



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Н. В. МЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИПКОН РАН

Шляпин Алексей Владимирович

«07» июля 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института проблем комплексного освоения недр
имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН)
на основании решения расширенного заседания отдела горной экологии

Диссертация "Обоснование технологии депонирования углеродсодержащих выбросов шлаками от сжигания твердых коммунальных отходов" выполнена отделе горной экологии федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель Воробьев Кирилл Александрович работал в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук в отделе горной экологии в должности инженера (по совместительству), одновременно обучаясь в очной аспирантуре ИПКОН РАН.

В 2022 г. окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы" по направлению 21.04.01. «Нефтегазовое дело».

В июне 2025 г. окончил очную аспирантуру федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем комплексного освоения недр

имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук по специальности 1.6.21. Геоэкология (технические науки).

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук в 2025 году.

Научный руководитель – Шадрунова Ирина Владимировна, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом горной экологии федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН).

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

•Оценка выполненной соискателем работы.

Диссертация "Обоснование технологии депонирования углеродсодержащих выбросов шлаками от сжигания твердых коммунальных отходов" является самостоятельным законченным научным трудом, имеет теоретическую и практическую значимость, отличается актуальностью, научной новизной. Личное участие соискателя Воробьев Кирилл Александрович в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит в следующем.

• Результаты исследования являются самостоятельными и оригинальными.

Автором сформулированы научная цель, задачи, освоены и применены необходимые методология и методы исследований, обоснованы научные выводы и практические результаты. Научные и практические результаты получены автором диссертации лично, могут быть использованы для дальнейшего развития и внедрения в реальный сектор экономики.

• Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Обеспечивается применением современной приборной базы, апробированных методов анализа и статистической обработки фактического материала, представительностью исходных данных, использованием

общепринятых критериев оценки полученных результатов. Обоснованность выносимых положений подтверждается согласованностью выводов теоретического анализа и данных эксперимента, удовлетворительной сходимостью результатов измерений и экспериментальных исследований.

- **Новизна результатов проведенных исследований.**

Теоретический потенциал карбонизации шлаков и золы, рассчитанный по данным химического анализа, минералогических исследований фазового состава и фактического потенциала связывания диоксида углерода на уровне 47–79 кг CO₂ на 1 тонну сухого вещества, определенный экспериментально, доказывают возможность полезного использования остатков от сжигания твердых коммунальных отходов (ТКО) в технологии секвестрации или депонирования углеродсодержащих выбросов.

Разработана методика, позволяющая на специально изготовленной модельной установке, экспериментально изучить улавливание диоксида углерода природными и техногенными материалами в газовых средах, установить оптимальные параметры процесса ускоренной карбонизации и определить фактический потенциал связывания диоксида углерода различными материалами.

Установлены зависимости степени карбонизации золы и шлаков от сжигания ТКО от вещественного состава отходов и основных параметров процесса ускоренной минеральной карбонизации: времени гидратации и времени карбонизации, температуры, концентрации и давления газа, соотношения жидкой и твердой фаз.

Сформирован научно-методологический подход разработки технологических решений по секвестрации углеродсодержащих выбросов шлаками от сжигания ТКО, основанный на расчете теоретического потенциала карбонизации по данным химического анализа, детальных минералогических исследованиях фазового состава, оценке потенциальной опасности выщелачивания экоконтролируемых элементов по содержанию тяжелых металлов и микроэлементов в водных и буферных вытяжках, экспериментальном определении фактического потенциала связывания диоксида углерода.

Впервые разработана схема технологических маршрутов переработки

техногенных отходов от сжигания ТКО и минеральной карбонизации, обеспечивающих наиболее полную обработку и стабилизацию (нейтрализацию) отходов технологических процессов сжигания ТКО с получением вторичного сырья для производства строительных материалов и снижение экологической нагрузки.

- **Теоретическая значимость работы** заключается в углублении существующих и получении новых научных знаний о вещественном составе и свойствах отходов от сжигания ТКО, их реакционной способности и активности к связыванию диоксида углерода; в теоретической и экспериментальной оценке секвестрационного потенциала остатков от сжигания ТКО для технологии ускоренной минеральной карбонизации; в уточнении механизмов и установлении закономерностей гидратации и принудительной карбонизации шлаков и летучей золы. Полученные новые научные знания и практические результаты расширяют и углубляют современные представления о принудительной карбонизации систем на основе остатков от сжигания ТКО с одновременным связыванием диоксида углерода в стабильные карбонатные комплексы.

- **Практическая значимость проведенных исследований** состоит в установлении рациональных параметров процесса минеральной карбонизации углеродсодержащих выбросов шлаками и летучей золой от сжигания твердых коммунальных отходов, в разработке развернутой схемы технологических маршрутов комплексной переработки остатков от сжигания ТКО и одновременного связывания углеродсодержащих выбросов методом минеральной карбонизации. Реализация процессов минерализации выбросов CO_2 путем карбонизации техногенных отходов будет способствовать, с одной стороны, более безопасному хранению, утилизации и вторичному использованию карбонизированных отходов, а, с другой стороны, – к связыванию некоторого количества диоксида углерода и сокращению его выбросов.

- **Ценность научных работ соискателя.**

По теме диссертации опубликованы 23 научные работы: 11 статей в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ, в том числе 3 по специальности 1.6.21. Геоэкология (технические науки), 5 статей - в изданиях, входящих в

библиографические и реферативные базы данных рецензируемой научной литературы Scopus и/или Web of Science, 8 публикаций в сборниках конференций и журналах, размещенных в национальной библиографической базе данных научного цитирования (РИНЦ).

- **Личный вклад автора**

Анализ современного состояния и перспектив использования твердых отходов мусоросжигательных заводов для снижения углеродсодержащих выбросов, постановка цели и задач исследований, составление общей схемы экспериментальных исследований с разбивкой на этапы и выполняемые на них работы, обоснование применяемых методик, отбор проб шлаков и золы на мусоросжигательных заводах, организация и проведение экспериментов, разработка и изготовление модельной установки для изучения карбонизации шлаков в газовых средах, термодинамические расчеты, обработка и анализ полученных результатов, подготовка публикаций и апробация материалов на конференциях различного уровня выполнены автором лично или при его непосредственном участии.

- **Специальность, которой соответствует диссертация.**

По своему содержанию диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.6.21. Геоэкология (технические науки) в части:

пункта 17 - имеет важное научно-методологическое и практическое значение для ресурсосбережения, санации и рекультивации земель, утилизации отходов производства и потребления, в том числе возникающих в результате хозяйственной деятельности и эксплуатации ЖКХ, их безопасного размещения и хранения;

пункта 7 - получены новые научные знания и практические результаты в области геоэкологических аспектов устойчивого развития регионов, функционирования природно-технических систем, которые будут способствовать оптимизации взаимодействия (коэволюции) природной и техногенной подсистем;

пункта 3 - получены новые научные знания и практические результаты, которые затрагивают междисциплинарные аспекты стратегии выживания

человечества и вносят существенный вклад в разработку научных основ регулирования качества состояния окружающей среды.

• Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Материалы диссертации представлены в следующих опубликованных работах, включенных, в том числе, в список использованных источников в диссертацию:

Научные статьи автора в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Разработка концепции комплексной переработки отходов мусоросжигательных установок / И.В. Шадрунова, Е. В. Колодежная, О. Е. Горлова, К. А. Воробьев // Экология и промышленность России. – 2025. – Т. 29, № 2. – С. 4-11. – DOI: 10.18412/1816-0395-2025-2-4-11. (Scopus Q3, ВАК K1 по спец. 1.6.21).

2. Экспериментальное определение оптимальных параметров процесса карбонизации шлаков от сжигания твердых коммунальных отходов / К. А. Воробьев, О. Е. Горлова, И. В. Шадрунова, Т. В. Чекушина // Вестник евразийской науки. – 2025. – Т. 17. – № 3. (С. 1-13) – URL: <https://esj.today/PDF/40NZVN325.pdf>. DOI: 10.15862/40NZVN325. (ВАК K2 по спец. 1.6.21).

3. Воробьев, К. А. Оценка эколого-гигиенических аспектов утилизации продуктов термической обработки твердых коммунальных отходов / К. А. Воробьев, Е. В. Колодежная // Маркшейдерия и недропользование. – 2025. – Т. 25. – №4. –С. 76-82. (ВАК K2 по спец. 1.6.21).

4. Микроструктурные особенности строения силикатов в шлаках термической переработки твёрдых коммунальных отходов / Е. В. Колодежная, О. Е. Горлова, И. В. Шадрунова, М. С. Колкова, Ю. Ю. Ефимова, К. А. Воробьев // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2025. – Т. 31, № 1. – С. 39-50. – DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-1-39-50. (ВАК K2).

5. Воробьев К. А. Возможности улавливания диоксида углерода шлаками мусоросжигательных заводов в газовых средах / К. А. Воробьев // Вестник Пермского университета. Геология. – 2023. – Т. 22, № 3. – С. 275-281. DOI: 10.17072/psu.geol.22.3.275. (ВАК K2).

6. Исследование количества диоксида углерода при сжигании отходов: экспериментальные измерения / К. А. Воробьев, Т. В. Чекушина, Н. Курбанов, Ш. И. Рабаданов // Естественные и технические науки. – 2024. – № 4(191). – С. 76-79. DOI: 10.25633/ETN.2024.04.15. (ВАК K2).

7. Сокращение углеродного следа с помощью технологий улавливания и переработки диоксида углерода / К. А. Воробьев, Т. В. Чекушина, Н. Ниязов [и др.] // Естественные и технические науки. – 2024. – № 4(191). – С. 80-84. DOI: 10.25633/ETN.2024.04.16. (ВАК K2).

8. Особенности правового регулирования и обращения с твердыми коммунальными отходами в России и Германии / В. А. Щерба, К. Р. Баранова,

Е. А. Абрамова, К. А. Воробьев, А. В. Мазаев // Отходы и ресурсы. – 2023. – Т. 10, № 2. – DOI: 10.15862/12NZOR223 (BAK K3).

9. Адаптационный подход к процессам комплексной переработки техногенного минерального сырья / И. В. Шадрунова, О. Е. Горлова, Т. В. Чекушина, К. А. Воробьев // Естественные и технические науки. – 2018. – № 11(125). – С. 285-287. DOI: 10.25633/ETN.2018.11.24. (BAK K2).

10. Салаватов, Т. Ш. Использование диоксида углерода в качестве химического сырья / Т. Ш. Салаватов, А. С. Байрамова, К. А. Воробьев // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13, №2. (BAK K2).

Научные статьи автора в изданиях, входящих в библиографические и реферативные базы данных рецензируемой научной литературы Scopus и Web of Science

1. Вещественный состав остатков сжигания твердых коммунальных отходов и оценка их потенциала минерального связывания диоксида углерода / Е. В. Колодежная, И. В. Шадрунова, О. Е. Горлова, К. А. Воробьев // Обогащение руд. – 2025. – №1. – С. 42-49. – DOI: 10.17580/or.2025.01.07. (Scopus Q2, BAK K2).

2. Protection of hydrosphere in mining regions: Problems and methodology of technological solutions / I.V. Shadrunkova, N.N. Orekhova, T.V. Chekushina, K.A. Vorob'ev // Industrial Engineering and Management Systems. – 2020. – Vol. 19, № 1. – P. 70-77. – DOI: 10.7232/iems.2020.19.1.070.s (Scopus Q3 & Wos Q4)

3. Use of Non-magnetic Fraction of Metallurgical Slags in Carbon Dioxide Sequestration Technology / E.V. Kolodezhnaya, M.S. Garkavi, I.V. Shadrunkova, O.E. Gorlova, K.A. Vorobyev // Proceedings of the 7th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. ICCATS 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, V.400. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47810-9_38 (Scopus Q4).

4. The Possibility of Using Lithium-Containing Waste in the Russian Federation / K. A. Vorobyev, I. V. Shadrunkova, T. V. Chekushina // Proceedings of the 6th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. ICCATS 2022. Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Vol 308. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21120-1_55 (Scopus Q4).

5. Vorobyev, K. A. The Carbon Dioxide Capture Potential of Ash and Slag from Waste Incineration Plants / K. A. Vorobyev, I. V. Shadrunkova, T. V. Chekushina // Proceedings of the 7th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety ICCATS 2023, Sochi, 10–16 сентября 2023 года. Vol. 400. – Springer Cham: Springer Cham, 2024. – P. 558-568. – P. 558-568. DOI 0.1007/978-3-031-47810-9_51. (Scopus Q4).

Другие издания и материалы конференций

1. Воробьев, К. А. Методы минеральной карбонизации и утилизации диоксида углерода на территории Российской Федерации / К. А. Воробьев, В. Д. Ушкова, Е. М. Иванова. – Москва : ООО "Издательство "Спутник+", 2023. – 34 с. – ISBN 978-5-9973-6616-2.

2. Оценка потенциала секвестрации выбросов углекислого газа металлургических предприятий за счёт карбонизации шлаков / Е.В. Колодежная, М.С. Гаркави, К.А. Воробьев, О.Е. Горлова // Недропользование и транспортные системы. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 22-29. DOI 10.18503/SMTS-2023-13-1-22-29.

3. Воробьев, К.А. Технологическая оценка секвестрации диоксида углерода шлаками мусоросжигающих заводов / К. А. Воробьев //Тезисы Московского Международного Конгресса Обогащителей (ММКО-2025). - М.: Издательский Дом «Графит», 2025. С. 210. – ISBN 978-5-6047564-7-8.

4. Vorobyev, K.A. Technological evaluation of carbon dioxide sequestration by waste incineration plant slags / K. A. Vorobyev //Тезисы Московского Международного Конгресса Обогащителей (ММКО-2025). - М.: Издательский Дом «Графит», 2025. С. 211. – ISBN 978-5-6047564-7-8.

5. Воробьев К.А. Изучение выбросов углекислого газа при термическом сжигании ТКО на модельной установке / К. А. Воробьев // Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горнохимического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов : Материалы международной конференции, Апатиты, 23–27 сентября 2024 г. – Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2024. – С. 542-545.

6. Воробьев, К. А. Возможности использования шлаков мусоросжигательных заводов для снижения углеродсодержащих выбросов / К. А. Воробьев // Человек и окружающая среда: Сборник докладов XI Всероссийской молодёжной научной конференции, Сыктывкар, 19.04.2023 г. – Сыктывкар: Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, 2023. – С. 43-47.

7. Воробьев, К.А. Особенности захоронения CO₂ в техногенных литосферных реакторах как фактор сокращения количества его антропогенных выбросов / К. А. Воробьев, В.А. Щерба // География: развитие науки и образования: Сборник статей по материалам ежегодной международной научно-практической конференции (к 225-летию Герценовского университета). Санкт-Петербург, 20–23 апреля 2022 г., Т. II. – Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2022. – С. 31-35.

8. Воробьев, К.А. Диоксид углерода как химическое сырье / К.А. Воробьев, В.А. Щерба // География: развитие науки и образования :Сборник статей по материалам ежегодной международной научно-практической конференции LXXIV Герценовские чтения, Санкт-Петербург, 21–23 апреля 2021 г., Т. 2. – Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 2021. С. С. 149-157.

Текст диссертации проверен на использование заимствованного материала без ссылки на авторов и источники заимствования. После исключения всех корректных совпадений иных заимствований не обнаружено.

В диссертации, являющейся завершённой научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-практическая задача разработки технологии депонирования углеродсодержащих выбросов шлаками от сжигания твердых коммунальных отходов, что имеет важное научно-

методологическое и практическое значение для ресурсосбережения, санации и рекультивации земель, утилизации отходов производства и потребления, в том числе возникающих в результате хозяйственной деятельности и эксплуатации ЖКХ, их безопасного размещения и хранения. Диссертация соответствует п. 17 паспорта специальности 1.6.21. Геоэкология (технические науки).

Диссертация "Обоснование технологии депонирования углеродсодержащих выбросов шлаками от сжигания твердых коммунальных отходов" Воробьева Кирилла Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.21. Геоэкология (технические науки).

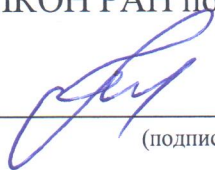
Заключение принято на расширенном заседании отдела горной экологии.

Присутствовало на заседании 34 чел., в том числе 1 академик РАН, 12 докторов наук, из них 3 по специальности 1.6.21. Геоэкология, 14 кандидатов наук, 8 чел. без степени.

Результаты голосования: «за» – 34 чел, «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 3 от «03» июня 2025 г.

Председатель расширенного заседания отдела горной экологии:
заместитель директора ИПКОН РАН по науке

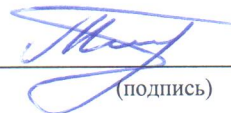
докт. техн. наук


(подпись)

Владимир Геннадиевич Миненко

Секретарь расширенного заседания отдела горной экологии:

канд. техн. наук


(подпись)

Александр Сергеевич Тимофеев

Подписи Миненко В. Г. и Тимофеева А. С. удостоверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного учреждения науки
Института проблем комплексного освоения недр им. акад. Н.В. Мельникова
Российской академии наук
профессор, доктор технических наук

