:

$$\delta_{\text{уд.о стенку}} = (1 - k^2) \cdot m \cdot \frac{U^2}{2} \cdot N_{\text{ш}} \quad (15)$$

В этих зависимостях приняты следующие обозначения:  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $D_{\text{б}}$  – диаметр барабана шаровой мельницы, м;  $n_{\text{кр}}$  – критическая частота вращения барабана, об/мин;  $n_p$  – рабочая частота вращения барабана, об/мин;  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ш}}$  – плотность материала шаров, кг/м<sup>3</sup>;  $d_{\text{ш}}$  – диаметр шаров, м;  $d_{\text{ч}}$  – диаметр частиц, м;  $\Theta_1, \Theta_2$  – величины упругих параметров для шаров и материала соответственно;  $m_{\text{см}}$  – масса мелющих тел и материала помола, находящихся в зоне контакта, кг;  $N_{\text{ш}}$  – количество мелющих тел (шаров), шт.;  $m$  – масса шаров, кг;  $k$  – коэффициент восстановления. При расчёте потерь энергии при соударении шаров с материалом принимаем, что происходит частично упругий удар, и значение коэффициента  $k$  будет в диапазоне от 0 до 1. При соударении шаров со стенкой барабана мельницы принимаем, что происходит абсолютно неупругий удар. В этом случае  $k = 0$ .

Приведённая методика расчёта подвода энергии позволяет учитывать характеристики помольного оборудования и прогнозировать количество вводимой энергии для получения механоактивированных частиц ЛИА с заданными характеристиками.

### **Выводы**

Рассмотрены теоретические основы процесса механохимической активации, в частности, применительно к твёрдым частицам литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Приведена сравнительная характеристика процесса помола частиц ЛИА в энергонапряжённых аппаратах (шаровая мельница и дезинтегратор). Выявлено, что помол частиц ЛИА в шаровой мельнице происходит за счёт стеснённого движения шаров и измельчаемого материала, а в дезинтеграторе – за счёт интенсивного высокоимпульсного воздействия. Предложена усовершенствованная расчётно-теоретическая модель подвода энергии в шаровой барабанной мельнице, учитывающая потери энергии при соударении шаров и частиц материала ЛИА и при соударении шаров с частицами со стенкой барабана мельницы. Данная методика даёт возможность учитывать характеристики помольного оборудования (частота вращения барабана, время соударения шаров и частиц материала и др). Это позволяет прогнозировать количество вводимой энергии для получения механоактивированных частиц литий-ионных аккумуляторов с заданными характеристиками, обеспечивающими их эффективную переработку механическими методами.

### **Список литературы**

1. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ / В.В. Болдырев // Успехи химии. – 2006. – Т.75. №3. – С. 203-216.
2. Алфимова Н.И. Механоактивация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном

материаловедении / Н.И. Алфимова, В.В. Калатоци, С.В. Карацана [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №3. – С. 85-89.

3. Калыгин В.Г. Механохимические эффекты при структурообразовании компактированной шихты / В.Г. Калыгин, Л.Н. Козлова, О.С. Чехов // Стекло и керамика. – 1990. – № 8. – С. 13-15.

4. Макаренков Д.А. Процессы и аппараты химических технологий. Основные процессы и оборудование производства пигментов, суспензий и паст в лакокрасочной продукции: учебное пособие / Д.А. Макаренков, В.И. Назаров, Е.А. Баринский. – М.: ИНФРА-М, 2025. – 211 с.

5. Широков Ю.Г. Механохимия. Теоретические основы / Ю.Г. Широков. – Иваново: Изд-во ИГХТУ, 2015. – 214 с.

6. Назаров В.И. Особенности процесса измельчения частиц литий-кобальтовых аккумуляторов в мельницах и дезинтеграторах и его влияние на интенсификацию процесса выщелачивания / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, Г.Р. Афлятунова [и др.] // Цветные металлы. – 2023. - № 12. – С. 27-34.

7. Ретивов В.М. Критериальное обобщение параметров механохимической деструкции кобальтсодержащих соединений при утилизации источников тока / В.М. Ретивов, А.М. Гонопольский, Д.А. Макаренков [и др.] // Вестник ТГТУ. – 2021. - № 4. – С. 625-635.

8. Гараев М.М. Оценка уровня подводимой механической энергии к композиции, при проведении механохимической активации в аппаратах измельчения / М.М. Гараев, Е.Г. Белов, А.М. Коробков [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 7. – С. 389-394.

## **ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ И ОТРАБОТАННЫХ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕССОВ МЕХАНОАКТИВАЦИИ**

В.И. Назаров<sup>1</sup>, Д.А. Макаренков<sup>1</sup>, А.П. Попов<sup>1</sup>,  
А.М. Немерюк<sup>1</sup>, Р.Р. Сайфутяров<sup>1</sup>, В.Р. Калачева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт»,

г. Москва

<sup>2</sup> Московский политехнический университет,

г. Москва

**Аннотация.** В работе представлен комплексный подход к переработке техногенных отходов: хвостов обогащения свинцово-цинковых руд, золошлаковых отходов ТЭС и отработанных литиевых источников тока. Показано, что длительное хранение отходов сопровождается трансформацией их состава и повышением миграционной способности токсичных элементов, что приводит к загрязнению окружающей среды.

Показано, что проведение процессов механоактивации в шаровой мельнице и ли дезинтеграторе приводит к деструкции поверхности и структуры частиц. Это обеспечивает на стадиях выщелачивания порошков выход целевого продукта.

Для хвостохранилищ Унальского месторождения определены гранулометрические характеристики активированных порошков (215-465 мкм, удельная поверхность 370 см<sup>2</sup>/г).

*Для зол уноса Рефтинской ГРЭС определен гранулометрический состав порошков, а по дифрактограмме определено содержания оксида алюминия и кремнезема.*

*В результате помола отработанных литиевых химических источников тока (ЛХИТ) на шаровой мельнице и в дезинтеграторе, по дифрактограммам определены образующиеся новые комплексные соединения (Li, Ni, Co, Mn). В работе приведены технологические схемы переработки техногенных отходов с различной морфологией.*

**Ключевые слова:** *техногенные отходы, хвостохранилища, золы уноса, отработанные ЛХИТ, механоактивация, выщелачивание, глинозем, кобальт лития, рентгенофазовый анализ.*

**Введение.** В настоящее время по технологии переработки руд в начале извлекаются ценные компоненты в виде соединения различных металлов. Их добыча проводится в горно-обогатительных и горно-металлургических комбинатов (ГОК) и (ГМК). При этом на территории России образуются промышленные отходы ГОК, которые затем складываются в специальных полигонах (хвостохранилища). В этих отходах находится как тяжелые металлы, так и соединения оксидов различных металлов. Отходы хвостохранилищ являются источником загрязнения окружающей среды. Для утилизации этих отходов используют различные технологии их переработки с получением целевых продуктов.

Проведен анализ отходов Садонского свинцово-цинкового комбината. Показано, что суммарный запас различных металлов составил: Pb – 5450 тонн, Zn – 8320 тонн, Cu – 2600 тонн, Ti – 4680 тонн, Fe – 161 тыс. тонн, Mn – 4160 тонн.

Разработка комплексной технологии переработки отходов, позволит получать целевые компоненты из различных металлов и снизить экологическую нагрузку на окружающую среду [1,2].

К многотонажным техногенным отходам относятся золы и шлаки теплоэлектростанции, образующиеся после сжигания углей тепловых электростанций (ТЭС).

В золе, оставшейся после сжигания 1т каменного угля, содержатся цинк, кобальт, никель, олово, германий и другие элементы.

На примере Рефтинской ГРЭС приведены химические и компонентные составы образующихся отходов. Основными компонентами являются: оксид алюминия 28,58 % масс., оксид железа 5,41 % масс., оксид кальция 2,14 % масс. и оксид кремния 59,59 % масс. При утилизации золошлаковых отходов целевым компонентом является оксид алюминия  $Al_2O_3$  [3].

В настоящее время в России образуются большое количество отработанных ЛХИТ [4]. Однако, отсутствуют комплексные технологии их рециклинга, снижающие нагрузку на окружающую среду и позволяющие получать целевые компоненты (соединения лития, кобальта, никеля, марганца).

В России ежегодно выбрасывают около 20 тысяч тонн литий-ионных аккумуляторов, что составляет примерно миллиард штук. При этом перерабатывается не более 2 % из них.

## Методология и методы исследования.

Для переработки отходов ГОК и ГМК была выбрана комплексная технология переработки отходов с использованием совмещенных механических и массообменных процессами [5] (рис.1).

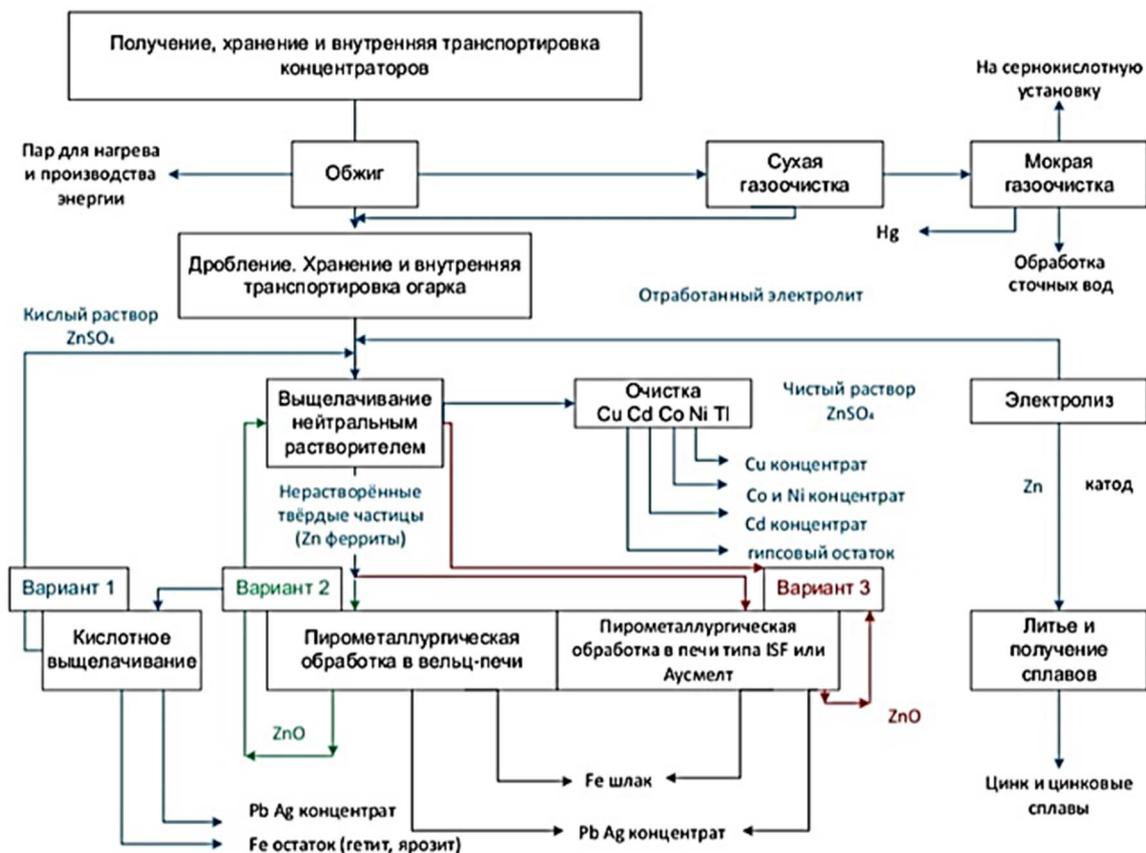


Рис.1. Блок-схема получения целевых продуктов из рудного концентрата первичного сырья

Для переработки зол уноса при работе электростанции была выбрана технологическая схема для извлечения глинозема из зол уноса после сжигания экибастузских углей [3] (рис.2).



Рис. 2. Блок-схема процесса извлечения глинозема из золы ТЭС

Технология обеспечивает извлечения глинозема, а также обогащенную железом магнитную фракцию, углеродную фракцию, раствор хлорида алюминия и оксида кремния.

В настоящее время разрабатываются различные комплексные технологии переработки многотонажных отработанных ЛХИТ, содержащие токсичные вещества такие как HF и PF<sub>5</sub>, диметоксиэтан, пропиленкарбонат.

Основными катодными материалами в ЛХИТ являются: кобальтат лития (LiCoO<sub>2</sub>), оксид литий-марганца (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), литий-железофосфат (LiFePO<sub>4</sub>), оксид литий-никель-марганец-кобальта (LiNiMnCoO<sub>2</sub>), оксид литий-никель-кобальт-алюминия (LiNiCoAlO<sub>2</sub>).

Показано, что недостатками технологий утилизации являются большие временные циклы и энергозатраты (термообработка), сложность процесса, использование агрессивных сред и сложное аппаратное оформление.

В Курчатовском комплексе физико-химических технологий НИЦ «Курчатовский институт» была разработана комплексная технология утилизации ЛХИТ. Переработка включает стадии разрядки аккумуляторов в солевых растворах, их вскрытия в шредере, измельчения в ножевой мельнице и помол в дезинтеграторе или шаровой мельнице. Эффективность переработки ЛХИТ определяется процессами выщелачивания и химического осаждения целевых компонентов в реакторах с высокоскоростной мешалкой.

Модернизированная технологическая схема приведена на рис. 3.

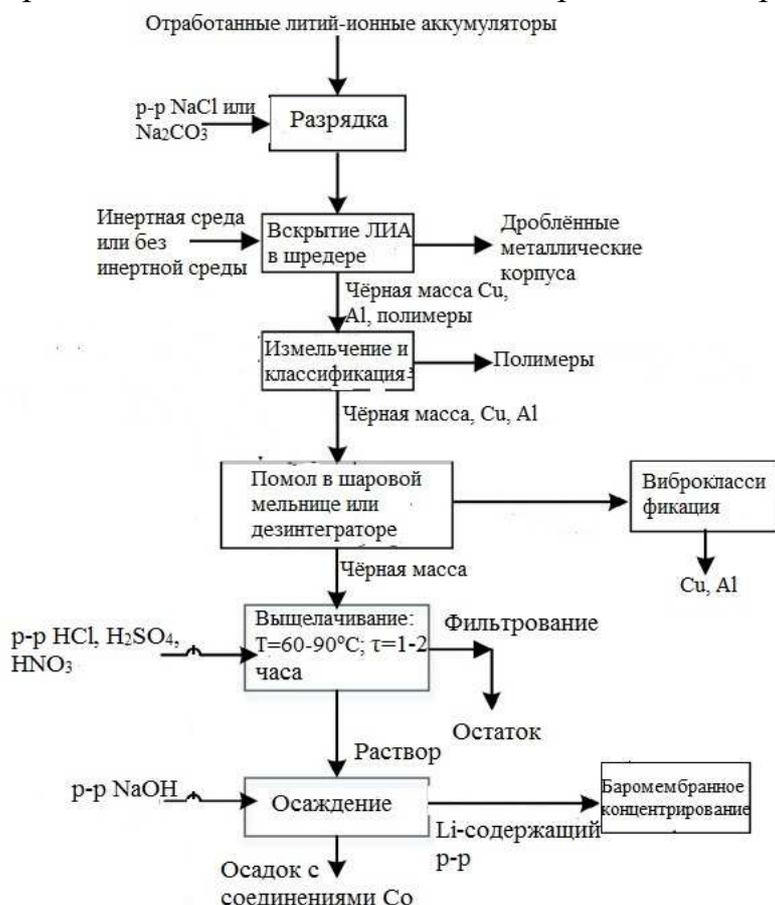


Рис. 3. Модернизированная блок-схема утилизации литий-ионных аккумуляторов, разработанная в НИЦ «Курчатовский институт»

## Результаты и обсуждения.

Для повышения эффективности процесса выщелачивания используют проведение процесса механоактивации. Для этого используют процесс помола на шаровой мельнице или дезинтеграторе. Механоактивированные порошки отличаются дисперсностью частиц и их высокой удельной поверхностью. После измельчения при помоле получают механоактивированные частицы с размерами (20 - 200) мкм с удельной поверхностью  $S = (150 - 600) \text{ см}^2/\text{г}$ .

Результаты анализа изменения гранулометрического состава и изменение удельной поверхности частиц приведены на рис.4 и 5.

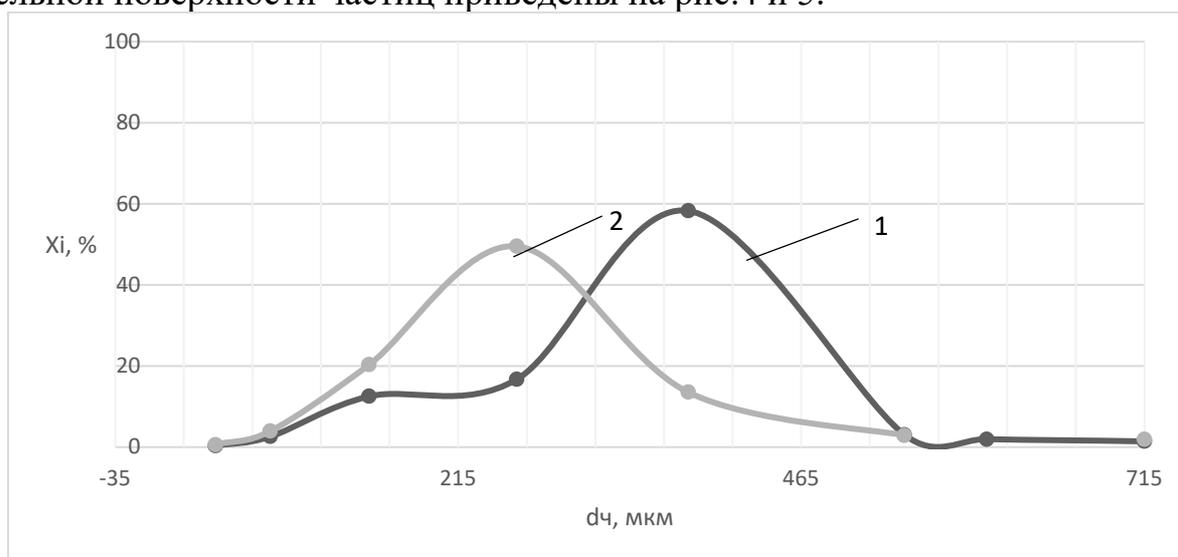


Рис.4. Дифференциальные кривые распределения частиц по размерам отходов Унальского хвостохранилища: 1 – скважина №1; 2 – скважина №2

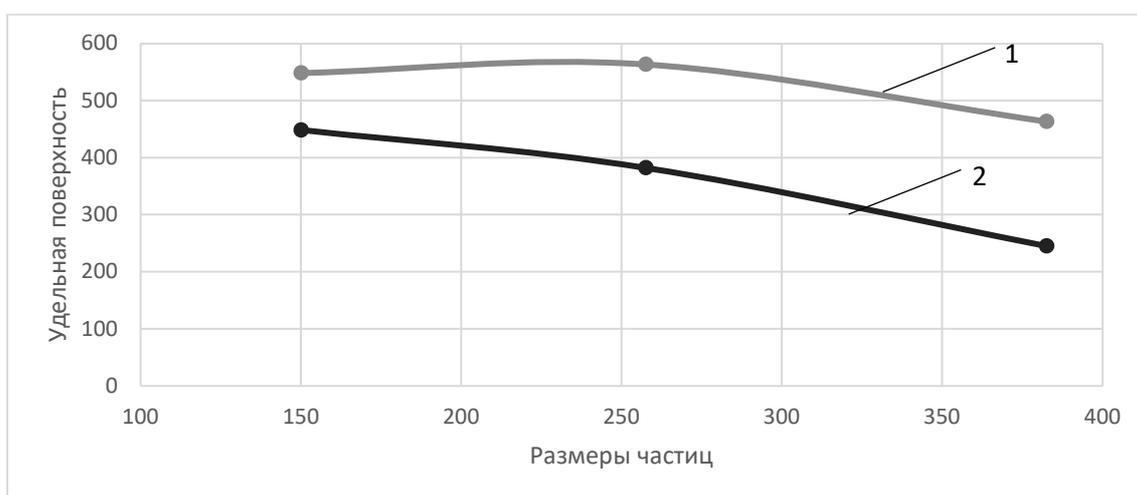


Рис.5. Зависимость изменения удельной поверхности порошков хвостохранилищ от диаметра частиц: 1 – скважина №1; 2 – скважина №2

Из полученных результатов видно, что диаметры частиц после помола изменяются в диапазоне от 215 до 465 мкм. При этом удельная поверхность частиц из разных скважин изменяется в диапазоне от 150 до 370  $\text{см}^2/\text{г}$ .

В работе также приведены кривые гранулометрического состава частиц (рис. 6), а также состав зол уноса в виде оксидов. Основными компонентами

являются: оксид алюминия 28,58 % масс., оксид железа 5,41 % масс., оксид кальция 2,14 % масс. и оксид кремния 59,59 % масс.

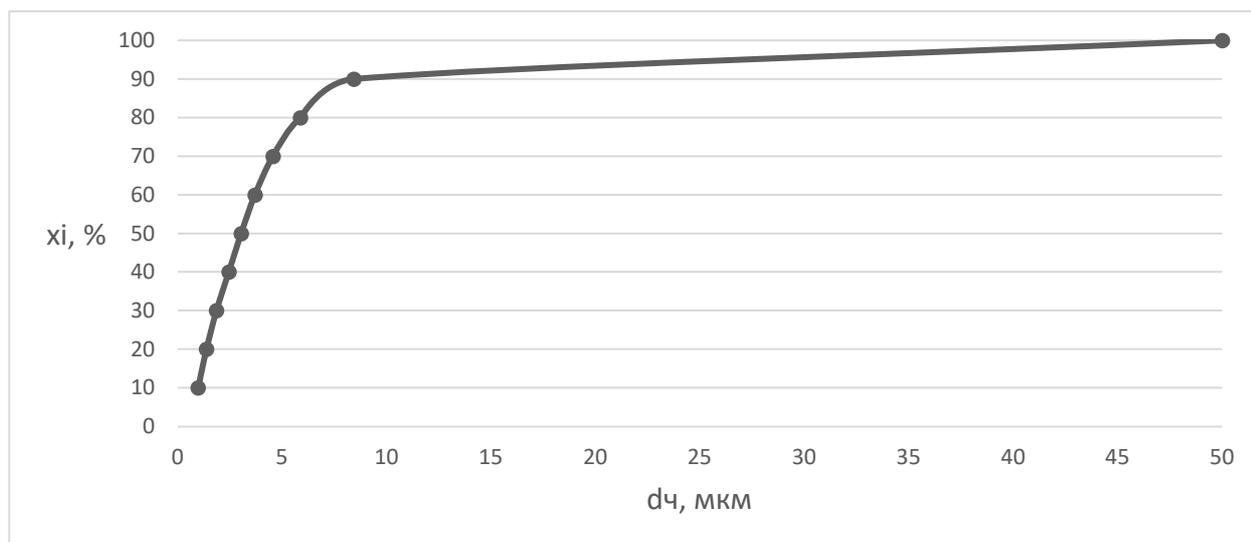


Рис.6. Интегральная кривые распределения частиц зол уноса по размерам

На рис. 7 приведен рентгенофазовый анализ исходной золы. Ранее было показано [6], что алюминий после вскрытия находится в минерале муллит. Установлено, что в процессе сжигания зола покрывается аморфным кремнеземом в виде стекловидной оболочки. Из данных рентгенофазового анализа видно, что наличие кремнезема в аморфной фазе характеризуется сплошными линии, а кристаллическая – в виде пик.

Для извлечения  $Al_2O_3$  методом выщелачивания необходимо использовать в качестве экстрагента серную кислоту [3].

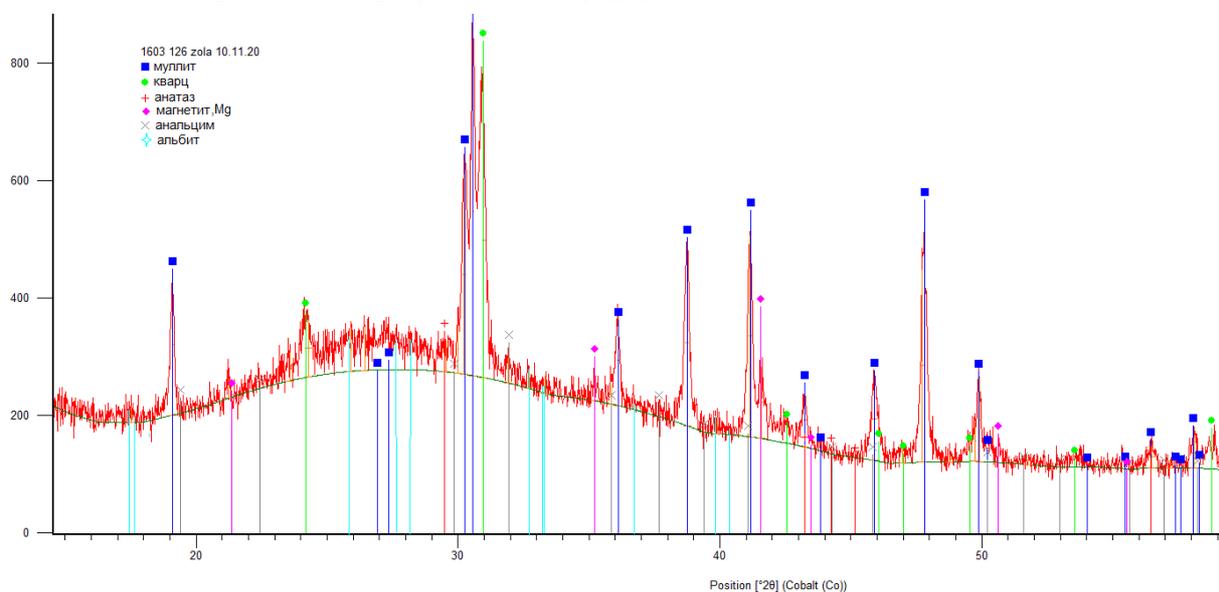


Рис. 7. Дифрактограммы рентгенофазового анализа состава исходной золы (высокие пики отражают содержания оксида алюминия и кремнезема)

Далее приведены результаты анализов механоактивированных порошков, отработанных ЛХИТ, полученных после помола на шаровой мельнице (рис.8) и на дезинтеграторе (рис. 9 и 10). На кривых рис. 8 цифровые обозначения

отражают содержание компонентов в порошке: 1 –  $\text{LiCoO}_2$ ; 2 –  $\text{C}$ , 3 –  $\text{LiCoO}_2$ ; 4 –  $\text{LiNiFeCoO}_2$ . Высота пик характеризует количества этих соединений в механоактивированном порошке.

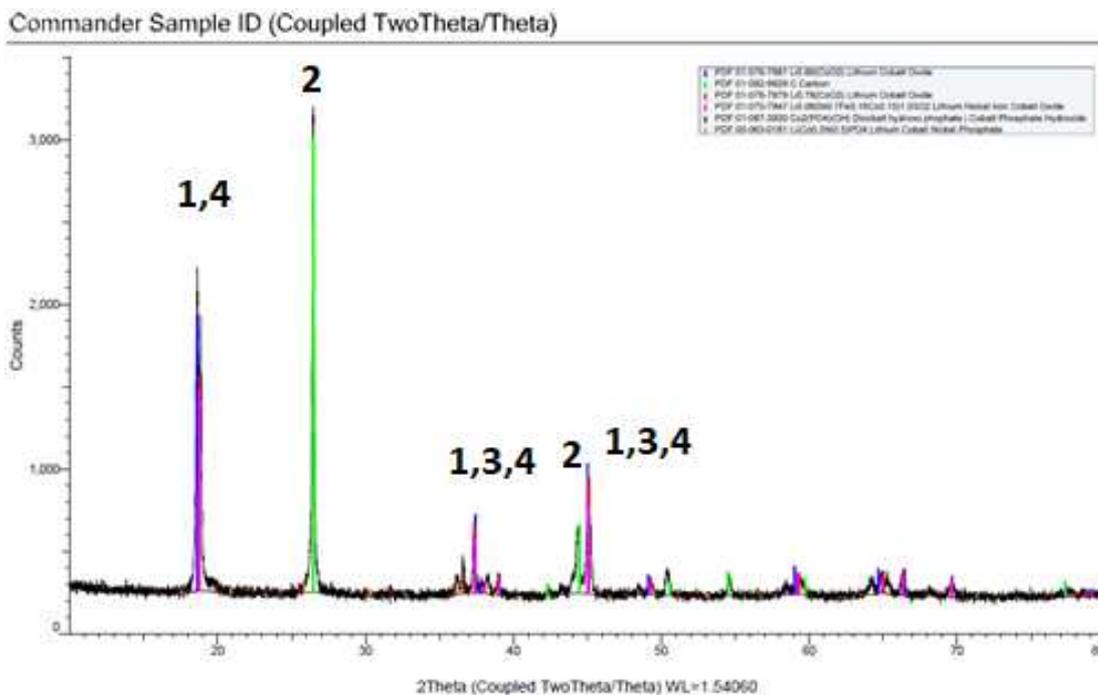


Рис. 8. Дифрактограммы рентгенофазового анализа механоактивированного порошка ЛХИТ после шаровой мельницы

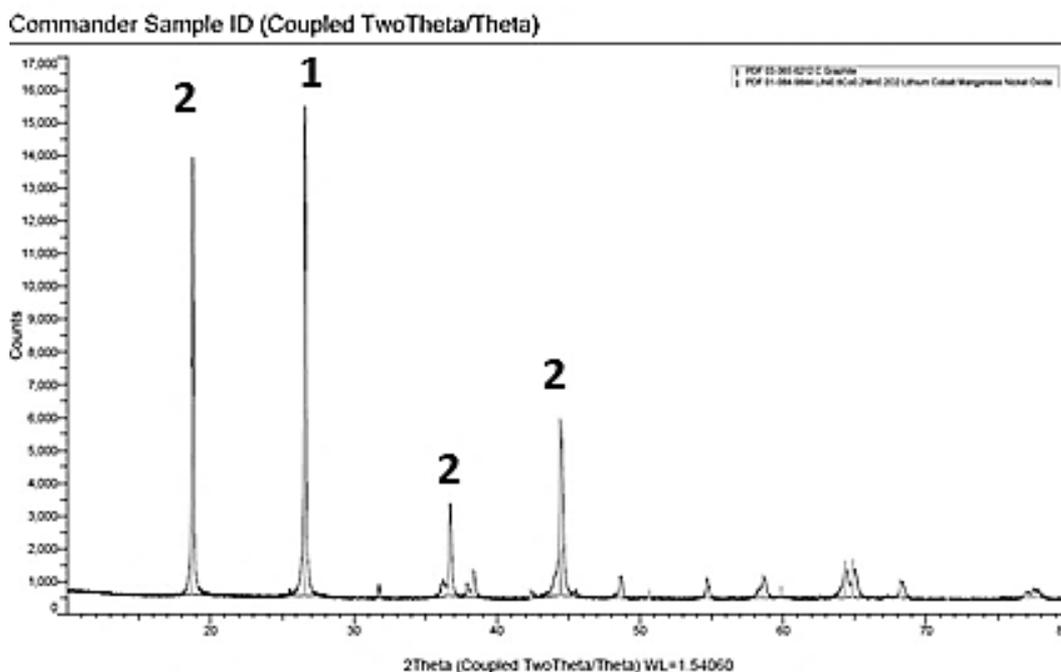


Рис. 9. Дифрактограммы рентгенофазового анализа механоактивированного порошка ЛХИТ после одного цикла помола на дезинтеграторе

На кривых рис. 9 цифровые обозначения отражают содержание компонентов в порошке: 1 –  $\text{C}$ ; 2 –  $\text{LiNiCoMnO}_2$ . Высота пик характеризует количества этих соединений в механоактивированном порошке.

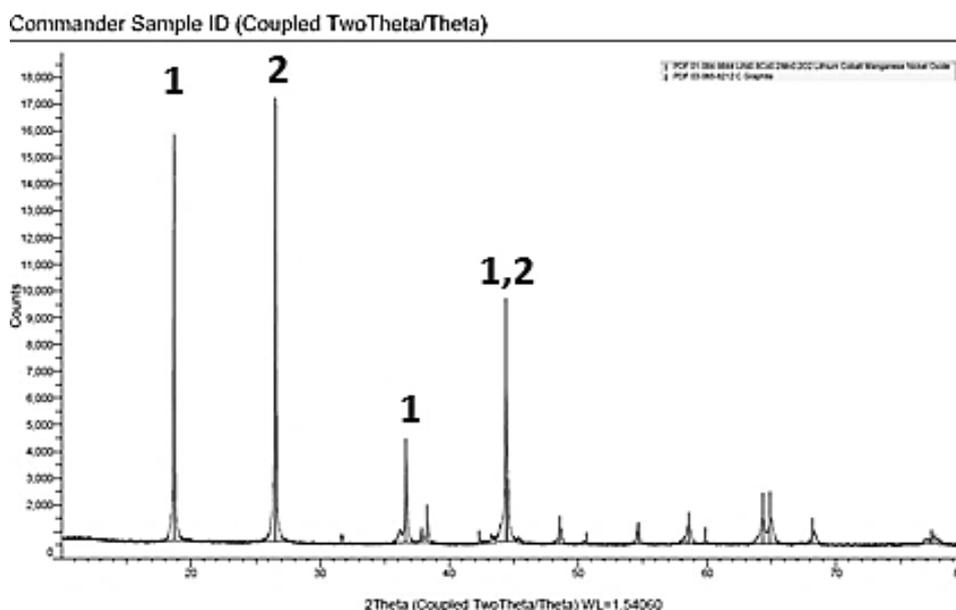


Рис. 10. Дифрактограммы рентгенофазового анализа механоактивированного порошка ЛХИТ после двух цикла помола на дезинтеграторе

На кривых рис. 10 цифровые обозначения отражают содержание компонентов в порошке: 1 –  $\text{LiNiCoMnO}_2$ ; 2 – С. Высота пик характеризует количества этих соединений в механоактивированном порошке.

Исследования помола в шаровой мельнице проводили в течении 2 часов. Помол измельченных частиц в дезинтеграторе проводился в течении 20 секунд. Это время было обозначено как время технологического цикла. На рис. 9 это время составило 20 секунд, а на рис. 10-40 секунд.

Было установлено, что при проведении процесса механоактивации как в шаровой мельнице, так и в дезинтеграторе, за счёт механического воздействия образуются новые комплексные соединения. Они включают соединения Li, Ni, Co, Mn.

#### **Выводы.**

Проведен анализ техногенных отходов, образующихся после ГОК, зол уноса после сжигания угля на ТЭС, а также отработанных ЛХИТ. Приведены данные по процессам помола в шаровой мельнице и дезинтеграторе, обеспечивающие получение механоактивированных порошков. Получены дифрактограммы рентгенофазового анализа механоактивированного порошков зол уноса ТЭС и отработанных ЛХИТ. В работе приведены комплексные технологические схемы для рециклинга техногенных отходов с различной морфологией.

*Аналитические исследования выполнены с использованием научного оборудования ЦКП «Исследовательский химико-аналитический центр НИЦ «Курчатовский институт».*

#### **Список литературы**

1. Рыльникова М.В. Энергоэффективные и безопасные технологии разведки и разработки техногенных образований/Журнал Горная

промышленность / М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко // Горная Промышленность №3 (139). – 2018. – С. 86-90.

2. Назаров В.И., Макаренков Д.А., Калачева В.Р., Попов А.П. Оценка ресурсного потенциала захороненных отходов Садонского свинцово-цинкового комбината (хвостохранилищ) и вопросы экологической безопасности / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, В.Р. Калачева, А.П. Попов // ПАХТ-2025. Международный научно-практический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения Ю.И. Дытнерского. – Москва, 2025. – С. 116-120.

3. Valeev D. "Complex utilisation of ekibastuz brown coal fly ash: Iron & carbon separation and aluminum extraction." *Journal of cleaner production* / D. Valeev [et al.]. – 218 (2019): 192-201.

4. Немерюк А.М. Особенности технологии утилизации литиевых аккумуляторов со смешанным катодом и с получением металлического никеля селективным восстановлением / А.М. Немерюк, В.И. Назаров, А.П. Попов, Д.А. Макаренков, В.Р. Калачева // ПАХТ-2025 Международный научно-практический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения Ю.И. Дытнерского. – Москва, 2025. – С. 177-182.

5. Бюро НДТ. ИТС 13 – 2020 Производство свинца, цинка и кадмия. Москва, с. 258.

6. Valeev, D., Shoppert, A., Mikhailova, A., & Kondratiev, A. (2020). Acid and acid-alkali treatment methods of al-chloride solution obtained by the leaching of coal fly ash to produce sandy grade alumina. *Metals*, 10(5), 585.

## МЕТОДЫ СИНТЕЗА СМЕШАННОГО КАТОДНОГО МАТЕРИАЛА СОСТАВА $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$

Д.Д. Кубкин, В.И. Назаров

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
г. Москва

**Аннотация.** В работе представлены результаты обзора и сравнительный методов синтеза слоистого сложного оксида  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$ , используемого в качестве катодного материала для литий-ионных аккумуляторов. Рассмотрены ключевые особенности твердофазного, золь-гель метода, метода термодеструкции в масле, соосаждения и гидротермального синтеза. Показано, что метод синтеза определяет размер частиц. На основе сравнительной характеристики методов, систематизированной в табличной форме, выявлены их основные преимущества и недостатки. Сделан вывод о целесообразности выбора метода синтеза в зависимости от конечных требований к материалу.

**Ключевые слова:** Слоистый сложный оксид, синтез, смешанный катодный материал, литий-ионный аккумулятор, прекурсор, удельная емкость.

### Введение

Среди перспективных катодных материалов особое место занимают сложные оксиды состава  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$  (NMC). Их электрохимические характеристики: удельная емкость, циклируемость и стабильность – критически

зависят от микроструктуры, которая, в свою очередь, определяется условиями синтеза. Цель данной работы – провести сравнительный анализ методов получения NMC.

### **Обзор методов синтеза**

Существует множество методов синтеза смешанного катодного материала типа NMC. Например, в работе Воронова В. А., для синтеза NMC используются три метода, позволяющие получить материал с различной микроструктурой [1].

*Твердофазный метод.* В качестве реагентов используют: гидроксид лития, карбонаты никеля, марганца и кобальта. Их обрабатывают в планетарной шаровой мельнице в течение 2 ч при 100 об./мин, в мольном соотношении 3:1:1:1=Li:Ni:Mn:Co. Измельченный, перемешанный порошок подвергают термообработке в муфельной печи (400-900°C, 14-16 ч) в атмосфере воздуха.

*Золь-гель метод.* В качестве исходных реагентов используются ацетаты лития, никеля, марганца и кобальта ( $\text{Li}(\text{CH}_3\text{COO})\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Соли в мольном соотношении 3:1:1:1=Li:Ni:Mn:Co растворяют в дистиллированной воде, добавляют 2 М раствор лимонной кислоты (комплексообразователь и агент поликонденсации). Кислотность среды поддерживают гидроксидом аммония ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )  $\text{pH}\sim 7,0$ . Полученную смесь подвергают интенсивному перемешиванию при нагревании (80°C) в течение 6 часов, что приводит к испарению растворителя и формированию вязкого геля. На заключительном этапе гель сушат при 100°C до постоянной массы, после чего проводят термическую обработку порошка-прекурсора в муфельной печи в интервале температур 400-900°C на воздухе.

*Метод термодеструкции металлосодержащих соединений в масле.* В качестве реагентов выступают те же соли металлов, как и в золь-гель методе, а также полиэтилен высокого давления (ПЭВД) и вакуумное масло (ВМ). В нагретый расплав ПЭВД-ВМ в токе аргона при интенсивном перемешивании по капельно вводят раствор смеси ацетатов лития, никеля, марганца и кобальта в ледяной уксусной кислоте. Массовое соотношение полимерной матрицы к конечному продукту (ПЭВД/NMC) составляет 30 масс. %. Полученный осадок подвергают экстракции бензолом до полного удаления остатков углеводородного масла. После сушки на воздухе получают порошок прекурсора светло-розового цвета, который подвергают термической обработке в муфельной печи в интервале температур 400-900 °C в течение 12-18 ч в атмосфере аргона. Образец, синтезированный этим методом, обладает узким распределением частиц по размерам, средним размером кристаллитов 70 нм, покрытых нанометровой углеродной оболочкой (до 3 нм), как и кристаллиты образца, полученного золь-гель методом.

*Метод соосаждения* – традиционный, наиболее высокопроизводительный и широко используемый в промышленности. Авторы одной из статей, в качестве реагентов используют сульфаты металлов ( $\text{NiSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CoSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$ ) [2]. Соли растворяют в дистиллированной воде в мольном соотношении 8:1:1=Ni:Mn:Co, добавляют комплексообразователь и вводят осадитель, гидроксид аммония ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) и гидроксид натрия ( $\text{NaOH}$ ),

соответственно. После сушки полученный прекурсор смешивают с гидроксидом лития ( $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) и проводят термообработку.

*Гидротермальный метод.* Для получения прекурсора авторы статьи растворяют в воде сульфаты никеля, кобальта и марганца, а в качестве комплексообразователя используют глицин [3]. Этот водный раствор смешивается с раствором гидроксида натрия и обрабатывается в реакторе для микроволнового гидротермального синтеза в течение 15-60 минут при температуре  $160^\circ\text{C}$  и внутреннем давлении  $\sim 6$  бар. После сушки полученный прекурсор смешивают с гидроксидом лития ( $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) и проводят термообработку.

### Сравнительный анализ методов синтеза

Ниже приведена таблица 1, отражающая ключевые характеристики, преимущества и недостатки каждого рассмотренного способа синтеза.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов синтеза катодного материала NMC

Метод синтеза	Исходные реагенты	Преимущества	Недостатки	Типичная морфология
Твердофазный	LiOH, Карбонаты Ni, Mn, Co	Простота, дешевизна, отсутствие жидких отходов	Неоднородность состава, крупные частицы, диффузионные ограничения	Крупные частицы неправильной формы
Золь-гель	Ацетаты Li, Ni, Mn, Co	Высокая однородность, наноразмерные частицы, чистая фаза	Сложность масштабирования, многостадийность	Наноразмерные пористые частицы ( $\sim 90$ нм)
Термодеструкция в масле	ПЭВД, ВМ, ацетаты Li, Ni, Mn, Co,	Предотвращение агломерации, высокодисперсный порошок	Использование токсичных растворителей (бензол), сложность	Высокодисперсные наночастицы ( $\sim 90$ нм)
Соосаждение	Сульфаты Ni, Mn, Co, $\text{NH}_4\text{OH}$ , NaOH, LiOH	Промышленный стандарт. Высокая производительность, сферические частицы, высокая плотность упаковки	Образование сточных вод (сульфаты), контроль pH	Плотные сферические частицы (5-15 мкм)

Метод синтеза	Исходные реагенты	Преимущества	Недостатки	Типичная морфология
Гидротермальный	Сульфаты Ni, Mn, Co, глицин, NaOH, LiOH	Быстрый синтез, уникальная морфология, высокая кристалличность	Дорогое оборудование, низкая производительность	Частицы с контролируемой огранкой (250-700 нм)

Для исследования полученных образцов используют стандартный набор аналитических методов: атомно-эмиссионную спектроскопию с индуктивно-связанной плазмой (элементный состав), рентгенофазовый анализ (кристаллическая структура), просвечивающую и сканирующую электронную микроскопию (морфология и размер частиц), методы термического анализа (температуры фазообразования) и электрохимические измерения (тестирование в ячейках).

### Выводы

На основе проведенного обзора методов синтеза катодного материала NMC можно сделать следующие выводы:

Выбор метода синтеза определяется конечными требованиями к материалу: для лабораторных исследований предпочтительны золь-гель и гидротермальный методы, в то время как для массового производства безальтернативным остается соосаждение.

Твердофазный метод наиболее прост в реализации, но уступает жидкофазным методам по гомогенности распределения элементов и контролю морфологии частиц.

Золь-гель метод и метод термодеструкции обеспечивают высокую чистоту и наноразмерность продукта, что улучшает электрохимические характеристики, однако их применение ограничено лабораторными масштабами из-за сложности и высокой стоимости.

Метод соосаждения является оптимальным для промышленного внедрения, поскольку позволяет получать сферические частицы прекурсора с высокой плотностью, что критически важно для создания высокоэнергоемких аккумуляторов.

Гидротермальный метод перспективен для получения материалов с контролируемой кристаллической структурой и морфологией, но требует специального дорогостоящего оборудования.

### Список литературы

1. Воронов В.А. Влияние метода получения катодного материала состава  $LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$  на электрохимические характеристики литий-ионного аккумулятора / В.А. Воронов [и др.] // Журнал неорганической химии. – 2016. – Т. 61, №. 9. – С. 1211-1217.

2. Коржаков А.А. [и др.] Исследование влияния параметров процесса соосаждения на физико-химические характеристики прекурсора катодного

материала NCM811 / А.А. Коржаков [и др.] // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология. – 2025. – Т. 25, №. 4. – С. 375-384.

3. Skvortsova I. Microwave-assisted hydrothermal synthesis of space fillers to enhance volumetric energy density of NMC811 cathode material for Li-ion batteries / I. Skvortsova [et al.] // Batteries. – 2022. – Т. 8, №. 7. – С. 67.

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОПОРОШКОВ КРИОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Н.С. Дем, М.Г. Беренгартен, В.И. Назаров  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
г. Москва

***Аннотация.** В работе рассмотрены особенности криохимического метода получения функциональных материалов, включая высокопористые структуры на основе целлюлозы и нанопорошки оксида алюминия. Метод основан на низкотемпературном замораживании исходных растворов или гелей с последующей сублимационной сушкой. Это позволяет минимизировать капиллярные напряжения и сохранить однородность распределения компонентов.*

Показано, что при использовании криотропного гелеобразования из измельченных бумажных отходов были получены целлюлозные аэрогели. При проведении сублимационной сушки полученных образцов были сформированы частицы с пористой структурой (до 97,5 %) и удельной поверхностью до 406 м<sup>2</sup>/г. Полученный материал может применяться в качестве сорбентов для сбора проливов нефтяных продуктов.

Для нанопорошков  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> показано, что при проведении криохимической обработки свежесажденного гидроксида алюминия (T = – 25 °C) и с последующей сублимационной сушки, получены порошки с размером кристаллитов ~7 нм и удельной поверхностью 258 м<sup>2</sup>/г. Субмикронные порошки  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> используют при получении прозрачной керамики, конструктивных элементов радиоламп и наполнителей для огнеупорных материалов. Установлено, что использование стадии замораживания способствует снижению температуры фазовых переходов AlOOH →  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> →  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и интенсифицирует спекание керамики.

### **Ключевые слова.**

Высокопористые материалы, целлюлозные аэрогели, нанопорошки, оксид алюминия, мезопористая структура, сублимационная сушка, криотропное гелеобразование, криохимический метод.

### **Введение.**

Современное материаловедение предъявляет высокие требования к функциональным материалам, используемым в катализе, медицине, энергетике и экологических технологиях. Особый интерес представляют высокопористые

материалы с развитой удельной поверхностью и наноразмерные порошки с контролируемой морфологией [1, 2]. Традиционные методы получения таких материалов часто сопряжены с проблемами агломерации частиц, значительной усадки при удалении растворителя и загрязнения конечного продукта. Криохимический метод, включающий стадии замораживания и сублимационной сушки, позволяет преодолеть указанные недостатки благодаря фиксации структуры жидкой фазы в твердом состоянии и последующему удалению растворителя. При этом исключается фазовый переход жидкость-пар, что сводит к минимуму количество контактов между частицами дисперсной фазы [3, 4]. В данной работе рассматриваются особенности криохимического синтеза на примере двух классов материалов: высокопористых целлюлозных аэрогелей, получаемых методом криотропного гелеобразования, и нанопорошков оксида алюминия, синтезируемых с использованием замораживания гидроксидных прекурсоров.

#### **Методология и методы исследования.**

Криохимический метод включает три ключевые стадии: приготовление исходного раствора, золя или геля с заданным составом, криогенное замораживание и сублимационную сушку [5].

Для получения высокопористых материалов на основе целлюлозы использовали метод криотропного гелеобразования. Замораживание раствора полимера приводит к получению кристаллической структуры и концентрированию полимера в межкристаллическом пространстве с последующим формированием пористой структуры после удаления растворителя сублимацией [2].

Для получения нанопорошков оксида алюминия применяли замораживание свежееосажденного гидроксида алюминия с последующей сублимационной сушкой и термообработкой для осуществления фазовых переходов  $\text{AlOOH} \rightarrow \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  [3].

Исследование структуры и свойств полученных материалов проводили с использованием комплекса аналитических методов: для изучения морфологии сканирующую электронную микроскопию (СЭМ), рентгенофазовый анализ (РФА) использовали для идентификации фаз и размера кристаллитов. Для изучения термических превращений, проведения седиментационного анализа для оценки дисперсности порошков использовали дифференциальный термический анализ (ДТА) и термогравиметрию (ТГ). При этом проводили гидростатическое взвешивание и пикнометрию для определения плотности

#### **Экспериментальная часть.**

Для получения целлюлозных аэрогелей исходную микрокристаллическую целлюлозу растворяли в водно-щелочном растворе NaOH с мочевиной при пониженной температуре. Криотропное гелеобразование осуществляли путем замораживания раствора при  $T = -22\text{ }^\circ\text{C}$  с последующим оттаиванием в этиловом спирте для регенерации целлюлозы [1].

Для интенсификации процесса зародышеобразования на этой стадии применяли ультразвуковое воздействие частотой 40 кГц мощностью 50 Вт.

Сублимационную сушку образцов проводили при разряжении менее 200 Па в течение 48 часов.

Для получения нанопорошков оксида алюминия исходный раствор  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (0,1 М) осаждали водным аммиаком с концентрацией 1 М при рН (9,0-9,5). Полученный гелеобразный осадок  $\text{Al}(\text{OH})_3$  разделяли на две части: первую сушили при  $T=180^\circ\text{C}$  в течение 1 ч, вторую подвергали замораживанию при  $T = -25^\circ\text{C}$  в течение 24 ч с последующей сублимационной сушкой при  $T = 50^\circ\text{C}$  и разряжении  $\sim 30$  Па в течение 5 ч. Термическую обработку для получения  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  и  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  проводили при  $T = 600^\circ\text{C}$  и  $T = 1000^\circ\text{C}$  соответственно [3].

### Результаты и обсуждение.

Проведение криотропного гелеобразования целлюлозы с ультразвуковым воздействием показало возможность осуществления кристаллизации без переохлаждения раствора и сокращение времени начала фазового перехода. Полученные криотропным методом целлюлозные аэрогели обладают высокой пористостью (до 97,5 %) и удельной площадью поверхности до  $406 \text{ м}^2/\text{г}$ . На Рис. 1 представлена сформированная волокнистая структура образца с взаимосвязанными порами. При этом наблюдается шарообразная структура, полученная при низких концентрациях целлюлозы (2-3 масс. %), переходящая в волокнистую при повышении концентрации до 4-6 масс. %.

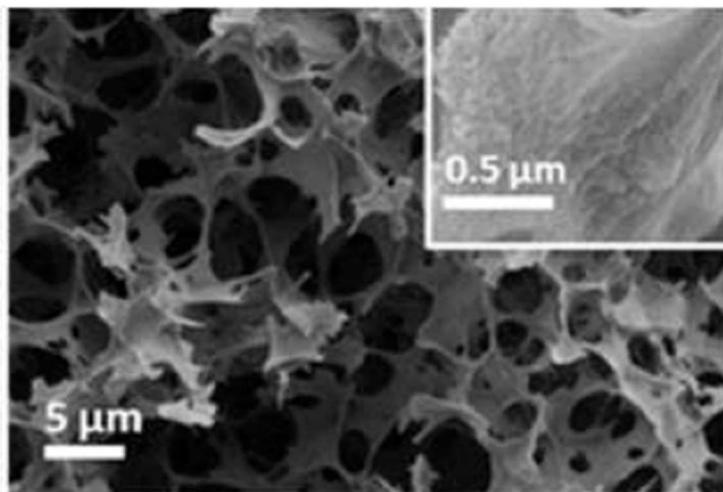


Рис. 1. Внешний вид структуры и СЭМ-изображения образцов на основе целлюлозы, полученных с использованием сублимационной сушки

При синтезе нанопорошков оксида алюминия установлено, что использование замораживания свежесосажденного  $\text{Al}(\text{OH})_3$  при  $T = -25^\circ\text{C}$  с последующей сублимационной сушкой позволяет получить слабоагломерированный порошок  $\text{AlOOH}$  (бемит) с унимодальным распределением частиц. На Рис. 2 представлены распределения частиц по размерам  $D_a$  в  $\text{AlOOH}$  полученные методом сушки в сушильном шкафу и методом сублимационной сушки. Из рис. 2б видно, что частицы имеют размеры (75-200) нм с площадью удельной поверхности  $S_{\text{уд}} = 430 \text{ м}^2/\text{г}$ , что в два раза превышает аналогичный показатель для образца, полученного без замораживания ( $S_{\text{уд}} = 198 \text{ м}^2/\text{г}$ ).

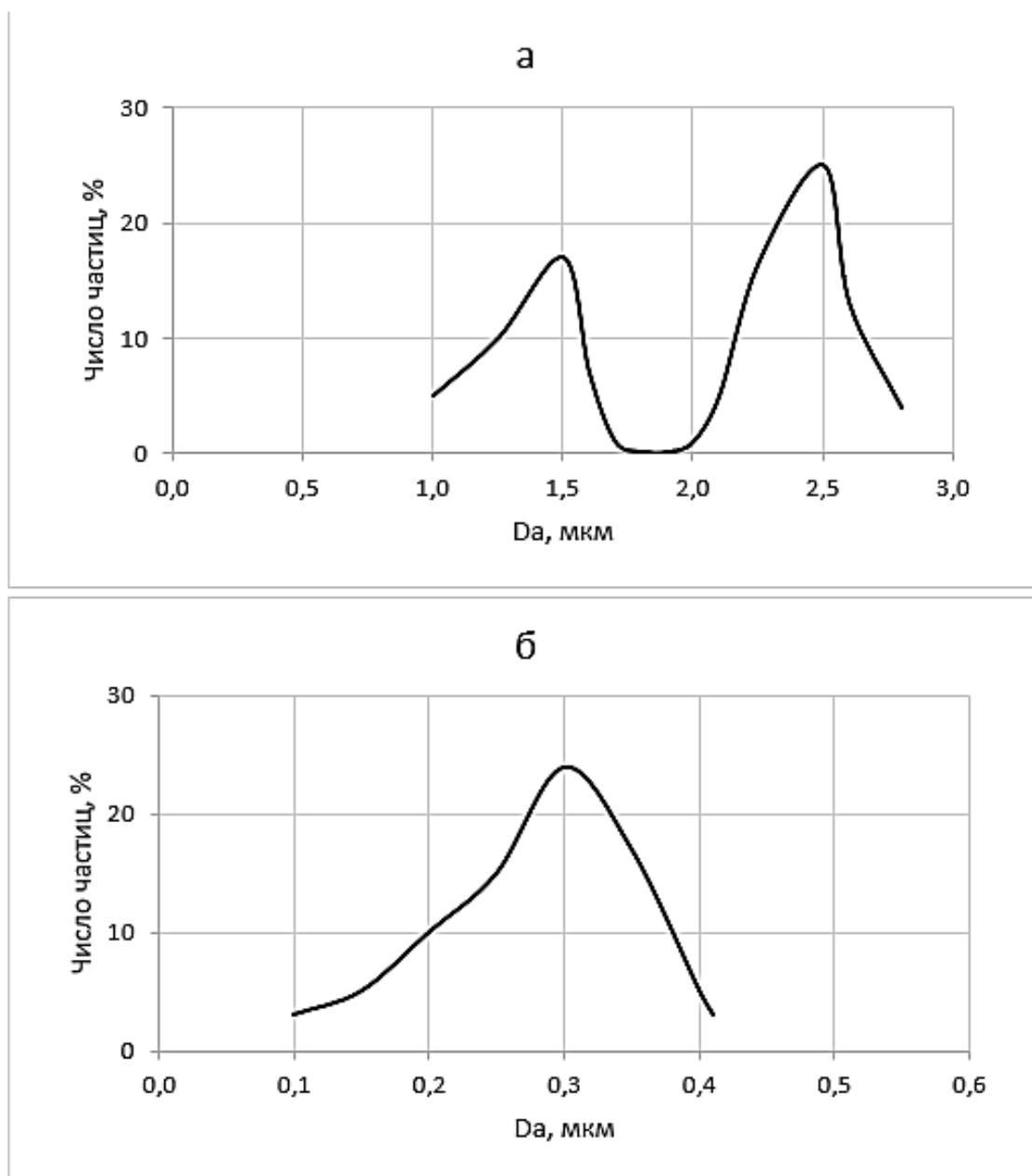


Рис. 2 Распределение частиц по размерам  $D_a$  в AlOOH:  
а – образец, просушенный при  $t_{\text{суш}}=180^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{суш}}=1\text{ч}$ , б – образец, полученный методом сублимационной сушки при  $t_{\text{суш}}=50^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{суш}}=5\text{ч}$ ,  $P=30\text{ Па}$

Методом ДТА показано, что применение криообработки приводит к снижению температуры фазового перехода  $\text{AlOOH} \rightarrow \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  на  $50^\circ\text{C}$ , а последующих переходов  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \theta\text{-Al}_2\text{O}_3$  и  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  на  $40^\circ\text{C}$  и  $70^\circ\text{C}$  соответственно. Полученный порошок  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  характеризуется нанокристаллической структурой с размером кристаллитов  $\sim 7\text{ нм}$ , удельной поверхностью  $S_{\text{уд}} = 258\text{ м}^2/\text{г}$  и мезопористой структурой с объемом пор  $0,64\text{ см}^3/\text{г}$ . Последующее спекания полученных порошков показало, что порошок, синтезированный с использованием криообработки, обладает лучшей спекаемостью: при  $1400^\circ\text{C}$  получена плотная нанокерамика  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  с размером кристаллитов  $57\text{ нм}$  и относительной плотностью  $0,98$ .

## **Выводы.**

Показано, что использование криохимических процессов получения высокопористых материалов и нанодисперсных порошков является более эффективным методом по сравнению с технологией использующую сушку, обжиг или полимеризацию.

Установлено, что для целлюлозных аэрогелей метод криотропного гелеобразования обеспечивает формирование пористой структуры с высокими удельными характеристиками ( $S_{уд}$  до 406 м<sup>2</sup>/г, пористость до 97,5 %). Ультразвуковое воздействие на стадии кристаллизации интенсифицирует процесс зародышеобразования и позволяет управлять структурой материалов.

Установлено, что использование стадии замораживания при синтезе оксида алюминия увеличивает дисперсность получаемого продукта, позволяет снизить температуру фазовых переходов на 50-70 °С, а также интенсифицировать процесс спекания порошков. Для нанопорошков оксида алюминия криохимическая обработка (замораживание при –25°С и сублимационная сушка) позволяет достичь высокой химической однородности, предотвратить агломерацию и сохранить наноразмерное состояние частиц.

Полученные результаты демонстрируют перспективность криохимического метода для создания функциональных материалов с заданными свойствами для применения в сорбционных технологиях, катализе и создании нанокерамики.

## **Список литературы**

1. *Menshutina N. Investigation of Gelation Techniques for the Fabrication of Cellulose Aerogels / N. Menshutina, O. Fedotova, K. Trofimova, P. Tsygankov // Gels. – 2023. – Vol. 9, No. 12. – P. 919.*

2. *Федотова О.В. Процессы переработки целлюлозы в суб- и сверхкритических флюидах, криотропное гелеобразование и сушка: дис. канд. техн. наук. – РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2025 – 135 с.*

3. *Морозова Л.В. Жидкофазный синтез с элементами низкотемпературной обработки различных модификаций оксида алюминия и исследование их физико-химических свойств / Л.В. Морозова // Перспективные материалы. – 2019. – № 9. – С. 54-64.*

4. *Морозова Л.В. Влияние криохимической и ультразвуковой обработки на текстуру, термическое разложение ксерогелей и свойства нанокерамики в системе  $ZrO_2(Y_2O_3)-Al_2O_3$  / Л.В. Морозова, М.В. Калинина, М.Ю. Арсентьев, О.А. Шилова // Неорганические материалы. – 2017. – Т. 53, № 6. – С. 654-661.*

5. *Генералов М.Б. Криохимическая нанотехнология / М.Б. Генералов. – М.: Академкнига, 2006. – 325 с.*

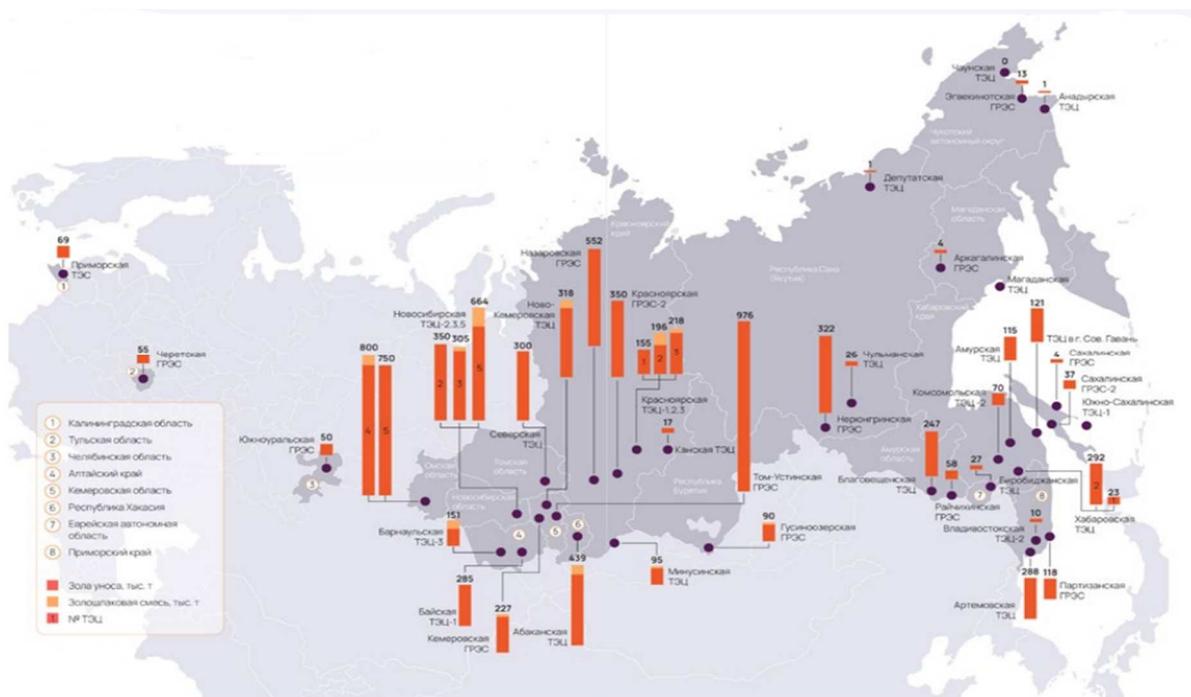
# ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПОДХОДОВ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ЗШО В КАЧЕСТВЕ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

А.С. Киреева  
Тульский государственный университет,  
г.Тула

**Аннотация.** Рассматривается проблема накопления золошлаковых отходов как на территории Тульской области, так и России в целом. Представлены основные направления использования ЗШО на сегодняшний день на территории РФ. Проведён аналитический обзор исследований, где зола-уноса выступает в качестве сорбентов для очистки сточных вод.

**Ключевые слова:** золошлаковые отходы, минеральный состав, зола-уноса, экологическая безопасность, утилизация, сорбент.

Проблема переработки и утилизации ЗШО в России стоит довольно остро и, несмотря на предпринимаемые попытки, доля возвращенных в хозяйственный оборот ЗШО ничтожно мала. В энергетической стратегии России до 2050 г. был установлен целевой показатель использования золошлаков (в % от годового объема образования) в следующем виде: 50 % к 2036 г. и 90 % - к 2050 г. [1] Согласно Минэнерго, в России накоплено порядка 1,5-2,0 млрд тонн ЗШО в результате прошлой хозяйственной или иной деятельности с ежегодным увеличением более 20 млн тонн. Хранение и складирование ЗШО в отвалах сопряжено с такими проблемами как: выведение из промышленного оборота земель, пыление, эрозия почв, загрязнение поверхностных и подземных вод в случае нарушения технологии возведения и эксплуатации, где-то близость отвалов к жилой застройке и др.



Карта образования ЗШО \*

На сегодняшний день в России утилизируется чуть более 10 % ЗШО. Основными направлениями проектов является дорожное строительство (Алтайский край, Иркутская область, Новосибирская область, Приморский край, Республика Хакасия), производство стройматериалов (Алтайский край, Красноярский край, Приморский край), модернизация ТЭС (Забайкальский край, Приморский край, Республика Хакасия, Хабаровский край), рекультивация (Кемеровская область, Красноярский край, Новосибирская область, Хабаровский край) [2].

На территории Тульской области в результате прошлой деятельности ТЭС, ГРЭС было накоплено значительное количество золошлаковых отходов, до сих пор складированных в шлакозолоотвалах.

Минеральный состав ЗШО Щёкинской ГРЭС, %

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	K <sub>2</sub> O	Pb
51,24	1,05	31,83	6,93	0,21	2,17	0,4	0,03	0,78	0,01
Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	C <sub>орг</sub>	Cl	Zn	Sr	Zr	Ba
0,1	0,07	0,04	0,63	1,4	<0,02	0,02	0,01	0,08	<0,01

Химический состав исследуемого образца золошлака характеризуется преобладанием оксида кремния (51,24 %), значительным содержанием оксида алюминия (31,83 %) и меньшими концентрациями оксида железа (6,93 %) и оксида кальция (2,17 %). Органический углерод присутствует в количестве 1,4 %, что может негативно повлиять на последующие процессы сепарации вследствие снижения контрастности технологически значимых свойств. Присутствие серы (0,63 %) и фосфора (0,07 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) рассматривается как нежелательная примесь. Концентрация тяжелых и цветных металлов крайне мала и составляет менее одной сотой процента.

Применение золошлаков ТО в строительной отрасли при производстве композитных материалов, заполнителей бетонов, цементных смесей и др. автору кажется маловероятным ввиду «возраста» ЗШО, большого количества примесей, нестабильности состава отходов, а также режима гидрозолоудаления (наиболее перспективным является метод сухого удаления золы). Исключением является Черепетская ГРЭС, где по данным [3] на сегодняшний момент доступно к отгрузке 55 тыс. тонн золы-уноса. Еще одним перспективным направлением переработки ЗШО является извлечение ценных и редкоземельных металлов. Но такой подход требует высокотехнологичных новых решений, зачастую несопоставимых ни со стоимостью изначального сырья, ни с полученным продуктом, хотя с точки зрения рационального природопользования преимущества очевидны. Еще одним популярным мероприятием по вовлечению золошлаковых отходов в хозяйственный оборот является обратная засыпка горных выработок. Странами-лидерами по использованию такого метода являются Австралия, США и Индия [4]. Однако, следует отметить, что данный подход является экономически целесообразным, только если золошлакоотвал находится до 20 км от объекта рекультивации [5]. По федеральному

классификационному каталогу отходов ЗШО имеют пятый (наименьший) класс опасности, это значит практически неопасные. Рекультивантом полигонов твердых бытовых или промышленных отходов также могут служить ЗШО. Такую практику уже использовала Сибирская генерирующая компания, где золошлаки были использованы при рекультивации полигона размещения отходов одного из предприятий. Рентабельность таких проектов также будет обеспечиваться относительно небольшим расстоянием от мест хранения ЗШО до объекта рекультивации.

Структуру, химический, физико-химический, минеральный состав, свойства ЗШО изучали многие авторы. В работе [6] автором была проведена систематизация данных о возможных способах утилизации с практическим опытом на территории РФ, приведена классификация ЗШО теплоэлектростанций, а также основные характеристики ЗШО. Однако, нет упоминаний о возможном использовании ЗШО в качестве сорбента для очистки вод от поллютантов. Особое внимание привлекает использование летучей золы (золы-уноса).

В работе [7] были проведены исследования и получены положительные результаты по извлечению из сточных вод ионов тяжелых металлов и красителей из водных растворов с использованием золы-уноса в качестве сорбента.

В [8] проведены испытания цеолитов в Индии, полученных на основе летучей золы посредством обработки щелочным раствором гидроксида натрия с последующим термическим воздействием при температуре 90 °С в течение 24 часов, что обеспечило повышение сорбционных характеристик относительно ионов аммония.

В [9] исследователи из Китая провели изучение свойств летучей золы тепловых электростанций, выделив два типа золы – одна с высоким содержанием оксида кальция (37,55 %) и вторая с низким уровнем содержания данного компонента (3,31 %). После химической модификации образцов путём воздействия раствора гидроксида натрия было установлено, что сорбционные характеристики по отношению к ионам аммония составили соответственно 3,17 мг/г с высоким содержанием кальция и 23,8 мг/г с низким.

Сорбционную ёмкость золошлаковых отходов возможно повысить путем реализации различных методов модификации. Среди них выделяются процессы высокотемпературного прокаливания, гидротермальная обработка с использованием растворов щелочей, преимущественно гидроксида натрия (NaOH) или калия (KOH), а также модификация веществами неполярного характера, основанными на кремнийорганических полимерах.

Изучались возможности использования золошлаков и летучей золы в роли сорбентов для выделения метиленового синего из водных сред [10]. Исследуемые образцы подвергались предварительному помолу, просеиванию сквозь сита с диаметром отверстий 245 мкм, сушке и последующему смешению с определёнными массовыми пропорциями растворов натриевого силиката и гидроксида натрия. Полученную смесь доводили до состояния пасты, формировали её и термостатировали в течение суток при 60°С. Доведённый до

сухого состояния материал обозначался термином «геополимер». Перед применением в качестве сорбционного агента указанный геополимер дополнительно дробился и многократно промывался деионизованной водой до стабилизации уровня рН среды до нейтрального значения (рН=7). Раствор метиленового синего начальной концентрации 1000 мг/л готовили путём полного растворения пигмента в деионизованной воде, рабочие же растворы приготавливались методом последовательного разведения основного состава. В ходе эксперимента стандартизированное количество сорбента (0,05 г) вводилось в мерные пробирки, наполненные водным раствором метиленового синего объёмом 20 мл и концентрацией 100 мг/л, уровень рН которого поддерживался постоянным значением 12 с помощью добавления одного молярного раствора гидроксида натрия. Процесс статической сорбции осуществлялся при фиксированных условиях: температуре 27 °С, частоте вращения мешалки 300 оборотов в минуту и длительности процесса 3 часа. По завершении сорбционного периода образованные смеси подвергались процессу разделения на центрифуге при скорости вращения ротора 8000 оборотов в минуту в течение четверти часа для эффективного отделения твёрдой фазы (геополимера). Экспериментально зафиксированная величина эффективности сорбции составляла порядка 36 % при продолжительности взаимодействия реагентов равному 180 минутам.

Согласно исследованию, представленному в источнике [11], авторы синтезировали цеолит путем гидротермального преобразования летучей золы, осуществляемого с использованием раствора гидроксида натрия концентрацией 2 моль/дм<sup>3</sup>. Затем полученный цеолит испытывали на модельных составах и успешно применяли для удаления ионов аммония из сточных вод свиноводческих комплексов. Было показано, что степень снижения концентрации аммония достигала значений 64,34 % для необработанных стоков свинокомплексов и 79,61 % для очищенных стоков, прошедших биоочистку. Эти результаты подтверждают перспективность применения синтетических цеолитов для практического решения проблемы обеззараживания сточных вод животноводства, содержащих аммиачные соединения.

Таким образом, исследования золошлаков в качестве сорбентов для удаления различных форм загрязняющих веществ сточных вод являются весьма перспективными, решающие сразу две основными проблемы: это утилизация золошлаковых отходов и очистка сточных вод.

### Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации № 908-р от 12.04.2025 г. // *Официальный сайт Правительства Российской Федерации.*
2. СПРАВКА о статусе утверждения и реализации региональных программ по повышению объемов использования золошлаков ТЭС / Арвис 15.04.2025г [https://arvis.online/wpcontent/uploads/2025/04/spravka\\_o\\_statuse\\_20250415-4.pdf](https://arvis.online/wpcontent/uploads/2025/04/spravka_o_statuse_20250415-4.pdf)
3. Электронный ресурс: <https://arvis.online/interaktivnaya-karta/>

4. Золотова И.Ю. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС. *Инновации и инвестиции* / И.Ю. Золотова. – 2020. – № 7. – С. 123-128.

5. Gurba L., Heidrich C., Ward C. *Coal combustion products handbook. Australia, Cooperative Research Centre for Coal in Sustainable Development, Australian Black Coal Utilisation Research Limited, 2014. – 414 p.*

6. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций / Е.А. Пичугин // *Проблемы региональной экологии*. 2019. №4. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-obzor-nakoplennoy-v-rossiyskoy-federatsii-opyta-vovlechiya-v-hozyaystvennyy-оборот-zoloshlakovyh-otvodov> (дата обращения: 02.03.2026).

7. Aigbe UO, Ukhurebor KE, Onyancha RB, Osibote OA, Darmokoesoemo H, Kusuma HS, Fly Ash-based Adsorbent for Adsorption of Heavy Metals and Dyes from Aqueous Solution: A Review, *Journal of Materials Research and Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.140>.

8. Yuliani, G. Preparation of zeolite from coal fly ash and its adsorption-desorption behavior on ammonium ion in aqueous solution / G. Yuliani [et al.] // *Journal of Engineering Science and Technology*. – 2020. – Vol. 15, No. 2. – P. 982- 990.

9. Zhang, M. Ammonium removal from aqueous solution by zeolites synthesized from low-calcium and high-calcium fly ashes / M. Zhang [et al.] // *Desalination*. – 2011. – Vol. 277, No. 1-3. – P. 46-53. DOI: 10.1016/j.desal.2011.03.085.

10. Nguyen K.D. Coal fly ash-slag and slag-based geopolymers as an adsorbent for the removal of methylene blue in wastewater / K.D. Nguyen [et al.] // *Science & Technology Development Journal*. – 2022. – Vol. 25, No. 1. – P. 2215-2223. <https://doi.org/10.32508/stdj.v25i1.3421>.

11. Tang H. Removal of ammonium from swine wastewater using synthesized zeolite from fly ash / H. Tang [et al.] // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, No. 8. – P. 3423. <https://doi.org/10.3390/su12083423>.

\* Карта компании kept. Обзор глобальных трендов и решений по переходу к экономике замкнутого цикла. – 2023. <https://inveb-docs.ru/attachments/article/sd-library/04-2024/Globalnye-trendy-ekonomika-zamknutogo-cikla.pdf>.

## **ТЕХНОГЕННЫЕ ОТХОДЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ: СОЛИГОРСКИЕ И ГОМЕЛЬСКИЕ ГОРЫ**

Н.Ю. Макаревич, Н.В. Зык, Е.В. Стрелкова, В.О. Шункевич  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск

**Аннотация.** В статье определены промышленные предприятия Республики Беларусь, имеющие наибольшее количество техногенных отходов - ОАО «Беларуськалий» (галитовые твердые отвалы, глинисто-солевые шламы), РУПП «Гранит» (гранитные отсев, пыль), ОАО «Гомельский химический завод» (фосфогипс). Проблема накопления промышленных отходов рассмотрена в научно-практическом разрезе решения экологических проблем горнодобывающей отрасли промышленного сектора: разработка технологий переработки накопившихся отходов в полезные продукты и избежание образования последующих,

модернизация линий производства и ликвидация нанесенного ущерба окружающей Предложены основные направления их переработки.

**Ключевые слова:** переработка отходов, химическая промышленность, экологическая проблема, техногенная нагрузка на окружающую среду, галитовые отходы, фосфогипс, горноперерабатывающая и горнодобывающая промышленность.

Научно-технический прогресс в области использования и переработки природных ресурсов находится в прямой зависимости от применяемых на промышленных комплексах технологий. В силу несовершенства данных технологических процессов назрела острая проблема накопления крупнотоннажных промышленных отходов и вопрос о рациональном использовании всего природного потенциала добываемого ресурса, тем самым объясняя стремление экологически безопасно развивающегося мира к полному переходу на безотходные технологии производства материалов и продукции.

Статистика использования техногенных отходов в Республике Беларусь по средним показателям за последнее десятилетие составляет около 32 %. В соответствии с общегосударственным классификатором Республики Беларусь ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь» опасные отходы производства классифицируются по классам: 1 класс опасности – чрезвычайно опасные; 2 класс опасности – высокоопасные; 3 класс опасности – умеренно опасные; 4 класс опасности – малоопасные (рис.).

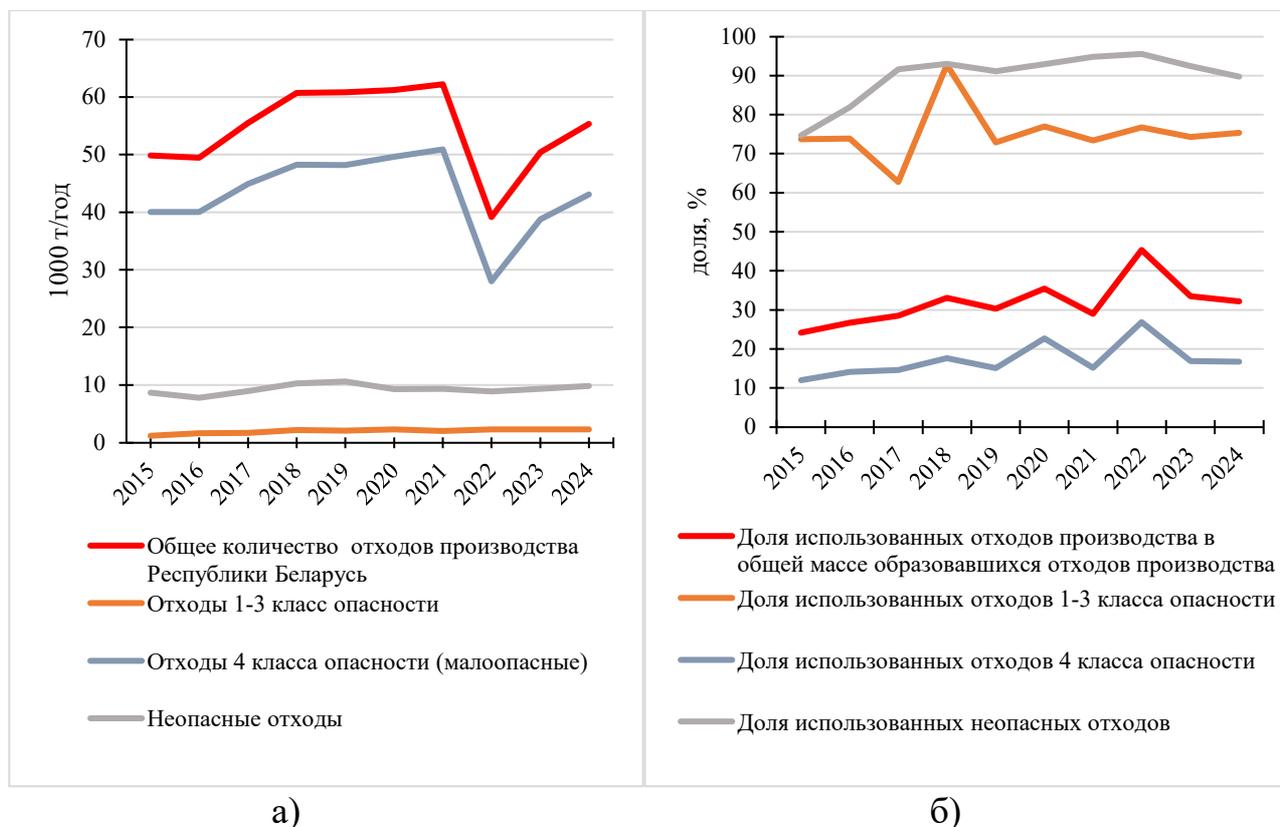


Рис. Статистические данные по техногенным отходам Республики Беларусь за период 2015-2024 гг.:

- а – образование отходов производств общее и по классам опасности 2015-2024 гг.
- б – доля использованных отходов производства в массе образовавшихся отходов производства общее и по классам опасности за 2015-2024 гг.

Наиболее высокий уровень образования промышленных отходов наблюдается в горнодобывающей и горнообрабатывающей отрасли ведущих предприятий страны, таких как ОАО «Беларуськалий» (галитовые твердые отвалы, глинисто-солевые шламы), РУПП «Гранит» (гранитные отсев, пыль), ОАО «Гомельский химический завод» (фосфогипс) и другие масштабные предприятия на территории страны (рис.). Из диаграмм следует, что процент использования таких отходов гораздо ниже, чем темп его образования и накопления. Лидирующую позицию по складированию техногенного массива на территории Республики Беларусь является мировой бренд производства калийных удобрений – ОАО «Беларуськалий» [1]. Ежегодно в отвалы отправляется порядка 15-20 млн. т галитовых отходов и 1,8-2,0 млн. т глинисто-солевых шламов. Отходы хранятся на открытых участках территории предприятий и занимают более 1,9 тыс. га земель. На данный момент в шламохранилищах накопилось более 1 млрд. т. отходов (твердые отходы с NaCl и в виде суспензий водные растворы солей). Во избежание нецелевого использования пахотнопригодных земельных единиц и большего количества рассолов, на каждом рудоуправление внедрена система высотного складирования отходов, достигающая 150 метров, что является фактором просадки в рельефе местности и изменении ландшафта. Сильвин (KCl) – основной продукт предприятия, производится многоэтапным путем переработки (дробление, флотация, сгущение, измельчение, сушка и др.) добытой шахтным способом руды на территории Солигорского района на 6 рудоуправлениях и 4 обогатительных фабриках. Большой массив отходов образуется в силу высокого содержания KCl (94-96 % масс.) в готовой продукции, в отличие от используемого сырья, где полезного компонента в 3-4 раза меньше, порядка 25-30 % в зависимости от горизонта. Разработка технологического процесса переработки накопившегося отхода или модернизация производства линий рудоуправлений и обогатительных фабрик в безотходную технологию в настоящее время не представляется возможным. К другому многотоннажному отходу, как и Солигорские горы, относятся белоснежные горы в г. Гомель – терриконы фосфогипса. Данный отход относится к 4 классу опасности, получается в ходе технологической переработки апатита сернокислым способом, для производства фосфорной кислоты, комплексных минеральных удобрений (КМУ) и различной химической продукции. Хвостовой влажный остаток породы в виде бело-серого комкующегося порошка, в своем составе содержит редкоземельные элементы (РЗЭ), фтор, кислотные остатки и другие примеси, которые влияют на физико-химические свойства вяжущих из техногипса и ухудшает ряд параметров, таких как прочность, влагостойкость, время схватывания, плотность и другие. Сильно усугубляется задача переработки накопившегося техногипса его радиоактивностью – порядка 570-580 Бк/кг, что значительно выше показателя природного минерала гипса – 25-30 Бк/кг, что препятствует широкому его использованию как в строительной индустрии, так и в сельскохозяйственных целях в качестве мелиоранта. Отвалы фосфогипса на территории предприятия занимают порядком 90 га под открытым небом в

объемы более 25 млн. тонн и создают техногенную нагрузку на атмосферные, литосферные, водные ресурсы, биоразнообразие и ландшафт региона. Также дестабилизируется обстановка в социальном секторе на фоне белых терриконов, высота которых достигает более 100 м. Для хранения фосфогипса в терриконах необходимо выделение новых земельных площадок, так как используется отход в малой доле (1-1,5 %), остальная часть идет на долгосрочное хранение и накопление. Направление переработки техногенных отходов с каждым годом привлекает больше внимания со стороны научного сектора. Повышенный спрос, и добыча некоторых видов природных ресурсов, способствует необходимости в разработке технологий привлечения в оборот альтернативных сырьевых баз техногенных отходов промышленных предприятий.

### Список литературы

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс] – Режим доступ: <http://www.belstat.gov.by> – Дата доступа: 04.12.2024.

## МОНИТОРИНГ СОСТАВА СТОЧНЫХ ВОД В СИСТЕМЕ ВОДООТВЕДЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ МУП «РУБЦОВСКИЙ ВОДОКАНАЛ»)

А.В. Кузнецова, А.С. Стребкова  
Алтайский государственный университет,  
г. Барнаул

***Аннотация.** В статье рассматривается деятельность МУП «Рубцовский водоканал» по очистке сточных вод в городе Рубцовске. Представлены результаты лабораторного мониторинга качества воды на входе (гидроузел) и выходе (биопруд) системы за период 2020-2024 годов. Анализ полученных данных демонстрирует стабильное соответствие очищенной воды установленным нормативам. В заключении обозначены направления модернизации и реконструкции очистных сооружений города.*

***Ключевые слова:** Сточные воды, водоотведение, водные ресурсы, устойчивое развитие, водопользование, водоснабжение.*

Загрязнение сточными водами водных ресурсов является одной из ключевых экологических проблем современности. Сточные воды, особенно неочищенные или недостаточно очищенные, содержат большое количество загрязняющих веществ, таких как органические соединения, патогенные микроорганизмы, тяжелые металлы, азотные и фосфорные соединения. Попадая в водоемы, они ухудшают качество воды, вызывают снижение уровня растворенного кислорода, что негативно сказывается на водных организмах и экосистемах в целом.

Согласно Федеральному закону Российской Федерации «О водоснабжении и водоотведении» сточные воды централизованной системы водоотведения (сточные воды) – принимаемые от абонентов в централизованные системы

водоотведения воды, а также дождевые, талые, инфильтрационные, поливомоечные, дренажные воды, если централизованная система водоотведения предназначена для приема таких вод. Состав и свойства сточных вод определяются как совокупность показателей, характеризующих физические, химические, бактериологические и другие свойства сточных вод, в том числе концентрацию загрязняющих веществ, иных веществ и микроорганизмов в сточных водах [1].

Существует несколько типов сточных вод в зависимости от их происхождения, состава и уровня загрязнения:

1. По происхождению: хозяйственно-бытовые сточные воды; промышленные сточные воды; атмосферные сточные воды.

2. По степени загрязнения: слабо загрязненные; среднезагрязненные; сильно загрязненные.

3. По составу загрязнителей: органические; неорганические; химические [2].

В свою очередь, процесс очистки сточных вод состоит из нескольких этапов, которые обеспечивают удаление загрязнений различной природы: механическая; биологическая; химическая очистки; глубокая очистка и обезвреживание [2].

Очистка сточных вод представляет собой комплексный и многоступенчатый процесс, направленный на поддержание экологического равновесия и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. Правильное и ответственное обращение со сточными водами является фундаментом экологической безопасности и устойчивого развития, обеспечивая сохранение экосистем и благополучие будущих поколений.

Рассмотрим работу по очистке сточных вод с последующим водовыпуском на примере МУП «Рубцовский водоканал». Город Рубцовск расположен в юго-западной части Алтайского края, в Алейской степи на левом берегу реки Алей. Рельеф занимаемой территории равнинный, местность степная. По правую сторону реки Алей и реки Склюихи расположены низменные и заливные луга. Помимо степных территорий в районе имеются и участки, занятые лесом. Лесополосы и пойма реки – забока – обильны различной по ярусности растительностью [3].

Современные очистные сооружения в г. Рубцовске представляют собой канализационные станции, оснащённые оборудованием для механической и биологической очистки, включая песколовки, аэротенки, первичные и вторичные отстойники, а также биологические пруды. Данные очистные объекты обслуживают бытовые и производственные стоки, что помогает предотвращать загрязнение реки Алей и окружающей среды. Центральная химико-бактериологическая лаборатория МУП «Рубцовский водоканал» аккредитована на соответствие требованиям государственных и международных стандартов, на основании этого имеет право самостоятельно выполнять анализы воды и сточной жидкости, необходимые в ходе выполнения производственных процессов. Компетентность лаборатории подтверждается согласно

установленной периодичности. Объемы и периодичность лабораторно-производственного контроля определены ежегодными графиками, согласованными в рамках действующего законодательства РФ [4].

В централизованной системе водоотведения города Рубцовска 100 % хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод, попадающих в систему водоотведения, поступают на очистку. В общем объеме очищенных сточных вод хозяйственно-бытовые сточные воды составляют 80,1 %, промышленные сточные воды – 19,9 % [5].

Оценка воздействия сбросов сточных вод с централизованной системы водоотведения г. Рубцовска в водный объект – р. Алей производится по результатам лабораторного мониторинга качества речной воды в створе сброса в точках: выше выпуска (гидроузел), ниже выпуска (биопруд – озеро Горькое).

Технологические зоны отведения стоков обусловлены наличием замкнутых систем водоотведения. В Рубцовске существует две технологически замкнутые системы водоотведения с разными технологиями очистки сточных вод.

По группам абонентов поступление сточных вод показано на рисунке 1 [5].



Рис. 1. Прием стоков по зонам в городе Рубцовск [5]

Рассматривая объем водоотведения по каждой из зон, можно сказать, что наибольший объем приходится на производственную зону, а именно на производственные предприятия Рубцовска (около 73 % на общий объем водоотведения), далее идет жилая зона (около 17 %) и общественно-деловая зона (приходится около 10 %) [5].

Основные производственные предприятия, которые осуществляют сброс сточных вод, представлены на карте города Рубцовска (рис. 2).



Рис. 2. Основные производственные предприятия, которые осуществляют сброс сточных вод [6]

Для оценки эффективности работы очистных сооружений МУП «Рубцовский водоканал» были изучены показатели с гидроузла (южная часть города Рубцовск на реке Алей) и биопруда (в 10 км на север от города), которые являются начальной и конечной точками в очистке сточных вод города. Отбор проб с гидроузла позволяет контролировать исходное качество речной воды перед её подачей в городскую систему водоснабжения, а пробы из биопруда отражают степень биологической очистки и эффективность снижения загрязнений сточных вод, поступающих в природные источники. Сбор данных проводится ежегодно, за исключением биопруда. Там показатели собираются приблизительно раз в два года в зависимости от его наполненности. Далее проводится обработка и анализ информации, предоставленной МУП «Рубцовский водоканал».

Средние значения состава сточных вод с гидротехнического узла, впадающих в реку Алей, а также нормативы по этим показателям, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Состав воды на очистных сооружениях водопровода МУП «Рубцовский водоканал» за 2020-2024 года [7; 8]

Определяемый показатель	Единица измерения	Норма	Количество	Год				
				2020	2021	2022	2023	2024
Водородный показатель	ед. рН	6-9	12	8,2	8,2	8,2	8,2	8,3
Мутность	мг/дм <sup>3</sup>	20	12	7,14	9,42	5,49	11,68	11,89
Хлориды	мг/дм <sup>3</sup>	1000	4	18,12	11,85	12,49	14,42	8,47
Сульфаты	мг/дм <sup>3</sup>	1000	4	45,87	40,02	44,63	44,38	37,45
Нефтепродукты	мг/дм <sup>3</sup>	10	12	<0,005	<0,005	0,006	0,008	0,006
АПАВ	мг/дм <sup>3</sup>	0,01-10	12	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015

Средние значения состава сточных вод из биопруда, представленные в таблице 2, собираются в мае.

Таблица 2

Сведения о составе воды из биопруда за 2021-2023 года [7; 9]

Определяемый показатель	Единица измерения	Норма	Год		
			2021	2022	2023
Водородный показатель	ед. рН	6-9	8,9	8,6	8,5
БПК <sub>5</sub>	мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	300	4,67	3,28	2,12
Хлориды	мг/дм <sup>3</sup>	1000	181	167	220
Сульфаты	мг/дм <sup>3</sup>	1000	289	228	225
Нефтепродукты	мг/дм <sup>3</sup>	10	0,45	0,3	менее 0,3
АПАВ	мг/дм <sup>3</sup>	0,01-10	0,071	0,024	0,048

Все исследуемые показатели находятся в пределах допустимых нормативов. Водородный показатель воды находится близко к установленным нормативным значениям. В течение рассматриваемого периода наблюдалось снижение показателей по биохимическому потреблению кислорода (БПК<sub>5</sub>), сульфатам и содержанию нефтепродуктов. Остальные параметры значительно ниже предельно допустимых норм.

На основании анализа данных мониторинга за 2020-2024 гг. установлено, что качество очищенной воды на сооружениях МУП «Рубцовский водоканал» характеризуется как стабильно удовлетворительное и соответствующее установленным нормативам. Проведенная оценка динамики ключевых физико-химических показателей выявила следующие закономерности: значения водородного показателя сохраняются в пределах стабильной слабощелочной реакции; параметры мутности, демонстрируя некоторые сезонные колебания, не превышают нормативных уровней; концентрации хлоридов и сульфатов остаются на стабильно низком уровне, а содержание нефтепродуктов и АПАВ не

достигает пороговых значений. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применяемой технологии очистки и отсутствии системных нарушений в работе предприятия, что подтверждается устойчивыми значениями всех контролируемых параметров в течение пятилетнего периода наблюдений.

К перспективным направлениям по повышению эффективности очистки сточных вод в Рубцовске относится разработка комплексной стратегии, сочетающей техническую модернизацию, внедрение инновационных технологий и использование природных ресурсов. Важным аспектом развития является реконструкция критически важной инфраструктуры, в частности канализационных коллекторов и очистных сооружений, что обеспечивает непрерывный и технологически полноценный процесс водоотведения.

Значительное улучшение качества очистки достигается за счёт применения современных методов обеззараживания, таких как использование диоксида хлора, что повышает как экологическую безопасность, так и экономическую эффективность процесса. Интеграция естественных методов доочистки, например, через биопруды, играет важную роль в снижении нагрузки на основные очистные сооружения и уменьшении антропогенного воздействия на водные объекты [10].

Неотъемлемой частью стратегии является внедрение комплексного мониторинга качества сточных вод с использованием современных лабораторных методов, что обеспечивает своевременное выявление нарушений установленных нормативов и оперативное реагирование. В Рубцовске уже ведутся масштабные работы по реконструкции главного канализационного коллектора с использованием современных технологий, таких как гидродинамическая промывка и спирально-навивной метод восстановления труб. Также проводится капитальный ремонт и модернизация очистных сооружений с внедрением прогрессивных биологических и механических методов обработки сточных вод. Данные мероприятия финансируются в рамках федеральных проектов и национальных программ, что обеспечивает всестороннюю поддержку модернизации коммунальной инфраструктуры города.

### Список литературы

1. *О водоснабжении и водоотведении: федеральный закон Российской Федерации от 07.12.2011 №416-ФЗ (ред. от 08.08.2014).* – Текст: электронный // КонсультантПлюс. – Режим доступа: по подписке.
2. *Что такое сточные воды* // URL: <https://www.gidrolica.ru/info/glossary/stochnye-vody/>
3. *Рубцовский район* // URL: <https://akunb.altlib.ru/o-tsentre-ekologiya/ekologicheskaya-karta-altaya/rubtsovskiy-rayon/>
4. *МУП «Рубцовский водоканал»* // URL: <https://vodokanal.rubtsovsk.ru/>
5. *Схема водоснабжения и водоотведения муниципального образования город Рубцовск Алтайского края до 2025 г.* // URL: [https://rubtsovsk.org/sites/default/files/shema\\_vodosnabzheniya\\_s\\_podpisyu.pdf?ysclid=mgz9xedrpy127431346](https://rubtsovsk.org/sites/default/files/shema_vodosnabzheniya_s_podpisyu.pdf?ysclid=mgz9xedrpy127431346) (дата обращения: 20.10.2025).

6. Google Earth // URL: <https://earth.google.com/web/?hl=ru>

7. Об утверждении правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации: Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 №644 (ред. от 28.11.2013) – Текст: электронный // КонсультантПлюс. – Режим доступа: по подписке.

8. Состав воды на очистных сооружениях водопровода МУП «Рубцовский водоканал» за 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 года // МУП «Рубцовский водоканал».

9. Сведения о составе воды из биопруда с 01.05.2021 г. по 31.05.2021 г., 01.05.2022 г. по 31.05.2022 г., 01.05.2023 г. по 31.05.2023 г. // МУП «Рубцовский водоканал».

10. Первые итоги работы новой станции обеззараживания воды подвели в Рубцовском водоканале // Вести Алтай. 2024. URL: <https://vestialtai.ru/news/pervye-itogi-raboty-novoy-stantsii-obezzarazhivaniya-vody-podveli-v-rubtsovskom-vodokanale/>

## НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОМЕРЗШИХ ГРУНТАХ

К.А. Головин, В.О. Белевцев  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

**Аннотация.** При промерзании водонасыщенные грунты увеличиваются в объеме, что вызывает напряжения и деформации. В замкнутых системах происходит сжатие грунта, а в хорошо проницаемых – разрыв структурных связей. Массивное пучение связано с накоплением льда из-за миграции влаги, усиливающейся при высокой плотности миграционного потока и низкой скорости замораживания.

Плотность миграционного потока влаги ( $J_w$ ) и деформация пучения ( $h_w$ ) зависят от теплопроводности, температурного градиента и скорости промерзания. Усадка определяется составом грунта и условиями промерзания. В глинистых грунтах вклад миграционного льда в пучение выше, чем в песчаных.

Ускорение промерзания снижает пучение, а приток влаги из водоносного горизонта увеличивает. Пригрузка уменьшает пучение. Высокие скорости промерзания создают равномерное распределение льда, а после полного промерзания происходит перераспределение влаги и вторичное пучение. Растворимые вещества и искусственные добавки могут снижать пучинность грунта.

**Ключевые слова:** пучения, грунты, промерзания, льда, миграционного, влаги, потока, усадке, воды, давления, величина, промерзающих, накопление, снижает, системах, напряжения, повышенном, массивного, увеличении, плотности, градиенты, скорости деформация, глины, водонасыщенные.

При промерзании водонасыщенные грунты увеличиваются в объёме из-за расширения воды при замерзании. В замкнутых системах это вызывает напряжения между частицами грунта из-за давления кристаллизации льда, что приводит к их сжатию, изменению ориентации и пластическому движению. В оттаивающих грунтах напряжения возникают только при повышенном давлении в мёрзлом блоке или при обезвоживании и усадке талого грунта. В хорошо

проницаемых водонасыщенных грунтах (пески, гравий) при промерзании вода перемещается вниз (поршневой эффект), что приводит к разрыву структурных связей в талых грунтах под действием гидростатического давления. При наличии водоупорного горизонта формируются напорные надмерзлотные или внутримерзлотные воды, величина массивного пучения которых вычисляется следующим образом

$$H_f = 0,09 (W_{\&} - W_{uf}) \&$$

где:  $\&$  – глубина промерзания,  $W$  – объёмное содержание влаги на границе со стороны талой зоны;  $W_{uf}$  – количество незамёрзшей воды.

При повышенной влажности происходит массивное пучение промерзающих грунтов. Исследования установили, что накопление льда в результате миграции влаги в зону замерзания определяет величину пучения. Накопление льда и пучение усиливаются при увеличении плотности миграционного потока (высокие градиенты потенциала, повышенная проводимость) и при снижении скорости замораживания. На этих зависимостях основаны расчёты и приближённые количественные оценки.

Поток влаги, вызванный миграционным льдом, зависит от влагопроводности грунта, свойств жидкостных пленок, их температурной зависимости, температурного градиента и скорости промерзания. Деформации усадки определяются составом и структурой грунта; условия промерзания имеют значительное влияние. При промерзании тонкодисперсных грунтов иногда наблюдается их сжатие, когда усадка превышает пучение.

Вклад миграционного льда в пучение промерзающей каолининовой глины составляет 80-95 %, в то время как в промерзающих иловых, суглинистых и песчаных грунтах не превышает 50-60 %. Массивное пучение в глинистых грунтах ограничено 20 % и достигает 70-80 % в супесчаных грунтах из-за более низкого содержания связанной воды. Увеличение усадочных деформаций наблюдается от супесей к суглинкам и глинам, при этом пучение поверхности уменьшается на 20 % в каолининовой глине и на 10 % в суглинке; в супесчаных грунтах усадка почти не проявляется. Максимальные значения миграционного потока фиксируются в глинистых грунтах, хотя их пучение часто меньше, чем в суглинках. Ускорение процесса промерзания снижает суммарное накопление льда и величину пучения. Промерзание в «открытой» системе с притоком влаги из водоносного горизонта вызывает резкое увеличение пучения и напряжений по сравнению с «закрытой» системой. При промерзании под давлением (пригрузкой) пучение уменьшается за счёт снижения плотности миграционного потока.

При высоких скоростях промерзания образуются значительные температурные градиенты, усиливающие миграционный поток влаги, однако короткий период миграции ограничивает накопление льда, обеспечивая почти равномерное распределение льда по глубине промерзающего слоя. После полного промерзания в мерзлом состоянии происходит перераспределение влаги и льда, изменение криогенной структуры и вторичное пучение, интенсивность

которого снижается с глубиной; датчики в приповерхностном слое фиксируют наибольшие смещения. Наличие растворимых веществ в грунте существенно влияет на пучение. Соли, оставшиеся после морского подъема или эвапотранспирации, снижают температуру промерзания и уменьшают пучинность, однако их эффект кратковременен. Искусственные добавки дают аналогичный результат: обработка каолинита 1,5 % сульфитными щелочами уменьшила пучение с 22,19 мм до 0,78 мм; формальдегид снижает его до 3,42 мм, но является канцерогеном. Следовательно, применение нетоксичных химических веществ может эффективно снижать величину пучения.

### Список литературы

1. Баулин В.И. *Напряженное состояние промерзших грунтов* / В.И. Баулин. – М.: Стройиздат, 1987. – 192 с.
2. Герсеванов Н.М. *Основы динамики грунтов* / Н.М. Герсеванов. – М.: Госстройиздат, 1948. – 248 с.
3. Дерюгин П.П. *Механика мерзлых грунтов* / П.П. Дерюгин. – М.: Высшая школа, 1979. – 288 с.
4. Зотов В.В. *Напряженно-деформированное состояние мерзлых грунтов при строительстве* / В.В. Зотов. – М.: Стройиздат, 1985. – 160 с.
5. Иванов Н.И. *Основы механики мерзлых грунтов* / Н.И. Иванов. – М.: Стройиздат, 1970. – 320 с.
6. Казаков В.С. *Механика мерзлых грунтов* / В.С. Казаков. – М.: Стройиздат, 1981. – 240 с.
7. Кривошеин А.А. *Напряжения и деформации в мерзлых грунтах* / А.А. Кривошеин. – Новосибирск: Наука, 1978. – 184 с.

## ГАЗЫ В ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ И ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПРИ ТАЯНИИ ЛЬДА

К.А. Головин, В.О. Белевцев  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

*Аннотация.* Вечная мерзлота является естественным хранилищем газов. Эти газы могут находиться как в порах грунта, так и быть «запертыми» в структуре кристаллов льда. Источниками этих газов служат атмосферный воздух, продукты разложения органических веществ, а также газы, выделяемые живыми корнями растений. Перемещение этих газов происходит путем диффузии, и часто их присутствие связано с залежами нефти и газа. Среди этих газов преобладают двуокись углерода и водород, а также присутствуют метан, этан, пропан и бутан. При определенных условиях, например, при наличии достаточного количества кислорода, эти газы могут постепенно высвободиться в атмосферу или даже вызывать взрывы в горных породах. Газовые гидраты представляют собой образования, где молекулы газов встроены в кристаллическую решетку льда. Эта решетка имеет гексагональную структуру с достаточно большими пустотами. Газы с небольшими молекулами, такие как метан, этан, пропан, входят в состав газовых гидратов, что делает их потенциально важными для энергетического сектора. При таянии вечной

*мерзлоты и освобождении газов происходит изменение рельефа местности, так как высвобождающиеся газы могут приводить к образованию пустот и оседанию грунта. Это может вызвать оползни и другие геологические процессы, влияющие на экосистему и климат. Таким образом, изучение газов в вечной мерзлоте и их влияние на формирование рельефа является важной задачей для понимания последствий глобального потепления.*

**Ключевые слова:** *давления, потеплением, породах, твердые, плато, атмосферный, залежами, преобладают, кристаллическую, метастабильные, слоистостью, полигональных, преимущественно, постледниковой, совокупность, факторами.*

Вечная мерзлота является естественным хранилищем газов. Эти газы могут находиться как в порах грунта, так и быть «запертыми» в структуре кристаллов льда. Источниками этих газов служат атмосферный воздух, продукты разложения органических веществ, а также газы, выделяемые живыми корнями растений. Перемещение этих газов происходит путем диффузии, и часто их присутствие связано с залежами нефти и газа. Среди этих газов преобладают двуокись углерода и водород, а также присутствуют метан, этан, пропан и бутан. При определенных условиях, например, при наличии достаточного количества кислорода, эти газы могут постепенно высвобождаться в атмосферу или даже вызывать взрывы в горных породах.

Газовые гидраты представляют собой образования, где молекулы газов встроены в кристаллическую решетку льда. Эта решетка имеет гексагональную структуру с достаточно большими пустотами. Газы с небольшими молекулами, такие как метан, этан, пропан, изобутан и углекислый газ, могут проникать в эти пустоты, если они присутствуют в горной породе. При низких температурах и высоком давлении эти газы конденсируются, образуя твердые кристаллические структуры, известные как клатраты или газовые гидраты. При разложении этих гидратов твердый газ превращается обратно в газообразное состояние, что сопровождается значительным увеличением объема. Ярким примером такого явления стал случай на Мархинской скважине в Якутии в 1963 году. Исследования показали, что зоны распространения вечной мерзлоты и газовых гидратов в российской Арктике обширны, и подобные залежи были обнаружены и в Северной Америке.

Газовые гидраты обычно залегают на глубинах от примерно 140 до 1860 метров от поверхности (Judge, 1982). Однако под океанами они могут образовываться и на меньших глубинах, если давление воды достаточно велико. Недавние находки газовых гидратов были сделаны в горах Цилян (38°06' с.ш., 99°10' в.д., высота 4057 м) и в бассейне Куньлунь-Шаня (Xu et al., 1999; Lu et al., 2011; Wu et al., 2015). В горах Куньлунь газовые гидраты были обнаружены в четырех скважинах на глубинах от 133 до 396 метров. При разложении кристаллы газовых гидратов превращаются в пористую ледяную структуру, а выделяющийся газ легко воспламеняется.

Существует предположение, что газовые гидраты могут находиться и в других участках вечной мерзлоты, в частности, вдоль северного края плато Цинхай-Тибет и на северо-востоке Китая. Иногда газовые гидраты сохраняют стабильность даже в условиях, которые, казалось бы, не допускают их существования (Истомин, 1998). Современные исследования часто объясняют

эти метастабильные состояния гидратов их устойчивостью по отношению к твердым фазам. Феномен самосохранения газовых гидратов, который пока не до конца изучен, может быть связан с образованием ледяной пленки на поверхности метастабильного гидрата при температурах ниже 271 К. При этом температура может быть как отрицательной, так и положительной по Цельсию, а давление газа может отличаться от атмосферного. Это приводит к гистерезису – разнице между условиями образования и распада газовых гидратов.

#### Формирование рельефа при таянии льда

Термокарст – это совокупность форм рельефа и структур, возникающих в результате таяния подземного льда. Эти явления особенно распространены в современных условиях. Их широкое распространение объясняется двумя основными факторами: во-первых, общим потеплением климата, начавшимся после последнего ледникового периода (примерно 25 000-12 000 лет назад), и во-вторых, локальным потеплением, наблюдаемым в последние полвека в таких регионах, как Якутия и Цинхай-Тибетское плато. Эти процессы усугубляются изменениями, связанными с хозяйственной деятельностью человека.

В период последнего крупного оледенения большая часть территории Канады была покрыта ледниками. Вследствие этого, современная вечная мерзлота в основном сформировалась в равновесии с климатом голоцена и является постледниковой по возрасту. Тем не менее, климатическое потепление, достигшее пика в климатический оптимум около 6000 лет назад, а затем сменившееся Малым ледниковым периодом и последующим потеплением, привело к значительным термокарстовым изменениям в районах, которые во время крупных ледниковых периодов были покрыты вечной мерзлотой.

Значительные территории Сибири, не будучи покрытыми ледниками из-за сухого климата, тем не менее, испытывали очень холодные условия в течение каждого из основных ледниковых эпизодов последних 3,5 миллионов лет. Это способствовало развитию вечной мерзлоты на глубину до 1100 метров в некоторых районах. Повторяющиеся холодные периоды, чередующиеся с теплыми межледниковьями, несомненно, приводили к многократным циклам термокарстового развития.

В южной и центральной Сибири, а также на Северо-Востоке Китая, значительная часть вечной мерзлоты является реликтовой и продолжает адаптироваться к более теплему климату голоцена. Здесь основные термокарстовые формы, такие как якутские аласы (котловины и долины, образовавшиеся в результате таяния подземного льда и проседания поверхности), сформировались преимущественно во время климатического оптимума около 6000 лет назад.

В период позднего Висконсинского (или Сартанского в Западной Сибири) оледенения (29 000-12 000 лет назад) на юге, особенно на Цинхай-Тибетском плато, преобладали очень холодные условия. Об этом свидетельствуют каменные полигоны, или тесселлоны (rock tessellons) – полигональные трещины, заполненные обломками пород, которые образовались там в последние тысячелетия позднего Висконсинского оледенения. Термин «тесселлон»

(tessellon) был впервые предложен Певе (Pewe, 1959) для описания песчаных полигональных жил с характерной вертикальной слоистостью.

### Список литературы

1. Алексеев В.Р. Вечная мерзлота и ее свойства / В.Р. Алексеев. – М.: Наука, 1980. – 240 с.
2. Базаров Б.М. Газовые гидраты / Б.М. Базаров. – М.: Недра, 1990. – 288 с.
3. Глушков А.И. Газовые гидраты в криолитозоне / А.И. Глушков. – Якутск: Изд-во СО РАН, 2005. – 312 с.
4. Дерпгольц В.Ф. Вечная мерзлота / В.Ф. Дерпгольц. – М.: Госгеолтехиздат, 1951. – 304 с.
5. Каминский В.Д. Газовые гидраты в осадочных породах / В.Д. Каминский. – М.: Недра, 1985. – 240 с.
6. Колчунов А.Н. Газовые гидраты в вечной мерзлоте / А.Н. Колчунов. – М.: Наука, 1992. – 180 с.
7. Кузнецов В.И. Вечная мерзлота и ее освоение / В.И. Кузнецов. – М.: Стройиздат, 1977. – 288 с.

## МОРОЗНОЕ ПУЧЕНИЕ

К.А. Головин, В.О. Белевцев  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

**Аннотация.** *Замерзание воды в горных породах вызывает их пучение (увеличение объема и подъем), что является сложным процессом, зависящим от множества факторов и имеющим значительные последствия для геологических процессов и инженерного строительства в холодных регионах.*

**Ключевые слова:** *порода, пучение, лед, воды, горный, величина, замерзание, вода, вторичный, мерзлый, образование, первичный, промерзание, процесс, температура, фронт, влияние внутри, минеральный, оттаивание, слой увеличение, условие, глубина, давление, деформация, дополнительный, засоленность, измерение, мерзлота, направление, охлаждение, перераспределение.*

Когда жидкая вода превращается в лед, ее объем увеличивается примерно на 9 %. Это естественное расширение оказывает воздействие на окружающие горные породы, даже если вода не поступает дополнительно к зоне промерзания. Однако, если вода активно перемещается к фронту замерзания, проблема усугубляется. Изначально образующийся лед может скреплять минеральные частицы породы. Но из-за увеличения объема льда по сравнению с водой, горная порода сжимается, становясь более плотной. По мере образования все большего количества льда, давление внутри породы достигает уровня давления веса вышележащих слоев. Дальнейшее образование льда приводит к подъему этих верхних слоев, пропорциональному избытку льда. Этот процесс, известный как

первичное пучение, происходит за счет энергии, выделяющейся при замерзании воды (скрытая теплота плавления). Величина первичного пучения возрастает с увеличением притока воды к фронту промерзания. Направление этого подъема совпадает с направлением роста ледяных кристаллов, что подтверждается ориентацией минеральных включений и пузырьков воздуха в породе. Скорость и степень охлаждения воздуха не оказывают существенного влияния на величину пучения, и его точный прогноз остается сложной задачей. Тем не менее, существуют методы расчета.

Сложности в прогнозировании пучения связаны с непредсказуемостью движения воды к фронту замерзания и величины теплового потока к поверхности породы. В то же время, ниже фронта промерзания происходит обезвоживание и последующая усадка горных пород.

#### Измерение и характеристики пучения

Для измерения пучения горных пород на разных глубинах используются специальные приборы – телескопические трубки (пучиномеры). Эти приборы позволяют отслеживать вертикальные перемещения породы в течение года, сопоставляя их с температурными данными. Исследования показали, что пучение может продолжаться на протяжении всей зимы, даже после полного промерзания породы. Например, магнитные датчики зафиксировали увеличение расстояния между ними на 40 и 58 см на глубине около 1,25 м в течение весны 1984 года.

Первичное пучение обычно составляет от 60 % до 70 % от максимально возможного полного пучения. После первичного этапа, горные породы могут подвергаться вторичному пучению, которое происходит уже в мерзлом состоянии. Предполагается, что оно вызвано перераспределением воды внутри мерзлой породы и накоплением дополнительного льда. Вторичное пучение негативно сказывается на физико-механических свойствах породы. При оттаивании лед исчезает, порода уплотняется, что приводит к осадке при оттаивании.

#### Влияние засоленности на пучение

В засоленных горных породах, которые часто встречаются на Арктическом побережье, величина пучения значительно меньше – примерно в два раза по сравнению с незасоленными породами. В таких условиях также наблюдается меньшее образование мощных активных слоев.

Это явление имеет важное значение для геологических процессов и инженерного строительства в холодных регионах. Понимание механизмов пучения и его последствий позволяет принимать меры по предотвращению деформаций зданий и сооружений, а также прогнозировать изменения ландшафта.

В частности, вторичное пучение, происходящее в мерзлом состоянии, может быть особенно разрушительным, поскольку оно происходит в условиях уже сформировавшейся мерзлоты и может привести к значительным деформациям. Перераспределение воды внутри мерзлых пород, вызывающее

вторичное пучение, может быть связано с капиллярными силами и градиентами температуры.

Осадка при оттаивании, следующая за пучением, также является серьезной проблемой. Уплотнение породы после исчезновения льда приводит к оседанию поверхности, что может вызвать повреждение фундаментов и других конструкций.

Влияние засоленности на пучение объясняется тем, что растворенные соли понижают температуру замерзания воды. Это означает, что для образования льда в засоленных породах требуется более низкая температура, и процесс замерзания происходит медленнее и менее интенсивно. Кроме того, соли могут влиять на структуру льда и его взаимодействие с минеральными частицами, что также снижает величину пучения.

Таким образом, пучение горных пород является сложным многофакторным процессом, который зависит от множества условий, включая состав породы, содержание воды, температуру, скорость охлаждения и наличие солей. Его изучение и учет необходимы для успешного освоения территорий с вечной мерзлотой.

### **Список литературы**

1. *Абрамов С.М. Пучение грунтов при промерзании / С.М. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1988. – 160 с.*
2. *Алексеев В.Р. Термокарст / В.Р. Алексеев. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1991. – 240 с.*
3. *Баулин В.И. Пучение и просадки грунтов / В.И. Баулин, В.Д. Каминский, П.Д. Ковалев. – М.: Стройиздат, 1982. – 240 с.*
4. *Гербова О.В. Криогенные процессы и явления / О.В. Гербова. – М.: Наука, 1979. – 184 с.*
5. *Ершов Э.Д. Общая геология / Э.Д. Ершов. – М.: Высшая школа, 2002. – 464 с.*
6. *Каменский Р.М. Инженерная геология / Р.М. Каменский. – М.: Высшая школа, 1984. – 320 с.*
7. *Кривошеин Д.А. Основы механики мерзлых грунтов / Д.А. Кривошеин, В.И. Смирнов. – М.: Стройиздат, 1985. – 288 с.*

## **КРИОСТРАТИГРАФИЯ, КРИОСТРУКТУРЫ, КРИОТЕКСТУРЫ И КРИОФАЦИИ ПУЧИНИСТОСТЬ ГРУНТОВ**

К.А. Головин, О.И. Белевцев, В.О. Белевцев  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

*Аннотация.* Криостратиграфия, как наука, представляет собой фундаментальную дисциплину, изучающую мерзлые горные породы в верхних слоях Земли. Ее основная задача – не просто описать наличие этих пород, но и раскрыть сложную историю их формирования, анализируя расположение слоев относительно друг друга. Каждый слой, каждая

*особенность в его структуре и составе, является своего рода летописью, повествующей об условиях, в которых он образовался, о климатических изменениях и геологических процессах, происходивших на протяжении тысячелетий.*

**Ключевые слова:** порода, пучение, лед, воды, горный, величина, замерзание, вода, вторичный, мерзлый, образование, первичный, промерзание, процесс, температура, фронт, влияние внутри, минеральный, оттаивание, слой увеличение, условие, глубина, давление, деформация, дополнительный, засоленность, измерение, мерзлота, направление, охлаждение, перераспределение.

Наука, изучающая мерзлые горные породы в верхних слоях Земли, называется криостратиграфией. Она исследует, как слои этих пород расположены относительно друг друга и что их расположение говорит об условиях, в которых они образовались.

Сингенетические мерзлые породы формируются одновременно с отложением материала, из которого они состоят (согласно АСGR, 1988). В отличие от них, эпигенетические мерзлые породы замерзают уже после того, как материал был отложен.

Криолитология (попов и др., 1985; Мельников и Спесивцев, 2000) – это раздел литологии, который занимается изучением распределения и количества льда в породе.

Криоструктура (Мертон и Френч, 1994, стр. 738) описывает форму и особенности ледяных включений в грунте. Эти же авторы используют термин криотекстура для обозначения размера и формы кристаллов льда. Однако в терминологии часто встречаются разночтения.

Согласно Шумскому (1964, стр. 6), размер, форма и шероховатость являются структурными параметрами, а пространственное распределение частиц и их взаимосвязь составляют текстуру. Таким образом, в контексте мерзлых пород:

Криоструктура (в России также известная как криогенная структура) – это размер, форма и шероховатость ледяных включений.

Криотекстура (в России также известная как криогенная текстура) – это пространственное распределение ледяных включений и их взаимосвязь.

Криофациальный анализ, предложенный Катасоновым (1969), основывается на общепринятых описательных подходах и концепциях, разработанных в начале 20 века для осадочных пород в Западной Европе и Северной Америке (Петтиджон, 1949; Бейтс и Джексон, 1987, стр. 681). Понятие фации используется для описания изменений в составе осадочных пород в пределах одного стратиграфического горизонта, где фация представляет собой слой или группу слоев, отражающих условия осадконакопления. Соответственно, криофация – это слой мерзлых пород, образовавшийся в конкретных условиях промерзания.

Эта стандартизированная терминология крайне важна для единообразного описания разрезов мерзлых пород и содержащегося в них льда. Однако, учитывая постоянное движение незамерзшей воды в мерзлых породах под воздействием температурных градиентов, возникает вопрос о реальной стабильности криотекстур.

Мертон и Френч (1994) выделили семь типов криотекстур в мерзлых отложениях Туктояктукской низменности: нетекстурированные (Sl), линзовидные (Le), слоистые (La), регулярные сетчатые (Rr), нерегулярные сетчатые (Ri), корковые (Cr) и взвешенные (Su). Эти криотекстуры могут быть переходными (когда они сочетают черты двух типов, например, нерегулярные сетчатые и линзовидные) или смешанными (когда два типа структур встречаются вместе, например, бесструктурные и корковые в песке).

«Пучинистость, или морозочувствительность, – это свойство горных пород, определяющее их склонность к деформациям при замерзании и оттаивании. Она проявляется в миграции влаги к фронту промерзания, образовании ледяных линз, вспучивании грунта и объектов, а также оседании при оттаивании. Хотя единого критерия для оценки пучинистости нет, ключевыми факторами являются размер частиц, содержание мелких фракций и их соотношение (грейдинг). Касагранде (1932) предложил считать пучинистыми породы с более чем 10 % частиц мельче 0,02 мм, а Linell & Kaplar (1959) подтвердили этот критерий, который лег в основу классификации Корпуса инженеров США. Однако этот критерий не всегда точен, так как некоторые гравийные породы с малым содержанием мелких частиц пучатся, а некоторые песчаные с большим – нет. Поэтому для точной оценки необходимы лабораторные испытания. Пучинистость критически важна для проектирования в условиях повышенной влажности и для понимания формирования рельефа в районах вечной мерзлоты, влияя на такие явления, как криотурбации и структурные грунты. В Канаде и США для оценки пучинистости также используют «сегрегационный потенциал», который связывает температурный градиент с потоком влаги к фронту промерзания.»

### Список литературы

1. Алексеев А.С. Криостратиграфия и палеогеография четвертичного периода / А.С. Алексеев. – М.: Наука, 1989. – 240 с.
2. Баулин В.И. Криогенные текстуры и структуры многолетнемерзлых пород / В.И. Баулин. – Якутск: Изд-во СО РАН, 2005. – 180 с.
3. Головин А.А. Криостратиграфия и палеоклимат плейстоцена / А.А. Головин. – М.: Геос, 2012. – 312 с.
4. Ершов Э.Д. Общая геокриология / Э.Д. Ершов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 475 с.
5. Каминский В.Д. Криогенные текстуры и структуры в осадочных породах / В.Д. Каминский. – М.: Недра, 1979. – 192 с.
6. Кривошеин Д.А. Криостратиграфия и палеогеография четвертичных отложений Сибири / Д.А. Кривошеин. – Новосибирск: Наука, 2001. – 210 с.

## УТИЛИЗАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ В РОССИИ: ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО, ПРАКТИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ

М.А. Кудрявцев, Н.Н. Афанасьева  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

*Аннотация.* В Российской Федерации утилизация вторичных ресурсов (ВР) является одним из ключевых направлений экологической и экономической политики. Система переработки отходов и вовлечения их в хозяйственный оборот служит цели снижения нагрузки на окружающую среду, обеспечения промышленности вторичным сырьем и перехода к экономике замкнутого цикла. В условиях ежегодного образования порядка 50-60 миллионов тонн твердых коммунальных отходов (ТКО) создание эффективной системы обращения с вторичными ресурсами приобретает стратегическое значение как для федерального, так и регионального уровней управления.

Правовой основой функционирования системы переработки отходов служат Федеральный закон от 24 июня 1998 года № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», а также федеральные программы и постановления, направленные на стимулирование переработки и ответственности производителей. Одним из значимых нововведений стало внедрение механизма расширенной ответственности производителя (РОП), вступившего в силу с 2024 года. Согласно реформе, производители и импортеры обязаны обеспечить 100 % утилизацию упаковки и товаров, утративших потребительские свойства, что создает финансовую мотивацию к развитию собственной перерабатывающей инфраструктуры или оплате экологического сбора [1]. Для субъектов, не осуществляющих самостоятельную переработку, ставка экологического сбора рассчитывается с учетом коэффициентов, стимулирующих использование вторичного сырья, а требования к учету и отчетности обеспечивают прослеживаемость сырья [2].

Юридическое закрепление понятий «вторичные ресурсы» и «вторичное сырье» с 1 марта 2023 года стало важным шагом для вовлечения отходов в производственный цикл. Вторичные ресурсы определяются как отходы, пригодные для повторного использования в производстве товаров, оказании услуг или для получения энергии, тогда как вторичное сырье является конечным продуктом переработки, готовым к промышленному применению. Эта нормативная база упрощает оборот сырья, стимулирует отдельный сбор и повышает эффективность использования ВР.

На федеральном уровне управление и координацию деятельности по обращению с вторичными ресурсами осуществляет Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России) совместно с Российским экологическим оператором (РЭО). Минпромторг разрабатывает отраслевые программы и стратегические инициативы, регулирует стандарты переработки и стимулирует внедрение новых технологий, включая химический и механический рециклинг пластика, переработку электронных и строительных отходов. Российский экологический оператор координирует

работу региональных операторов, ведет учет ТКО и внедряет современные инструменты контроля и отчетности, обеспечивая прозрачность и эффективность системы [3].

Региональные органы власти отвечают за реализацию федеральной политики на местах, разработку региональных программ переработки отходов, надзор за объектами II и III категорий по объемам отходов и их переработке, а также управление региональными ресурсами. Например, в субъектах с развитой инфраструктурой (Московская и Белгородская области, Санкт-Петербург, Татарстан) внедряются двухконтейнерные системы сбора, работают крупные экотехнопарки, а доля переработки ТКО приближается к федеральным целевым показателям. В удаленных регионах, особенно на Дальнем Востоке и Крайнем Севере, существуют проблемы логистики и недостаток мощностей, что затрудняет эффективное вовлечение вторичного сырья.

Основные виды вторичных ресурсов включают пластик, бумагу и картон, металлы и стекло, а также специализированные отходы, такие как резинотехнические изделия, строительные материалы и электронное оборудование. Пластик перерабатывается в гранулы для производства упаковки и синтетического волокна, бумага и картон – в гофрокартон и строительные материалы, металлы – многократно, что обеспечивает значительную экономию энергии, а стекломой – в новую тару и строительные материалы. Специализированные отходы перерабатываются с использованием механических и высокотехнологичных гидро- и пирометаллургических процессов, позволяя извлекать ценные металлы и создавать вторичное сырье для промышленного применения [4].

Отрасль сталкивается с рядом проблем, включая низкое качество сортировки отходов, высокие экономические и логистические барьеры, недостаток мощностей глубокой переработки и нестабильный спрос на продукцию из вторичного сырья. Стоимость первичного сырья часто ниже вторичного, что снижает экономическую привлекательность переработки, а расстояния между источниками отходов и перерабатывающими предприятиями повышают логистические издержки.

В перспективе развитие отрасли строится на реализации принципов экономики замкнутого цикла. Национальные проекты и федеральные программы предусматривают к 2030 году обеспечение 100 % сортировки ТКО и двукратное сокращение захоронения отходов [5]. Государство стимулирует переработку через субсидии, налоговые льготы и льготное кредитование, а также внедрение механизма экологического заказа, обеспечивающего гарантированный сбыт продукции из вторичного сырья. Эти меры создают условия для масштабного вовлечения ВР в промышленный оборот и перехода к циклической экономике.

Таким образом, система утилизации вторичных ресурсов в России представляет собой многоуровневый механизм управления, где стратегическое планирование и нормативное регулирование сосредоточено на федеральном уровне, координация и надзор – на региональном, а непосредственная реализация переработки – на уровне операторов и муниципальных структур.

Современные инициативы направлены на повышение технологической глубины переработки, цифровизацию контроля и стимулирование экономической активности в отрасли, однако дальнейшее совершенствование системы требует расширения инфраструктуры, унификации подходов к переработке и усиления экологической ответственности населения и бизнеса.

### Список литературы

1. *Об отходах производства и потребления: Федеральный закон от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ (в ред. от 25.12.2023) // Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».*

2. *Об утверждении перечня видов отходов от использования товаров...: Постановление Правительства РФ от 29.12.2023 г. № 2394 // Доступ из справочно-правовой системы «Гарант».*

3. *Отчетные данные о ходе реализации федерального проекта «Комплексная система обращения с ТКО» за 2023 год / Российский экологический оператор (РЭО). – [Электронный ресурс]. – URL: <https://reo.ru/news/> (дата обращения: 03.11.2025).*

4. *Проект отраслевой программы «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в промышленном производстве» / Минпромторг России. – [Документ, определяющий приоритетные направления переработки].*

5. *Паспорт национального проекта «Экология»: утвержден Президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24 декабря 2018 г. № 16).*

## СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Ю.Д. Исаева

Тульский государственный университет,  
г. Тула

***Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена потребностью в совершенствовании инструментов экологического управления, требующих перехода от пассивного сбора данных к их активной аналитической обработке для непосредственной поддержки принятия решений. В статье рассматривается проблема преодоления разрыва между массивами данных экологического мониторинга и процедурами принятия управленческих решений.*

Современная экологическая повестка характеризуется усилением антропогенной нагрузки, ужесточением международных и национальных нормативов и ростом общественного запроса на экологическую безопасность. В этих условиях эффективное управление качеством окружающей среды перестает быть факультативной задачей, становясь основой для обеспечения устойчивого развития отраслей промышленности. Ключевым элементом такого управления

является своевременное получение объективной, всесторонней и структурированной информации о состоянии природных сред.

Однако на практике процесс принятия управленческих решений в экологической сфере часто сталкивается с системными информационными барьерами. С одной стороны, наблюдается дефицит релевантных данных, существующие пункты наблюдений могут не покрывать всю территорию, а измеряемые параметры не всегда соответствуют конкретным задачам. С другой стороны, возникает проблема анализа полученных данных, информация от разрозненных источников слабо структурирована и не пригодна для анализа в целях управления. Это приводит к тому, что решения принимаются на основе устаревшей или неполной информации [1].

Анализ эволюции систем экологического мониторинга выявляет пять ключевых, но часто разрозненных подходов:

1. Локальные измерительные комплексы. Они обеспечивают высокую достоверность данных в точке, но лишены пространственного охвата и интеграции для стратегического управления. Методы: стандартизованные методики отбора проб, использование поверенных анализаторов.

2. ГИС-системы. Эффективны для пространственной визуализации и картографирования, но слабы в углубленном временном анализе и автоматическом выявлении скрытых паттернов. Методы: интерполяция, наложение слоев.

3. SCADA-системы. Подход, заимствованный из промышленной автоматике, направлен на оперативный контроль параметров в реальном времени. Критически важны для оперативного реагирования на аварии, но не содержат инструментов для ретроспективного анализа, прогнозирования и работы со сложными многомерными зависимостями. Методы: сбор данных с телеметрических датчиков, пороговая сигнализация.

4. IoT-платформы и Big Data. Решают проблемы масштабируемого сбора и агрегации разнородных данных, но не предлагают готовых аналитических моделей для поддержки принятия решений. Методы: потоковая обработка, облачные хранилища.

5. Методы Data Mining и Machine Learning. Фокусируются на алгоритмической составляющей. Статистические методы (на основе интерквартильных размахов, z-score), методы, основанные на расстояниях (k-NN, Local Outlier Factor), и ансамблевые методы на основе деревьев решений, такие как Isolation Forest и Random Forest. Последние особенно перспективны для многомерных экологических данных, так как способны выявлять сложные нелинейные аномалии без предположения о нормальности распределения и устойчивы к шуму.

Разработка модели базируется на принципах системного анализа и функционального моделирования (IDEF0), что позволяет рассматривать ИИС как целенаправленную систему. Ключевым требованием к аналитическому модулю выступает способность детектировать сложные многомерные аномалии в потоковом режиме [2]. Алгоритм Isolation Forest наиболее полно отвечает

поставленным условиям благодаря своей непараметрической природе, вычислительной эффективности и устойчивости к шуму.

Предлагаемая модель реализуется в виде пятиуровневой архитектуры, где поток данных последовательно преобразуется в информацию для лица, принимающего решение (ЛПР).

Уровень 1 (измерительно-сенсорный). Он включает сеть гетерогенных датчиков (газоанализаторы, метеостанции). Его функция первичная фиксация параметров окружающей среды.

Уровень 2 (сетевой). Обеспечивает сбор и консолидацию данных с периферии в единый центр.

Уровень 3 (систематизация данных). Организует структурированное хранение, обеспечивая доступ к историческим и текущим данным.

Уровень 4 (аналитический). Выполняет функцию интеллектуальной обработки. В его составе центральное место занимает модуль обнаружения аномалий на основе Isolation Forest. Алгоритм работает следующим образом:

1. На исторических данных обучается ансамбль изолирующих деревьев.
2. Для каждого нового многомерного наблюдения (вектор, содержащий, концентрации  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $PM_{2.5}$ ) вычисляется средняя длина пути в деревьях, необходимая для его изоляции.
3. На основе этого пути рассчитывается коэффициент аномальности. Объекты с короткими путями (легко изолируемые) идентифицируются как аномалии.

4. Результатом работы модуля является поток событий с метками аномалий, их оценкой значимости и связанными параметрами.

Уровень 5 (визуализация). Адаптирует выходы аналитического ядра (списки аномалий, прогнозы) через веб-интерфейсы и системы оповещения.

Модель можно встроить в управленческий цикл PDCA (Plan-Do-Check-Act) [3].

- Plan (планирование). ЛПР анализирует отчёты о выявленных аномалиях, сформированные системой, для постановки экологических целей.
- Do (выполнение). Принимается и реализуется конкретное решение (например, проверка источника).
- Check (проверка). Система непрерывно контролирует данные после вмешательства, оценивая, привело ли оно к нормализации показателей или породило новые аномалии.
- Act (действие). Результаты контроля поступают к ЛПР, формируя основу для корректировки стратегии. Таким образом, аномалия, обнаруженная Isolation Forest, становится триггером для полного управленческого цикла.

Предложенная структурно-функциональная модель ИИС экологического мониторинга, центральным интеллектуальным компонентом которой является метод обнаружения аномалий Isolation Forest, обеспечивает системе способность автоматически выявлять сложные, неочевидные угрозы в многомерных данных. Модель служит мостом, переводящим ИИС из состояния пассивного регистратора в статус активного инструмента поддержки решений.

Перспективой развития модели является интеграция модуля причинно-следственного анализа для автоматической гипотезы об источнике выявленной аномалии.

### Список литературы

1. Безбородова О.Е. Имитационное моделирование взаимодействия человека и объекта техносферы в информационно-измерительных и управляющих системах обеспечения экологического благополучия человека // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2023. – №1 (45). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-vzaimodeystviya-cheloveka-i-obekta-tehnosfery-v-informatsionno-izmeritelnyh-i-upravlyayuschih-sistemah>
2. Бурый А.С., Ловцов Д.А. Информационные структуры умного города на основе киберфизических систем // *Правовая информатика*. – 2022. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye-struktury-umnogo-goroda-na-osnove-kiberfizicheskikh-sistem>
3. Попов Е.В. Эволюция цифровых технологий управления территорией // *Экономика и управление*. – 2025. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-tsifrovyyh-tehnologiy-upravleniya-territoriey>

## ТОПЛИВНО-ЭНЕРГИТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ И ИХ РОЛЬ В РАЗВИТИИ СТРАНЫ

И.А. Ерёмчев, Н.Н. Афанасьева  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

*Аннотация.* Использование топливно-энергетических ресурсов оказывает значительное воздействие на окружающую среду. От выбора источника энергии зависят объемы выбросов парниковых газов, загрязняющих веществ и степень разрушения экосистем. Развитие возобновляемых источников энергии позволяет снизить негативное воздействие энергетики на природу и обеспечить устойчивое будущее для последующих поколений.

Российская Федерация обладает уникальным и диверсифицированным по видам топливно-энергетическим комплексом, что обеспечивает ей высокий уровень энергетической самодостаточности.

Ископаемые ресурсы (уголь, нефть, газ) остаются основой энергобаланса и бюджетных поступлений. Уголь, несмотря на значительные экологические издержки, связанные с открытой добычей (нарушение ландшафтов, воздействие на водоносные горизонты) и высокими выбросами загрязняющих веществ (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) при сжигании, сохраняет свою значимость благодаря доступности запасов и низкой себестоимости добычи, особенно в ключевых бассейнах (Кузбасс, Канско-Ачинский). Его роль постепенно трансформируется в сторону применения более чистых технологий сжигания и газификации [1].

Нефть и природный газ – главные экспортные товары и основа финансовой стабильности страны. Запасы сосредоточены в Западной Сибири, Поволжье и на Урале. Доминирование государственных и квазигосударственных корпораций («Роснефть», «Газпром», «ЛУКОЙЛ») определяет централизованную модель управления сектором. Будущее нефтегазового комплекса связано с необходимостью технологического обновления (разведка, добыча на шельфе, трудноизвлекаемые запасы), диверсификации экспортных маршрутов (поворот на Восток) и адаптации к растущему спросу на низкоуглеродные технологии [2].

Гидроэнергетика представляет собой один из наиболее чистых в части атмосферных выбросов источников энергии. Мощнейшие ресурсы сосредоточены в Сибири (Ангара-Енисейский каскад). Однако крупное гидростроительство влечет за собой серьезные социально-экологические издержки: затопление территорий, переселение населения, нарушение экосистем рек. Современный акцент смещен на модернизацию существующих мощностей [2, 3].

Атомная энергетика является стратегическим направлением, где Россия сохраняет лидирующие позиции в мире благодаря госкорпорации «Росатом». Развитие основано на технологиях новых поколений (реакторы на быстрых нейтронах, повышающие эффективность использования топлива и снижающие объем отходов) и инновационных проектах (плавающие АЭС). После чернобыльской аварии безопасность стала абсолютным приоритетом, что отразилось в многоуровневых системах пассивной защиты, современных стандартах проектирования и подготовке персонала. Атомная энергетика рассматривается как ключевой элемент низкоуглеродной энергетики будущего [1].

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) выполняет в российской экономике мультипликативную роль, выступая одновременно как: 1) основной источник валютной выручки (до 60 % экспорта); 2) значительный contributor в ВВП (около 20 %); 3) ключевой донор федерального бюджета; 4) фундамент энергетической безопасности; 5) драйвер смежных отраслей (машиностроение, трубопроводный транспорт, химическая промышленность) [4].

Такая глубокая интеграция создает системные риски, формируя «ресурсное проклятие» в современном проявлении:

Макроэкономическая нестабильность. Бюджет и курс национальной валюты критически зависят от конъюнктуры мировых цен на нефть и газ. Их резкое падение приводит к бюджетному дефициту, девальвации, инфляции и сокращению инвестиционных программ.

Структурные диспропорции. Гипертрофированное развитие сырьевого сектора может сдерживать инвестиции и инновации в обрабатывающие и высокотехнологичные отрасли, создавая барьеры для диверсификации экономики.

Инвестиционные и технологические вызовы. Волатильность цен делает долгосрочные и капиталоемкие проекты (освоение Арктического шельфа, трудноизвлекаемые запасы) высокорисковыми, требуя особых механизмов государственной поддержки.

Внешиполитическая уязвимость. Энергетика становится инструментом

геополитического давления, а зависимость от транзитных маршрутов и конкретных рынков сбыта создает дополнительные риски.

Интенсивная эксплуатация ТЭР сопряжена с масштабным воздействием на окружающую среду: загрязнение атмосферы парниковыми газами и токсичными веществами, деградация земель, аварии с разливами нефти, нарушение водных экосистем. Эти проблемы напрямую влияют на качество жизни населения и несут долгосрочные экономические издержки.

В ответ на глобальные климатические тренды и внутренние экологические проблемы формируются новые приоритеты:

Повышение экологической эффективности традиционного ТЭК: внедрение технологий улавливания и хранения углерода (CCS), «зеленых» стандартов добычи, газификации угля, сокращение факельного сжигания попутного газа [2, 4].

Стимулирование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Несмотря на огромный потенциал солнечной, ветровой и геотермальной энергии, их доля в энергобалансе незначительна. Требуется создание стимулирующего регуляторного режима и инфраструктуры.

Развитие водородной энергетики и новых низкоуглеродных направлений, где Россия также обладает значительным технологическим и ресурсным потенциалом.

### **Список литературы**

1. Министерство энергетики РФ. (2023). Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. М.
2. BP. (2024). *Statistical Review of World Energy 2024*.
3. Руководство по оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) для объектов гидроэнергетики. (2021). М.: Минприроды России.
4. Гурвич Е.Т., Прилепский И.В. Влияние цен на нефть и обменного курса на доходы бюджетной системы / Е.Т. Гурвич, И.В. Прилепский // «Вопросы экономики», 2023. – № 9. – С. 85-104.

## **АВТОНОМНАЯ ПОЗИЦИОННАЯ СТАНЦИЯ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

А.А. Маслова, В.А. Браун  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

***Аннотация.** В статье рассмотрена автономная позиционная станция мониторинга загрязнения водных объектов, принцип работы которой заключается в том, что датчики фиксируют значения измеряемых параметров и передают их в береговой модуль. Контроллер проводит сопоставление полученных данных с эталонными значениями, хранящимися в его базе данных (памяти). После чего, на основании данного анализа, он генерирует управляющий сигнал для корректировки глубины погружения модуля, который затем передается на устройство управления глубиной. Измеренные датчиками значения параметров водной среды через контроллер поступают на устройство внешней связи, которое в свою очередь передаёт их в центр сбора информации как результаты наблюдений.*

Вопросы методологии и методики прогнозирования неблагоприятных экологических ситуаций подлежат дальнейшему изучению и разработке. В рамках данной проблематики можно выделить несколько ключевых аспектов, требующих особого внимания:

1. трудности, связанные со сбором и обработкой исходных данных;
2. сложность экосистем и ограничения традиционных методов прогнозирования.
3. отсутствие достаточной систематизации методических материалов.

Для решения этих проблем предлагается учитывать современные разработки, инновационные методики мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций по водоемам.

Прогнозирование, включая его экологический аспект, сталкивается с множеством препятствий, которые можно классифицировать на четыре основные категории:

- общепрогностические;
- общегеографические;
- информационные;
- организационно-управленческие.

Особого внимания заслуживают информационные проблемы, поскольку их решение непосредственно влияет на качество прогностических моделей и, как следствие, на их достоверность и применимость в практической деятельности (по методикам оценки комплексного воздействия и расчетам снижения концентраций загрязнения от этих воздействий).

Несмотря на продолжительную историю исследований в области краткосрочного гидрологического прогнозирования с разработкой методов и наличие передовых модельных инструментов, достижение высококачественного прогноза остаётся сложной задачей. Основные проблемы связаны с недостаточным пониманием физических процессов формирования стока, их комплексной и индивидуальной спецификой для каждого водосборного бассейна, а также с дефицитом достоверных и полных данных наблюдений [1].

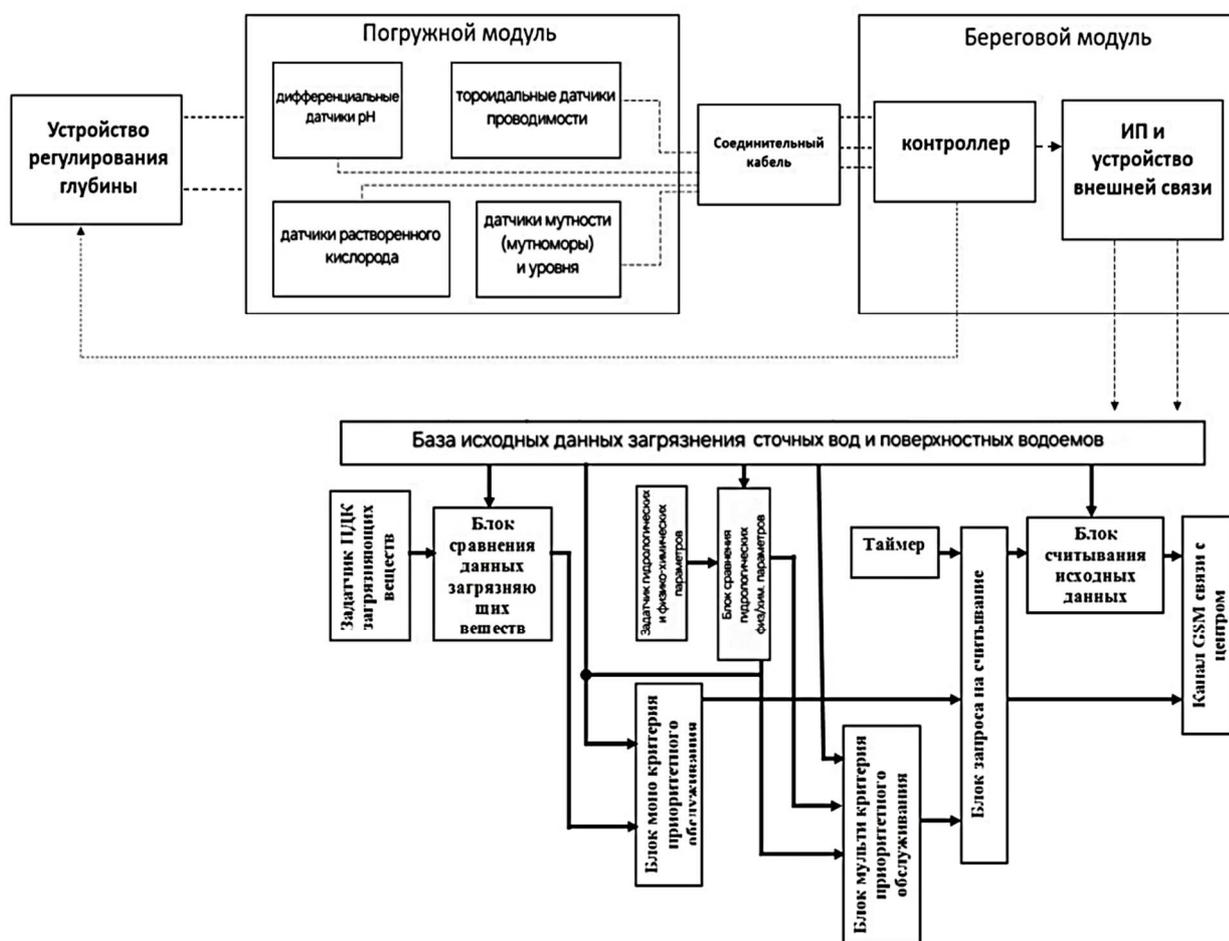
Комплексное и детализированное моделирование процессов загрязнения поверхностных водных объектов, включая прогнозирование эколого-гидрологических рисков в промышленно освоенных зонах, позволяет минимизировать погрешности и эффективно решать задачи, связанные с разработкой оптимальной конфигурации сети мониторинга (стационарных и мобильных постов), а также с оценкой вклада конкретных промышленных объектов в общий уровень загрязнения.

Разработана автономная позиционная станция мониторинга водной среды, которая состоит из следующих элементов:

- погружной модуль (зонд). В нём размещены датчики контроля, измеряющие гидрологические и физико-химические параметры исследуемого водного объекта, источник питания и коммутационное устройство для опроса измерительных каналов;
- соединительный кабель, обеспечивающий передачу зарегистрированных данных от датчиков в береговой модуль;

- береговой модуль. Включает в себя контроллер, устройство внешней связи и источник питания (ИП);
- устройство регулирования глубины погружения. Оно связано с якорем и получает сигнал от контроллера для изменения глубины погружения модуля.

На рисунке представлена структурная схема автономной позиционной станции мониторинга загрязнения водных объектов.



Структурная схема автономной позиционной станции мониторинга загрязнения водных объектов

Принцип работы автономной позиционной станции мониторинга загрязнения водных объектов заключается в следующем: датчики фиксируют (регистрируют) значения измеряемых параметров и передают их в береговой модуль. Контроллер сравнивает полученные от датчиков значения с контрольными, занесёнными в его память. Контроллер проводит сопоставление полученных данных с эталонными значениями, хранящимися в его базе данных (памяти). После чего, на основании данного анализа, он генерирует управляющий сигнал для корректировки глубины погружения модуля, который затем передается на устройство управления глубиной [2]. Измеренные датчиками значения параметров водной среды через контроллер поступают на устройство внешней связи (рисунок), которое в свою очередь передаёт их в центр сбора информации как результаты наблюдений.

Для минимизации корреляционных связей между постами наблюдения и обеспечения объективной оценки качества моделирования применяется метод главных компонент PCA (Principal Component Analysis), который заключается в преобразовании исходной системы координат, представленной матрицей коррелированных данных, в новую систему координат.

Исходный набор переменных трансформируется в новый набор переменных в U-пространстве, известный как главные компоненты. Количество главных компонент соответствует числу исходных переменных, однако они не коррелируют между собой и являются ортогональными. В процессе формирования U-пространства дисперсии главных компонент систематически уменьшаются от первой к последней, в совокупности достигая общей дисперсии исходной совокупности данных.

### Список литературы

1. Сучилина З.А. Краткосрочное прогнозирование стока реки Уссури: методика и специфика / З.А. Сучилина, Б.И. Гарцман, Л.В. Гончуков // *Гидросфера. Опасные процессы и явления.* – 2024. – Т. 6. – Вып. 3. – С. 231-249.
2. Куликовский К.Л. Информационно-измерительная система перспективного прогнозирования экологического состояния водных экосистем / К.Л. Куликовский, А.Н. Толокнова // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки.* – 2012. – № 3(35). – С. 56-61.

## ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В УПРАВЛЕНИИ РИСКАМИ

А.А. Маслова, А.А. Качалова  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

*Аннотация.* Статья посвящена исследованию проблематики математического моделирования и прогнозирования аварийного риска, которое позволяет сделать вывод о том, что современные подходы в области мониторинга техносферы постепенно переходят от реактивного анализа последствий к предиктивному управлению рисками, основанному на больших данных, машинном обучении и цифровом моделировании.

В современных условиях обеспечение безопасности техносферы и окружающей среды невозможно без развития информационно-измерительных систем мониторинга, которые обеспечивают непрерывное наблюдение за параметрами состояния как технических объектов, так и природной среды. Такие системы позволяют не только фиксировать текущее состояние инфраструктуры и природных компонентов, но и формировать данные для оценки и прогнозирования аварийного риска, а также оперативного принятия решений по управлению последствиями [1].

Системы мониторинга окружающей среды включают сенсорные сети,

дистанционное зондирование, беспилотные летательные аппараты, спутниковые платформы, а также автоматизированные системы обработки и визуализации данных. В одном из обзоров отмечено, что интеграция пространственных и временных данных (одномерных, двумерных и трёхмерных) существенно повышает точность и эффективность мониторинга рисков при строительстве объектов электросетевого транспорта. Например, данные о микроклимате, изменениях растительного покрова, состоянии почвы и гидрологических условиях комбинируются с параметрами технической инфраструктуры, что даёт возможность вычленивать ранние признаки повышения риска аварии на этапе строительства и эксплуатации.

В контексте техносферы важно, что мониторинг окружающей среды рассматривается не как автономный аспект, а как интегральный элемент системы безопасности: изменения в природной среде могут влиять на долговечность и надёжность технических систем, а сами аварии техногенного характера часто создают экологические последствия. Нужно подчеркнуть, что техносфера – это динамическая система, тесно связанная с другими сферами Земной системы, и мониторинг среды должен быть включён в оценку рисков техносферы.

Практическое применение систем мониторинга включает создание геоинформационных систем (ГИС) и карт риска, которые позволяют визуализировать экспозицию населения, инфраструктуры и природной среды к потенциальным авариям или экологическим факторам [2]. Информационная система для территориального управления рисками может быть более продвинутой, где модули «Экосфера», «Техносфера» и «Социосфера» объединены, и мониторинговые данные по атмосфере, водным ресурсам и состоянию промышленности применяются для количественной оценки риска. Это позволяет получить раннее предупреждение о ситуациях, которые могут перерасти в аварии или техногенные инциденты.

Мониторинг окружающей среды также важен для управления последствиями аварийных событий. После аварии данные мониторинга помогают оценить распространение загрязнения, угрожаемость здоровья населения, экологический ущерб и определить зоны вмешательства. Системы раннего предупреждения и реагирования становятся частью целостной стратегии управления риском. Например, концепция раннего предупреждения предусматривает: мониторинг и предупреждение; оповещение и коммуникацию; и систему реагирования.

Выводя на уровень управления, необходимо отметить, что внедрение систем мониторинга способствует формированию резко-ориентированной культуры и процессов внутри предприятий и органов управления. Мониторинг позволяет не просто фиксировать аварии, но активизировать превентивные меры: техническое обслуживание, инспекции, изменение параметров эксплуатации, автоматическое отключение оборудования при отклонениях. Современные технологии (IoT-устройства, облачные платформы) делают эти системы более оперативными и адаптивными, что даёт преимущество в управлении риском.

Реальные практические примеры демонстрируют, как теоретические

подходы к моделированию аварийного риска находят применение в мониторинге техносферы и окружающей среды. Они иллюстрируют особенности анализа данных, построения моделей и принятия мер по снижению риска.

Один из таких примеров – авария на трубопроводе Sinopet в Китае – утечка нефти и взрыв на участке «Donghuang». Исследователи использовали уточнённую модель причинно-следственных связей аварии, где непосредственные причины и коренные причины (дефициты системы управления безопасностью и культуры безопасности) выявлялись через последовательный анализ. Это позволило не просто реконструировать событие, но и извлечь уроки для предотвращения подобных происшествий: например, усиление инженерных барьеров, улучшение культуры безопасности и повышение ответственности управления.

Другой значимый кейс – исследование в сталелитейной отрасли Кореи. В нём проводился опрос и интервью среди сотрудников, затем данные оценивались на вероятность и тяжесть различных рисков (таких как аварии, взрывы, пожар) и выводились соответствующие меры. Этот пример показывает, как методики, знакомые из теории (вероятность × тяжесть, матрица риска), применяются на производственном предприятии, связаны с мониторингом техносферы и требуют

Каждый из этих примеров подчёркивает ключевые моменты: важность качественных и количественных данных мониторинга, необходимость анализа причинно-следственных цепочек, применение математических моделей для оценки вероятностей и последствий, и, наконец, преобразование результатов в конкретные меры управления (уведомления, технические барьеры, изменения процедур). Такие кейсы демонстрируют, как мониторинговые данные становятся основой для моделирования риска и как модели влияют на практику безопасности и устойчивости.

Современная концепция управления техногенными рисками претерпевает значительные изменения под влиянием цифровизации, климатических вызовов и перехода к устойчивому развитию. Если в конце XX века акцент делался на инженерных методах защиты и реактивном реагировании на аварии, то в XXI веке в центре внимания оказались прогнозирование, предупреждение и интеграция мониторинговых данных в систему принятия решений.

Одной из ключевых тенденций является внедрение цифровых двойников для промышленных и инфраструктурных объектов. Цифровой двойник объединяет геоинформационные, сенсорные и эксплуатационные данные в единую модель, которая отражает реальное состояние объекта в режиме реального времени и позволяет проводить сценарное моделирование. Использование цифровых двойников снижает вероятность аварий в нефтегазовой отрасли на 15-20 % за счёт раннего выявления отклонений в показателях оборудования.

Второе направление связано с развитием искусственного интеллекта (ИИ) и методов предиктивной аналитики. Алгоритмы машинного обучения анализируют потоки данных с датчиков, выявляя скрытые закономерности и аномалии, указывающие на потенциальную угрозу. Применение глубоких

нейронных сетей (LSTM, GNN) позволило повысить точность прогнозирования отказов оборудования на 25 % по сравнению с классическими регрессионными моделями.

Не менее важной тенденцией является интеграция экологического мониторинга с техногенными рисками. В России и Европе развивается концепция «умного мониторинга», в рамках которой данные о загрязнении воздуха, водных объектов и почв сопоставляются с промышленными и транспортными потоками. Например, система «ЭкоМониторинг-РФ» позволяет в реальном времени отслеживать влияние аварийных выбросов на качество атмосферного воздуха и прогнозировать зоны возможного превышения ПДК [3].

С точки зрения стратегического управления, важным направлением является переход от реактивного подхода к адаптивному управлению рисками. В классической модели риск считался статической величиной (фиксированное значение вероятности и ущерба), но современная практика рассматривает риск как динамическую функцию времени и внешних условий. Это особенно важно в условиях изменяющегося климата, когда природные факторы (температура, влажность, осадки) напрямую влияют на вероятность аварий в техносфере.

Однако вместе с технологическими достижениями сохраняется ряд проблем. Во-первых, недостаточная интеграция данных: в России до сих пор часто разделены экологический, промышленный и санитарный мониторинг, что снижает эффективность оценки совокупного риска. Во-вторых, человеческий фактор остаётся одной из основных причин аварий – по данным Ростехнадзора (2024), более 60 % инцидентов связаны с нарушением регламентов персоналом. В-третьих, дефицит квалифицированных кадров в области цифрового анализа и управления рисками ограничивает внедрение интеллектуальных систем мониторинга.

Отдельное внимание уделяется вопросам нормативного обеспечения. В России продолжается развитие системы стандартизации в области анализа и управления рисками (ГОСТ Р 51901.11–2005, ГОСТ Р 22.10.06-2022 и др.), однако их внедрение в практику остаётся неполным. В 2025 году в рамках нацпроекта «Экология и безопасность» запланировано создание единой цифровой платформы мониторинга риска для объектов ТЭК и промышленности, где математическое моделирование, статистический анализ и геоинформационные технологии будут объединены в единую систему управления.

Исследование проблематики математического моделирования и прогнозирования аварийного риска позволяет сделать вывод о том, что современные подходы в области мониторинга техносферы постепенно переходят от реактивного анализа последствий к предиктивному управлению рисками, основанному на больших данных, машинном обучении и цифровом моделировании.

### **Список литературы**

*1. Фоменко Г.А. Риск-ориентированный подход к управлению экологической безопасностью нефтеперерабатывающего предприятия / Г.А. Фоменко,*

С.И. Комаров, М.А. Фоменко, А.Е. Бородкин, А.К. Лузанова // СРРМ. – 2018. – №2 (107). – С.102-109.

2. Баймухамбетов К.К. Использование методов оценки и управления рисками при осуществлении мониторинга за состоянием окружающей среды / К.К. Баймухамбетов, А.С. Мусина, З.К. Хабдулина // Вестник КазНМУ. – 2014. – №3-1. – С. 52-54.

3. Ничепорчук В.В. Концепция создания региональной системы мониторинга рисков / В.В. Ничепорчук, О.В. Тасейко // Решетневские чтения. – 2016. – №20. – С. 294-296.

## ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

А.А. Маслова, А.Н. Коваленко  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

*Аннотация.* В статье описаны основные тенденции развития информационных систем мониторинга аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях (хвостохранилищах, шламохранилищах), которые определяются переходом от традиционных точечных измерений к интегрированным цифровым платформам с использованием современных сенсорных сетей, искусственного интеллекта и больших данных.

Основные тенденции развития информационных систем мониторинга аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях (хвостохранилищах, шламохранилищах) (ГТС) определяются переходом от традиционных точечных измерений к интегрированным цифровым платформам с использованием современных сенсорных сетей, искусственного интеллекта и больших данных.

### **Геодезические и дистанционные методы.**

Современные системы мониторинга ГТС активно применяют GNSS/GPS-ресиверы с точностью до 247 раз выше традиционных методов, а также интерферометрию радаров (InSAR) для непрерывного контроля деформаций на больших площадях. Технологии LiDAR обеспечивают создание высокоточных 3D-моделей откосов, что позволяет выявлять локальные смещения и прогнозировать обрушения [1]. В России внедрены системы вроде СМУ ГТС на предприятиях «Полюса», где данные с датчиков визуализируются в формате «светофора» и 3D-дашбордов для оперативной диагностики [2].

### **Сенсорные сети и IoT-технологии**

Развертывание сетей IoT на базе LoRaWAN и NB-IoT позволяет собирать данные о температуре грунта, пьезометрии, сейсмике и фильтрате в реальном времени с охватом всех параметров по ГОСТ Р 22.1.11-2024 и СП 58.13330.2019. Зарубежные аналоги, такие как системы GroundProbe и Lumidas, интегрируют

распределенные волоконно-оптические датчики для мониторинга напряжений, акустических сигналов и просачивания, снижая риски аварий на 30–50%. Российские платформы XPERT обеспечивают интеграцию разнородных источников с автоматизированным прогнозированием [3].

### ***Искусственный интеллект и машинное обучение***

Применение ML-моделей (регрессия, нейронные сети, Computer Vision) для анализа трендов деформаций и гидрологических цепочек рисков (осыпание–оползень–селевые потоки) повышает точность прогнозов на 20-40 % [8]. Зарубежные исследования демонстрируют эффективность байесовских сетей и интеллектуальный анализ данных для оценки катастрофических рисков на хвостохранилищах. В РФ разработаны интеллектуальные системы для прогнозирования паводков на основе глубокого обучения [4].

### ***Цифровые двойники и Big Data (большие данные)***

Цифровые двойники (на базе BIM, GIS, Seequent Central) динамически обновляют 3D-модели ГТС с IoT-данными, моделируя сценарии аварий и оптимизируя управление. Анализ Big Data аккумулирует исторические ряды для выявления аномалий, как в системах «СМИС Эксперт» и Lumidas [3,6]. Это соответствует требованиям Ростехнадзора №505 и глобальным стандартам ICOLD [5].

### ***Перспективы интеграции и нормативная база***

Интеграция облачных платформ с многоуровневым ранним предупреждением (мобильные приложения, AI-анализ) формирует замкнутый цикл «восприятие–прогноз–реагирование» [2, 5]. В России акцент на автоматизированные системы для устаревшей инфраструктуры (АСДК), а за рубежом – на масштабируемые облачные фреймворки. Дальнейшее развитие требует унификации протоколов и сертификации по стандартам.

Современное состояние безопасности гидротехнических сооружений (ГТС), в особенности таких экологически опасных объектов, как хвостохранилища и шламохранилища, характеризуется активным внедрением и конвергенцией цифровых технологий, направленных на переход от реактивного к предиктивному управлению рисками. Это обусловлено ужесточением международных и национальных требований к промышленной и экологической безопасности, а также необходимостью минимизации катастрофических последствий аварий, анализ которых указывает на недостаточность традиционных методов периодического контроля. Выделяются следующие ключевые технологические тенденции, формирующие облик интеллектуальных систем мониторинга и прогнозирования (ИСМП):

1. От дискретного контроля к комплексному непрерывному мониторингу в реальном времени. На смену разрозненным системам локальных замеров приходят интегрированные геотехнические платформы, осуществляющие сбор данных 24/7 по множеству параметров: деформациям (с использованием автоматизированных тахеометров, GNSS-приемников, инклинометров), пьезометрическому напору (автоматические пьезометры), сейсмической активности и напряженно-деформированному состоянию конструкций

(распределенные волоконно-оптические системы – ДВОС) [6]. Это формирует необходимую плотную временную и пространственную выборку данных для последующего прогнозного моделирования.

2. Интеграция дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и беспилотных технологий. Данные тенденции позволяют получать информацию на масштабах всего объекта и прилегающих территорий. Спутниковая радиолокационная интерферометрия (InSAR) обеспечивает мониторинг миллиметровых смещений, выявляя долгосрочные негативные тренды [2]. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с комплексами лазерного сканирования (LiDAR), гиперспектральной и фотограмметрической съемки оперативно детектируют изменения рельефа, признаки фильтрации, эрозионные процессы и формируют актуальные цифровые модели местности (ЦММ). Комбинация этих данных с наземными измерениями существенно повышает достоверность оценок.

3. Развитие технологий «Интернета вещей» (IoT) и беспроводных сенсорных сетей. Наблюдается переход к развертыванию сетей автономных «умных» датчиков с энергосберегающими протоколами передачи данных (LoRaWAN, NB-IoT) [3]. Такие датчики способны к первичной обработке данных, самодиагностике и адаптивному режиму работы, что повышает отказоустойчивость системы и снижает эксплуатационные расходы по сравнению с проводными аналогами.

4. Внедрение искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) для предиктивной аналитики. Это центральная тенденция, трансформирующая ИСМП из систем регистрации в системы прогноза. Алгоритмы МО, включая глубокое обучение для анализа многомерных временных рядов [3], позволяют выявлять сложные нелинейные зависимости между параметрами (деформации, уровень воды, осадки, сейсмичность) и предсказывать развитие аварийных сценариев [4]. Методы компьютерного зрения автоматизируют анализ изображений с БПЛА и спутников для обнаружения трещин, смещений и зон фильтрации. Современные исследования направлены на создание гибридных моделей, сочетающих физико-математические модели фильтрации и устойчивости с адаптивными алгоритмами МО для учета неопределенностей и пространственной изменчивости свойств грунтов [6].

5. Создание и применение цифровых двойников (Digital Twin). Цифровой двойник представляет собой динамическую виртуальную модель ГТС, непрерывно актуализируемую данными мониторинга в режиме реального времени. Его ключевое назначение в контексте прогнозирования аварий – проведение имитационного моделирования различных сценариев внешних воздействий (ливни, землетрясения, подъем уровня) для оценки устойчивости сооружения и прогнозирования его отклика. Это позволяет оптимизировать превентивные управленческие решения, например, заблаговременный сброс воды.

6. Эволюция в сторону киберфизических систем и автоматизации реагирования. Передовые ИСМП эволюционируют от пассивного мониторинга к активному управлению. При достижении контролируемые параметры

прогнозируемых критических значений система может инициировать автоматические действия: открытие водосбросов, включение насосов, активацию систем локализации. Это требует интеграции с системами диспетчерского управления и технологическими (SCADA) системами, а также обеспечения кибербезопасности всего контура.

7. Централизация данных на облачных платформах и развитие аналитических интерфейсов. Обработка больших данных (Big Data) с гетерогенных источников осуществляется на облачных платформах, что обеспечивает масштабируемость и доступность. Интерактивные аналитические панели (дашборды) предоставляют инструменты для визуализации и углубленного анализа специалистами различного уровня, поддерживая принятие обоснованных решений.

Подведем итоги: современная парадигма развития ИСМП для ГТС заключается в создании интеллектуальных, самообучающихся киберфизических систем, интегрирующих данные наземных сетей датчиков, ДЗЗ и БПЛА в едином информационном пространстве цифрового двойника. Ключевым вектором является не просто фиксация изменений, а опережающее прогнозирование рисков на основе предиктивной аналитики и имитационного моделирования, что позволяет реализовать стратегию проактивного управления безопасностью гидротехнических сооружений. Дальнейшие исследования, в том числе представленные в данной работе, должны быть направлены на совершенствование алгоритмов прогнозирования, повышающих точность и заблаговременность предупреждений об аварийных ситуациях.

### Список литературы

1. Хуснутдинов А.О., Хабаров В.И., Карманов В.С. (2025). Глубокое обучение для анализа многомерных временных рядов: систематизация типов данных, задач, архитектур и подходов. *Системы анализа и обработки данных*, № 3 (99). – С. 113-136.
2. Соколов А.Ю., Мясников Д.В., Лебедев А.А. (2023). Разработка нейросетевой модели для оценки фильтрационной прочности оснований гидротехнических сооружений с учетом пространственной изменчивости свойств грунтов. *Гидротехническое строительство*, № 2. – С. 35-41.
3. An, L.; Dias, D., et al. (2024). Pore Water Pressure Prediction Based on Machine Learning Methods – Application to an Earth Dam Case. *Appl. Sci.* 2024. 14. 4749.
4. Palchevsky, E., Antonov, V., et al. Development of an intelligent system for early forecasting and modelling of flood situation... using a proprietary machine and deep learning library. *Journal of Hydrology*, 2024. 633. 130978.
5. Сахнюк В.И. Применение методов машинного обучения в обработке данных геофизических исследований скважин... / В.И. Сахнюк, Е.В. Новиков [и др.]. – *Георесурсы*. 2022. 24(2). – С. 230-238.
6. Храпов С.С. Численное моделирование гидродинамических аварий: размыв дамб и затопление территорий / С.С. Храпов // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. – 2023. – Т. 10 (68). – Вып. 2. – С. 357-373.

# ПРИКЛАДНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ В АСПЕКТЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

А.В. Волков, И.А. Ерёмчев  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

*Аннотация.* В статье рассмотрены прикладные приложения теории геохимических барьеров в аспекте управления потоками загрязняющих веществ.

В настоящее время добыча драгоценных металлов из россыпных месторождений имеет достаточно обширное применение, побочным эффектом которого является образование (развитие) геохимических аномалий, негативно влияющих на окружающую среду и человека.

При разработке россыпных месторождений золота, ниже по течению реки можно заметить область с отсутствующей (минимально присутствующей) растительностью – «мёртвые зоны». Это вызвано наличием в воде примеси серной кислоты которая образуется в результате окисления минерала сульфида железа - пирита. Помимо этого, в результате химической реакции образуются минералы оксиды железа. Эксплуатация месторождений приводит к вскрытию нового пирита и, следовательно, к увеличению содержания серной кислоты в водотоке. Данный факт негативно влияет не только на окружающую среду, но и на человека, так как работа на таких месторождениях очень тесно связана на контакте с водой.

Раствор серной кислоты в первую очередь влияет на кожу человека. Кожа, особенно на тыльной стороне кистей, становится сухой, жесткой и трескается. На ладонях может наблюдаться резкое утолщение рогового слоя (гиперкератоз). Постоянный контакт даже с низкими концентрациями кислоты способен привести к хроническому гнойному воспалению вокруг ногтей – панарицию.

Помимо этого, употребление воды даже с небольшой примесью серной кислоты может негативно сказываться на хронических заболеваниях человека, таких как язва. Кислота вызовет сильное раздражение и воспаление в области язвы. Это может привести к углублению язвенного дефекта, повреждению кровеносных сосудов и, как следствие, к желудочному кровотечению. Даже если острое отравление не наступит, заживление химического ожога на фоне язвы приведет к образованию грубой рубцовой ткани. Это может деформировать желудок или вызвать стеноз (сужение) привратника – выхода из желудка, что делает невозможным нормальное прохождение пищи.

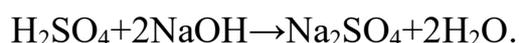
В небольших количествах серная кислота может положительно влиять на растения, подкисляя грунт и разрыхляя его, что увеличивает приток кислорода. Но в случае с «мёртвыми зонами», содержание кислоты достаточно высокое, что негативно сказывается на рН среды. рН воды в этих областях достаточно низок ( $\approx 4,5$ ), что сказывается на кислотности почв и приводит к вымиранию растений в данных областях.

Помимо влияния рН на кислотность почв, он так же влияет на растворимость и доступность макро- и микроэлементов таких как фосфор, кальций, калий, магний, которые становятся менее доступными для поглощения [1].

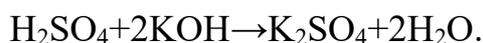
В связи с перечисленными факторами, возникает потребность в локализации, либо в полном устранении геохимической аномалии. К возможным способам борьбы с потоками, загрязнёнными серной кислотой, можно отнести нейтрализацию с помощью гашеной извести  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  или щелочей  $\text{NaOH}$  или  $\text{KOH}$ . Но данные методы могут быть не эффективны и не долговечны, поскольку привнос в водоток серной кислоты будет происходить до тех пор, пока на месторождении имеется не окисленный (минимально окисленный) пирит.

Помимо недолговечности, нейтрализация серной кислоты с помощью щелочей  $\text{NaOH}$  и  $\text{KOH}$  дорогостоящий процесс, что может сказаться на прибыли предприятия и халатности руководства в аспекте безопасности окружающей среды. Также, одним из минусов использования данного метода можно считать образование растворимых солей натрия и калия:

Гидроксид натрия ( $\text{NaOH}$ ): образуется соль – сульфат натрия.



Гидроксид калия ( $\text{KOH}$ ): образуется соль – сульфат калия.

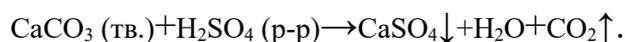


Данный факт может негативно сказаться на уровне солёности водотока и водоёма (реки) к которым примыкает водоток [2].

Также для нейтрализации можно использовать гашенную известь. Одним из минусов её использования можно считать большое количество образуемого шлама (гипса, металла) что приводит к забиванию пор в барьере и оборудовании для добычи полезных ископаемых.

Наиболее эффективным способом можно считать создание геохимического барьера для загрязняющих потоков. Конкретно для нашего примера можно рассмотреть работу барьера из карбонатных минералов таких как: мел, известняк.

Принцип работы барьера основан на создании резкого перепада двух ключевых параметров среды: кислотности (рН) и окислительно-восстановительного потенциала (Eh). Известняк (карбонат кальция) здесь выступает главным действующим лицом, создавая щелочную среду. Кислая вода поступает в слой известняка. Происходит классическая реакция нейтрализации. Карбонат кальция, из которого состоит известняк, вступает в реакцию с ионами водорода ( $\text{H}^+$ ), которые и делают воду кислой.



В результате ионы водорода ( $\text{H}^+$ ) связываются, и рН воды растёт (среда становится нейтральной или слабощелочной). Образуется сульфат кальция

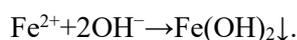
(CaSO<sub>4</sub>). Он может выпадать в осадок в виде кристаллов (иногда это забивает поры барьера, что является проблемой) [3].

Но на этом роль известняка не заканчивается. Когда кислота нейтрализована и вода стала почти нейтральной, в дело вступает другой процесс – гидролиз карбонат-ионов, который делает среду слабощелочной.

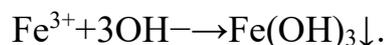


Теперь, когда в воде появились гидроксид-ионы (OH<sup>-</sup>) и карбонат-ионы (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), растворенные металлы теряют свою стабильность. Они переходят в нерастворимые формы и выпадают в осадок. Растворенные в кислой воде катионы металлов (например, двухвалентное железо) реагируют с гидроксид-ионами.

Для железа (II):



Для железа (III):



В нашем случае, где помимо серы в воде присутствуют ионы железа следует учесть важный нюанс. Если в барьер поступает вода с двухвалентным железом (Fe<sup>2+</sup>) и в ней есть кислород, железо окислится до трехвалентного (Fe<sup>3+</sup>) до того, как встретится с известняком. Fe<sup>3+</sup> очень склонен к гидролизу и даже в слабокислой среде может начать выпадать в осадок, забивая поры известняка и блокируя доступ кислоты к нему. Барьер «заиливается» и перестает работать [4].

Поэтому в эффективных конструкциях воду стараются изолировать от воздуха. В анаэробных (бескислородных) условиях железо остается в виде Fe<sup>2+</sup> до тех пор, пока не попадет в щелочную среду, созданную известняком. Там оно тоже выпадет в осадок, но уже в виде карбоната или гидроксида, не забивая поры так быстро. Это позволяет барьеру работать дольше и эффективнее.

Долговечность – основной фактор для нейтрализации геохимической аномалии, т.к. в результате вышперечисленных реакций образуется шлам, состоящий из оксидов железа. При низком pH железо становится более растворимым и в больших концентрациях негативно влияет на растения. Избыток железа, особенно в форме Fe<sup>2+</sup> (которая содержится в FeSO<sub>4</sub>), может быть токсичен для растений и негативно влиять на корневую систему. Высокие концентрации железа в почве или питательном растворе могут привести к повреждению клеток корня, нарушению целостности клеточных мембран. Это проявляется в потемнении, укорочении и некрозе корневых кончиков. Избыток Fe<sup>2+</sup> может катализировать образование реактивных форм кислорода (свободных радикалов), которые вызывают окислительный стресс, повреждая ДНК, белки и липиды в корневых клетках. Высокие уровни железа могут препятствовать поглощению других важных микроэлементов, таких как фосфор, марганец, цинк и медь, приводя к их дефициту, несмотря на их наличие в почве. Например, железо может образовывать нерастворимые соединения с фосфатами, делая фосфор недоступным для растений. Поврежденные избытком железа корни не могут эффективно поглощать воду, что приводит к увяданию растений, даже при достаточной влажности почвы [5].

## Список литературы

1. Кузнецов Ю.А. Модель образования россыпей золота Бодайбинского района Иркутской области на примере Месторождения «Хлебопёк» / Ю.А. Кузнецов, В.П. Грибанов, С.Д. Варфоломеев, В.Н. Калинин, А.А. Мальцев, В.И. Рождествова, В.А. Наумов, А.А. Дубков, А.В. Жабин // Недра Поволжья и Прикаспия. – № 116. – 2024. – С. 4-11.
2. Макаров М.И. Влияние кислотных осадков на подвижность органического вещества в лесных почвах / М.И. Макаров, Н.П. Недбаев // Почвоведение. – 1994. – № 8. – С. 111-118.
3. Середина В.П. Калий в автоморфных почвах на лессовидных суглинках / В.П. Середина. – Томск: Издво Томского унта, 1984. – 216 с.
4. Харько П.А. Возможность применения геохимических барьеров на основе известняка для очистки подотвальных вод от металлов / П.А. Харько, Р.Р. Нуреев, М.А. Пашкевич // Вестник евразийской науки. – № 6, Т. 12. – 2020. – С. 4-8.
5. Баярова Ю.Л. Искусственные геохимические барьеры для решения экологических и технологических задач / Ю.Л. Баярова, Д.П. Нестеров, Е.А. Корнева, А.В. Светлов, Д.В. Макаров, В.А. Маслобоев // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2013. – № 3, Т. 16. – С. 2-6.

## ТЕХНОЛОГИИ ЗДОРОВЬЯ. ВЛИЯНИЕ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### ОСОБЕННОСТИ ЛИПИДНОГО ОБМЕНА У ЛИЦ С АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Н.С. Лапаева, И.В. Бобина, Е.А. Шарлаева  
Алтайский государственный университет,  
г. Барнаул

**Аннотация.** Городская среда характеризуется комплексом неблагоприятных экологических, социально-экономических и социокультурных условий, которые повышают риск развития неинфекционных заболеваний. Целью исследования явилось исследование показателей липидного обмена и оценка риска атеросклероза у городских жителей, страдающих артериальной гипертензией. Проанализированы показатели липидного обмена: общий холестерин, липопротеины высокой плотности, липопротеины низкой плотности, липопротеины очень низкой плотности, триглицериды, фосфолипиды, незатерифицированные жирные кислоты и рассчитан индекс атерогенности. Установлено, что у лиц с гипертонической болезнью, в условиях городской среды, отмечается повышенный уровень общего холестерина, липопротеинов низкой плотности и индекса атерогенности по сравнению с референсными значениями.

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются одной из наиболее значимых проблем современной медицины и лидируют в структуре заболеваемости населения России [1]. Среди сердечно-сосудистых заболеваний особое место занимает артериальная гипертензия (АГ), которая в комплексе с дислипидемией, считаются одними из основных факторов риска развития неблагоприятных сердечно-сосудистых исходов, в первую очередь атеросклеротической природы [2, 3]. В сочетании АГ с нарушениями липидного обмена риск не просто суммируется, а возрастает в 3 и более раз, являясь причинами инвалидизации и гибели людей трудоспособного возраста [4, 5, 6]. В условиях городской среды отмечается рост заболеваемости населения быстрыми темпами из-за складывающихся неблагоприятных экологических, социально-экономических и социокультурных условий [7, 8].

В связи с этим, целью работы явилось исследование показателей липидного обмена и оценка риска атеросклероза у городских жителей, страдающих артериальной гипертензией.

Для оценки состояния липидного обмена были проанализированы данные лабораторного обследования 100 человек, страдающих артериальной гипертензией, из которых 50 женщин и 50 мужчин. Средний возраст в обеих группах составил 52 года.

Изучены биохимические показатели крови – общий холестерин (ОХС), липопротеины высокой плотности (ЛПВП), липопротеины низкой плотности (ЛПНП), липопротеины очень низкой плотности (ЛПОНП), триглицериды (ТГ), фосфолипиды (ФЛ), неэтерифицированные жирные кислоты (НЭЖК). Определение липидного профиля проводилось с помощью анализатора BS-3000М с использованием набора реагентов. Для повышения клинической информативности показателей липидного обмена рассчитан индекс атерогенности (ИА) по формуле [9]:

$$\text{ИА} = (\text{ОХС} - \text{ЛПВП}) / \text{ЛПВП}$$

Анализ липидного профиля у обследованных городских жителей показал, что содержание общего холестерина в крови мужчин составило  $5,53 \pm 0,07$  ммоль/л, женщин –  $5,50 \pm 0,08$  ммоль/л, что оказалось выше референсных значений ( $\leq 5,0$  ммоль/л.) на 10,6 % и 10,0 % соответственно.

Уровень триглицеридов в крови, отражающий нарушения обмена жирных веществ [10], у мужчин и женщин находился в пределах референсных значений ( $\leq 1,7$  ммоль/л.) и составил  $1,26 \pm 0,03$  ммоль/л у мужчин и  $1,29 \pm 0,03$  ммоль/л у женщин. Достоверных различий по данному показателю среди групп выявлено не было.

Количественное содержание фосфолипидов, которые оказывают гиполлипидемический эффект, снижая уровень холестерина и триглицеридов, повышая содержание липопротеинов высокой плотности [11], в крови у мужчин и женщин составило  $3,65 \pm 0,06$  г/л и  $3,47 \pm 0,07$  г/л соответственно, что находится в пределах референсных значений (2,0 – 4,0 г/л).

Большое значение в патогенезе АГ уделяется нарушению функционального состояния сосудистого эндотелия. Одной из причин

ухудшения эндотелий-зависимой вазодилатации являются высокие концентрации неэтерифицированных жирных кислот в крови [12]. Средняя концентрация НЭЖК в крови мужчин составила  $0,60 \pm 0,03$  ммоль/л, женщин –  $0,70 \pm 0,01$  ммоль/л, что также не превышало референсных значений ( $0,3-0,9$  ммоль/л). У женщин, больных гипертонической болезнью, среднее значение НЭЖК в крови достоверно выше ( $p < 0,05$ ), чем у мужчин на 16,7 %.

Анализ фракций липопротеинов плазмы крови обусловлен их определяющим значением в развитии атеросклероза и одной из ключевых составляющих механизма дислипидемий. Фракция ЛПНП считается атерогенной и требует особого внимания [13, 14].

У мужчин количественное содержание ЛПНП составило  $3,64 \pm 0,07$  ммоль/л, у женщин –  $3,53 \pm 0,08$  ммоль/л. Концентрация ЛПНП в крови больных гипертонической болезнью, превышает референсные значения ( $\leq 3,0$  ммоль/л.) на 21 % и 17,8 % соответственно.

Содержание ЛПОНП в крови мужчин и женщин находилось в пределах референсных значений ( $\leq 1,0$  ммоль/л.): у мужчин –  $0,57 \pm 0,01$  ммоль/л, у женщин –  $0,58 \pm 0,01$  ммоль/л.

Уровень ЛПВП в крови мужчин, больных гипертонической болезнью, составил  $1,31 \pm 0,03$  ммоль/л, женщин –  $1,38 \pm 0,03$  ммоль/л, что находится в пределах нормативных значений (мужчины – не ниже 1,0 ммоль/л; женщины – не ниже 1,2 ммоль/л).

Для оценки риска возникновения атеросклероза у больных с артериальной гипертензией был рассчитан индекс атерогенности, отражающий соотношение между атерогенными и антиатерогенными липопротеинами. У здоровых людей индекс не должен превышать 3 единиц [9]. Полученные данные свидетельствует о наличии риска возникновения и прогрессирования клинических проявлений атеросклероза у городских жителей, страдающих артериальной гипертензией. У мужчин индекс атерогенности составил  $3,23 \pm 0,09$ , у женщин –  $3,05 \pm 0,09$ , что не значительно, но выше (на 8 % у мужчин и на 2 % у женщин) по сравнению с допустимыми значениями ( $< 3$ ). У мужчин предрасположенность к атеросклерозу выше по сравнению с женщинами, поскольку мужчины изначально склонны к развитию абдоминального типа ожирения при нарушении обменных процессов, который является андрогензависимым [15].

Таким образом, в результате обследования городских жителей, страдающих артериальной гипертензией, установлены повышенные значения общего холестерина, ЛПНП и индекса атерогенности по сравнению с референсными, что указывает на наличие риска возникновения атеросклероза и его последствий.

### Список литературы

1. Мамедов М.Н. Оценка нарушений липидного обмена и гипергликемии в открытой популяции 30-69 лет: результаты многоцентрового исследования / М.Н. Мамедов, Л.Т. Сушкова, Р.В. Исаков, В.А. Куценко, О.М. Дряпкина // Кардиоваскулярная терапия и профилактика, 2023. – №22(6). – С.46–53.

2. Топчиева Л.В. Липидный спектр у больных эссенциальной артериальной гипертензией и здоровых людей, имеющих разные аллельные вариации гена NOS2 / Л.В. Топчиева, В.А. Корнева, О.В. Балан, И.Е. Малышева, И.В. Курбатова // Труды Карельского научного центра РАН, 2020. – № 3. – С. 112-120.

3. Усенко Г.А. Особенности липидного обмена у больных артериальной гипертензией мужчин с различным психосоматическим статусом / Г.А. Усенко, Д.В. Васендин, А.Г. Усенко // Военно-медицинский журнал, 2021. – №5. – С.44-51.

4. Гринштейн Ю.И. Распространенность сочетания артериальной гипертензии и дислипидемии среди взрослого населения крупного Восточно-сибирского региона / Ю.И. Гринштейн, В.В. Шабалин, Р.Р. Руф, С.А. Шальнова, О.М. Драпкина // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2021. – №20(4). – С.19-25.

5. Мулерова Т.А. Параметры инфраструктуры района проживания и их связь с факторами сердечно-сосудистого риска / Т.А. Мулерова, Т.Ф. Газиев, Е.Д. Баздырев, Е.В. Индукаева, Д.П. Цыганкова, А.С. Азиенко, О.В. Нахратова, Г.В. Артамонова // Рациональная Фармакотерапия в Кардиологии, 2022. – 18(4). – С. 402-410.

6. Исмарова Г.С. Распространенность артериальной гипертензии: осведомленность и приверженность к гипотензивной терапии с учетом возрастных особенностей жителей городской и сельской местностей / Г.С. Исмарова // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана, 2022. – № 9. – С. 121-124.

7. Шиняева О.В. Здоровье населения крупного города: объективные и субъективные детерминанты изменений / О.В. Шиняева, Т.В. Ключева // Вестник УлГТУ, 2014. – № 4. – С. 11-13.

8. Кудаева И.В. Состояние липидного обмена у лиц, проживающих на территории экологического неблагополучия / И.В. Кудаева, А.А. Лысенко // Гигиена и санитария, 2023. – Т. 102, № 9. – С. 896-901.

9. Канева А.М. Индексы липидного обмена: информативность и клиническое значение при оценке атерогенности липидного профиля крови / А.М. Канева, Е.Р. Бойко // Медицинский академический журнал, 2017. – Т. 17, №1. – С. 41-50.

10. Панин Л.Е. Обмен липопротеинов и атеросклероз / Л.Е. Панин // Бюллетень СО РАМН, 2006. – № 2. – С. 15-22.

11. Наймушина Е.С. Эффективность применения фосфолипидов в качестве гепатопротекторов для коррекции дислипидемии при метаболическом синдроме у подростков / Е.С. Наймушина, Е.Ю. Дробинина // Казанский медицинский журнал, 2014. – Т.95, № 3. – С. 334-337.

12. Новиков С.Ю. Сравнительный анализ показателей липидного и углеводного обмена у подростков с артериальной гипертензией и ожирением / С.Ю. Новиков, А.В. Шестопалов, П.В. Шумилов, И.Г. Морено, Е.В. Неудахин // Вопросы детской диетологии, 2019. – Т. 17, №3. – С. 18-27.

13. Артеменков А.А. Дислипидемии плазмы крови: патогенез и диагностическое значение. Обзор литературы / А.А. Артеменков // Пермский медицинский журнал, 2023. – Т. XL, №1. – С.78-93.

14. Арабидзе Г.Г. Лабораторная диагностика нарушений липидного обмена: современные инновации в новых российских и международных рекомендациях / Г.Г. Арабидзе, А.А. Пухаева, Е.В. Правдивцева // Лабораторная служба, 2024. – Т. 13, №1. – С. 20-30.

15. Миттова В.О. Гендерные особенности липидного обмена / В.О. Миттова, А.О. Хороших, О.В. Земченкова, С.В. Рязанцев, О.В. Маслов, Е.В. Корж, Л.С. Рясная-Локинская, В.В. Алабовский // Конденсированные среды и межфазные границы, 2021. – №23(2). – С. 245-259.

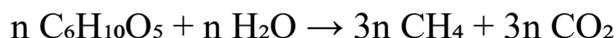
## **ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ СВАЛОЧНОГО ГАЗА И МЕХАНИЗМЫ ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА**

В.М. Панарин, М.А. Кудрявцев  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

***Аннотация.** В статье на основе анализа актуальных российских научных публикаций рассматривается проблема воздействия компонентов свалочного газа на здоровье населения. Детально анализируются химические механизмы токсического действия сероводорода, бензола и других летучих органических соединений, а также данные о рисках для проживающих вблизи полигонов. Отдельный раздел посвящен инженерно-техническим решениям для редевелопмента бывших мусорных полигонов под жилую застройку и анализу современных подходов к мониторингу и дегазации.*

Свалочный газ (биогаз) образуется в результате сложных биохимических процессов анаэробного разложения органической фракции отходов, захороненных на полигонах. Хотя его основными компонентами являются метан (СН<sub>4</sub>) и диоксид углерода (СО<sub>2</sub>), именно микропримеси токсичных соединений представляют наибольшую угрозу для здоровья населения.

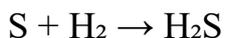
Процесс газообразования может быть описан упрощенным стехиометрическим уравнением разложения органического вещества (в частности, целлюлозы, формула которой может быть представлена как С<sub>6</sub>Н<sub>10</sub>О<sub>5</sub>):



Это уравнение показывает, как под действием микроорганизмов сложные органические полимеры превращаются в основные компоненты свалочного газа – метан и углекислый газ. Однако помимо них образуется множество токсичных микропримесей [1].

Сероводород (Н<sub>2</sub>С) является одним из наиболее распространенных и опасных компонентов свалочного газа, занимая до 3 % его объема. Он образуется преимущественно при гниении серосодержащих органических веществ, в

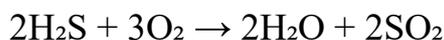
первую очередь пищевых отходов, а также может быть получен в результате прямой реакции серы с водородом в условиях разложения:



Запах «тухлых яиц», характерный для этого газа, обманчив: при высоких концентрациях сероводород парализует обонятельный нерв, и человек перестает ощущать опасность [2].

Механизм действия. Токсичность сероводорода обусловлена его способностью блокировать фермент цитохромоксидазу в митохондриях, что приводит к нарушению клеточного дыхания и развитию тканевой гипоксии. По механизму действия он напоминает цианиды [2, 3].

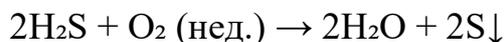
Химические превращения в атмосфере и организме. Сероводород – сильный восстановитель. При попадании в атмосферу и легкие он может окисляться. При достаточном количестве кислорода происходит полное окисление с образованием диоксида серы (сернистого газа):



Диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ) – сам по себе токсичный газ, который при контакте со слизистыми оболочками образует сернистую кислоту ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ), вызывая сильное раздражение:



При недостатке кислорода сероводород окисляется не полностью, с выделением элементарной серы:



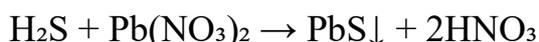
Клиническая картина отравления. Степень тяжести поражения напрямую зависит от концентрации и длительности воздействия:

Легкое отравление: Раздражение глаз и верхних дыхательных путей.

Отравление средней тяжести: Тошнота, рвота, головная боль, головокружение.

Тяжелое (острое) отравление: При вдыхании высоких концентраций сероводорода возникает резкое нарушение дыхания вплоть до его остановки, судороги, потеря сознания и кома [4].

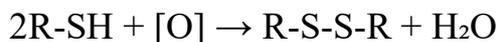
Качественная реакция. Обнаружение сероводорода даже в малых концентрациях возможно с помощью реакции с солями свинца, которая используется в лабораторном анализе воздуха:



Образование черного осадка сульфида свинца ( $\text{PbS}$ ) – не только аналитический признак, но и показатель способности сероводорода реагировать с металлами, в том числе входящими в состав ферментов организма, что и лежит в основе его токсичности [5].

Меркаптаны (тиолы,  $\text{R-SH}$ ) – это серосодержащие органические соедине-

ния общей формулы R-SH (где R – углеводородный радикал). Они образуются при разложении серосодержащих аминокислот (метионина, цистеина) и обладают чрезвычайно резким запахом, ощутимым даже в ничтожных концентрациях (на уровне 1:10<sup>11</sup>). Эксперты подчеркивают: «безопасных меркаптанов не бывает» – эти вещества высокотоксичны, поражают центральную нервную систему. Процесс их окислительного детоксикации в организме или окружающей среде может протекать по реакции:



В результате образуются менее токсичные дисульфиды (R-S-S-R), однако в условиях свалочного газа этот процесс идет медленно, и основное воздействие оказывают именно исходные меркаптаны [6].

Свалочный газ содержит сложную смесь летучих органических соединений, многие из которых обладают канцерогенными, мутагенными и нейротоксическими свойствами. При исследовании полигонов идентифицировано около 140-160 различных органических соединений.

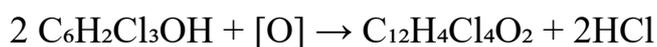
Ароматические углеводороды. Эта группа веществ представляет особую опасность из-за своей устойчивости и способности к биоаккумуляции.

Бензол (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) – простейший ароматический углеводород, безусловный канцероген, для которого не существует безопасного порога воздействия. Метаболизм бензола в организме происходит в печени с участием ферментов цитохрома P-450. В ходе многоступенчатого окисления образуются высокореакционноспособные промежуточные продукты (эпоксиды), которые ковалентно связываются с ДНК и белками, вызывая мутации и подавляя кроветворную функцию костного мозга. Конечными продуктами метаболизма являются фенол, катехол, гидрохинон и муконовая кислота, которые выводятся с мочой.

Толуол (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>-CH<sub>3</sub>) и ксилолы (CH<sub>3</sub>-C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-CH<sub>3</sub>) обладают выраженным нейротоксическим действием. Их метаболизм идет по пути окисления метильной группы с образованием бензойной кислоты (из толуола), которая затем конъюгирует с глицином и выводится в виде гиппуровой кислоты [6].

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Эти соединения, такие как бенз(а)пирен (C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>), образуются при тлении и неполном сгорании органических отходов, особенно пластиков и синтетических материалов. Международное агентство по изучению рака (IARC) классифицирует бенз(а)пирен как канцероген для человека. Молекула бенз(а)пирена подвергается в организме ферментативному окислению с образованием диолэпоксидов, которые способны прочно встраиваться в структуру ДНК, образуя ДНК-аддукты, что инициирует процесс канцерогенеза [7].

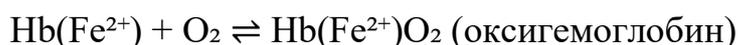
Диоксины и фураны. Наиболее токсичным представителем является 2,3,7,8-тетрахлордибензо-п-диоксин (C<sub>12</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>4</sub>O<sub>2</sub>). Эти соединения образуются при сжигании хлорсодержащих материалов (ПВХ, некоторые виды упаковки) в условиях недостатка кислорода. Общая схема образования диоксинов может быть представлена как конденсация двух молекул хлорфенолов:



Диоксины относятся к классу «суперэкоотоксикантов» – кумулятивных ядов. Их молекулы способны точно встраиваться в рецепторы живых организмов (Ah-рецептор), подавляя или извращая их жизненные функции.

Угарный газ (монооксид углерода, CO) образуется при неполном сгорании органических веществ в толще свалки, особенно при тлении пластиков и синтетических материалов. Механизм его токсичности уникален и хорошо изучен на молекулярном уровне [8, 9].

Гемоглобин (Hb) – белок эритроцитов, переносящий кислород. Кислород связывается с двухвалентным железом ( $\text{Fe}^{2+}$ ) гема обратимо:



Угарный газ обладает в 200-300 раз более высоким сродством к гемоглобину, чем кислород. Он также связывается с железом гема, но образует гораздо более прочное соединение – карбоксигемоглобин ( $\text{Hb}(\text{Fe}^{2+})\text{CO}$ ):



Эта реакция практически необратима в физиологических условиях. Связывание CO с гемоглобином блокирует его транспортную функцию:

Уменьшается количество гемоглобина, доступного для переноса кислорода.

Происходит сдвиг кривой диссоциации оксигемоглобина: оставшийся связанный кислород отдается тканям хуже (эффект Холдейна).

В результате даже при нормальном парциальном давлении кислорода в воздухе ткани организма испытывают тяжелое кислородное голодание (гипоксию). При концентрациях CO в воздухе 0,1 % сатурация гемоглобина угарным газом может достигать 60-70 %, что приводит к потере сознания и смерти.

Представленные химические формулы и уравнения реакций наглядно демонстрируют, что токсическое действие свалочных газов имеет под собой строгую молекулярную основу. От образования сероводорода при гниении серосодержащих аминокислот до блокировки клеточного дыхания цианидоподобным действием  $\text{H}_2\text{S}$  и необратимого связывания CO с гемоглобином – каждое из этих воздействий может быть описано языком химических реакций. Понимание этих механизмов на молекулярном уровне подтверждает необходимость строжайшего контроля за эмиссией свалочных газов и недопустимость проживания людей в зоне их влияния.

### Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году». Министерство природных ресурсов и экологии РФ. – Москва, 2024. – 707 с.

2. Музалевский А.А. Оценка экологических рисков в природно-технических системах, образованных полигонами твердых бытовых отходов. Экология

урбанизированных территорий / А.А. Музалевский, М.П. Федоров, В.В. Сергеев. – 2020. – № 1. С. – 28-34.

3. Бобкова Т.Е. Зонирование территории перспективной застройки с применением методологии оценки риска здоровью населения. Гигиена и санитария / Т.Е. Бобкова. – 2009. – № 6. – С. 38-40.

4. Некрасов Б.В. Основы общей химии: в 2 т. 3-е изд., испр. и доп. / Б.В. Некрасов. – Москва: Химия, 1973. – Т. 1. – 656 с.

5. Патрушева М.П. Оценка влияния полигонов твердых бытовых отходов на состояние водных объектов на территории московской области. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление / М.П. Патрушева. – 2022. – № 5. – С. 82-94.

6. Зайцева Н.В. Методология оценки рисков здоровью населения при воздействии химических, физических и биологических факторов для определения показателей безопасности продукции (товаров) / Н.В. Зайцева, И.В. Май, П.З. Шур, Д.А. Кирьянов // Анализ риска здоровью. – 2014. – №3. – С. 4-18.

7. Куценко С.А. Основы токсикологии: научно-методическое издание / С.А. Куценко. – СПб.: Фолиант, 2004. – 720 с.

8. Долгих О.В. Иммунологические и генетические маркеры воздействия ароматических углеводов на работающих / О.В. Долгих, А.В. Кривцов, А.М. Гугович, Р.А. Харахорина, Д.В. Ланин, Т.С. Лыхина, М.А. Сафонова // Медицина труда и промышленная экология. – 2012. – №12. – С. 30-33.

9. Гребенюк А.Н. Токсикология и медицинская защита: учебник / А.Н. Гребенюк, Н.В. Аксенова, А.Е. Антушевич [и др.]; Под ред. проф. А.Н. Гребенюка. – СПб.: Фолиант, 2016. – 672 с.

## **АНАЛИЗ МОНИТОРИНГА ТРОПОСФЕРНОГО ОЗОНА В МОСКОВСКОМ РЕГИОНЕ ЗА 2024-2025 ГГ.**

А.Н. Цедилин<sup>1</sup>, Д.А. Макаренков<sup>1,2</sup>, А.П. Исакова<sup>3</sup>, Н.О. Шишов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева,  
г. Москва

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт»,  
г. Москва

<sup>3</sup> ГБОУ «Школа № 1212 Щукино»,  
г. Москва

<sup>4</sup> ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева,  
г. Москва

**Аннотация.** Проведен анализ мониторинга тропосферного озона в Московском регионе за 2024-2025 гг. по данным ГПБУ «Мосэкомониторинг». Показано, что наиболее объективными показателями являются усреднённые по территории города концентрации тропосферного озона. Анализ данных показал:

- Среднегодовые концентрации тропосферного озона стабильно (с 2022 г.) превышают ПДК<sub>сс</sub>, что может негативно влиять на здоровье жителей Московского региона.

- Усредненные по территории Московского региона среднемесячные концентрации имеют циклический характер с максимальными значениями в весенне-летний период и минимальными значениями в осенне-зимний период.

- Механизм формирования тропосферного озона определяется, преимущественно, миграцией  $O_3$  из стратосферы и фотохимическими реакциями образования  $O_3$  из «предшественников» природного и антропогенного происхождения. В осенне-зимний период (при низкой продолжительности светового дня и относительно низких температурах) превалирует миграционный механизм формирования тропосферного озона. В весенне-летний период (при продолжительном световом дне и повышенных температурах) реализуются оба механизма с образованием высоких концентраций  $O_3$ .

- Установлено отсутствие существенного влияния магнитных бурь 1-6 баллов на изменение концентраций тропосферного озона.

**Ключевые слова:** тропосферный озон, предельно допустимые концентрации, мониторинг, техносферная безопасность, технологический уклад.

Озон – аллотропное видоизменение кислорода, образование которого в атмосфере обусловлено, преимущественно, живым веществом [1]. В тропосфере присутствие  $O_3$  оказывает негативное влияние на живое вещество, что делает его неблагоприятным фактором окружающей среды, влияющим на здоровье человека.

По параметрам острой токсичности в РФ озон относится к 1 классу опасности [2]. Максимальная разовая ПДК<sub>мр</sub> озона в атмосферном воздухе – 0,1600 мг/м<sup>3</sup>, средняя суточная ПДК<sub>сс</sub> озона в атмосферном воздухе – 0,0300 мг/м<sup>3</sup>.

В последние десятилетия скорость роста концентрации тропосферного озона в среднем по планете составляет примерно 1-2 % в год [3]. Данная тенденция, в совокупности с воздействиями  $O_3$  на техно-биосферу, становится существенным вызовом XXI в. и формирует новое научно-практическое направление в обеспечении техносферной безопасности – оптимизация функции дыхания живого вещества и человека. Для его успешного развития необходимы экспериментально обоснованные значения концентраций тропосферного озона для исследуемых территорий.

Проведенные исследования, являющиеся продолжением работ по тропосферному озону [4], охватывают все климатические сезоны 2024-2025 гг. (годовые исследования) для последующих сравнительных наблюдений, изучения воздействия озона на техно-биосферу мегаполиса и человека, разработки организационных и санитарно-гигиенических мероприятий.

Методом исследований является статическая оценка, для которой используется база данных ГПБУ «Мосэкомониторинг», осуществляющее квалифицированное регулярное наблюдения за состоянием атмосферного воздуха над территорией города.

Показатели состояния атмосферного воздуха в базе данных ГПБУ «Мосэкомониторинг» представлены как данные автоматических измерительных станций и усреднённые по территории города концентрации загрязняющих веществ.

Было установлено, что концентрации тропосферного озона в жилых районах города существенно выше, чем вблизи автотрасс, поэтому представленные результаты соответствуют загрязнению воздуха над жилыми территориями.

В табл. 1 внесены типовые часовые показания автоматических измерительных станций Московского региона по тропосферному озону, характерные для различных месяцев 2024-2025 г.

Таблица 1

Данные измерительных станций по тропосферному озону характерные для 2024-2025 г. (мг/м<sup>3</sup>)

<p><b>2024 г.:</b></p> <p><b>18.01. 15.30.</b> МГУ – 0,0475, Туристская – 0,0515, Останкино – 0,0254, Полярная – 0,0280, Кожухово – 0,0427, Лосиный остров – 0,0459, Кожуховский проезд – 0,0469.</p> <p><b>27.03. 13.00.</b> МГУ – 0,0693, Туристская – 0,0939, Останкино – 0,0810, Полярная – 0,0747, Кожухово – 0,0803, Кожуховский проезд – 0,0539.</p> <p><b>26.08. 15.00</b> МГУ – 0,0955, Туристская – 0,1264, Останкино – 0,1262, Полярная – 0,1080, Кожухово – 0,1267, Лосиный остров – 0,1120, Кожуховский проезд – 0,0667, Нижняя Масловка – 0,0546, МАДИ – 0,0869.</p> <p>01.11. 12.00. МГУ – 0,0048, Туристская – 0,0032, Полярная – 0,0024, Кожухово – 0,0016, Лосиный остров – 0,0010, Кожуховский проезд – 0,0046.</p>
<p><b>2025 г.:</b></p> <p><b>21.01. 11.30</b> МГУ – 0,0402, Туристская – 0,0496, Останкино – 0,0610, Полярная – 0,0464, Кожухово – 0,0261, Лосиный остров – 0,0557, Спиридоновка – 0,0443, Марьино – 0,0299.</p> <p><b>30.04. 23.00.</b> МГУ – 0,0142, Останкино – 0,0258, Полярная – 0,0192, Кожухово – 0,0104, Лосиный остров – 0,0126, Кожуховский проезд – 0,0141.</p> <p><b>23.08. 15.00</b> Туристская – 0,0416, Останкино – 0,0261, Полярная – 0,0250, Кожухово – 0,0477, Кожуховский проезд – 0,0155, Спиридоновка – 0,0233, Марьино – 0,0262, Нижняя Масловка – 0,0194.</p> <p>04.10. 15.00 Туристская – 0,0157, Останкино – 0,0115, Полярная – 0,0085, Кожухово – 0,0024, Кожуховский проезд – 0,0035, Спиридоновка – 0,0059, Марьино – 0,0061, Нижняя Масловка – 0,0112, МАДИ – 0,0030, Толбухина – 0,0040.</p>

Данные таб.1, как дифференциальные показатели, свидетельствуют о существенном и постоянном различии концентраций тропосферного О<sub>3</sub> над территорией мегаполиса и детерминируют использование в анализе интегральных показателей - усреднённых по территории города часовых

концентраций тропосферного озона (представленные в базе данных ГПБУ «Мосэкомониторинг» в виде ежедневного графика).

Интегральные показатели результатов мониторинга концентраций тропосферного озона в Московском регионе за 2024-25 г. г. представлены в табл. 2.

Таблица 2

Усредненные по территории города средняя месячная, максимальная суточная и максимальная часовая концентрации тропосферного озона за 2024-2025 гг. (мг/м<sup>3</sup>)

Месяц	Средняя месячная концентрация	Максимальная суточная концентрация	Максимальная часовая концентрация
2024 г.			
Январь	0.0211	0,0498	0,0668
Февраль	0,0230	0,0476	0,0693
Март	0,0355	0,0634	0,0858
Апрель	0,0477	0,0672	0,1097
Май	0,0543	0,0786	0,1334
Июнь	0,0467	0,0745	0,1219
Июль	0,0488	0,0763	0,1594
Август	0,0324	0,0482	0,1273
Сентябрь	0,0360	0,0529	0,1248
Октябрь	0,0165	0,0449	0,0835
Ноябрь	0,0200	0,0366	0,0452
Декабрь	0,0202	0,0507	0,0656
Среднегодовая концентрация 0,0344 (1,15 ПДК <sub>сс</sub> )			
2025 г.			
Январь	0,0290	0,0561	0,0742
Февраль	0.0239	0,0433	0,0671
Март	0,0383	0,0696	0,0884
Апрель	0,0589	0,0903	0,1314
Май	0,0507	0,0793	0.1251
Июнь	0,0390	0,0619	0,0990
Июль	0,0460	0,0731	0,1310
Август	0,0312	0,0735	0,1365
Сентябрь	0,0268	0,0448	0,1067
Октябрь	0.0137	0.0274	0,0575

Продолжение таблицы			
Ноябрь	0,0140	0,0335	0,0588
Декабрь	0,0205	0,0583	0,0720
Среднегодовая концентрация 0,0327 (1,09 ПДК <sub>сс</sub> )			

В декабре (минимальная продолжительность световой день) 2024 и 2025 гг. в соответствии с данными табл.3 исследовалось влияние солнечных вспышек на концентрацию тропосферного озона.

Таблица 3

Значения нагрузки на магнитное поле Земли в декабре 2024-2025 гг.

Декабрь 2024 г.: 6-7 декабря – 4 балла. 30 декабря – 3 балла
Декабрь 2025 г.: 3-4 декабря – 5 баллов, 9 декабря – 6 баллов, 22 декабря – 5 баллов

Установлено, что для указанных в табл.3 дней, значения концентраций тропосферного озона существенно не превышали месячных показателей, что может свидетельствовать об отсутствии влияния магнитных бурь 1-6 баллов на рост тропосферного озона.

Анализ данных мониторинга тропосферного озона в Московском регионе показал:

- Среднегодовые концентрации тропосферного озона стабильно (с 2022 г.) превышают ПДК<sub>сс</sub>, что может негативно влиять на здоровье жителей Московского региона.

- Усредненные по территории Московского региона среднемесячные концентрации имеют циклический характер с максимальными значениями в весенне-летний период и минимальными значениями в осенне-зимний период.

- Механизм формирования тропосферного озона определяется, преимущественно, миграцией O<sub>3</sub> из стратосферы и фотохимическими реакциями образования O<sub>3</sub> из «предшественников» природного и антропогенного происхождения. В осенне-зимний период (при низкой продолжительности светового дня и относительно низких температурах) превалирует миграционный механизм формирования тропосферного озона. В весенне-летний период (при продолжительном световом дне и повышенных температурах) реализуются оба механизма с образованием высоких концентраций O<sub>3</sub>.

- Установлено отсутствие существенного влияния магнитных бурь 1-6 баллов на изменение концентраций тропосферного озона.

Полученные массивы данных мониторинга тропосферного озона представляют собой информативную основу для применения методов искусственного интеллекта и машинного обучения. Современные алгоритмы регрессионного анализа и нейронных сетей позволяют выявлять скрытые нелинейные зависимости между концентрациями озона, метеорологическими параметрами, солнечной активностью и антропогенной нагрузкой, что

существенно расширяет возможности прогнозирования качества атмосферного воздуха [5].

Использование методов машинного обучения целесообразно при разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений в области техносферной и экологической безопасности, а также при оптимизации функционирования альтернативных энергетических и климатических устройств, чувствительных к составу атмосферного воздуха.

В частности, рекуррентные нейронные сети типа LSTM (Long Short-Term Memory), эффективно работающие с временными рядами, могут применяться для кратко- и среднесрочного прогнозирования концентраций тропосферного озона на основе исторических данных мониторинга и метеорологических факторов.

### Список литературы

1. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера / В.И. Вернадский. – Москва: Издательство АСТ, 2022 – 640 с.

2. ГОСТ 12.1.007-76 Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

3. Мил Г.А., Стокер Т.Ф., Коллинз У.Д., Фридлигштейн П., Гей, А.Т., Грегори Дж.М. [и др.] (2007). «Глобальные климатические прогнозы», в «Изменение климата в 2007 году: физические основы. Вклад рабочей группы I в четвертый оценочный доклад межправительственной группы экспертов по изменению климата», т. 747-846. Под ред. Соломон С., Цинь Д., Мэннинг М., Чен З., Маркиз М., Эйвери К.Б., Тинор М., Миллер Х.Л. (Кембридж: Издательство Кембриджского университета).

4. Цедилин А.Н., Макаренков Д.А., Нартов А.С. (2023). Анализ результатов мониторинга тропосферного озона в городе Москве. *Industrial Processes and Technologies*, (10), 32-41.

5. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем и искусственный интеллект в задачах управления. — М.: Физматлит, 2019. — 456 с.

## ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ И ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ РОСТА РАСТЕНИЙ

А.С. Ступин

Рязанский государственный агротехнологический университет  
имени П.А. Костычева,  
г. Рязань

*Аннотация.* В статье представлен систематизированный обзор научных публикаций, касающихся потенциала применения регуляторов роста для оптимизации выращивания сельскохозяйственных культур. Особое внимание уделено механизмам, посредством которых регуляторы роста повышают стрессоустойчивость растений. Кроме того, рассмотрены перспективы их применения в биотехнологических процессах и системах защиты растений, а также проанализированы данные об их влиянии на продуктивность и качество урожая.

Биотехнологии в России признаны приоритетными, особенно в контексте их применения в пищевой, аграрной и лесной сферах. Развитие теоретической базы и внедрение передовых биотехнологических решений должны способствовать получению высококачественной сельхозпродукции, безопасных лекарств и экологически чистого продовольствия, включая продукты для детского и диетического питания [1].

Несмотря на успехи в улучшении урожайности с помощью ГМО и общее развитие аграрного сектора, многие развивающиеся страны страдают от дефицита продовольствия. Для решения этой проблемы предлагается усовершенствовать традиционные методы земледелия. Ключевым моментом является применение высокоэффективных удобрений и регуляторов роста, разработанных для пролонгированного и контролируемого высвобождения активных компонентов. Такой подход позволит точно дозировать необходимые вещества на протяжении всего вегетационного периода, что не только повысит урожайность, но и снизит потенциальные риски для здоровья людей и животных.

Существует консенсус среди ряда ведущих исследователей, что прогресс в области повышения продуктивности и качества сельскохозяйственных культур, а также в обеспечении населения безопасной и экономически доступной растительной продукцией, будет достигнут посредством применения инновационных и высокоэффективных регуляторов роста и развития растений.

В настоящее время использование регуляторов роста растений (РРР), как природного, так и синтетического происхождения, является перспективным подходом для увеличения урожайности и улучшения качества сельскохозяйственных культур. Согласно современной научной литературе, РРР представляют собой экзогенные органические соединения, способные стимулировать или подавлять жизненные процессы растений без проявления токсичности в применяемых концентрациях [2].

Применение регуляторов роста растений в сельском хозяйстве является относительно новым явлением. Изначально их использование ограничивалось сферой садоводства. Впоследствии был проведен обширный скрининг как природных, так и синтетических соединений для выявления действенных регуляторов роста, пригодных для возделывания сельскохозяйственных культур, что привело к их последующему крупномасштабному производству.

Физиологическая активность большинства регуляторов роста и развития растений, как правило, коррелирует с их структурным подобием природным фитогормонам. Несмотря на ограниченный период использования, прогресс в разработке эффективных препаратов для регулирования роста растений является весьма динамичным. Предполагается, что именно внедрение регуляторов роста растений (РРР) обеспечит существенное увеличение урожайности сельскохозяйственных культур в первой четверти XXI столетия. Данные по их применению в странах Западной Европы подтверждают этот прогноз: к 1999 году в Германии до 80 % площадей посевов озимой пшеницы, а в Англии до 70 % подвергались обработке РРР.

В аграрных системах с высоким уровнем развития, прикорневая фертига-

ция поликомпонентными удобрениями, включающими регуляторы роста растений (РРР) пролонгированного действия, является краеугольным камнем научно обоснованной стратегии питания продовольственных культур, нацеленной на максимизацию продуктивности. Установлено, что вегетативная подкормка макро- и микроэлементами обеспечивает прирост урожайности на 12-15 %, тогда как растительный продукционный потенциал может достигать 20-25 %, стимуляция которого возможна, в том числе, посредством применения экзогенных регуляторов роста. Следовательно, разработка инновационных подходов к синтезу и комбинаторике физиологически активных соединений природного происхождения с органическими и неорганическими питательными субстратами длительного действия, способствующих мобилизации эндогенного потенциала растений, является актуальным направлением исследований [3].

Эпин-Экстра, Р – это передовой регулятор роста, разработанный для повышения эффективности сельскохозяйственного производства. Благодаря тщательно подобранному составу, он оказывает многостороннее положительное воздействие на растения. Среди ключевых преимуществ: ускорение прорастания семян, улучшение приживаемости рассады при пересадке, стимуляция более раннего созревания и увеличение общего урожая. Препарат активно способствует развитию корневой системы и формированию плодов. Важной функцией Эпин-Экстра, Р является защита растений от стрессовых условий, включая низкие температуры, засоление почвы и другие неблагоприятные факторы. Он также повышает сопротивляемость к распространенным заболеваниям, таким как пероноспороз, парша, бактериоз и фузариоз. Средство эффективно для реанимации ослабленных растений и омоложения старых, стимулируя рост новых побегов. Дополнительным преимуществом является способность препарата снижать содержание вредных примесей в растениях, таких как нитраты, тяжелые металлы, радионуклиды и остатки пестицидов.

Механизм действия: в состав регулятора роста Эпин-Экстра входит действующее вещество эпибрасинолид, действуя опосредованно через гормональную систему, влияет на активность и биосинтез ферментов окислительного цикла (ПО, ПФО, каталазу, СОД), гидроксилитических ферментов (протеазы), МДГ, оказывает разностороннее влияние на растение: усиливает прорастание семян и рост растений, повышает устойчивость к биотическим и абиотическим факторам, увеличивает урожай и улучшает его качество.

Эпин-Экстра повышает продуктивность яровой пшеницы при выращивании в условиях дефицита влаги. Применение Эпин-Экстра для предпосевной обработки семян и опрыскивания в фазу цветения в комплексе с микроудобрением Цитовит и рострегулятором Циркон обеспечивает максимальную прибавку урожая 20 %. Дополнительный урожай формируется за счет увеличения продуктивных стеблей на 3-4 %, числа зерен в колосе на 8 %, их массы на 21 % [4].

Циркон, (Р) представляет собой высокоэффективное средство для регулирования роста сельскохозяйственных культур. В его основе лежит

уникальный комплекс гидроксикоричных кислот и их производных, которые играют ключевую роль в стимуляции роста, повышении устойчивости растений к стрессам и поддержании их жизненно важных функций. Применение «Циркона» значительно улучшает всхожесть семян, особенно тех, что имеют низкое качество, а также способствует быстрому и успешному укоренению рассады, черенков хвойных и лиственных растений. Препарат обеспечивает комплексную защиту от различных стрессовых факторов (биотических и абиотических), предотвращает преждевременное опадание завязей и плодов. Кроме того, «Циркон» эффективно снижает риск развития и распространения многих распространенных заболеваний, включая фитофтороз картофеля и томатов, пероноспороз огурцов, паршу, бактериоз, фузариоз, корневые гнили (в частности, серую гниль земляники), мучнистую росу и монилиоз косточковых культур [5].

Механизм действия: в состав регулятора роста Циркон входит действующее вещество гидроксикоричные кислоты принимают активное участие в дыхании растений, открытии и закрытии устьиц, защищая клетки от УФ-в излучения и засухи. Природный регулятор негормонального происхождения, получен из Эхинацей пурпурной.

Предпосевная обработка зерновых культур препаратом Циркон повышала всхожесть семян, усиливая энергию прорастания на 32-41 %.

В дальнейшем, ускорялось, в сравнении с контролем, прохождение фаз развития на 5-8 дней, увеличивалась облиственность растений и синтез хлорофилла.

Оба препарата нетоксичны, безопасны для животных, пчел и человека, не загрязняют окружающую среду. Но при работе с ними нужно придерживаться правил техники безопасности, использовать СИЗ.

Разница Эпина и Циркона заключается в следующем:

1. Состав иммуномодуляторов.
2. Механизм действия – Циркон подавляет вирусы, способствует укоренению и цветению растения. Эпин-Экстра повышает сопротивляемость к патогенной флоре, устойчивость к неблагоприятным условиям.
3. Особенности дозирования, скорость и способ поглощения активных веществ растениями. Циркон, в отличие от Эпина, усваивается корневой системой. Поэтому им можно орошать землю вокруг растения.

Активные компоненты Циркона – гидроксикоричные кислоты, выделенные из эхинацей пурпурной. Препарат выпускается в ампулах объемом 1 мл. Не стимулирует рост, а регулирует внутренние механизмы защиты растения от патогенов. Гидроксикоричные кислоты усваиваются в течение 16-18 часов.

Действие препарата: фунгицидное; иммуномодулирующее; корнеобразующее; улучшает проникновение влаги сквозь оболочку семени; предупреждает обсыпание завязи.

Действующее вещество препарата Эпин-Экстра – эпибрасинолид в дози-

ровке 0,025 г/л. Он похож на собственные гормоны растений. Улучшает гомеостаз, обменные процессы в тканях. Является адаптогеном.

Препарат повышает устойчивость растения к действию патогенной бактериальной флоры, стимулирует образование новых побегов, снижает количество токсинов и радионуклидов.

Эпин-Экстра показан при: заморозках; паводках с затоплением сельскохозяйственных угодий; нашествии вредителей; стрессе растения.

Эффективен в течение 2 недель, далее распадается. Раствор впитывается любыми частями растения.

### Список литературы

1. Шаповал О.А. Регуляторы роста растений в сельском хозяйстве / О.А. Шаповал, И.П. Можарова // *Защита и карантин растений*. – 2019. – № 4. – С. 9-14.

2. Шаповал О.А. Регуляторы роста растений в агротехнологиях / О.А. Шаповал, И.П. Можарова, А.А. Коришунов // *Защита и карантин растений*. – 2014. – № 6. – С. 16-20.

3. Шаповал О.А. Регуляторы роста растений в практике сельского хозяйства / О.А. Шаповал, В. В. Вакуленко, Л. Д. Прусакова, И. П. Можарова. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2009. – 60 с.

4. Синяшин О.Г. Инновационные регуляторы роста растений в сельскохозяйственном производстве / О.Г. Синяшин, О.А. Шаповал, М.М. Шулаева // *Плодородие*. – 2016. – № 5(92). – С. 38-42.

5. Верхотуров В.В. Физиологические проявления действия окислительного стресса у проростков пшеницы / В.В. Верхотуров, Г.В. Пинигина, О.В. Соколова // *Сборник трудов «Проблемные вопросы Восточно-Сибирского региона»*. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. – С.109-111.

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ АЛМАЗНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Ю.Е. Будюков, В.И. Спирин, А.А. Буканов  
ООО ДСС,  
г. Москва

*Аннотация.* Проведены исследования и опытно-конструкторские работы, в результате которых разработан эффективный адгезионно-активный к алмазу пропиточный сплав, применение которого в алмазных коронках типа К-41 позволило повысить: стойкость инструмента на 76 %, механическую скорость бурения в крепких абразивных породах на 35 %.

Матрицы алмазного бурового породоразрушающего инструмента (коронки, долот, расширителей) изготавливают в металлических или графитовых пресс-формах путем установки в них алмазных зерен, засыпки шихты, состоящей из смеси твердосплавных порошков, прессованием корпусом

инструмента, в который помещается пропиточный материал, с последующей пропиткой при заданной температуре в термической печи, при которой расплавленный пропиточный материал связывает частицы шихты и припаивает матрицу к корпусу. Когда пропиточный материал хорошо смачивает шихту матрицы, корпус инструмента и поверхность алмазов буровой инструмент получается с высоким качеством. При отсутствии такого смачивания матрица не полностью пропитывается, разрушается и отрывается от корпуса под действием нагрузок, возникающих при бурении.

Также на работоспособность алмазного бурового инструмента влияет и прочность закрепления алмазов в матрице, которые крепятся, в основном, путем их механического обжата материалом матрицы. При бурении крепких и абразивных горных пород буровым инструментом наблюдается оголение и выпадение работоспособных алмазных зерен за счет не достаточного их закрепления и интенсивного износа материала матрицы. Для повышения работоспособности (стойкости и механической скорости бурения) инструмента необходимо прочное закрепление при возможно большем вылете зерен алмазов из матрицы бурового инструмента.

Необходимую прочность закрепления алмазов в матрице можно получить, вводя в состав матрицы или пропиточного материала химически активные к алмазу элементы, образующие адгезионно-химическую связь алмазных зерен с материалом матрицы. Исследования, проведенные с участием авторов (Будюков Ю.Е., Спиринов В.И.) в ТулНИГП и АО «Полема» показали, что широко применяемые при производстве алмазного бурового инструмента пропиточные сплавы на основе меди хорошо смачивают основной компонент матричной шихты-карбид вольфрама, однако краевой угол смачивания поверхности алмаза медью равен  $135^\circ$ , что свидетельствует о том, что медь практически не смачивает поверхность алмаза. Проведенные исследования показали, что хорошей степени смачивания алмазов можно ожидать тогда, когда пропиточный металл или сплав интенсивно взаимодействует с углеродом, образуя карбиды или значительно растворяя углерод на поверхности алмазов. Наиболее эффективными карбидообразующими элементами показали себя титан и хром в сплавах с железом, медью, оловом и др. Учитывая, что медно-хромовые сплавы прочнее других сплавов хрома, были проведены исследования по созданию адгезионно-активного к алмазу пропиточного материала (сплава) на основе меди. При этом в качестве карбидообразующего элемента применяли хром, также проводились отдельные опыты с использованием титана.

Исследованиями, проведенными в ТулНИГП, установлено, что добавка около 18 вес. % марганца в медь, уменьшает краевой угол смачивания поверхности алмаза и снижает температуру плавления сплава до  $940^\circ\text{C}$ .

Медно-хромово-марганцевый сплав получали сплавлением составов медь-хром и медь-марганец. При этом составы лигатур и образованного ими сплава определяли методами спектрального и химического анализов, температура плавления оценивалась по температуре застывания сплавов, измеряемой платино-родиевой термопарой. Проведенные опыты с медно-хромо-

марганцевым сплавом показали хорошую смачиваемость им алмаза (краевой угол смачивания для этого сплава составил 40 °) и температуру его плавления – 960 °С.

Были проведены в условиях Норильской ГРЭ производственные испытания алмазных импрегнированных коронок типа К-41 (5 штук), изготовленных с пропиткой медно-хромомарганцевым сплавом в сопоставлении по аналогичным показателям и в одинаковых геологических условиях (при бурении в крепких и абразивных породах) с коронами типа К-41 (5 штук), пропитанных медью. И установлено, что коронки, пропитанные сплавом, эффективнее коронок, пропитанных медью, по стойкости на 76 %, по механической скорости бурения на 35 %.

Необходимо заметить, что работы по созданию адгезионно-активных сплавов к алмазу проводились в различное время в известных научно-исследовательских институтах: ВНИИАЛМАЗе, ВИТРе, БашНИПИнефть, ВНИИБТ. Однако, созданные в этих научно-исследовательских организациях пропиточные сплавы, за отдельным исключением (ВНИИАЛМАЗ – рациональный сплав для правящего инструмента), не отличались высокой эффективностью и не получили широкого распространения.

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕММУ ФИКСАЦИИ АЗОТА В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ АММИАЧНОГО СИНТЕЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОВАЛЕНТНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСОВ**

В.Н. Захаров, О.К. Лебедева, И.И. Кузнецова, Д.Ю. Культин,  
Л.А. Асланов, Л.М. Кустов  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Химический факультет,  
г. Москва

***Аннотация.** В кратком обзоре проанализированы новые публикации, касающиеся электрохимического синтеза аммиака, способного в будущем заменить энергоемкий промышленный процесс Габера-Боша. Возможный подход связан с электрохимической фиксацией атмосферного азота и последующего его восстановления до аммиака в мягких условиях, то есть при комнатной температуре и атмосферном давлении. Обсуждается перспективность использования катион-радикального триазинового каркаса, полученного нами микроволновым синтезом, в качестве безметалльного катализатора в указанном выше электрохимическом синтезе аммиака. Данный процесс является примером востребованной и релевантной реакцией в современной зелёной химии.*

***Ключевые слова:** электрохимическая реакция восстановления азота (NRR), электрокатализ, экологическая (зеленая) химия, аммиак, ковалентные органические каркасы.*

Электрохимическая реакция восстановления азота (NRR) представляет собой экологичную альтернативу энергозатратному процессу Габера – Боша, поскольку позволяет синтезировать аммиак в условиях окружающей среды.

Однако практическое применение NRR по-прежнему ограничено низкой селективностью и фарадеевской эффективностью, в основном из-за конкурирующей реакции выделения водорода, которая является кинетически и термодинамически более предпочтительной. NRR – это экологичная и энергоэффективная альтернатива традиционному процессу Габера – Боша для синтеза аммиака, работающая в щадящих условиях и оказывающая наименьшее воздействие на окружающую среду.



Открытые каркасные материалы, в том числе ковалентные органические каркасные структуры (COF) и металлоорганические каркасные структуры (MOF), являются многообещающими кандидатами благодаря своей модульной структуре, регулируемой пористости и адаптируемым функциональным возможностям.

Настройка 2D-ковалентных органических каркасов на основе металлов и фталоцианинов для реакции восстановления азота: кооперативность переходных металлов и органических линкеров была проведена в работе [1].

Двумерные ковалентные органические каркасные структуры (2D-COF) проявляют высокую активность в электрохимической реакции восстановления азота (NRR), однако взаимосвязь между их структурой и эффективностью остается нерешенной проблемой, что препятствует разработке эффективных катализаторов. В этой работе с помощью расчетов методом теории функционала плотности была проведена оценка множества потенциальных материалов на основе фталоцианинов переходных металлов, содержащих переходные металлы и X-фталоцианин (X = N, O, F, S и Cl), на предмет их эффективности в NRR. Расчеты показали, что атомы металлов в этих материалах могут эффективно активировать молекулы  $\text{N}_2$  за счет допирования электроноакцепторными группами. Катализаторы на основе Mo и Nb демонстрируют самую высокую электрокаталитическую активность в NRR с самыми низкими предельными потенциалами – 0,31 и 0,32 В соответственно. Кроме того, Nb-катализатор продемонстрировал значительное преимущество, подавляя реакцию выделения водорода, что делает его одним из главных претендентов среди исследованных материалов на роль электрокатализатора реакции восстановления нитратов. Благодаря детальному анализу орбитального взаимодействия наше исследование показало, что внедрение переходных металлов в подложку приводит к прямой корреляции между количеством электронов, переданных подложке, и уменьшением энергетического расщепления d-орбитали металла, что напрямую приводит к снижению магнитного момента металла. Следовательно, сродство металла к адсорбции  $\text{N}_2$  прямо пропорционально степени переноса электронов. Результаты подчеркивают важность магнитного момента материала как предварительного показателя эффективности адсорбции  $\text{N}_2$ .

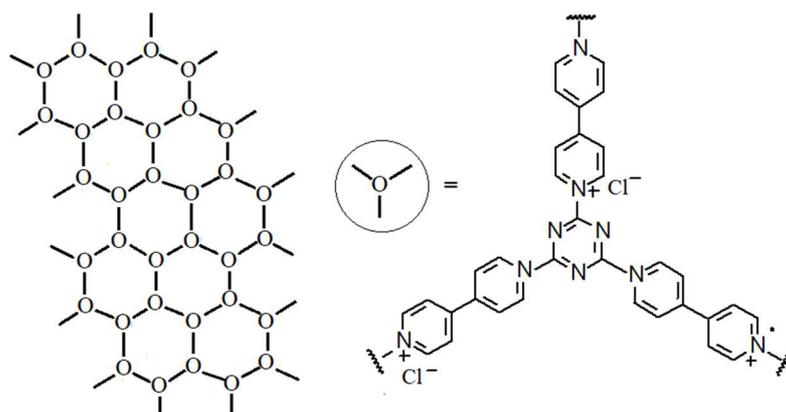
Изменение смачиваемости поверхности катализатора для ускорения NRR была исследована [2]. Эти исследования показали, что межфазная инженерия, в частности интеграция гидрофобных и гидрофильных областей, может помочь в

регулировании границы раздела газ – жидкость – твердое тело и повысить активность NRR. Регулирование смачиваемости способствует адсорбции азота, подавляет реакцию выделения водорода и улучшает перенос заряда и массы на поверхности катализатора, что открывает широкие возможности для разработки целевых катализаторов.

В обзоре [3] кратко изложены последние достижения в области органических фотоэлектрических материалов для NRR, в частности стратегии выбора и разработки активных центров, регулирования пористой структуры и повышения проводимости, а также функционализации поверхности и разработки межфазных границ. Критически анализируются основные проблемы, в том числе структурная нестабильность, низкая собственная проводимость и сложность масштабируемого синтеза. В качестве инновационных инструментов для преодоления этих препятствий предлагаются передовые методы определения характеристик, теоретическое моделирование и машинное обучение. Обсуждаются возможности промышленного применения органических материалов для устойчивого производства  $\text{NH}_3$ , подчеркивая их преобразующую роль в сокращении выбросов.

Многомерные ковалентные органические каркасные структуры с заданным электростатическим потенциалом способствуют электровосстановлению нитратов до аммиака в кислой среде, как родственную и зависимую реакцию от NRR [4]. Прямой синтез аммиака из нитрата ( $\text{NO}_3^-$ ) путем его восстановления в кислой среде является перспективным методом для промышленного применения. Однако сложность заключается в том, что этот процесс конкурирует с неизбежной реакцией выделения водорода, которая протекает в присутствии большого количества протонов ( $\text{H}^+$ ). В этой статье авторы систематически исследуют и рационально оптимизируют микросреду, используя многомерные COF структуры в качестве адьювантов катализатора для ускорения процесса превращения нитрата в аммиак в кислой среде. При подаче специально подобранного положительного электростатического потенциала, генерируемого на многокомпонентных центрах окраски, массоперенос  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{H}^+$  регулируется за счет соответствующих электростатических взаимодействий, что обеспечивает приоритет реакции восстановления нитратов по сравнению с реакцией гидролиза нитратов или превращения  $\text{NO}_3^-$  в  $\text{NO}_2^-$ . В результате достигается высокий уровень выхода  $\text{NH}_3$ , и Фарадеевской эффективности 91,0 %, а твердый  $\text{NH}_4\text{Cl}$  с высокой чистотой 96,2 % собирается непосредственно в кислоте; таким образом, этот метод обеспечивает практический подход к экономичному преобразованию сточных вод в ценный аммиак.

В авторской работе [5] впервые синтезирован микроволновым способом уникальный катион-радикальный триазиновый каркас (CTF), содержащий в качестве анионов хлорид-ионы. (Рисунок) На основе полученного материала создан гибридный электрод-катализатор, состоящий из графитового субстрата и слоя полимерного триазинового



Схематическое изображение полученного многослойного СТФ

каркаса. Катализатор испытан в востребованной электрохимической реакции синтеза аммиака из водных растворов нитратов  $\text{NO}_3\text{RR}$  и Фарадеевская эффективность процесса составила 31 %.

Концентрация аммиака была использована для определения Фарадеевской эффективности процесса, которая рассчитывалась по формуле:

$$FE(\text{NH}_3) = \frac{8 \times F \times n(\text{NH}_3)}{Q},$$

где  $n(\text{NH}_3)$  обозначает количество (моль)  $\text{NH}_3$ ;  $F$  – постоянная Фарадея ( $96\,485 \text{ C моль}^{-1}$ );  $Q$  – общий заряд, прошедший через электрод, 8 – количество переносов электронов ( $n$ ), необходимых для образования 1 моля аммиака.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Проектов-госзадания № АААА-А21-122040600057-3 и №. АААА-А21-121011590083-9. Микроволновой синтез катион-радикального триазинового каркаса выполнен на приборе NOVA 2S (КНР).*

### Список литературы

1. Zhao Y., Xu J., Huang Z., Wang Y., Li Y., Wei H. Tuning Metal-Phthalocyanine 2D Covalent Organic Frameworks for the Nitrogen Reduction Reaction: Cooperativity of Transition Metals and Organic Linkers / *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2025, 17, 12156–12168 // doi:10.1021/acsami.4c20810.
2. Qureshi N., Ravi K., Shim J.H. Modulating Catalyst Surface Wettability to Boost Electrochemical Ammonia Synthesis under Ambient Conditions / *J. Mater. Chem. A* 2026, 14, 1468-1497 //doi:10.1039/D5TA06140G.
3. Cao S., Lu J., Sun Y., Li Y., Hao Z., Lee J. Open Frameworks Materials for Nitrogen Electrofixation to Ammonia, Progress, Challenges, and Future Perspectives / *Small* 2025, 21, 2502708 // doi:10.1002/sml.202502708.
4. Cheng Q., Liu S., He Y., Wang M., Ji H., Huan Y., Qian T., Yan C., Lu J. Multivariate Covalent Organic Frameworks with Tailored Electrostatic Potential Promote Nitrate Electroreduction to Ammonia in Acid / *Nat Commun* 2025, 16, 3717 // doi:10.1038/s41467-025-59052-2.

5. Дмитриев Д.А. Безметалльный катализ в электрохимическом способе получения аммиака / Д.А. Дмитриев, И.И. Кузнецова, В.В. Захаров, Д.Ю. Культин, О.К. Лебедева, В.В. Чернышев, Л.А. Асланов, Л.М. Кустов // Тезисы докладов. II Лунинские чтения (Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 11 февраля 2026 г.) / Составители Т.В. Богдан, Н.А. Мартынова, Д.А. Фирсов. – М.: КДУ, 2026. – 151 с. – Электронное издание сетевого распространения (КДУ, 2026 Москва), 2026, р. 146 (russian).

## ПРОЦЕСС ЗАМЕРЗАНИЯ ВОДЫ НА ЛЬДУ

В.И. Коннов, Е.Е. Вершинина, В.А. Кирюхина

Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» в г. Чите

**Аннотация.** В работе рассмотрены процессы замерзания воды на льду при толщине слоя более 5-7 мм. Промерзание новых слоев воды на льду формируется наледь с линзами воды и с густой сетью водопроводящих каналов. В результате отложения и кристаллизации переохлажденных капель дождя, мороси, тумана, ветровых брызг также возникает наледообразование. С практической точки зрения наибольший интерес представляют исследования теплотеря при наледообразовании и расчет таяния наледного льда.

**Ключевые слова:** наледообразования, кристаллизация, температура воды и льда, охлаждение, замерзание, наледный слой, линзы.

Приведенные ранее теплотехнические расчеты льдообразования на реках, ручьях говорят о сложности этих физических процессов (Коннов В.И., 2022, 2023, 2024 г) [1-4].

Процесс замерзания воды на льду осложняется появлением ледяной корки у ее поверхности. При толщине слоя более 5-7 мм корка льда сдерживает кристаллизацию воды (рис. 1), обеспечивает развитие миниатюрных бугров пучения и излияние наледных вод (рис. 2).

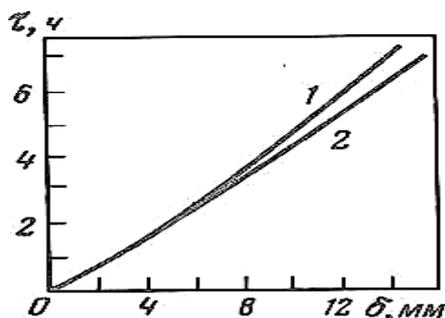


Рис. 1. График зависимости  $r = f(\delta)$  ( $r$  – время промерзания;  $\delta$  - толщина корки льда);  
1 – с учетом термического сопротивления корки льда;  
2 – без учета термического сопротивления корки льда

При мощности слоя наледообразующих вод, измеряемой десятками сантиметров, в толще воды возникают большие напряжения, которые разрешаются посредством взрыва или путем напорной миграции в

межкристаллическое пространство ледяного основания. В ряде случаев возможно расщепление смерзшихся элементарных наледных слоев. При перекрытии корки льда новыми порциями воды возможно формирование наледи с линзами воды и густой сетью водопроводящих каналов. Промерзание их вызывает резкие деформации ледяного массива. В природной обстановке формирование линз инъекционно-наледного льда в течение зимы происходит многократно, в результате чего строение наледи резко осложняется.

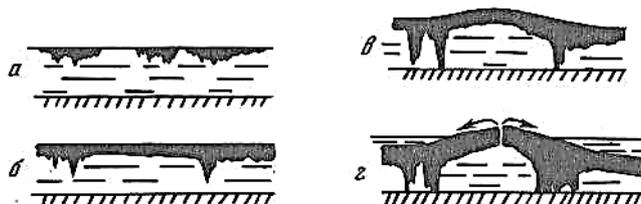


Рис. 2. Схема промерзания слоя воды толщиной до 5 мм  
а-г – стадии промерзания слоя воды

Наледеобразование за счет капельно-жидкой воды (дождя, мороси, тумана, ветровых брызг) происходит в результате отложения и кристаллизации в основном переохлажденных капель. Мелкие капли, сталкиваясь с плоскостью аккумуляции, замерзают почти мгновенно, поэтому сохраняют свою сферическую форму. Выделяющееся при этом небольшое количество скрытой теплоты льдообразования уносится потоком воздуха, не влияя на трансформацию белого зернистого налета. Крупные капли несут большое количество скрытой теплоты. Кристаллизация их сопровождается повышением температуры до  $-0^{\circ}\text{C}$ . Это приводит к тому, что вода разливается тончайшим слоем и затем превращается в стекловидную корку льда. В свободной атмосфере намерзание переохлажденных капелек происходит аналогичным образом на отдельных кристаллах льда, крупы, ледяного дождя или летательных аппаратов. При этом образуются отложения, близкие к гололеду. Особое строение имеет град. Он состоит из концентрических слоев намерзшей воды, число которых иногда достигает 50. В особых случаях формируется так называемый взрывчатый град. Б.А. Савельев (1971) следующим образом объясняет его происхождение: «Вначале образуются крупные капли в слабопересыщенной парами атмосфере, затем начинается замерзание, но не изнутри, а с поверхности. Возникает своеобразный гидролакколит, который при дальнейшем промерзании и повышении давления разрывается изнутри с образованием либо осколков, либо нароста за счет замерзания воды, излившейся на поверхность».

Как видим, процессы намерзания наледных вод в различных условиях имеют много общего. Вместе с тем они существенно отличаются от промерзания крупных водоемов, рек и ручьев.

С теплофизических позиций наледобразование разделяется на три стадии: 1) охлаждение наледобразующих вод, 2) замерзание наледной воды, 3) охлаждение льда. При разрушении наледи проявляются противоположные процессы: 1) нагревание наледи, 2) таяние наледного льда, 3) прогревание талых

наледных вод. С практической точки зрения наибольший интерес представляют исследования теплотерь при наледообразовании и расчет таяния наледного льда.

### Список литературы

1. *Экологическая и техносферная безопасность. Научно-прикладные задачи и решения: монография / под общ. ред. Научного совета ГНИИ «Нацразвитие».* – СПб: ГНИИ «Нацразвитие», 2024. – 80 с. ISBN 978-5-00213-407-6 DOI 10.37539/240704.2024.56.58.001.

2. *Данильченко С.Л. Развитие российской социально-экономической системы: вызовы и перспективы: монография / С.Л. Данильченко, А.Н. Фомичев, В.Н. Круглов [и др.]; гл. ред. Э.В. Фомин; Чувашский государственный институт культуры и искусств.* – Чебоксары: Среда, 2024. – 200 с. ISBN 978-5-907830-14-1. DOI 10.31483/a-10584

3. *Качество жизни населения и экология: монография / Под общ. ред. Л.Н. Семерковой.* – Пенза: РИО ПГСХА, 2015. – 140 с. – Текст: непосредственный.

4. *Алексеев В.Р. Основные итоги изучения наледей на территории Сибири и Дальнего Востока / В.Р. Алексеев, Н.Ф. Савко, А.И. Сизиков – Текст: непосредственный // Зап. Забайкальского филиала Геогр. Об-ва СССР.* – Чита, вып. 92, 1973. – С. 7-98.

## СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БЕНТАНИТА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ЧЕТВЕРТИЧНЫМИ СОЛЯМИ АМОНИЯ

Соколов А.А., Донская Е.С., Лебедев П.В., Атрощенко Ю.М.  
Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,  
г. Тула

**Аннотация.** Установлено, что интеркаляция катионов цетилтриметиламмоний бромида (ЦТАБ) в межслоевое пространство бентонита приводит к значительному увеличению базальных расстояний, варьирующихся в диапазоне 14,47-33,30 Å. Данные элементного анализа показали высокую эффективность поглощения модификатора (87-99 %). Выявлено, что количество сорбированного ПАВ превышает обменную емкость исходной глины, что указывает на наличие гидрофобных взаимодействий наряду с ионным обменом. На основании полученных данных сделан вывод о молекулярной организации органических катионов в межслоевом пространстве бентонита в зависимости от плотности упаковки: от латерального монослоя и бислоя до структур парафинового типа.

Природная глина не обладает оптимальным уровнем адсорбционной активности в отношении неполярных органических загрязнителей. В этом случае наноглины гидрофобизируют поверхностно-активными веществами.

В качестве объекта исследования был использован природный бентонит Таганского месторождения (Республика Казахстан). Химический состав бентонита, согласно предыдущим исследованиям [1], мас. %: SiO<sub>2</sub> – 66,2;

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 20,8; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 7,3; MgO – 3,2; CaO – 1,3; Na<sub>2</sub>O – 1,2. Состав кристаллических фаз: смектит диоктаэдрический (монтмориллонит) – 98,5 %, кварц – 1,5 %. Органическим модификатором для синтеза органобентонита служил катионный ПАВ – цетилтриметиламмоний бромид (ЦТАБ). Органоглину получали по методике [2]. При синтезе органоглин количество ЦТАБ бралось с учетом величины емкости катионного обмена бентонита и соответствовало следующим значениям ЕКО: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5. Емкость катионного обмена (ЕКО) бентонита, определенная методом адсорбции метиленового голубого [3], составила 88 мг-экв/100 г.

Для оценки содержания органического модификатора в органоглине был проведен СНN-анализ синтезированных образцов на СНN-анализаторе Sundry SDCHN636 (КНР). Данные элементного анализа образцов исходного и модифицированного бентонита представлены в табл. 1. Как следует из полученных данных, эффективность поглощения бентонитом ЦТАБ составляет 87-100 %. Количество нанесенного катионного ПАВ превышает обменную емкость исходного бентонита, что указывает на возможность гидрофобных взаимодействий, помимо ионного обмена, в ходе модификации.

Таблица 1  
Результаты определения содержания С и N в исследуемых образцах

Образец	m(ЦТАБ) на 1 г глины, г	w(C), %	w(N), %	w(ЦТАБ), рассч., %	w(ЦТАБ) эксп., %	Эффективность поглощения, %
Бентонит	-	0,25	0,4	-	-	-
0,5 ЕКО ЦТАБ	0,155	9,21	0,59	13,42	11,72	87,33
1,0 ЕКО ЦТАБ	0,309	18,34	0,88	23,61	23,65	100,17
1,5 ЕКО ЦТАБ	0,464	24,44	1,1	31,69	31,63	99,81
2,0 ЕКО ЦТАБ	0,618	28,71	1,21	38,19	37,21	97,43
2,5 ЕКО ЦТАБ	0,7725	31,48	1,31	43,58	40,83	93,69

Таблица 2  
Базальные расстояния исходного и модифицированного бентонита

Базальный рефлекс	Исходный бентонит	Количество интеркалированного ЦТАБ				
		0,5ЕКО	1,0ЕКО	1,5ЕКО	2,0ЕКО	2,5ЕКО
°2θ	5,790	6,101	4,834	4,439	4,501	4,541; 2,651
d001, Å	15,25	14,47	18,27	19,89	19,61	19,44 (d002); 33,30 (d001)

Модели упаковки молекул катионного ПАВ в межслоевом пространстве органоглин [4,5]

Модель упаковки	Базальное расстояние (d001), Å
Латеральный монослой	14,5–14,7
Латеральный бислой	17,5–18,5
Псевдотрислой	19,1–20,1
Парафиновый монослой	22,5–25,0
Парафиновый бислой	38,5–41,3

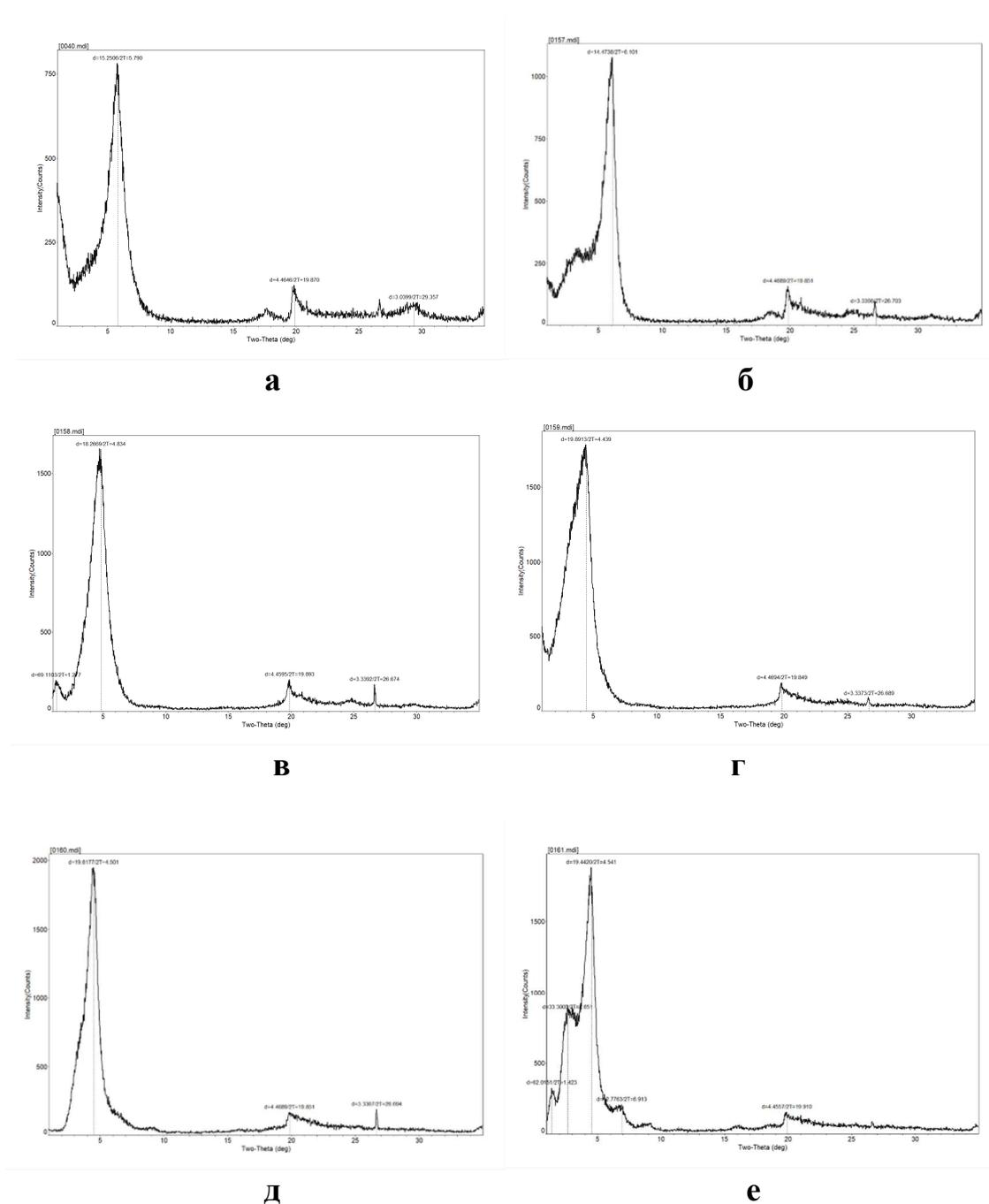


Рис. 1. Рентгенодифрактограммы исходного бентонита (а) и модифицированного разным количеством ЦТАБ: 0,5ЕКО (б), 1,0ЕКО (в), 1,5ЕКО (г), 2,0ЕКО (д), 2,5ЕКО (е)

Рентгеновское изучение исходного бентонита и модифицированных образцов осуществлялось на дифрактометре Tongda TD-3700 (Китай). Эксперимент выполнен с использованием  $\text{CuK}\alpha$  – излучения (длина волны 1,542 Å); съемка велась с напряжением и током на трубке 60 кВ и 50 мА, в интервале углов  $1^\circ < 2\theta < 35^\circ$ , шаг сканирования  $0,02^\circ$ , время экспозиции  $\tau = 0,6$  с в точке. Результаты рентгенодифрактометрического анализа исследуемых образцов исходного и модифицированного бентонита приведены на рис. 1 и в табл. 2.

Из данных табл. 2 следует, что интеркаляция катионов ЦТАБ в слои бентонита привела к значительному увеличению базальных расстояний органоглины, варьирующихся в диапазоне 14,47–33,30 Å, что указывает на проникновение катионов поверхностно-активного вещества в межслоевое пространство бентонита. Эти расширения слоёв глины, очевидно, связаны с расположением молекул ЦТАБ в зависимости от количества модификатора. Так, ранее на основании данных рентгеновской дифракции авторы работ [4,5] предположили, что с увеличением плотности упаковки расположение интеркалированных молекул ПАВ в межслоевом пространстве органоглин варьируется от латерального (параллельное расположение углеводородной цепи) монослоя к латеральному бислою, затем к монослою парафинового типа (алкиламмониевая цепь располагается под определенным углом к алюмосиликатной поверхности) и, наконец, к бислою парафинового типа. Величина базального расстояния ( $d_{001}$ ) при этом ступенчато возрастает (табл. 3). Таким образом, сравнивая межслоевые расширения и молекулярные размеры поверхностно-активного вещества, можно различить ориентацию катионов и молекул ЦТАБ в межслоевом пространстве.

### Список литературы

1. Карпова Т.В. Композитные мезопористые материалы на основе кислотно-активированных монтмориллонитов / Т.В. Карпова, Е.А. Булучевский, А.В. Лавренов // Вестник Томского государственного университета. Химия, 2019. – № 16. – С. 15-28. <https://doi.org/10.17223/24135542/16/2>
2. Чечетко Е.С. О возможности использования модифицированного додецилтриметиламмоний бромидом бентонита для очистки вод от нефти и ее водорастворимых компонентов / Е.С. Чечетко, И.И. Толпешина, Ю.А. Завгородняя // Вестник Московского университета. Почвоведение, 2017. – № 3. – С. 33-40.
3. ГОСТ 21283-2024. Глина бентонитовая для тонкой и строительной керамики. Методы определения показателя адсорбции и емкости катионного обмена. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – С. 1-5.
4. Zhu J.X. Arrangement models of alkylammonium cations in the interlayer of HDTMA<sup>+</sup> pillared montmorillonites / J.X. Zhu, H.P. He, J.G. Guo, D. Yang, X.D. Xie // Chinese Science Bulletin, 2003. – Vol. 48, № 2. – P. 368-372.
5. Zhu L. Influence of clay charge densities and surfactant loading amount on the microstructure of CTMA–montmorillonite hybrids / L. Zhu, R. Zhu, L. Xu, X. Ruan // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007. – Vol. 304, № 1-3. – P. 41-48.

# РЕГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ХРОМА: ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В.М. Панарин, Н.Н. Пантелеев  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

*Аннотация.* В данной статье представлен обзор технологий регенерации электролитов, применяемых при производстве металлического электролитического хрома. Рассматриваются особенности шестивалентных электролитических процессов, передовые методы очистки и восстановления рабочих растворов, перспективные исследования в области мембранных технологий и расплавных электролитов, а также экономические и экологические аспекты проблемы.

Электролитический хром – это металлический хром высокой чистоты (до 99,99%), получаемый методом электролиза водных растворов. В отличие от гальванического хромирования, где целью является нанесение тонкого покрытия на поверхность изделий, производство электролитического хрома представляет собой электрохимический способ получения самостоятельного металлургического продукта – хромовых пластин (хлопьев), которые затем перерабатываются в порошок, слитки или мишени для напыления.

Высокочистый электролитический хром занимает стратегическое положение в современной промышленности. Он является незаменимым сырьём для производства жаропрочных суперсплавов на основе никеля, применяемых в газовых турбинах авиационных двигателей и энергетических установок. Хромовые мишени для магнетронного распыления используются в электронной промышленности при производстве полупроводников, жидкокристаллических дисплеев, жёстких дисков и антирефлексных покрытий. Кроме того, электролитический хром служит легирующей добавкой в специальной металлургии для получения коррозионностойких и жаростойких сталей [1].

Основной проблемой при промышленном электролизе хрома является деградация электролитов в ходе длительной эксплуатации. Накопление примесных ионов, изменение соотношения компонентов, восстановление шестивалентного хрома до трёхвалентного – все эти процессы постепенно снижают выход по току, ухудшают чистоту получаемого металла и в конечном итоге вынуждают полностью заменять электролит. Учитывая высокую стоимость хромового ангидрида особой чистоты и значительные объёмы электролитов в промышленных установках (десятки кубических метров), регенерация отработанных растворов представляет собой задачу первостепенной экономической и экологической важности.

## **Электролитические процессы получения металлического хрома**

Наиболее распространённым промышленным методом получения высокочистого металлического хрома является электролиз водного раствора хромового ангидрида ( $\text{CrO}_3$ ). Электролит готовится из хромового ангидрида и серной кислоты в массовом соотношении приблизительно 100:1. Типичные

концентрации составляют 220-300 г/л  $\text{CrO}_3$  и 2,2-3,0 г/л  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Электролиз ведётся при плотности тока 1000-1400 А/м<sup>2</sup>, температуре электролита 10-15°С и напряжении на ячейке 3,5-4,0 В. Электролит непрерывно циркулирует через теплообменник для поддержания низкой температуры, необходимой для получения качественного осадка [1].

В ходе электролиза шестивалентный хром восстанавливается на катоде (нержавеющая сталь) до металлического хрома, который осаждается в виде пластин толщиной 1-2 мм за цикл продолжительностью около 24 часов. После достижения необходимой толщины катодные пластины извлекаются из ванны, хромовые пластины отделяются механически, промываются и сушатся. Полученный металл имеет чистоту до 99,99 % по хрому. Аноды изготавливаются из свинца или свинцово-оловянного сплава и служат исключительно для подвода тока, не растворяясь в процессе.

Производство электролитического хрома является крайне ресурсоёмким процессом. Высокоочищенный хромовый ангидрид – основное сырьё для шестивалентного электролита – относится к дорогостоящим химикатам, а его расход напрямую зависит от эффективности рециркуляции электролита. При полной замене электролита без регенерации потери  $\text{CrO}_3$  могут составлять 30-50% от общего расхода сырья, что существенно увеличивает себестоимость продукции [1].

Экологическая составляющая не менее значима. Шестивалентный хром является признанным канцерогеном, включённым в списки особо опасных загрязнителей. Сброс отработанного электролита требует многостадийной нейтрализации: восстановления  $\text{Cr(VI)}$  до  $\text{Cr(III)}$  с помощью восстановителей (бисульфита натрия, гидразина, сульфата железа), последующего осаждения гидроксида хрома при рН 7-9, фильтрации и утилизации хромсодержащего шлама на специализированных полигонах.

Внедрение технологий регенерации радикально меняет экономику и экологический профиль производства. По расчётам, применение электромембранной очистки в сочетании с обратным осмосом промывных вод позволяет сократить потребление хромового ангидрида на 70-90 %, уменьшить объём хромсодержащих стоков на 80-95 % и снизить затраты на очистные сооружения в 3-5 раз.

#### **Механизмы деградации электролитов и необходимость регенерации**

В шестивалентном процессе наиболее серьёзной проблемой является накопление трёхвалентного хрома  $\text{Cr(III)}$  в электролите. На катоде параллельно с осаждением металлического хрома протекает неполное восстановление  $\text{Cr(VI)}$  до  $\text{Cr(III)}$ , который остаётся в растворе. На аноде происходит частичное обратное окисление  $\text{Cr(III)}$  до  $\text{Cr(VI)}$ , однако скорости этих процессов не сбалансированы, что ведёт к постепенному росту концентрации  $\text{Cr(III)}$ . При содержании  $\text{Cr(III)}$  выше 15-20 г/л существенно ухудшается качество катодного осадка: хром становится хрупким, увеличивается содержание примесей, снижается выход по току.

Кроме того, избыток Cr(III) изменяет электропроводность раствора, вязкость и характер образования хромовых комплексов, что затрудняет транспорт ионов к катоду. Поддержание оптимального соотношения Cr(VI) является одной из ключевых задач управления электролизом. Свинцовые аноды частично способствуют окислению Cr(III) обратно в Cr(VI), но их каталитическая эффективность ограничена и снижается со временем из-за образования оксидных плёнок.

Среди наиболее перспективных направлений развития технологий регенерации электролитов при производстве металлического хрома можно выделить несколько ключевых областей.

#### **Электродиализ с катионообменными мембранами**

Электромембранные процессы являются наиболее перспективным направлением для тонкой очистки электролитов в производстве высокочистого металлического хрома. В двухкамерном электролизёре, разделённом катионообменной мембраной (КОМ), очищаемый электролит размещается в анодном пространстве. Под действием электрического тока катионные примеси ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  и др.) мигрируют через КОМ в катодную камеру, заполненную разбавленным раствором кислоты. При этом хромат-анионы остаются в анодном пространстве, что обеспечивает минимальные потери ценного компонента.

Исследования показали, что при оптимальной плотности тока 1-5 А/дм<sup>2</sup> и температуре 40-60 °С степень извлечения примесных катионов достигает 90-98 %. Для производства металлического хрома это означает возможность снижения содержания железа в электролите с нескольких граммов на литр до уровня менее 0,1 г/л без существенных потерь хромовой кислоты. Электромембранный метод может работать в непрерывном режиме параллельно с основным электролизом, что исключает необходимость остановки производственной линии для регенерации [2].

#### **Электродиализ с анионообменными мембранами**

Альтернативный подход предполагает перенос хромат-анионов из загрязнённого раствора через анионообменную мембрану (АОМ) в анолит, где формируется чистый раствор хромовой кислоты. В данной конфигурации загрязнённый электролит размещается в катодном пространстве. Хроматные и дихроматные анионы мигрируют через АОМ, оставляя катионные примеси в исходном растворе.

Достоинством данного варианта является получение высокочистого концентрата хромовой кислоты, практически свободного от металлических примесей, что особенно важно для производства хрома чистотой 99,99 %. Недостатком является более короткий срок службы АОМ в агрессивной окислительной среде хромовой кислоты. Тем не менее разработка новых фторсодержащих мембран и композитных материалов существенно расширяет возможности этого подхода [3].

#### **Погружные электрохимические модули**

Погружные электрохимические модули (ПЭМ), разработанные группой Кругликова, представляют компактное решение для непрерывной регенерации

электролитов непосредственно в производственных ваннах. Модуль погружается в ванну улавливания и совмещает функции концентрирования хромовой кислоты и очистки от катионных примесей, заменяя энергоёмкую стадию выпаривания. Применительно к производству металлического хрома ПЭМ может быть интегрирован в контур циркуляции электролита между приёмным баком и электролизной ванной, обеспечивая постоянное качество раствора без перерывов в производстве.

### **Баромембранные технологии: обратный осмос**

Технология обратного осмоса (RO) привлекает всё большее внимание в контексте замыкания водных циклов при производстве металлического хрома. В процессе промывки хромовых пластин после извлечения из электролизной ванны образуются промывные воды, содержащие разбавленную хромовую кислоту и примеси. Обратный осмос позволяет сконцентрировать эти растворы до уровней, пригодных для возврата в электролит.

Исследования показали, что при давлениях до 80-120 бар мембраны обратного осмоса обеспечивают задержание хрома на уровне более 99,9 %, сульфата – 99,6 %, борной кислоты – до 93,8 %, при извлечении воды до 87,7 % и удельном энергопотреблении не более 2,7 кВт·ч/м<sup>3</sup>. Ретентат (концентрат) может быть возвращён непосредственно в рабочий электролит после корректировки состава, а пермеат (очищенная вода) используется повторно для промывки [4,5].

Для производства металлического хрома обратный осмос особенно актуален в сочетании с предварительной электромембранной очисткой от примесей: сначала из промывных вод удаляются катионные загрязнители, затем очищенный раствор концентрируется обратным осмосом до рабочей концентрации. Такая комбинированная схема позволяет практически полностью замкнуть как водный, так и ресурсный циклы производства.

### **Заключение**

Регенерация электролитов при производстве электролитического хрома представляет собой многоплановую технологическую задачу, решение которой определяется типом электролитического процесса, требуемой чистотой металла и масштабом производства.

Для шестивалентного процесса ключевыми задачами являются непрерывное окисление накопившегося Cr(III) и глубокое удаление катионных примесей. Электромембранные технологии – электродиализ с катионо- и анионообменными мембранами, погружные электрохимические модули – предоставляют наиболее эффективные инструменты для решения обеих задач в непрерывном режиме.

Успешное внедрение этих технологий позволит существенно снизить себестоимость электролитического хрома, минимизировать экологический след производства и обеспечить растущий спрос аэрокосмической, электронной и металлургической промышленности на этот стратегически важный металл.

## Список литературы

1. Лякишев Н.П. *Металлургия хрома* / Н.П. Лякишев, М.И. Гасик. – М.: ЭЛИЗ, 1999. – 582 с.
2. Kruglikov S.S. *Application of electromembrane processes in chromium electroplating technology* / S.S. Kruglikov [et al.] // *Petroleum Chemistry*. – 2016. – Vol. 56. – P. 969-976.
3. Kruglikov S.S. *Regeneration of Chromium Electroplating Electrolytes by the Application of Electromembrane Processes* / S.S. Kruglikov [et al.] // *Theor. Found. Chem. Eng.* – 2018. – Vol. 52. – P. 800-805.
4. Engstler R. *A Reverse Osmosis Process to Recover and Recycle Trivalent Chromium from Electroplating Wastewater* / R. Engstler [et al.] // *Membranes*. – 2022. – Vol. 12(9). – Art. 853.
5. Engstler R. *A Robust High-Pressure RO Technology to Overcome the Barriers to Full Circularity in Cr(III) Electroplating Operations* / R. Engstler [et al.] // *ACS ES&T Water*. – 2024. – 5461-5472.

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В ОБЛАСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И ЭКОЛОГИИ

### ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА, ВЫРАЩИВАЕМОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ ПОЧВЫ

Е.М. Басарыгина<sup>1</sup>, Т.А. Путилова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный аграрный университет  
г. Троицк

<sup>2</sup> Челябинский институт путей сообщения – филиал  
Уральского государственного университета путей сообщения  
г. Челябинск

*Аннотация.* В статье рассмотрена методика оценки качества продукции растениеводства, выращиваемой с использованием восстановленной искусственной почвы. Приведены выражения для расчета производственно-экологических коэффициентов, учитывающих экологическую чистоту, биологическую полноценность и сохранение качества продукции.

Преимущества гидропонных технологий во многом зависят от свойств искусственной почвы, в частности, минеральных субстратов, которые стареют в период вегетационной эксплуатации. Для восстановления свойств искусственной почвы предложено использование методов и технических средств электротехнологии [1-3].

Для оценки качества продукции растениеводства, выращиваемой с использованием восстановленной искусственной почвы, разработана соответствующая методика, предусматривающая определение следующих показателей: коэффициента восстановления искусственной почвы; коэффициента восстановления свойств системы «субстрат-раствор»; коэффициента урожайности; коэффициента качества продукции и коэффициента энергетической эффективности.

Коэффициент восстановления субстрата представляет собой произведение коэффициента восстановления свойств системы «субстрат-раствор»; коэффициента урожайности и коэффициента качества продукции. Коэффициент восстановления свойств системы «субстрат-раствор» оценивает изменение электрофизических характеристик корнеобитаемой среды и газового режима; учитывает электропроводность, ионный состав, активность ионов восстановленной искусственной почвы и т.д. Значение коэффициента восстановления свойств системы «субстрат – раствор» должно быть равно единице. Данное значение указывает на эффективность технологии восстановления, то есть соответствие значений перечисленных характеристик корнеобитаемой среды рекомендуемым.

Коэффициент качества продукции оценивает экологическую чистоту, биологическую полноценность и сохранение качества продукции

$$K_k = K_{nэ1} K_{nэ2} K_c \geq 1, \quad (1)$$

где  $K_{nэ1}$  – производственно-экологический коэффициент первого рода;  $K_{nэ2}$  – производственно-экологический коэффициент второго рода;  $K_c$  – коэффициент сохранения качества продукции [2].

Производственно-экологический коэффициент первого рода оценивает экологическую чистоту продукции и представляет собой произведение частных производственно-экологических коэффициентов первого рода, учитывающих содержание отдельного класса экотоксикантов в получаемой продукции:

$$K_{nэ1} = k_1 k_2 k_3 \dots k_n \geq 1, \\ K_{nэ1} = (k_{1б} / k_{1п}) (k_{2б} / k_{2п}) (k_{3б} / k_{3п}) \dots (k_{nб} / k_{nп}) \geq 1, \quad (2)$$

где  $k_1 \dots k_n$  – частные производственно-экологические коэффициенты отдельного класса экотоксикантов;  $k_{1б} \dots k_{nб}$ ,  $k_{1п} \dots k_{nп}$  – содержание отдельных экотоксикантов в единице продукции (кг/кг) в базовом и предлагаемом вариантах соответственно [2].

Обязательным условием при расчете указанных коэффициентов является следующее: содержание в единице продукции экотоксикантов должно быть в предлагаемом варианте меньше допустимых значений. Коэффициент  $K_{nэ1}$  может рассчитываться по одному (доминирующему) экотоксиканту или по нескольким [2].

Производственно-экологический коэффициент второго рода представляет собой произведение частных производственно-экологических коэффициентов второго рода, учитывающих биологическую полноценность продукции –

содержание основных питательных элементов (белков, жиров, углеводов, витаминов, микро- и макроэлементов, в том числе и экопротекторных, и т.д.):

$$K_{nэ2} = C_1 C_2 C_3 \dots C_n \geq 1; \quad (3)$$

$$K_{nэ2} = (C_{1п} / C_{1б}) (C_{2п} / C_{2б}) (C_{3п} / C_{3б}) \dots (C_{nп} / C_{nб}) \geq 1, \quad (4)$$

где  $C_1 \dots C_n$  – частные производственные коэффициенты второго рода;  $C_{1б} \dots C_{nб}$ ,  $C_{1п} \dots C_{nп}$  – содержание основных питательных элементов в единице продукции (кг/кг) в базовом и предлагаемом вариантах соответственно.

При этом изменение содержания экопротекторных компонентов может быть выделено:

$$K_{nэ2} = (C_1 C_2 C_3 \dots C_n) / (C_{э1} C_{э2} C_{э3} \dots C_{эн}), \quad (5)$$

где  $C_{э1} \dots C_{эн}$  – частные производственно-экологические коэффициенты для экопротекторных компонентов [2].

Коэффициент сохранения качества продукции  $K_c$  представляет собой отношение срока хранения при выращивании продукции по проектируемому и базовому вариантам:

$$K_c = \tau_n / \tau_б \geq 1, \quad (6)$$

где  $\tau_n, \tau_б$  – срок хранения при выращивании продукции по проектируемому и базовому вариантам соответственно [2].

### Список литературы

1. Басарыгина Е.М. Электротехнологии и электрооборудование для микрклонального размножения растений / Е.М. Басарыгина, Е.А. Колотыгина, Т.А. Путилова // *Материалы Национальной (Всероссийской) научной конференции Института агроинженерии.* – Челябинск, 2022. – С. 192-196.

2. Басарыгина Е.М. Методика оценки эффективности восстановления минеральных субстратов / Е.М. Басарыгина, Г.П. Лещенко, П.М. Трушин // *Механизация и электрификация сельского хозяйства.* – 2006. – № 7. – С. 14-15.

3. Патент РФ № 2281648. Способ восстановления гидропонных субстратов // Авдеев М.В., Воловик Е.Л., Трушин П.М., Басарыгина Е.М. *БИ №23, 2006.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Панарин В.М., Маслова А.А., Кондрашов В.А. Алгоритмы пространственно-временного анализа данных экологического мониторинга для выявления несанкционированных выбросов .....	3
Панарин В.М. Структура автоматизированной системы обеспечения экологической безопасности природно-технических систем при завершении эксплуатации объектов захоронения ТКО .....	6
Маслова А.А. Разработка подсистемы оценки экологических рисков территорий полигонов твердых коммунальных отходов на постэксплуатационном этапе .....	10
Панарин В.М., Рылеева Е.М., Туляков С.П., Коряков А.Е. Донные отложения как индикатор техногенной нагрузки на водные объекты: методы геохимической оценки и регрессионного моделирования .....	14
Панарин В.М., Рылеева Е.М., Туляков С.П. Метод наименьших квадратов в анализе загрязнения поверхностных вод промышленно развитых территорий: преимущества, недостатки и области применения .....	24
Панарин В.М., Рылеева Е.М., Туляков С.П. Спектральные и оптические методы оперативного контроля качества поверхностных вод: современное состояние и перспективы развития в Российской Федерации .....	31
Зайцев В.П., Юр Г.С., Палагушкин Б.В. Исследования модифицированного топлива с целью улучшения экологических характеристик двигателя внутреннего сгорания .....	39
Аетов А.У., Хабриев И.Ш., Маннанова А.А., Закирова Л.Л. Использование сверхкритических флюидов для утилизации и глубокой переработки техногенных отходов лесопромышленного комплекса .....	41
Ван Шуэюй, Мищенко О.А. Сравнительный анализ утилизации твердых бытовых отходов в Хабаровске и приграничном Китае .....	44
Хабриев И.Ш., Кабиров Р.Р., Ганиева Л.И., Хайрутдинов В.Ф., Абдулагатов И.М. Предотвращение и удаление асфальто-смоло-парафиновых отложений внутри нефтяных скважин с использованием сверхкритических флюидов .....	49
Назаров В.И., Макаренков Д.А., Родина С.А., Костяева К.С. Особенности утилизации отхода пивоварения пивной дробины методом прокатки через плоскую матрицу с определением силовых параметров .....	52
Назаров В.И., Макаренков Д.А., Попов А.П. Анализ механизма и кинетики процесса механоактивации твёрдых частиц в шаровой мельнице с расчётом необходимого количества подводимой энергии .....	57
Назаров В.И., Макаренков Д.А., Попов А.П., Немерюк А.М., Сайфутяров Р.Р., Калачева В.Р. Особенности технологий утилизации техногенных отходов и отработанных альтернативных химических источников тока с использованием процессов механоактивации .....	63
Кубкин Д.Д., Назаров В.И. Методы синтеза смешанного катодного материала состава $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$ .....	71
Дем Н.С., Беренгартен М.Г., Назаров В.И. Особенности получения высокопористых материалов и нанопорошков криохимическим методом .....	75
Киреева А.С. Обращение с золошлаками: аналитический обзор подходов по использованию ЗШО в качестве сорбентов для очистки сточных вод .....	80
Макаревич Н.Ю., Зык Н.В., Стрелкова Е.В., Шункевич В.О. Техногенные отходы республики Беларусь: солигорские и гомельские горы .....	84
Кузнецова А.В., Стребкова А.С. Мониторинг состава сточных вод в системе водоотведения (на примере МУП «Рубцовский водоканал») .....	87

Головин К.А., Белевцев В.О. Напряжения в промерзших грунтах .....	93
Головин К.А., Белевцев В.О. Газы в вечной мерзлоте и формирование рельефа при таянии льда .....	95
Головин К.А., Белевцев В.О. Морозное пучение .....	98
Головин К.А., Белевцев О.И., Белевцев В.О. Криостратиграфия, криоструктуры, криотекстуры и криофации пучинистость грунтов .....	100
Кудрявцев М.А., Афанасьева Н.Н. Утилизация вторичных ресурсов в России: законодательство, практика и перспективы .....	103
Исаева Ю.Д. Структурно-функциональная модель информационно-измерительной системы экологического мониторинга для принятия управленческих решений .....	105
Ерёмчев И.А., Афанасьева Н.Н. Топливно-энергетические ресурсы и их роль в развитии страны .....	108
Маслова А.А., Браун В.А. Автономная позиционная станция мониторинга загрязнения водных объектов .....	110
Маслова А.А., Качалова А.А. Применение систем мониторинга окружающей среды в управлении рисками .....	113
Маслова А.А., Коваленко А.Н. Основные тенденции в развитии информационных систем мониторинга аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях .....	117
Волков А.В., Ерёмчев И.А. Прикладные приложения теории геохимических барьеров в аспекте управления потоками загрязняющих веществ .....	121

## **ТЕХНОЛОГИИ ЗДОРОВЬЯ.**

### **ВЛИЯНИЕ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ.**

#### **ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Лапаева Н.С., Бобина И.В., Шарлаева Е.А. Особенности липидного обмена у лиц с артериальной гипертензией в условиях городской среды .....	124
Панарин В.М., Кудрявцев М.А. Детальный анализ токсичных компонентов свалочного газа и механизмы их воздействия на организм человека .....	128
Цедилин А.Н., Макаренков Д.А., Исакова А.П., Шишов Н.О. Анализ мониторинга тропосферного озона в Московском регионе за 2024-2025 гг. ....	132
Ступин А.С. Экологически безопасные и высокоэффективные регуляторы роста растений .....	137
Будюков Ю.Е., Спиринов В.И., Буканов А.А. Способ повышения стойкости алмазного бурового инструмента .....	141
Захаров В.Н., Лебедева О.К., Кузнецова И.И., Культин Д.Ю., Асланов Л.А., Кустов Л.М. Перспективный взгляд на проблему фиксации азота в электрохимическом процессе аммиачного синтеза с использованием ковалентных органических каркасов .....	143
Коннов В.И., Вершинина Е.Е., Кирюхина В.А. Процесс замерзания воды на льду ....	147
Соколов А.А., Донская Е.С., Лебедев П.В., Атрощенко Ю.М. Структурные особенности бентанита, модифицированного четвертичными солями аммония .....	149
Панарин В.М., Пантелеев Н.Н. Регенерация электролитов при производстве электролитического хрома: технологии и перспективы .....	153

#### **НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В ОБЛАСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И ЭКОЛОГИИ**

Басарыгина Е.М., Путилова Т.А. Оценка качества продукции растениеводства, выращиваемой с использованием искусственной почвы .....	157
---	-----

