https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-93

МРНТИ: 87.21.03

BY 4.0
Check for updates

**У.Е. Жантикеев*, Л.Н. Сеймуханова, Д.Р. Мулдаш, Ш.Т. Султахан, М. Токтар**
Satbayev University, 050043, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

# ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА СВОЙСТВА ПОЧВЫ И РЕМЕДИАЦИЮ ЗАГРЯЗНЁННЫХ ГРУНТОВ: ОБЗОР

***Аннотация:*** *В обзоре систематизированы современные исследования по применению холодной (нетепловой) плазмы для ремедиации почв, загрязнённых органическими соединениями и тяжёлыми металлами. Рассмотрены механизмы образования активных форм кислорода и азота (АФКН) в плазменных разрядах, их перенос в пористой почвенной среде и участие в окислительной деструкции органических загрязнителей, изменении pH, окислительно-восстановительного потенциала и химических форм неорганических компонентов. Проведено сравнительное рассмотрение диэлектрического барьерного и коронного разрядов, прямых и дистанционных способов воздействия с учётом параметров разряда, влажности и свойств почвы, природы и концентрации загрязнителя, продолжительности обработки и энергетических характеристик. Показано, что в лабораторных исследованиях степень деструкции отдельных органических загрязнителей достигает 85-99 %, однако снижение концентрации исходного соединения не всегда соответствует степени его минерализации. Поэтому эффективность ремедиации необходимо оценивать с учётом остаточной концентрации загрязнителя, общего органического углерода, продуктов трансформации и энергетических затрат. Для тяжёлых металлов плазменное воздействие связано преимущественно с изменением химических форм, подвижности, выщелачиваемости и биодоступности, а не с деструкцией или удалением элемента. В зависимости от способа воздействия возможны как иммобилизация металла, так и изменение его доступности для растений. Установлено, что эффективность холоднoплазменной обработки ограничивается глубиной проникновения активных частиц и неоднородностью почвенной среды. Сделан вывод о перспективности холодной плазмы как компонента интегрированных технологий поверхностной и приповерхностной ремедиации и необходимости стандартизации критериев эффективности и энергопотребления.*

***Ключевые слова:*** *холодная плазма, почва, ремедиация, органические загрязнители, тяжёлые металлы.*

## Введение

Проблема загрязнения почв промышленным и агрохимическим отходами остается актуальной в последние годы, так как помимо локальных источников загрязнения происходит их трансформация через водный, вымывающий, размывающий и атмосферно-ветровой перенос с образованием диффузного загрязнения почвы и вторичного риска для экосистем и здоровья человека [1].

Среди наиболее значимых классов почвенных поллютантов выделяют тяжёлые металлы и стойкие органические соединения (включая пестициды, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и нефтяные углеводороды), которые длительно сохраняются в матрице почвы, могут переходить в пищевые цепи и проявлять токсичность на уровне микробных сообществ и почвенных функций [2]. Традиционная ремедиация (вывоз/замена грунта, промывки, химический окислительный и биологический разложение загрязнителей) обычно является компромиссной - одни методы занимают много времени, другие очень энергоемки и требуют сложной инфраструктуры, а третьи могут образовывать новые отходы либо работают лишь с определенной эффективностью на практике из-за неравномерности почвы и состава загрязняющих веществ [3].

В этой связи актуализируются исследования процессов продвинутого окисления, включая применения технологий «холодной» (нетепловой) плазмы – метода для создания у поверхности почвенных частиц активных кислород- и азотсодержащих форм (АФКН), способных стимулировать быструю деградацию органических загрязнителей почвы без существенного введения количеств химических реагентов [4].

©У.Е. Жантикеев, Л.Н. Сеймуханова, Д.Р. Мулдаш, Ш.Т. Султахан, М. Токтар, 2026

В актуальных обзорах указывается на важности типа разряда (DBD, коронный, скользящая дуга и т. д.) питания(импульсный или постоянный ток/частота/мощность) газового состава, физико-химических характеристик среды(влажность, пористость, органика, pH), определяющих соотношение процесса формирования активных частиц и доставки последних к целевой зоне в поверхностных слоях грунта [5].

Критически важным механизмом считается участие водной плёнки на частицах почвы: в присутствии влаги повышается вероятность образования •OH, $H_2O_2$ и других окислителей, а также протекания кислотно-основных и редокс-сдвигов в микрозоне контакта, что может ускорять распад органических молекул и изменять миграционные формы ряда неорганических компонентов [6].

Несмотря на возрастающее число исследований, посвящённых применению холодной нетепловой плазмы в процессах ремедиации, непосредственное сопоставление опубликованных результатов остаётся затруднительным вследствие существенных различий в конструкции плазменных систем, типах разряда, энергетических параметрах, свойствах почвенной матрицы, влажности, природе и исходной концентрации загрязнителей, а также используемых критериях эффективности. При этом одинаковое снижение концентрации загрязнителя не всегда характеризует одинаковый ремедиационный результат. Для органических соединений необходимо разграничивать деструкцию исходной молекулы и степень её минерализации, тогда как для тяжёлых металлов принципиальное значение имеет не разрушение или удаление элемента, а изменение его подвижности, выщелачиваемости и биодоступности.

В связи с этим целью настоящего обзора является критическое сопоставление современных исследований по применению холодной нетепловой плазмы для ремедиации загрязнённых почв с учётом типа разряда, параметров плазменной обработки, физико-химических характеристик почвы и природы загрязнителя, а также анализ взаимосвязи между генерацией и переносом активных форм кислорода и азота, деструкцией органических загрязнителей, изменением форм нахождения тяжёлых металлов и энергетической эффективностью процесса.

Отличительной особенностью настоящего обзора является рассмотрение плазменной ремедиации не только с позиции конечного снижения концентрации загрязнителя, но как последовательности взаимосвязанных стадий: генерации активных форм кислорода и азота в зоне разряда, их переноса через газовую, водную и пористую фазы почвы и последующего физико-химического воздействия на загрязнитель и почвенную матрицу. Такой подход позволяет отдельно оценивать окислительную деструкцию органических соединений и плазменно-индуцированную иммобилизацию тяжёлых металлов, а также выявлять ограничения, связанные с глубиной воздействия, массопереносом и энергетическими затратами.

Схема основных процессов в результате воздействия холодной плазмой на почво-растительный покров приведена на рисунке 1.




Рисунок 1 – Общая схема механизмов воздействия холодной плазмы на почву

**Методология обзора**

Отбор и анализ литературы проводили с учётом основной цели обзора – сопоставления механизмов и эффективности применения холодной нетепловой плазмы для ремедиации

загрязнённых почв и грунтов. В анализ включали экспериментальные и обзорные исследования, посвящённые плазменной обработке почв, содержащих органические загрязнители и тяжёлые металлы, а также работы, раскрывающие механизмы генерации и переноса активных форм кислорода и азота в пористых и увлажнённых средах [4].

При отборе публикаций основное внимание уделяли исследованиям, содержащим данные хотя бы по одному из следующих параметров: типу плазменного разряда, способу контакта плазмы с почвой, времени обработки, мощности или другим электрическим параметрам, составу рабочей газовой среды, влажности и характеристикам почвы, природе и исходной концентрации загрязнителя, а также конечному показателю ремедиационного эффекта. Работы, в которых рассматривалось исключительно образование плазмы без связи с воздействием на почвенную среду или загрязнитель, не использовались в качестве основной доказательной базы при сравнении эффективности ремедиации [5].

При сопоставлении опубликованных результатов учитывали, что прямое сравнение значений эффективности, полученных различными исследовательскими группами, ограничено существенными различиями в массе и составе почвенных образцов, влажности, начальной концентрации загрязнителей, конструкции плазменных реакторов, типах разряда и способах расчёта энергетических характеристик. Поэтому основной единицей сравнения являлся не только процент снижения концентрации загрязнителя, но совокупность условий, при которых данный эффект был достигнут.

Для органических загрязнителей анализировали снижение концентрации исходного соединения, характер его трансформации и, при наличии соответствующих данных, степень минерализации и образование промежуточных продуктов. Для тяжёлых металлов результаты оценивали отдельно, поскольку плазменная обработка не приводит к деструкции химического элемента. В данном случае учитывали изменения форм связывания, подвижности, миграционной способности и биодоступности металлов.

Таким образом, рассмотренные исследования сопоставлялись по следующим основным группам критериев: (1) тип и параметры плазменного разряда; (2) способ воздействия – прямой или дистанционный; (3) характеристики почвенной матрицы, включая влажность и физико-химические свойства; (4) тип и концентрация загрязнителя; (5) продолжительность обработки; (6) достигнутый ремедиационный эффект; (7) энергетические характеристики процесса, если соответствующие данные были представлены авторами исследования.

Анализ публикаций также показывает особенности взаимодействия плазмы с почвой. Так в одних работах, разряд создаётся над поверхностью почвы либо внутри поры и таким образом активные частицы находятся в непосредственной близости от загрязнённой фазы, а в других воздействия осуществляются на расстоянии - поэтому главными агентами оказываются долгоживущие окислители (озон, пероксид водорода, нитриты, нитраты). Такие формы живут дольше чем короткоживущие радикалы но перемещение через почву все же ограничено пористой структурой, влажностью и расположением загрязнителя, поэтому в литературе обычно сравнивали прямую и дистанционную обработку как отдельные случаи по разным принципам действия и результатам.

Для систематизации рассмотренных данных использован трёхуровневый принцип сравнительного анализа плазменно-индуцированных процессов. Первый уровень включает генерацию активных форм кислорода и азота непосредственно в зоне плазменного разряда и определяется типом разряда, электрическими характеристиками и составом газовой среды. Второй уровень характеризует транспорт образованных активных частиц к поверхности почвенных агрегатов и в приповерхностное поровое пространство; на данной стадии определяющее значение имеют время жизни активных форм, влажность, пористость, гранулометрический состав и особенности массопереноса. Третий уровень отражает конечные физико-химические последствия взаимодействия плазменно-индуцированных частиц с загрязнителем и почвенной матрицей: деструкцию и частичную или глубокую минерализацию органических соединений, изменение pH и окислительно-восстановительного потенциала, а также перераспределение тяжёлых металлов между подвижными и малоподвижными формами.

Применение такого подхода позволяет избежать оценки эффективности плазменной ремедиации исключительно по продолжительности обработки или мощности разряда и

связать конечный результат с последовательностью процессов «генерация активных частиц → массоперенос → взаимодействие с загрязнителем → ремедиационный эффект».

Следует подчеркнуть, что настоящий обзор не является формальным мета-анализом, поскольку опубликованные экспериментальные исследования характеризуются высокой методической неоднородностью: различаются типы и массы почвенных образцов, влажность и пористость грунта, начальные концентрации загрязнителей, конструкции плазменных реакторов, режимы электрического питания, продолжительность обработки и способы расчёта энергетических затрат. Кроме того, в разных исследованиях используются различные критерии результата – от снижения концентрации исходного загрязнителя до изменения общего органического углерода, токсичности, подвижности или биодоступности.

Поэтому в настоящей работе применён критико-сравнительный подход, при котором численные показатели эффективности рассматриваются совместно с экспериментальными условиями их получения. Особое внимание уделено выявлению факторов, ограничивающих прямое сопоставление результатов, включая глубину проникновения активных частиц, неоднородность реальных грунтов, влажность, массоперенос, образование промежуточных продуктов деструкции и различия в определении энергопотребления.

Такой подход позволяет не только обобщить имеющиеся данные, но и определить параметры, которые должны быть стандартизированы в дальнейших исследованиях холоднoплазменной ремедиации почв для обеспечения корректного сравнения лабораторных и перспективных масштабированных процессов.

**Механизм воздействия холодной плазмы на почву**

При воздействии на поверхность почвенная плазма с холодным разрядом в газовой фазе образуются высокоэнергетические электроны вызывающие диссоциацию кислородных, азотных и водяных паров.

На молекулярном уровне указанные процессы могут быть описаны через элементарные плазмохимические реакции, приводящие к образованию реактивных форм кислорода и азота. Первичным агентом плазменного воздействия являются не сами радикалы, а высокоэнергетические электроны, которые определяют скорость генерации активных форм и характер протекающих плазмохимических реакций [4].

$$e^- + O_2 \rightarrow 2O\bullet + e^- \quad (1)$$

$$e^- + H_2O \rightarrow \bullet OH + H\bullet + e^- \quad (2)$$

$$O\bullet + O_2 + M \rightarrow O_3 + M \quad (3)$$

$$e^- + N_2 \rightarrow 2N\bullet + e^- \quad (4)$$

$$N\bullet + O_2 \rightarrow NO + O\bullet \quad (5)$$

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \quad (6)$$

Радикалы и молекулярные окислители обладают большой степенью активности и как раз именно они выступают первичными агентами химического воздействия плазмы на поверхность почвенных частиц. Формируются различные активные формы кислорода и азота, в основном – гидроксильные радикалы, атомарный кислород, озон, оксиды азота. Данные частицы лишь немного проникают на ограниченную глубину в почву, однако они эффективно реагируют с верхним слоем почвы, содержащий большую часть органики и функциональные группы минералов [7]. Основной механизм воздействия холодной плазмы на почву происходит именно в приповерхностном слое грунта из-за недолгого времени их движения внутри почвы, что видно на рисунке 2.

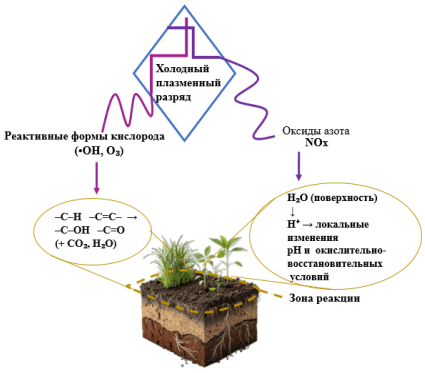



Рисунок 2 – Схематическое представление приповерхностных процессов при воздействии холодной плазмы на почву

Ключевым элементом механизма является наличие влаги на поверхности почвенных частиц. В присутствии тонкой водной плёнки на поверхности частиц плазменно-индуцированные активные формы вовлекаются в ряд вторичных реакций, протекающих в жидкой фазе [6].

$$\bullet OH + \bullet OH \rightarrow H_2O_2 \quad (7)$$

$$NO_2 + NO + H_2O \rightarrow 2HNO_2 \quad (8)$$

$$2NO_2 + H_2O \rightarrow HNO_2 + HNO_3 \quad (9)$$

Реакции протекают с образованием пероксидов и азотсодержащих веществ и локальным повышением концентрации $H^+$, изменяющих кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние верхнего слоя почвы.

Даже при сравнительно невысокой общей влажности на поверхности почвенных частиц может сохраняться тонкая водная плёнка, в которой активно протекают процессы образования и последующих реакций гидроксильных радикалов. В этой поверхностной водной фазе и происходят главные окисления. Гидроксильные радикалы имеют очень высокий окислительный потенциал и атакуют органические соединения по связям C-H и C-C. В итоге сложные органики разлагаются на более простые кислородосодержащие соединения, которые далее частично минерализуются в $CO_2$ и $H_2O$ [5].

Одновременно происходит образование в системе азотсодержащих активных форм. Оксиды азота, реагируя с водной фазой на поверхности, генерируют протоны и ионы азота, изменяя локально кислотность-основность и окислительно-восстановительный потенциал приповерхностного слоя почвы; эти локальные изменения являются пространственно ограниченными, однако они же обуславливают химию трансформации загрязнителей и составляющих матрицу почвы [6].

В отношении тяжелых металлов холодная плазма не обеспечивает их разложения или деструкции, а меняет степень окисления. Вследствие локального изменения pH и редокс потенциала изменяется распределение металла между подвижной и малоподвижной формами. Часть ионов переходят в формы более устойчивого состава либо прочнее связываются с функциональными группами органики и поверхностей минералов, что приводит к снижению миграционной способности и биодоступности [4].

Таким образом, механизм действия холодной плазмы по отношению к почве сводится к комбинации поверхностного окисления загрязнений-органики и химического «возбуждения» почвенной матрицы посредством реактивных форм кислорода и азота. Действие происходит преимущественно в приповерхностном слое почвы (зона контакта плазмы с поверхностью почвы) и зависит от влажности грунта, типа загрязнения и параметров разряда - это объясняет почему холодная плазма эффективна для поверхностных и приповерхностных задач ремедиации.

**Факторы, определяющие эффективность плазменной ремедиации почвы**

Эффективность холоднoплазменной ремедиации определяется совокупностью параметров плазменного разряда и характеристик почвенной системы. К основным факторам относятся влажность, пористость и гранулометрический состав грунта, содержание органического вещества, природа и концентрация загрязнителя, а также напряжение, частота, мощность, длительность импульсов, газовая среда и способ контакта плазмы с почвой.

Влажность оказывает неоднозначное влияние на процесс. Тонкая водная плёнка на поверхности частиц способствует образованию и переносу $\bullet OH$, $H_2O_2$ и других активных форм, тогда как избыточная влажность может снижать интенсивность микроразрядов в порах и ограничивать доступ активных частиц к загрязнителю [5,6]. Поэтому определяющим является не максимальное содержание воды, а оптимальная влажность, обеспечивающая одновременно развитие плазменного разряда и образование вторичных окислителей.

Пористость и гранулометрический состав определяют условия транспорта газовой фазы и долгоживущих окислителей. В рыхлых и песчаных грунтах массоперенос обычно эффективнее, тогда как в плотных, глинистых и гумусированных почвах он ограничивается сорбцией загрязнителей и конкурентным расходованием активных частиц на органические и минеральные компоненты матрицы.

Увеличение мощности или продолжительности обработки, как правило, повышает степень деструкции органических загрязнителей, однако зависимость не является линейной.

После разрушения наиболее доступной части загрязнителя дальнейшая обработка сопровождается ростом удельных энергетических затрат при меньшем приросте эффективности. Поэтому при сопоставлении плазменных систем необходимо учитывать не только степень удаления, но и энергетическую эффективность процесса. Для корректного сравнения следует указывать массу и влажность образца, тип почвы, начальную концентрацию загрязнителя, параметры разряда и метод расчёта энергозатрат.

**Изменение свойств почвы после обработки холодной плазмой**

Механизм действия холодной плазмы на почву связан с образованием АФКН, реагирующих с минеральной и органической составляющей почвенного комплекса преимущественно в поверхностных слоях. По мнению современных исследователей данный процесс происходит в области взаимодействия плазмы с увлажненной поверхностью почвы без значительного повреждения ее физической структуры [6].

Среди прочих наиболее частых изменений после плазменной обработки отмечается изменение pH почвы. При разных почвах, их буферности, влажностном состоянии и параметрах разряда могут наблюдаться как небольшие смещения в кислой зоне, так и небольшие увеличения pH; эти явления ассоциируют с появлением кислород и азотсодержащих групп (нитраты, нитриты, пероксидные структуры) при реакции активных компонентов плазмы с составляющими матрицы почвы [8].

Сдвиг электропроводности почвы в ходе обработки ее холодной плазмой свидетельствует о преобразовании ионного состава почвенного раствора. Как увеличение, так и уменьшение значения электропроводности можно связать и с образованием растворенных продуктов окисления органики и перераспределением ионных форм неорганической составляющей части из-за локальных ОВП. Направление и величина изменений электропроводности существенно зависят от исходных свойств почвы и режима плазменной обработки [6, 9, 10].

Концентрация органического вещества почвы уменьшается при воздействии на нее холодной плазмы за счет процесса окисления органики. Образующиеся при плазменной обработке •OH, атомарный кислород и озон способны инициировать разрыв C–H- и C–C-связей органических соединений с образованием более простых кислородсодержащих продуктов и их последующей частичной минерализацией до $CO_2$ и $H_2O$ [5,11].

Биопараметры почв также подвержены влиянию холодной плазмы. Указывалось на уменьшение количества микробов в обработанной области, а механизм явления объяснялся действием окислительного стресса на клеточные мембраны и органоиды. Обсуждался факт дозозависимости явления и его обратимости. Тем не менее существует ряд исследований в которых отмечается частичное восстановление сообщества микроорганизмов после отключения плазмы, тем более если обработка происходила в мягком режиме. Это объясняется уменьшением токсичной среды из-за разрушения органики и нормализации химических показателей почв [12, 13].

В целом, большинство исследователей считают, что воздействие холодной плазмы приводит к системным изменениям химических и биологических характеристик почвы, но не нарушает ее структурной целостности при среднем уровне воздействия [14].

Основные изменения химических, биологических и физических свойств почвы после обработки холодной плазмой, отмеченные в литературных источниках, обобщены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные изменения свойств почвы после обработки холодной плазмой

| Показатель | Характер изменения | Источник |
|---|---|---|
| pH | слабые сдвиги в кислую или щелочную сторону | [4, 8] |
| Электропроводность | изменение ионного состава, возможный рост электропроводности | [4, 6] |
| Органическое вещество | частичная окислительная минерализация органических соединений | [5] |
| Микробиота | снижение численности микроорганизмов в зоне обработки | [4, 15] |
| Физическая структура | существенных изменений макроструктуры не выявлено | [4] |

**Воздействие холодной плазмы на тяжёлые металлы и органические загрязнители в почве**

Холодная плазма пока не рассматривается в качестве средства для экстракции тяжелых металлов из почв, но она оказывает существенное влияние на состояние химических соединений тяжелыми металлами и их миграционную способность. В основе этого явления лежит взаимодействие активных форм кислорода и азота с поверхностью почвенных агрегатов, функциональных групп минеральных и органических компонентов почвы. В результате изменяются формы связывания металлов и их распределение между подвижными и малоподвижными фракциями, при этом целостность почвенной структуры сохраняется [14, 15].

Стабильность катионов тяжелых металлов в матрице почвы описывается реакцией со специфическими группами на поверхности и формированием малорастворимых продуктов.

$$\equiv SO^- + Me^{2+} \rightarrow \equiv SO–Me^+ \quad (10)$$

$$Me^{2+} + OH^- \rightarrow Me(OH)_2\downarrow \quad (11)$$

Данная совокупность процессов вызывает уменьшение миграционной активности и биологической доступности металлов при сохранении в почве (плазменно-индуцированная иммобилизация).

Поскольку плазменное воздействие на тяжёлые металлы связано прежде всего с изменением их химических форм, для количественной оценки необходимо анализировать не только общее содержание элемента, но также его подвижность, выщелачиваемость и биодоступность. Характерные результаты опубликованных исследований приведены в таблице 2.

Данные таблицы 2 показывают, что воздействие холодной плазмы на тяжёлые металлы не может быть описано единым механизмом «удаления». Наиболее прямой пример плазменно-индуцированной стабилизации продемонстрирован для Tl, где нетепловая плазма использовалась для модификации стабилизирующих реагентов, а эффективность оценивалась по снижению концентрации Tl в выщелате и перераспределению его химических форм [22]. В оптимизированных условиях концентрация выщелачиваемого Tl составляла 0,37-7,34 мкг/л, что свидетельствует именно об иммобилизации загрязнителя, тогда как его общее содержание в почве при этом не рассматривается как показатель удаления.

Для Cd и Pb результаты имеют иной характер. Предварительная плазменная обработка семян Cd-толерантных растений увеличивала накопление Cd на 8,8-54,4%, то есть способствовала фитоэкстракции металла из почвы [17]. Напротив, в опытах с плазменно-активированной водой и водяным шпинатом в ряде режимов наблюдалось снижение накопления Cd в растительной биомассе на 17,8-22,9%, тогда как для Pb выраженного положительного эффекта не установлено [16]. Таким образом, изменение содержания металла в растениях не следует автоматически интерпретировать как изменение его общего содержания в почве: оно отражает прежде всего изменение биодоступности и транспорта элемента в системе «почва – растение».

Плазменно-индуцированные изменения pH, окислительно-восстановительного состояния и свойств почвенной или ризосферной среды могут изменять распределение тяжёлых металлов между подвижными и малоподвижными формами. Направление этого перераспределения зависит от способа плазменного воздействия и свойств системы и может проявляться как в снижении выщелачиваемости и иммобилизации металла, так и в повышении его биодоступности при стимулировании фитоэкстракции [16-18].

Органические вещества имеют большую чувствительность к воздействию холодной плазмы относительно неорганических веществ. Высокая окислительная активность частиц, индуцируемых плазмой может приводить к разрыву связей между атомами в структуре органических соединений.

Окислительное разрушение органических загрязнителей под действием холодной плазмы реализуется по радикальному механизму и может быть описано обобщённой схемой реакций.

$$R–H + \bullet OH \rightarrow R\bullet + H_2O \quad (12)$$

$$R\bullet + O_2 \rightarrow ROO\bullet \quad (13)$$

$$ROO\bullet \rightarrow \text{фрагментация} \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{низкомолекулярные кислоты} \quad (14)$$

Таблица 2 – Количественные показатели влияния холодноплазменных технологий на подвижность, выщелачиваемость и биодоступность тяжёлых металлов

| Металл | Способ плазменного воздействия | Условия / объект | Исходное содержание | Оцениваемый показатель | Количественный эффект | Интерпретация | Источник |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| **Tl** | Нетепловая плазма для предварительной модификации стабилизаторов $KH_2PO_4$ и SDDC | NTP-обработанные стабилизаторы вносили в искусственно загрязнённую $Tl^+$ почву; варьировали напряжение, время NTP-обработки и молярное соотношение $KH_2PO_4$/SDDC | Искусственно загрязнённая почва | Выщелачиваемость Tl и изменение химических форм | В ортогональной серии концентрация Tl в выщелате составляла 5,11-52,37 мкг/л; после последующей оптимизации – 0,37-7,34 мкг/л | Выраженная иммобилизация Tl за счёт снижения выщелачиваемости и перераспределения химических форм | [22] |
| **Cd** | Предварительная обработка семян холодной плазмой | Bidens pilosa, Solanum nigrum, Trifolium repens; оптимальная мощность 100 Вт для B. pilosa и 500 Вт для двух других видов; время 60 с | Cd-загрязнённая почва | Накопление Cd растениями и эффективность фитоэкстракции | Накопление Cd увеличилось на 8,8-54,4 %, сухая биомасса – на 17,3-45,0 % по сравнению с контролем | Усиление фитоэкстракции, а не иммобилизации; эффект связывается с ростом кислоторастворимой фракции Cd в ризосфере | [17] |
| **Cd** | Плазменно-активированная вода и/или плазменная обработка семян | Водяной шпинат, выращенный на Cd-загрязнённой почве | 18,18-20,43 мг/кг сухой почвы | Содержание Cd в растительной биомассе | При использовании только PAW содержание Cd в растении снизилось на 17,8%; при обработке только семян – на 22,9%; при сочетании двух воздействий – на 4,5% | Снижение бионакопления Cd, но не доказанное удаление или иммобилизация общего Cd в почве | [16] |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Pb** | Плазменно-активированная вода и/или плазменная обработка семян | Водяной шпинат, выращенный на Pb-загрязнённой почве | 2064-2492 мг/кг сухой почвы | Содержание Pb в растительной биомассе | Снижение Pb в растении составляло 0,57% при PAW и 1,42% при обработке семян; сочетание двух воздействий, напротив, увеличивало накопление Pb на 64,8% | Эффект зависит от режима; однозначной иммобилизации Pb не установлено | [16] |
| **Cd, Pb** | Плазменно-активированная вода, полученная DBD с жидким электродом | Cannabis sativa в среде с различными концентрациями Cd или Pb | Варьировалось | Бионакопление и локализация металлов | LIBS-картирование показало преимущественное накопление Cd и Pb в корнях; PAW повышала рост растений при Pb-стрессе | Доказан эффект на биодоступность и фитоаккумуляцию, но количественное снижение содержания металла в почве не установлено | [18] |

В отличие от тяжёлых металлов органические загрязнители могут непосредственно подвергаться окислительной деструкции под действием •OH, атомарного кислорода и озона. Последовательное окисление приводит к фрагментации исходных молекул и образованию промежуточных кислородсодержащих соединений с последующей частичной или глубокой минерализацией [19-21]. Однако в реальной почвенной матрице загрязнитель конкурирует с гумусом и поверхностными функциональными группами за активные частицы, поэтому эффективность зависит не только от плазменной мощности, но и от состава почвы.

Для количественного сопоставления эффективности холоднoплазменной ремедиации были обобщены результаты экспериментальных исследований, в которых приведены основные параметры разряда, начальная концентрация загрязнителя, продолжительность обработки и достигнутый эффект. Такое сопоставление является более информативным, чем оценка только конечной степени удаления, поскольку одинаковый уровень деструкции может быть достигнут при существенно различающихся режимах плазменного воздействия, времени обработки и энергетических затратах. В таблице 3 представлены характерные результаты для различных классов органических загрязнителей и конфигураций плазменных разрядов. При интерпретации данных учитывалось, что используемые в литературе энергетические показатели выражаются в различных единицах и рассчитываются по неодинаковым методикам, что ограничивает возможность их прямого количественного сравнения.

Представленные данные демонстрируют, что холоднoплазменная обработка способна обеспечивать высокую степень деструкции различных органических загрязнителей, однако продолжительность обработки и энергетическая эффективность существенно зависят от типа разряда, свойств загрязнителя и условий взаимодействия плазмы с почвенной матрицей. Так, для атразина при DBD-обработке в течение 60 мин степень деградации достигала 86,9%, тогда как минерализация по общему органическому углероду составляла 65,5% [7]. Данное различие принципиально важно, поскольку исчезновение исходного соединения ещё не свидетельствует о его полном превращении в конечные неорганические продукты.

Для фенантрена степень деградации 87,3% была достигнута за 20 мин при энергетической эффективности 0,01 мг/кДж [8], тогда как применение наносекундного импульсного DBD к почве, загрязнённой ципрофлоксацином, позволило достичь приблизительно 99 % деградации примерно за 3 мин при энергетической эффективности 4,6 мг/кДж [23]. Для трифлуралина при формировании микроразрядов непосредственно в порах почвы степень деградации достигала 97,3% за 10 мин при энергетической эффективности 4,1 мг/кДж [15]. Эти результаты показывают, что генерация плазмы непосредственно в поровом пространстве может существенно интенсифицировать контакт активных форм с загрязнителем и сократить продолжительность обработки.

Отдельного внимания требует интерпретация показателей, характеризующих нефтяные загрязнения. При обработке пористой бокситовой матрицы, загрязнённой нефтешламом, снижение TOC составляло около 70 % за 30 мин при удельных энергозатратах 0,53 кВт·ч/кг [9]. В данном случае снижение TOC характеризует более глубокое удаление органического углерода, чем простое уменьшение концентрации одного исходного соединения, однако даже этот показатель не следует автоматически отождествлять с полной минерализацией всех компонентов нефтешлама. Для бензина максимальная степень деградации достигала 90 % после 60 мин импульсной коронной обработки [21], что также подтверждает высокую эффективность плазменного окисления летучих углеводородных загрязнителей.

Следует также учитывать, что энергетические характеристики в опубликованных исследованиях представлены в разных формах: как удельная энергия на массу почвы (Дж/г), энергетический выход по массе удалённого загрязнителя (мг/кДж) или энергопотребление на единицу массы обработанного материала (кВт·ч/кг). Поэтому прямое ранжирование плазменных систем только по численным значениям этих показателей некорректно. Для дальнейшего развития технологии необходима унификация энергетических критериев с обязательным указанием массы обрабатываемой почвы, начального содержания загрязнителя, продолжительности процесса и фактически достигнутой степени деструкции или минерализации.

Таблица 3 – Количественное сравнение эффективности холодноплазменной обработки почв, загрязнённых органическими соединениями

| Загрязнитель | Тип плазменного разряда | Основные параметры обработки | Начальная конц. | Время обработки | Достигнутый эффект | Энергетическая характеристика | Источник |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Атразин | Диэлектрический барьерный разряд (DBD) | 44,8 кВ; 300 Гц; расход воздуха 1,0 л/мин; масса почвы 5 г | 100 мг/кг | 60 мин | Деградация 86,9 %, минерализация 65,5 % по TOC | ≈100 Дж/г почвы | [7] |
| Фенантрен | Импульсный DBD | 110 В; 150 Гц; расход воздуха 0,6 л/мин; масса почвы 5 г | 200 мг/кг | 20 мин | Деградация 87,3 % | 0,01 мг/кДж | [8] |
| Пентахлор-фенол | Импульсный коронный разряд | 16 кВ; 67 Гц; расход воздуха 1,0 л/мин; масса почвы 5 г | 200 мг/кг | 60 мин | Деградация 87 % | Не указана | [20] |
| Ципрофлокса-цин | Наносекундный импульсный DBD | 17,4 кВ; 200 Гц; влажность почвы 5 %; воздух 1,0 л/мин | Варьировалась | ≈3 мин | Деградация ≈99 % | 4,6 мг/кДж | [23] |
| Трифлуралин | Коаксиальный DBD; наносекундные высоковольтные импульсы; микроразряды непосредственно в порах почвы | 26,8 кВ; 100 Гц; воздух 0,075 л/мин; масса почвы 10,1 г | 200 мг/кг | 10 мин | Деградация 97,3 % | 4,1 мг/кДж | [15] |
| Нефтешлам в пористой бокситовой матрице | Коаксиальный DBD, микроразряды непосредственно в порах материала | Плазма генерировалась непосредственно в воздушной фазе взаимосвязанных пор боксита | Сильно загрязнённый нефтешламом боксит | 30 мин | Снижение TOC ≈70 % | 0,53 кВт·ч/кг | [9] |
| Бензин | Импульсный коронный разряд, реактор игла–пластина | до 40 кВ; pH 7,2; температура ≈25 °C | Варьировалась | 60 мин | Максимальная деградация 90 % | Не указана | [21] |

**Критерии оценки ремедиационного эффекта: деструкция, минерализация и иммобилизация**

При оценке эффективности холодноплазменной ремедиации необходимо разграничивать удаление, деструкцию, минерализацию и иммобилизацию загрязнителей. Снижение концентрации исходного соединения само по себе не всегда свидетельствует о полном обезвреживании загрязнителя.

Для органических соединений под деструкцией понимается разрушение исходной молекулярной структуры под действием плазменно-индуцированных активных форм кислорода и азота с образованием промежуточных продуктов, включая органические кислоты, альдегиды, кетоны и другие низкомолекулярные соединения. Поэтому высокий процент деградации исходного вещества не эквивалентен полной минерализации.

Под минерализацией понимается более глубокое окислительное превращение органического углерода преимущественно в конечные неорганические продукты, прежде всего $CO_2$ и $H_2O$. Для оценки глубины процесса наряду с остаточной концентрацией загрязнителя целесообразно определять общий органический углерод (TOC) и состав продуктов трансформации. Показатель TOC позволяет отличить разрушение исходной молекулы от фактического уменьшения общего содержания органического вещества.

Термин «удаление» следует применять только при подтверждённом уменьшении количества загрязнителя или органического углерода в рассматриваемой системе, поскольку снижение концентрации исходного соединения может быть связано не только с минерализацией, но и с образованием летучих продуктов или перераспределением вещества между фазами. Для наиболее полной оценки органических загрязнителей целесообразно сочетать определение остаточной концентрации с GC–MS или HPLC-анализом продуктов трансформации, измерением TOC и, при необходимости, оценкой токсичности.

Для тяжёлых металлов термины «деструкция» и «минерализация» неприменимы, поскольку химический элемент в ходе плазменной обработки не разрушается. Плазменное воздействие может изменять степень окисления металла, его химическое окружение и распределение между подвижными и малоподвижными фракциями без существенного изменения общего содержания элемента в почве.

В данном случае более корректным критерием ремедиационного эффекта является иммобилизация, то есть перевод металла в формы с меньшей подвижностью, выщелачиваемостью и биодоступностью. Поэтому оценка эффективности должна включать определение общего содержания элемента, подвижных и обменных фракций, выщелачиваемости и биодоступности. Дополнительно необходимо учитывать устойчивость сформированных малоподвижных форм при изменении pH, влажности и окислительно-восстановительных условий.

Таким образом, для органических загрязнителей основными критериями являются степень деструкции и глубина минерализации, тогда как для тяжёлых металлов – изменение подвижности, выщелачиваемости и биодоступности при контроле общего содержания элемента. Такой подход позволяет избежать некорректного использования единого показателя «степень удаления» для различных механизмов плазменного воздействия.

**Ограничения технологии и перспективы масштабирования**

Основным ограничением холодноплазменной ремедиации остаётся небольшая эффективная глубина воздействия активных частиц. Поэтому технология наиболее применима к поверхностным и приповерхностным загрязнениям, тогда как обработка более глубоких горизонтов требует перемешивания или других способов интенсификации массопереноса. Проблема усиливается в реальных грунтах, характеризующихся неоднородностью влажности, плотности, органического и минерального состава, вследствие чего распределение плазменной дозы и доступ активных форм к загрязнителю существенно отличаются от условий лабораторных экспериментов.

Отдельный аспект – проблема масштабирования плазменных установок. На лабораторном уровне вполне реально обеспечить стабильный зазор электродов, заданную массу пробы, влажность, расход газа, мощность и время обработки. При переходе на большие объемы почвы уже сложнее добиться равномерности разряда и однородности дозы для всей массы материала. Это говорит о том, что повышение производительности установки не обеспечит соответствующее улучшение её эффективности. Более того, в случае нерационального режима работы возможно использование энергии на ее нагревание,

образование побочных веществ или на очистку уже очищенной поверхности, при этом загрязненные зоны внутренних поверхностей аппарата будут подвержены лишь незначительному воздействию.

Другим ограничением является образование промежуточных продуктов окисления. Поэтому технологический эффект должен оцениваться не только по снижению концентрации исходного соединения, но также по степени минерализации и токсичности продуктов трансформации.

Для тяжёлых металлов ключевым ограничением является долговременная устойчивость иммобилизованных форм. Изменение pH, влажности или окислительно-восстановительных условий после обработки потенциально может привести к повторной мобилизации металла, поэтому необходим контроль устойчивости ремедиационного эффекта во времени.

Особый интерес представляет сочетание с холодной плазмой иных технологий. Так, плазма может применяться в качестве подготовительного этапа к процессу частичной окислении небиоразлагаемых органических веществ для облегчения их дальнейшего биодеградации. Интересен также способ получения плазмы в присутствии сорбентов, катализаторов, фотокаталитических материалов или окислителей, позволяющих увеличивать время жизни активных частиц и уменьшать энергоемкость процесса. Для смесей органических и неорганических веществ (тяжёлых металлов) оптимальным является сочетание методов: плазма для деградации органогенной части, сорбенты/минерализаторы – для удаления неорганической фазы.

На наш взгляд, дальнейшее развитие плазменной ремедиации должно быть связано не только с поиском более мощных разрядных систем, но и со стандартизацией оценки эффективности. В разных работах используются различные массы почвы, разные начальные концентрации загрязнителей, разные способы расчёта энергии и разные критерии очистки. Из-за этого результаты трудно сравнивать между собой. Для более корректной оценки необходимо указывать влажность и массу образца, тип почвы, начальную и остаточную концентрацию загрязнителя, мощность и продолжительность обработки, расход газа, температуру, изменение pH и электропроводности, а также энергетические затраты на единицу массы обработанного грунта или удалённого загрязнителя.

**Заключение**

Проведённый обзор показывает, что холодная нетепловая плазма является перспективным инструментом для поверхностной и приповерхностной ремедиации загрязнённых почв за счёт генерации активных форм кислорода и азота и их последующего взаимодействия с загрязнителями и компонентами почвенной матрицы. Эффективность процесса определяется не только типом и параметрами плазменного разряда, но также влажностью, пористостью и составом почвы, природой и исходной концентрацией загрязнителя, способом контакта плазмы с обрабатываемой средой и продолжительностью воздействия.

Для органических загрязнителей основным механизмом является окислительная деструкция с образованием промежуточных продуктов и последующей частичной или глубокой минерализацией. Количественное сопоставление опубликованных данных показывает, что в лабораторных условиях степень деградации отдельных органических соединений может достигать 85-99%, однако эти значения получены при существенно различающихся режимах обработки и энергетических затратах. При этом степень деградации исходного соединения не всегда соответствует степени минерализации, что подтверждает необходимость комплексной оценки по остаточной концентрации загрязнителя, содержанию общего органического углерода, составу продуктов трансформации и энергетическим характеристикам процесса.

Для тяжёлых металлов холоднoплазменное воздействие не приводит к деструкции химического элемента, а изменяет его химические формы, подвижность, выщелачиваемость и биодоступность. В зависимости от способа воздействия и свойств системы это может проявляться как в снижении миграционной способности и иммобилизации металла, так и в изменении его доступности для растений и эффективности фитоэкстракции. Поэтому оценка ремедиационного эффекта для тяжёлых металлов должна основываться на раздельном контроле общего содержания элемента, подвижных и обменных фракций, выщелачиваемости

и биодоступности, а также на оценке устойчивости сформированных малоподвижных форм во времени.

Одним из основных ограничений технологии остаётся малая эффективная глубина проникновения активных частиц и неоднородность реальных почвенных систем, что затрудняет равномерное воздействие при масштабировании. Дополнительными ограничивающими факторами являются образование промежуточных продуктов окисления, различия в методиках расчёта энергетической эффективности и отсутствие унифицированных критериев сопоставления результатов.

Таким образом, холодную плазму целесообразно рассматривать не как универсальную замену традиционным методам ремедиации, а как компонент интегрированных технологий, особенно для поверхностных и приповерхностных загрязнений. Дальнейшее развитие направления должно быть связано со стандартизацией экспериментальных и энергетических параметров, оценкой токсичности продуктов трансформации, контролем долговременной устойчивости иммобилизованных форм тяжёлых металлов и разработкой инженерных решений, обеспечивающих более равномерный массоперенос и снижение удельных энергозатрат.

**Список литературы**


1. Nuruzzaman M. Diffuse soil pollution from agriculture: Impacts and remediation / M. Nuruzzaman, M.M. Bahar, R. Naidu // Science of the Total Environment. – 2025. – Vol. 962. – Article № 178398. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178398.
2. Effect of heavy metal pollution on soil microorganisms: Influence of soil physicochemical properties. A systematic review / C. Campillo-Cora et al // European Journal of Soil Biology. – 2024. – Vol. 124. – Article No. 103706. – https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103706.
3. Michael-Igolima U. A systematic review on the effectiveness of remediation methods for oil contaminated soils / U. Michael-Igolima, S.J. Abbey, A.O. Ifelebuegu // Environmental Advances. – 2022. – Vol. 9, Article № 100319. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100319.
4. Aggelopoulos C.A. Recent advances of cold plasma technology for water and soil remediation: A critical review / C.A. Aggelopoulos // Chemical Engineering Journal. – 2021. – Vol. 428, Article № 131657. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131657.
5. Review on remediation of organic-contaminated soil by discharge plasma: Plasma types, impact factors, plasma-assisted catalysis, and indexes for remediation / H. Guo et al // Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 436, Article № 135239. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135239.
6. Highly energy-efficient degradation of antibiotics in soil: Extensive cold plasma discharges generation in soil pores driven by high voltage nanopulses / M. Hatzisymeon et al // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 786, Article № 147420. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147420.
7. Aggelopoulos C. Degradation of atrazine in soil by dielectric barrier discharge plasma – Potential singlet oxygen mediation / C. Aggelopoulos, D. Tataraki, G. Rassias // Chemical Engineering Journal. – 2018. – Vol. 347. – P. 68-–694. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.111.
8. Study on remediation of phenanthrene contaminated soil by pulsed dielectric barrier discharge plasma: The role of active species / R. Li et al // Chemical Engineering Journal. – 2016. – Vol. 296. – P. 132-140. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.054.
9. Aggelopoulos C. A new perspective towards in-situ cold plasma remediation of polluted sites: Direct generation of micro-discharges within contaminated medium / C. Aggelopoulos, C. Tsakiroglou // Chemosphere. – 2020. – Vol. 266, Article № 128969. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128969.
10. Dielectric barrier discharge plasma used as a means for the remediation of soils contaminated by non-aqueous phase liquids / C. Aggelopoulos et al // Chemical Engineering Journal. – 2015. – Vol. 270. – P. 428-436. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.056.
11. Effects of cold plasma on volatile organic compounds in foods: fundamentals, mechanisms, and applications / J. Cheng et al // Food Chemistry. – 2025. – Vol. 503, Article № 147740. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.147740.
12. Optimizing cold plasma technology for pesticide and microbial safety enhancement of fresh okra (Abelmoschus esculentus) / A. Chandel et al // Journal of Stored Products Research. – 2025. – Vol. 115, Article № 102862. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102862.

13. Harnessing cold plasma for sustainable extraction of bioactive compounds: a critical review of mechanisms and applications / S.A. Banihashemi et al // Future Foods. – 2026. – Article № 100907. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2026.100907.
14. Non-thermal plasma technology for organic contaminated soil remediation: A review / H. Zhang et al // Chemical Engineering Journal. – 2016. – Vol. 313. – P. 157-170. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.067.
15. Novel combination of high voltage nanopulses and in-soil generated plasma micro-discharges applied for the highly efficient degradation of trifluralin / M. Hatzisymeon et al // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – Vol. 415, Article № 125646. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125646.
16. The effects of Plasma-Activated water on heavy metals accumulation in water spinach / C. Hou et al // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, № 11, Article № 5304. https://doi.org/10.3390/app11115304.
17. Enhanced biomass and cadmium accumulation by three cadmium-tolerant plant species following cold plasma seed treatment / L. Zhao et al // Journal of Environmental Management. – 2021. – Vol. 296, Article № 113212. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113212.
18. Study of plasma activated water effect on heavy metal bioaccumulation by Cannabis sativa Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy / L. Čechová et al // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2024. – Vol. 283, Article № 116807. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116807.
19. Transport characteristics of gas phase ozone in soil during soil remediation by pulsed discharge plasma / T.C. Wang et al // Vacuum. – 2013. – Vol. 101. – P. 86-91. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.07.020.
20. Evaluation of the Potential of Pentachlorophenol Degradation in Soil by Pulsed Corona Discharge Plasma from Soil Characteristics / T.C. Wang et al // Environmental Science & Technology. – 2010. – Vol. 44, № 8. – P. 3105-3110. https://doi.org/10.1021/es903527w.
21. Gasoline degradation and nitrogen fixation in soil by pulsed corona discharge plasma / J. Zhan et al // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 661. – P. 266-275. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.183.
22. Harnessing the power of nonthermal Plasma: A breakthrough in stabilizing Thallium contaminants in soil and unveiling the mechanism / T. Huang et al // Chemical Engineering Journal. – 2024. – Vol. 486, Article № 150250. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150250.
23. Remediation of ciprofloxacin-contaminated soil by nanosecond pulsed dielectric barrier discharge plasma: Influencing factors and degradation mechanisms / C.A. Aggelopoulos et al // Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 393, Article № 124768. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124768.

***Финансирование.*** *Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (№ BR28712925, «Исследование и создание холодноплазменных технологий для комплексной реабилитации экосистем»).*

**Ұ.Е. Жантикеев*, Л.Н. Сеймуханова, Д.Р. Мулдаш, Ш.Т. Султахан, М. Тоқтар**
Satbayev University, 050043, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев к-сі, 22
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

**СУЫҚ ПЛАЗМАНЫҢ ТОПЫРАҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ЖӘНЕ ЛАСТАНҒАН ТОПЫРАҚТАРДЫ РЕМЕДИАЦИЯЛАУҒА ӘСЕРІ: ШОЛУ**

***Аңдатпа:*** *Шолуда органикалық қосылыстармен және ауыр металдармен ластанған топырақтарды ремедиациялау үшін суық (термиялық емес) плазманы қолдану жөніндегі заманауи зерттеулер жүйеленді. Плазмалық разрядтарда оттегі мен азоттың белсенді түрлерінің түзілу механизмдері, олардың кеуекті топырақ ортасында тасымалдануы және органикалық ластағыштардың тотығу деструкциясына, pH пен тотығу-тотықсыздану потенциалының өзгеруіне, сондай-ақ бейорганикалық компоненттердің химиялық формаларының трансформациясына қатысуы қарастырылды. Диэлектрлік тосқауылдық және тәждік разрядтар, тікелей және қашықтан әсер ету тәсілдері разряд параметрлерін, топырақтың ылғалдылығы мен қасиеттерін, ластағыштың табиғаты мен концентрациясын, өңдеу ұзақтығын және*

*энергетикалық сипаттамаларды ескере отырып салыстырылды. Зертханалық зерттеулерде жекелеген органикалық ластағыштардың деструкция дәрежесі 85-99 %-ға жететіні көрсетілді, алайда бастапқы қосылыс концентрациясының төмендеуі әрқашан оның минералдану дәрежесіне сәйкес келе бермейді. Сондықтан ремедиация тиімділігін қалдық концентрация, жалпы органикалық көміртек, трансформация өнімдері және энергетикалық шығындар бойынша бағалау қажет. Ауыр металдар үшін плазмалық әсер элементтің деструкциясы немесе жойылуымен емес, негізінен оның химиялық формаларының, қозғалғыштығының, шайылғыштығының және биожетімділігінің өзгеруімен байланысты. Әсер ету тәсіліне қарай металдардың иммобилизациясы да, олардың өсімдіктерге қолжетімділігінің өзгеруі де мүмкін. Суық плазмамен өңдеудің тиімділігі белсенді бөлшектердің ену тереңдігімен және топырақ ортасының біртекті еместігімен шектелетіні анықталды. Суық плазманың беткі және жер бетіне жақын ремедиацияның интеграцияланған технологияларының құрамдас бөлігі ретінде перспективалы екені және тиімділік пен энергия тұтыну критерийлерін стандарттау қажеттілігі туралы қорытынды жасалды.*

***Түйін сөздер:*** *суық плазма, топырақ, ремедиация, органикалық ластағыштар, ауыр металдар.*

**U.Ye. Zhantikeyev*, L.N. Seimukhanova, D.R. Muldash, Sh.T. Sultakhan, M. Toktar**
Satbayev University, 050043, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev str., 22
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

## IMPACT OF COLD PLASMA ON SOIL PROPERTIES AND REMEDIATION OF CONTAMINATED SOILS: A REVIEW

***Abstract:*** *This review systematizes recent studies on the application of cold non-thermal plasma for the remediation of soils contaminated with organic compounds and heavy metals. The mechanisms of reactive oxygen and nitrogen species formation in plasma discharges, their transport through porous soil media, and their involvement in oxidative degradation of organic pollutants, changes in pH and redox potential, and transformation of the chemical forms of inorganic components are considered. Dielectric barrier and corona discharges, as well as direct and remote treatment modes, are compared with regard to discharge parameters, soil moisture and properties, pollutant type and concentration, treatment duration, and energy characteristics. Laboratory studies show that the degradation efficiency of individual organic pollutants can reach 85–99%; however, a decrease in the concentration of the parent compound does not necessarily correspond to the degree of mineralization. Therefore, remediation efficiency should be assessed using residual pollutant concentration, total organic carbon, transformation products, and energy consumption. For heavy metals, plasma treatment is associated primarily with changes in chemical forms, mobility, leachability, and bioavailability rather than with destruction or removal of the element. Depending on the treatment mode, both metal immobilization and changes in plant availability may occur. The effectiveness of cold-plasma treatment is limited by the penetration depth of reactive species and the heterogeneity of the soil matrix. It is concluded that cold plasma is promising as a component of integrated technologies for surface and near-surface soil remediation and that standardization of efficiency and energy-consumption criteria is required.*

***Key words:*** *cold plasma, soil, remediation, organic pollutants, heavy metals.*

### Сведения об авторах

**Улан Ержанулы Жантикеев*** – магистр технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории инженерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

**Лаура Нурлановна Сеймуханова** – магистр технических наук, научный сотрудник Лаборатории инженерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1438-6568.

**Диас Рустемулы Мулдаш** – магистр технических наук, научный сотрудник Лаборатории инженерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: muldashevdias@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2883-261X.

**Шынгысхан Темирханулы Султахан** – магистр технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории инжинерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан, e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.

**Мурат Токтар** – PhD, ассоциированный профессор, преподаватель, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: m.toktar@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0953-7491.

### Авторлар туралы мәліметтер

**Ұлан Ержанұлы Жантикеев*** – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының аға ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

**Лаура Нұрланқызы Сеймуханова** – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1438-6568.

**Диас Рустемұлы Мулдаш** – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: muldashevdias@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2883-261X.

**Шыңғысхан Темірханұлы Султахан** – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: Shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.

**Мұрат Тоқтар** – PhD, қауымдастырылған профессор, оқытушы, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: m.toktar@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0953-7491.

**Information about the authors**

**Ulan Yerzhanuly Zhantikeyev*** – Master of Technical Sciences, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

**Laura Nurlanovna Seimukhanova** – Master of Technical Sciences, Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1438-6568.

**Dias Rustemuly Muldash** – Master of Technical Sciences, Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: muldashevdias@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2883-261X.

**Shynggyskhan Temirkhanuly Sultakhan** – Master of Technical Sciences, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: Shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.

**Murat Toktar** – PhD, Associate Professor, Lecturer, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: m.toktar@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0953-7491.

*Поступила в редакцию 02.06.2026*
*Поступила после доработки 04.09.2026*
*Принята к публикации 11.09.2026*

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-94

МРНТИ: 58.91.41; 29.36.21

CC BY 4.0
Check for updates

**Ю.Ю. Бакланова*, В.В. Яковлев, О.С. Букина, В.В. Бакланов**
Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК
180010, Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт Атом, 10
*e-mail: basalai@nnc.kz

# ИММОБИЛИЗАЦИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В БИТУМНОЙ МАТРИЦЕ

***Аннотация:*** *В статье представлен комплексный аналитический обзор современных научно-технических подходов к кондиционированию и иммобилизации жидких радиоактивных отходов (ЖРО) низкого и среднего уровней активности методом битумирования. Авторами подробно описаны служебные преимущества и макрокинетические ограничения использования гетерогенных углеводородных матриц, а также сформулированы строгие нормативные требования к физико-химическим свойствам компаундов и солевому составу фиксируемых технологических флюидов. Проведен детальный сопоставительный анализ фракционного состава различных марок промышленных битумов, включая продукцию ТОО «Павлодарский нефтехимический завод». В работе систематизированы параметры периодического и непрерывного экструзионного процессов. Проанализированы ключевые внутренние факторы, определяющие предел соленаполнения, динамическую вязкость смесей, их радиационную стойкость, термостабильность и долговременную гидрофобность в условиях контакта с подземными водами. Показана необходимость предварительного исследования фазового состава ЖРО и оценки их совместимости с битумом для предотвращения экзотермических реакций. Рассмотрены требования к условиям безопасного промежуточного хранения и последующего*

©Ю.Ю. Бакланова, В.В. Яковлев, О.С. Букина, В.В. Бакланов, 2026