DOI: 10.33266/2782-6430-2026-4-36-45

Челарская Е.С., Ромодин Л.А., Глазко И.И., Балакин Е.И., Родионова А.А., Пустовойт В.И.

ХОЛОДНАЯ ПЛАЗМА В ЛЕЧЕНИИ ЛУЧЕВЫХ ПОРАЖЕНИЙ КОЖИ, ТРОФИЧЕСКИХ И ПРОЛЕЖНЕВЫХ ЯЗВ: КЛИНИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ МЕДИЦИНЫ.

Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Челарская Екатерина Сергеевна, email: katerina.chelarskaya@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Хронические раны и радиационно-индуцированные поражения кожи остаются одной из наиболее сложных задач современной клинической практики, поскольку сопровождаются персистирующим воспалением, микробной контаминацией, нарушением ангиогенеза, дефектами ремоделирования внеклеточного матрикса и замедленной регенерацией тканей. В этих условиях холодная плазма рассматривается как перспективный метод местного воздействия, сочетающий противомикробный, иммуномодулирующий и эффект, стимулирующий регенерацию тканей, за счёт образования реактивных форм кислорода и азота, влияния на клеточные сигнальные пути и изменение раневой микросреды.

Целью настоящего обзора являлась систематизация современных данных о механизмах действия холодной плазмы и оценка её клинического значения при лечении лучевых поражений кожи, трофических язв и пролежней в контексте задач восстановительной и регенеративной медицины. В работе рассмотрены физико-биологические основы действия холодной плазмы, её влияние на воспалительный ответ, ангиогенез, пролиферацию и миграцию кератиноцитов и фибробластов, ремоделирование тканей, микробную контаминацию и формирование биоплёнок. Обобщение экспериментальных и клинических данных показывает, что включение холодной плазмы в состав комплексной терапии хронических и радиационных кожных повреждений может ускорять заживление ран, снижать микробную нагрузку и улучшать локальные характеристики раневого процесса.

Вместе с тем существующая доказательная база остаётся неоднородной вследствие различий в типах плазменных устройств, параметрах экспозиции, дизайне исследований и выборе конечных точек. Холодная плазма представляет значительный интерес как вспомогательный метод в составе программ регенеративной терапии кожи, однако для её более широкого внедрения необходимы стандартизация протоколов, унификация подходов к дозированию и проведение крупных многоцентровых клинических исследований.

Ключевые слова: *холодная плазма; ХП; регенеративная медицина; хронические раны; трофические язвы; пролежни; заживление ран.*

Для цитирования: Челарская Е.С., Ромодин Л.А., Глазко И.И., Балакин Е.И., Родионова А.А., Пустовойт В.И. Холодная плазма в лечении лучевых поражений кожи, трофических и пролежневых язв: клинический потенциал и значение для регенеративной медицины // Клинический вестник ФМБЦ им. А.И. Бурназяна 2026. № 4. С. 36–45. DOI: 10.33266/2782-6430-2026-4-36-45

DOI: 10.33266/2782-6430-2026-4-36-45

Cold Plasma in the Treatment of Radiation-Induced Skin Lesions, Trophic and Pressure Ulcers: Clinical Potential and Implications for Regenerative Medicine

E.S. Chelarskaya, L.A. Romodin, I.I. Glazko, E.I. Balakin, A.A. Rodionova, V.I. Pustovoit

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Contact person: Ekaterina S. Chelarskaya, email: katerina.chelarskaya@yandex.ru

ABSTRACT

Chronic wounds and radiation-induced skin lesions remain among the most challenging areas of modern clinical practice, as they are accompanied by persistent inflammation, microbial contamination, impaired angiogenesis, defects in extracellular matrix remodeling, and delayed tissue regeneration. In these conditions, cold plasma is considered a promising local treatment method, combining antimicrobial, immunomodulatory, and regenerative effects through the formation of reactive oxygen and nitrogen species, influence on cellular signaling pathways, and modification of the wound environment.

The aim of this review was to systematize current data on the mechanisms of action of cold plasma and evaluate its clinical value in the treatment of radiation-induced skin lesions, trophic ulcers, and pressure ulcers in the context of restorative and regenerative medicine. This paper examines the physicobiological basis of cold plasma action, including its impact on the inflammatory response, angiogenesis, keratinocyte and fibroblast proliferation and migration, tissue remodeling, microbial contamination, and biofilm formation. A summary of experimental and clinical data demonstrates that the inclusion of cold plasma in combination therapy for chronic and radiation-induced skin injuries can accelerate wound healing, reduce microbial load, and improve local wound healing characteristics.

However, the existing evidence base remains heterogeneous due to differences in plasma device types, exposure parameters, study design, and endpoint selection. Cold plasma is of significant interest as an adjunctive therapy in skin regenerative therapy programs; however, standardization of protocols, unified dosing approaches, and large-scale multicenter clinical trials are needed for its wider implementation.

Keywords: *cold plasma; CP; regenerative medicine; chronic wounds; trophic ulcers; bedsores; wound healing.*

For citation: Chelarskaya ES, Romodin LA, Glazko II, Balakin EI, Rodionova AA, Pustovoit VI. Cold plasma in the treatment of radiation-induced skin lesions, trophic and pressure ulcers: clinical potential and implications for regenerative medicine. A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center Clinical Bulletin. 2026.4:36-45. (In Russian) DOI: 10.33266/2782-6430-2026-4-36-45

Введение:

Хронические раны, включая трофические язвы и пролежни, а также радиационно-индуцированные поражения кожи, представляют собой значимую клиническую и социально-экономическую проблему для здравоохранения, поскольку связаны с длительным лечением, высоким риском инфекции, болевым синдромом, снижением качества жизни и существенными затратами системы здравоохранения. Несмотря на совершенствование перевязочных материалов, методов локального антисептического воздействия, дебридмента и технологий стимуляции репарации, результаты терапии при трудно заживающих ранах нередко остаются неудовлетворительными, особенно в условиях хронического воспаления, ишемии, микробной колонизации и коморбидной патологии [1].

Заживление кожной раны в норме проходит через взаимосвязанные фазы гемостаза, воспаления, пролиферации и ремоделирования [2]. Однако хронические раны характеризуются остановкой или выраженным замедлением перехода от воспалительной фазы к пролиферативной, что сопровождается накоплением протеаз, дисбалансом цитокинов, дефектами ангиогенеза и нарушением межклеточной коммуникации [3, 4]. В случае трофических язв ключевыми звеньями патогенеза выступают хроническая венозная или артериальная недостаточность, диабетическая микро- и макроангиопатия, нейропатия и инфекция, тогда как при пролежнях ведущую роль играют длительное давление, локальная ишемия, нарушение микроциркуляции и вторичный некроз тканей [5]. Лучевые поражения кожи развиваются вследствие повреждающего действия ионизирующего излучения и проявляются воспалением, нарушением микроциркуляции, повреждением клеток эпидермиса и дермы, оксидативным стрессом и затяжным расстройством репарации [6-8].

В последние годы существенный интерес вызывает холодная плазма как инструмент плазменной медицины, являющейся предметом междисциплинарных исследований в области физики, биологии, дерматологии и восстановительной медицины. В отличие от термической плазмы, холодная плазма (ХП) генерируется при температуре газа, близкой к комнатной, что позволяет применять её на поверхности живых тканей без значимого термического повреждения [9-12]. Биологические эффекты ХП обусловлены генерацией активных форм кислорода (АФК) и азота, заряженных частиц, ультрафиолетового излучения низкой интенсивности и локальных электрических полей, которые влияют на микроорганизмы, клеточную сигнализацию, окислительно-восстановительный баланс и тканевую регенерацию [13-15].

Накопленные к настоящему времени данные свидетельствуют о том, что холодная плазма способна уменьшать бактериальную нагрузку, нарушать целостность биоплёнок, модулировать воспалительный ответ, стимулировать миграцию и пролиферацию клеток кожи, улучшать микроциркуляцию и усиливать ангиогенез [16]. Ключевые механизмы действия холодной плазмы представлены в табл. 1. Наряду с этим экспериментальные исследования при радиационно-индуцированных кожных повреждениях показывают, что ХП может ослаблять воспаление, активировать цитопротективные сигнальные пути и ускорять восстановление тканей. Вместе с тем клиническая трансляция этой технологии ограничена гетерогенностью устройств, вариабельностью режимов воздействия и недостаточным количеством крупных рандомизированных исследований. Основные клинические направления применения холодной плазмы показаны в табл. 2 [17-19].

Целью настоящего обзора является анализ современных представлений о физико-биологических механизмах действия холодной плазмы и оценка её клинического значения в лечении лучевых поражений кожи, трофических язв и декубитальных язв (пролежней) в контексте задач регенеративной медицины.

Материалы и методы поиска литературы

Настоящая работа представляет собой обзор литературы с элементами структурированного анализа. В основу обзора положен авторский материал, посвящённый применению холодной плазмы при лучевых поражениях кожи, трофических язвах и пролежнях, дополненный современными публикациями обзорного, экспериментального и клинического характера, преимущественно на английском языке.

Особое внимание уделялось публикациям последних лет, а также исследованиям, включавшим клинические значимые точки: уменьшение площади раны, скорость эпителизации, снижение бактериальной нагрузки, выраженность воспаления, переносимость терапии и безопасность. Поскольку обзор носит описательно-аналитический характер, задачей анализа являлась не формальная метааналитическая интеграция результатов, а критическое сопоставление данных о механизмах действия холодной плазмы и её возможностях как дополнительного метода в составе восстановительного лечения и регенеративной терапии. Характер доступных клинических данных по основным нозологическим группам представлен в табл. 2 [20-24].

Патофизиологические предпосылки применения холодной плазмы при трудно заживающих ранах

Успешная регенерация кожи требует согласованной смены клеточных и молекулярных программ, включающих формирование временного матрикса, рекрутирование клеток воспаления, активацию фибробластов и кератиноцитов, ангиогенез и последующее ремоделирование. При хронических ранах и радиационных повреждениях эти процессы нарушаются, вследствие чего в раневой среде сохраняются избыточное воспаление, оксидативный стресс, повышенная микробная нагрузка, протеолитическая активность и дефицит факторов, обеспечивающих полноценную репарацию [25-27]. Именно это делает такие поражения перспективной моделью для изучения технологий , способных влиять одновременно на несколько патогенетических звеньев [28, 29].

Трофические язвы формируются на фоне длительных сосудистых и метаболических нарушений, которые приводят к гипоксии тканей, снижению клеточной активности, ухудшению доставки питательных веществ и повышенной восприимчивости к инфекции [5]. Пролежни развиваются в результате компрессии тканей, нарушения перфузии, ишемии и некроза, а также часто сочетаются с выраженной коморбидностью пациентов, что дополнительно ограничивает регенераторный потенциал [3, 4]. Лучевые поражения кожи, в том числе радиационно-индуцированный дерматит, характеризуются воспалением, повреждением базального слоя эпидермиса, сосудистыми нарушениями и длительно сохраняющимся дисбалансом между повреждением и восстановлением [6, 7].

В этих условиях холодная плазма представляет интерес не просто как локальный физический агент, а как средство направленной модуляции раневой микросреды. Потенциал этой технологии определяется сочетанием нескольких взаимосвязанных эффектов: антимикробного действия, влияния на воспалительный ответ, стимуляции клеточной пролиферации и миграции, активации ангиогенеза и нормализации тканевого окислительно-восстановительного состояния [30-32]. С позиции регенеративной медицины это особенно важно, поскольку терапевтическая задача при хронической ране заключается не только в санации поверхности дефекта, но и в восстановлении способности ткани к организованной репарации. Основные механизмы такого действия суммированы в табл. 1.

Физико-биологические основы действия холодной плазмы

Холодная плазма представляет собой частично ионизированный газ, генерируемый при атмосферном давлении и температуре, допускающей безопасный контакт с биологическими тканями. ХП содержит активные формы кислорода и азота, озон, перекись водорода, оксид азота и гидроксильные радикалы, которые играют ключевую роль в формировании её биологических эффектов [42, 43]. Именно этот комплекс активных компонентов определяет способность холодной плазмы одновременно воздействовать на микроорганизмы, клетки кожи и молекулярные механизмы раневого процесса [15, 17].

Для медицинских целей наиболее значимы технологии, обеспечивающие генерацию плазмы при низкой температуре газа и контролируемом потоке

Таблица 1

Основные механизмы действия холодной плазмы (ХП) в контексте регенеративной медицины.
Key mechanisms of action of cold plasma (CP) in the context of regenerative medicine.

Механизм / уровень	Ключевые эффекты ХП	Потенциальное значение для регенерации тканей	Ссылка
Антимикробное действие	Образование реактивных форм кислорода и азота (перекись водорода, озон, гидроксильные радикалы, оксид азота) с повреждением мембран, белков и ДНК бактерий; разрушение структур биоплёнок.	Снижение микробной нагрузки и риска инфекции, улучшение условий для перехода от хронического воспаления к пролиферации; возможность уменьшить использование антибиотиков и антисептиков.	[15, 33-35]
Модуляция воспаления	Влияние на цитокиновый профиль (снижение IL-1β, TNF-α; транзиторное повышение IL-6), изменение функционального состояния макрофагов в сторону, благоприятную для репарации тканей.	Ограничение хронизации воспаления, создание микросреды, благоприятной для заживления; ускорение перехода от воспалительной фазы к пролиферативной.	[24]
Регуляция окислительно-восстановительных процессов и цитопротекция	Активация NRF2-зависимых путей и экспрессии антиоксидантных ферментов (HMOX1, NQO1 и др.) в ответ на контролируемый оксидативный стимул.	Снижение оксидативного стресса в хронических и радиационных ранах, защита клеток от избыточного повреждения, поддержка репарации ДНК и выживания клеток.	[36-38]
Стимуляция пролиферации и миграции клеток	Усиление пролиферации и миграции кератиноцитов и фибробластов; активация тромбоцитов; повышение клеточной активности в зоне раны.	Ускорение формирования грануляционной ткани и эпителизации; ускоренное закрытие раневого дефекта и восстановление барьерной функции кожи.	[16, 39]
Влияние на ангиогенез и микроциркуляцию	Повышение экспрессии VEGF и других факторов роста; улучшение функции эндотелия, микроциркуляции и тканевой перфузии.	Улучшение доставки кислорода и питательных веществ к раневой поверхности, ускорение грануляции и ремоделирования, особенно при ишемических и диабетических язвах.	[40]
Ремоделирование внеклеточного матрикса	Модуляция активности фибробластов, синтеза коллагена и матриксных металлопротеиназ; влияние на организацию внеклеточного матрикса.	Оптимизация качества вновь образованной ткани и структуры рубца; потенциал для снижения риска хронического дефекта при правильном подборе параметров воздействия.	[41]
Взаимодействие с биоматериалами и покрытиями	Возможность комбинировать ХП с биополимерными раневыми покрытиями, плазма-активированными жидкостями и системами локальной доставки факторов роста.	Создание комбинированных лечебно-регенеративных комплексов (холодная плазма + биоматериалы) с синергичным влиянием на санацию, воспаление и тканевую репарацию.	[34, 41]

Таблица 2

Применение холодной атмосферной плазмы (ХП) при хронических и радиационно-индуцированных кожных поражениях [26, 28-32]
Application of cold atmospheric plasma (CAP) for chronic and radiation-induced skin lesions [26, 28-32].

Нозология / тип раны	Тип ХП-устройства и режим воздействия	Основные клинические эффекты	Ограничения и замечания	Ссылка
Диабетические язвы стопы	Чаще используются струйные плазменные источники при атмосферном давлении и разряды с диэлектрическим барьером; экспозиция несколько минут на процедуру, курсом в течение нескольких недель.	Более выраженное уменьшение площади раны и более быстрое достижение клинически значимого сокращения дефекта; снижение бактериальной нагрузки, улучшение грануляции и эпителизации; хорошая переносимость.	Небольшие выборки, вариабельность устройств и протоколов, не во всех исследованиях получены выраженные различия по микробной нагрузке; ХП применялась на фоне стандартного лечения.	[21]
Хронические язвы нижних конечностей (венозные, смешанные)	Струйные плазменные источники и системы на основе разряда с диэлектрическим барьером; регулярные сеансы обработки язвы (например, 2–3 раза в неделю) в дополнение к стандартной раневой терапии.	Ускорение заживления по сравнению с базовой терапией, уменьшение площади раны, улучшение качества грануляционной ткани, снижение колонизации патогенной флорой; удовлетворительная переносимость.	Гетерогенность по типам язв, размеру и длительности существования ран; различия в режиме и длительности воздействия; ограниченные долгосрочные данные.	[56]
Хронические инфицированные раны (включая язвы стопы, осложнённые инфекцией)	ХП-устройства с фокусом на локальной деконтаминации; экспозиция 1–3 минуты на рану, часто в сочетании с перевязками.	Быстрое снижение бактериальной нагрузки (в том числе *S. aureus*, MRSA, *P. aeruginosa*), улучшение клинических признаков воспаления и заживления, отсутствие выраженного повреждающего воздействия на окружающие ткани.	Преимущественно небольшие серии; отсутствие единых критериев оценки микробной нагрузки; параллельное использование системных и местных антимикробных средств затрудняет оценку вклада ХП.	[20]
Пролежни	Низкотемпературные тлеющие плазменные разряды и другие ХП-системы для локальной обработки области пролежня; курс повторных процедур.	Ускорение регенерации раневого очага, сокращение сроков заживления, положительный эффект даже у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями; отсутствие значимых нарушений ритма и проводимости сердца.	Ограниченный объём доказательной базы, преимущественно отечественные и небольшие исследования; отсутствие крупных рандомизированных протоколов; необходимость стандартизации критериев оценки эффективности.	[22]
Радиационно-индуцированные поражения кожи (радиодерматит, лучевые ожоги)	ХП-jet и другие устройства с контролируемой экспозицией на область облучения; воздействие на кожу в постлучевой период.	Снижение выраженности воспаления, уменьшение клинической тяжести дерматита, стимуляция пролиферации и миграции клеток, активация путей, регулируемых транскрипционным фактором NRF2, улучшение репарации ДНК; потенциальное ускорение заживления.	Клинические данные ограничены, основу доказательной базы составляют экспериментальные работы; необходимы стандартизированные клинические исследования с оценкой эпителизации, боли, качества рубца и долгосрочной безопасности.	[24]
Острые и хронические раны (смешанные группы)	Различные плазменные системы, включая разряды с диэлектрическим барьером и струйные источники плазмы; схемы варьируют по длительности и частоте процедур.	Подтверждение универсальности механизма действия ХП в отношении раневого процесса: антибактериальный, противовоспалительный и стимулирующий регенерацию эффекты в разных типах	Высокая гетерогенность по типам ран, протоколам, конечным точкам; сложность сравнения и метааналитического объединения результатов; необходимость унификации протоколов.	[24]

активных частиц. В клинических и экспериментальных системах для этого используются различные типы плазменных разрядов, в том числе разряды с диэлектрическим барьером при атмосферном давлении и струйные плазменные источники. Выбор типа устройства имеет практическое значение, поскольку определяет площадь обработки, плотность потока реактивных молекул, глубину взаимодействия с тканями и воспроизводимость дозирования [44, 45].

Принципиально важным является дозозависимый характер действия холодной плазмы. Контролируемые количества активных форм кислорода и азота могут выполнять сигнальную функцию, активируя адаптационные и репаративные клеточные программы, тогда как избыточное воздействие потенциально способно усиливать оксидативное повреждение и вызывать цитотоксичность [46]. Поэтому клиническая ценность технологии определяется не только фактом генерации плазмы, но и точной настройкой параметров обработки: типа газа, мощности, расстояния до поверхности, длительности экспозиции и кратности процедур. Ключевые уровни действия холодной плазмы представлены в табл. 1.

Влияние холодной плазмы на воспаление и регуляцию окислительно-восстановительных процессов

Воспаление является обязательной фазой заживления раны, однако его избыточная и длительная активация препятствует переходу к пролиферации и ремоделированию. Холодная плазма способна модулировать воспалительный ответ за счёт воздействия на клетки врождённого иммунитета, цитокиновый профиль и сигнальные пути, чувствительные к изменениям окислительно-восстановительного состояния клетки. По современным данным, ХП может индуцировать контролируемое раннее воспалительное перестроение микросреды, необходимое для запуска репарации, и одновременно ограничивать хронизацию воспалительного процесса [47].

Одним из центральных механизмов считается влияние на систему NRF2, играющую ключевую роль в антиоксидантной защите клетки. Под действием контролируемого плазмой оксидативного стимула происходит активация транскрипционных программ, направленных на синтез антиоксидантных и детоксикационных ферментов, включая HMOX1, NQO1, GPX, CAT и SOD. Это способствует снижению оксидативной перегрузки и созданию условий, более благоприятных для регенерации тканей, особенно в моделях хронических и диабетических ран [36-38]. Соответствующие механизмы отражены в табл. 1.

При радиационно-индуцированных кожных повреждениях холодная плазма демонстрирует дополнительную ценность, поскольку позволяет воздействовать сразу на несколько патологических звеньев: воспаление, повреждение ДНК, оксидативный стресс и нарушение клеточной миграции. ХП может снижать выраженность воспаления, активировать пути, регулируемые транскрипционным фактором NRF2, и способствовать восстановлению пролиферации и миграции клеток кожи после облучения. Это соответствует представлению о холодной плазме как о средстве не только антисептического, но и направленного репаративного воздействия [24].

Холодная плазма и стимуляция пролиферации, миграции и ангиогенеза

Пролиферативная фаза заживления включает миграцию кератиноцитов, активацию фибробластов, синтез компонентов внеклеточного матрикса и формирование новых сосудов. Нарушение этих процессов является одной из основных причин хронического течения раневого дефекта, особенно при диабете, венозной недостаточности и ишемии. Холодная плазма, по данным рассмотренных материалов, способна усиливать клеточную активность, связанную с формированием грануляционной ткани и эпителизацией [48].

Установлено, что терапевтические эффекты холодной плазмы могут включать стимуляцию пролиферации и миграции кератиноцитов и фибробластов, а также улучшение ангиогенеза и микроциркуляции [16, 32, 49-51]. Эти эффекты особенно значимы для хронических язв и пролежней, где дефицит локального кровоснабжения и гипоксия играют определяющую роль в замедлении заживления. Основные механизмы, связанные с клеточной активацией и сосудистым ответом, систематизированы в табл. 1.

Влияние холодной плазмы на ремоделирование тканей

Ремоделирование является завершающей стадией репаративного процесса и направлено на перестройку внеклеточного матрикса, уплотнение ткани и восстановление её функциональной прочности. Холодная плазма потенциально влияет и на этот этап, поскольку может модулировать активность фибробластов, синтез коллагена и организацию внеклеточного матрикса [24, 49]. Такой эффект особенно важен при хронических ранах, где нарушен баланс между деградацией и восстановлением матрикса [48].

Вместе с тем интерпретация этих эффектов требует осторожности, поскольку ускорение закрытия дефекта не всегда эквивалентно оптимальному качеству заживления. По этой причине оценка клинической эффективности холодной плазмы должна учитывать не только сроки эпителизации, но и характеристики сформированной ткани [41]. Значение технологии для процессов ремоделирования также отражено в табл. 1.

Антимикробное действие и влияние на биоплёнки

Одним из наиболее изученных эффектов холодной плазмы является антимикробное действие. Генерируемые плазмой активные частицы повреждают мембраны микроорганизмов, нарушают структуру белков и нуклеиновых кислот, а также ослабляют устойчивость микробных сообществ в составе биоплёнок. Эти процессы имеют особое значение для хронических ран, в которых микробная колонизация поддерживает воспаление и препятствует переходу к физиологическому заживлению [17, 20, 33, 34, 52].

В исходном тексте приведены данные о действии холодной плазмы против *Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa* и метициллин-резистентного штамма *Staphylococcus aureus* (MRSA). Однако клиническое значение технологии, по-видимому, не исчерпывается деконтаминацией поверхности раны. Более вероятно, что конечный терапевтический эффект определяется сочетанием антимикробного действия, модуляции воспаления и стимуляции клеточной репарации [20]. Антимикробные и антибиоплёночные эффекты холодной плазмы представлены в табл. 1.

Клиническое применение при лучевых поражениях кожи

Лучевые поражения кожи представляют собой одну из наиболее сложных моделей нарушения тканевой репарации, поскольку сочетают воспаление, сосудистые расстройства, повреждение базального эпидермиса, оксидативный стресс и длительно сохраняющиеся нарушения репарации. В исходном материале подчёркивается, что стандартные методы терапии лучевых ожогов и радиационного дерматита нередко сопровождаются длительным заживлением и формированием рубцов. На этом фоне применение холодной плазмы рассматривается как подход, позволяющий одновременно воздействовать на воспаление, микробную контаминацию и клеточную регенерацию [7, 53].

Авторы [54] в рандомизированном двойном слепом плацебо-контролируемом исследовании изучили влияние холодной плазмы на развитие острого радиационного дерматита у пациенток с раком молочной железы, получающих лучевую терапию: статистически значимых преимуществ по сравнению с плацебо ни по клиническим, ни по субъективным показателям обнаружено не было. Вместе с тем ряд исследований указывает на потенциальную пользу воздействия холодной плазмой для смягчения тяжести лучевых ожогов [54, 55].

При местном воздействии холодной плазмы генерируемые активные формы кислорода и азота могут стимулировать клеточные процессы, связанные с восстановлением повреждённой ткани. В то же время клиническая доказательная база в этой области пока остаётся ограниченной, что требует осторожности при интерпретации результатов [33-35]. Характер доступных исследований при лучевых поражениях кожи представлен в табл. 2.

Клиническое применение при трофических язвах

Трофические язвы относятся к наиболее изученным клиническим моделям использования холодной плазмы. Это обусловлено сочетанием хронического воспаления, нарушения микроциркуляции, высокой микробной нагрузки и склонности к длительному отсутствию эпителизации. Холодная плазма оказывает выраженное антибактериальное действие при трофических язвах и может снижать контаминацию раны патогенами, включая *Staphylococcus aureus, E. coli, Pseudomonas aeruginosa* и MRSA [20].

Клиническое значение холодной плазмы при хронических язвах следует рассматривать как минимум в двух плоскостях. Первая связана со снижением бактериальной нагрузки. Вторая связана с возможным прямым стимулирующим влиянием на регенерацию, включая воздействие на клеточную миграцию, формирование грануляционной ткани и восстановление тканевой архитектоники [36, 37].

Авторы [56] в рандомизированном контролируемом исследовании показали, что применение холодной атмосферной плазмы с частотой один или два раза в неделю в дополнение к стандартной терапии достоверно улучшает заживление хронических венозных язв нижних конечностей по сравнению со стандартной терапией в монорежиме. При этом существенной разницы в эффективности между одно- и двукратным применением в течение недели выявлено не было. В другом рандомизированном плацебо-контролируемом клиническом исследовании было показано, что терапия холодной атмосферной плазмой значимо ускоряет заживление язв при синдроме диабетической стопы: площадь ран сокращалась быстрее и в большей степени, чем в плацебо-группе, однако влияния на микробную нагрузку и клинические признаки инфекции выявлено не было [57].

Был описан клинический случай, при котором применение холодной атмосферной плазмы обеспечило значимое закрытие раны (хронической язвы диабетической стопы) у 69-летнего пациента [58]. Недавно был описан другой клинический случай успешного лечения резистентной язвы диабетической стопы с применением комбинированного подхода, включающего холодную атмосферную плазму, личиночную терапию (маггототерапию) и альгинатные повязки, что свидетельствует о синергетическом потенциале данной мультимодальной стратегии при хронических ранах, не поддающихся стандартному лечению [59]

Основные клинические направления применения технологии применения холодной плазмы при хронических язвенных дефектах представлены в табл. 2.

Клиническое применение при пролежнях

Пролежни представляют собой повреждение мягких тканей ишемического происхождения, возникающее вследствие длительного давления, нарушения микроциркуляции и последующего некроза. Их лечение требует комплексного подхода, включающего разгрузку, локальную терапию, контроль инфекции, коррекцию питания и профилактику повторной компрессии. На этом фоне холодная плазма рассматривается как перспективный вспомогательный метод лечения, способный ускорять регенерацию тканей и улучшать локальные параметры раневой среды [3, 4, 6].

Имеются данные о положительных результатах клинического применения низкотемпературной плазмы при пролежнях, включая ускорение регенерации и сокращение сроков заживления. Вместе с тем доказательная база по этому направлению остаётся ограниченной и представлена главным образом небольшими исследованиями и сериями наблюдений. Краткая характеристика имеющихся данных

по пролежням приведена в табл. 2 [22, 60].В целом механизм и принципы терапевтического действия холодной плазмы при пролежнях аналогичны таковым при трофических язвах [61, 62].

Клиническая безопасность и практические ограничения

Благоприятный профиль переносимости является одним из ключевых факторов, поддерживающих интерес к холодной плазме как к методу, пригодному для клинического применения. Низкая температура газа делает возможной локальную обработку тканей без выраженного термического повреждения. Однако переносимость процедуры и её безопасность зависят от типа устройства, длительности воздействия, расстояния до поверхности и характеристик самой раны [33-35].

Несмотря на обнадёживающие результаты, существующие данные пока не позволяют сделать окончательные выводы. Основными ограничениями являются небольшие размеры выборок, гетерогенность плазменных устройств и режимов воздействия, вариабельность рабочих газов, отсутствие единых протоколов дозирования и различия в критериях оценки эффективности. Дополнительные трудности создаёт то обстоятельство, что холодная плазма, как правило, применяется в составе комплексной терапии, а не как изолированное вмешательство. Эти ограничения следует учитывать при интерпретации клинических данных, представлены в табл. 2 [20-24].

Значение холодной плазмы для регенеративной медицины

С точки зрения регенеративной медицины холодная плазма представляет интерес прежде всего как метод с многокомпонентным механизмом действия. Её эффект не сводится к одному механизму, а включает антимикробное действие, модуляцию воспаления, редокс-регуляцию, стимуляцию ангиогенеза, влияние на клеточную пролиферацию и ремоделирование тканей. Совокупность этих эффектов представлена в табл. 1. Именно сочетание нескольких механизмов действия делает холодную плазму перспективным компонентом комплексной терапии трудно заживающих ран [33-38, 63].

Дополнительный потенциал технологии связан с возможностью комбинирования с биополимерными покрытиями, современными раневыми покрытиями, местными системами доставки факторов роста и другими средствами регенеративной терапии. В перспективе это позволяет формировать комбинированные методы лечения, в которых холодная плазма выполняет роль средства для санации раны, регулирования воспаления и стимуляции репаративных процессов. Однако до получения стандартизированных клинических данных подобные подходы следует рассматривать скорее как направление дальнейших исследований, чем как сформированный терапевтический стандарт [64-66].

Интерес представляют работы [67-74], демонстрирующие способность оказывать цитотоксическое действие холодной плазмы, направленное на раковые клетки.

Заключение

Холодная плазма является перспективным дополнительным методом лечения хронических и радиационно-обусловленных поражений кожи. Её клиническое значение определяется сочетанием противомикробного действия, влияния на воспалительную реакцию и участия в клеточных и сосудистых механизмах регенерации. Наиболее убедительные данные на сегодняшний день получены при хронических язвах, тогда как при лучевых поражениях кожи и пролежнях доказательная база остаётся ограниченной. Для более широкого внедрения метода необходимы унификация параметров воздействия, согласование критериев оценки эффективности, а также проведение крупных контролируемых исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Лебедева Е.В., Радионова Е.Е., Денисова Е.В., Корсунская И.М. Хронические раны на фоне аутоиммунных заболеваний: взгляд дерматолога // Медицинский совет. 2025. Т.19. №14. С. 102–106 [Lebedeva Ye.V., Radionova Ye.Ye., Denisova Ye.V., Korsunskaya I.M. Chronic Wounds Associated with Autoimmune Diseases: a Dermatologist's Perspective. Meditsinskiy Sovet = Medical Council. 2025;19;14:102–106 (In Russ.)]. Doi: 10.21518/ms2025-359.
2. Березовская Т.И., Одинцова И.А. Соотношение пролиферации и апоптоза в клетках соединительных тканей кожи при заживлении механической травмы в эксперименте // Морфология. 2025. Т.163. №4. С. 327–338 [Berezovskaya T.I., Odintsova I.A. The Ratio of Proliferation and Apoptosis in Connective Tissue Cells of the Skin during Experimental Healing of Mechanical Injury. Morfologiya = Morphology. 2025;163;4:327–338 (In Russ.)]. Doi: 10.17816/morph.677204.
3. Дибиров М.Д. Пролежни: профилактика и лечение // Амбулаторная хирургия. 2016. №1-2. С. 55–63 [Dibirov M.D. Bedsores: Prevention and Treatment. Ambulatornaya Khirurgiya = Ambulatory Surgery (Russia). 2016;1-2:55–63 (In Russ.)].
4. Мухин А.С., Чеботарь В.И., Кузнецова Л.В., Букша М.А. Пролежни: этиология, классификация, профилактика и лечение // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. 2019. № 4. С. 49–64 [Mukhin A.S., Chebotar' V.I., Kuznetsova L.V., Buksha M.A. Bedsores: Etiology, Classification, Prevention, and Treatment. Voprosy Rekonstruktivnoy i Plasticheskoy Khirurgii = Issues of Reconstructive and Plastic Surgery. 2019;4:49–64 (In Russ.)]. Doi:10.17223/1814147/71/07.
5. Оболенский В.Н., Родоман Г.В., Никитин В.Г., Карев М.А. Трофические язвы нижних конечностей – обзоры проблемы // Русский медицинский журнал. 2009. Т.17. №25. С. 1647–1662 [Obolenskiy V.N., Rodoman G.V., Nikitin V.G., Karev M.A. Trophic Ulcers of the Lower Extremities – Reviews of the Problem. Russkiy Meditsinskiy Zhurnal = Russian Medical Journal. 2009;17;25:1647–1662 (In Russ.)].
6. Azevedo M., Lisboa C., Rodrigues A. Chronic Wounds and Novel Therapeutic Approaches. British Journal of Community Nursing. 2020;25;12:S26–S32. Doi:10.12968/bjcn.2020.25.Sup12.S26.
7. Yang X., Ren H., Guo X., Hu C., Fu J. Radiation-Induced Skin Injury: Pathogenesis, Treatment, and Management. Aging. 2020;12;22:23379–23393. Doi:10.18632/aging.103932.
8. Li S., Chang D.F., Court K.A., Nguyen T.K.C., Shah V.V., Morales E., Carrier J., Tiwari A., Ludlow A.T., Brannan K.W., Spiegel A.J., Rahimi M., Friedman J.D., Olmsted-Davis E., Godin B., Mojiri A., Cooke J.P. Telomerase mRNA Therapy Protects Human Skin against Radiation-Induced DNA Damage. Molecular Therapy: the Journal of the American Society of Gene Therapy. 2026;34;1:330–347. Doi:10.1016/j.ymthe.2025.09.029.
9. Jiang D., Zhang J., Liu Z., Yu Y., Xiao L., Ai M., Luo M., Yu O.Y., Cao Y., Song K. Penetration Depth of Cold Atmospheric Plasma Into Biological Tissue: a Review. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2026;14:Art.1764941. Doi:10.3389/fbioe.2026.1764941.
10. Simpson R., Derrick-Roberts A., Carney B., Cowin A., Venn X. Cold Atmospheric Plasma in Burn Treatment: a Review of Experimental Evidence and Future Clinical Translatability. Burns: Journal of the International Society for Burn Injuries. 2026;52;5:Art.107983. Doi:10.1016/j.burns.2026.107983.
11. Talukdar P., Gohain R.B., Biswas S., Bala A. Cold Atmospheric Plasma in Biomedicine and Pharmacology: Multidisciplinary Perspectives on Therapeutic Applications. ACS Pharmacology & Translational Science.

2026;9;4:859–879. Doi:10.1021/acsptsci.6c00042.
12. Yuan N., Yang Y., Cai J., Tan C., Ran X. Effects of Cold Atmospheric Plasma Therapy on Chronic Wounds: a Systematic Review and Meta-Analysis. Journal of Tissue Viability. 2026;35;3:101017. Doi: 10.1016/j.jtv.2026.101017.
13. Мартусевич А.К., Краснова С.Ю., Костров А.В. Холодная плазма как биорегулятор: биофизические и физиологические аспекты // Биорадикалы и Антиоксиданты. 2018. Т. 5. №3. С. 41–44 [Martusevich A.K., Krasnova S.Yu., Kostrov A.V. Cold Plasma as a Bioregulator: Biophysical and Physiological Aspects. Bioradikaly i Antioksidanty = Bioradicals and Antioxidants. 2018;5;3:41–44 (In Russ.)].
14. Оловянникова Р.Я., Макаренко Т.А., Лычковская Е.В., Гудкова Е.С., Мурадян Г.А., Медведева Н.Н., Чекишева Т.Н., Бердников С.И., Семичев Е.В., Малиновская Н.А., Салмина А.Б., Салмин В.В. Химические механизмы действия холодной плазмы на клетки // Фундаментальная и клиническая медицина. 2020. Т.5. №4. С. 104–115 [Olovyannikova R.Ya., Makarenko T.A., Lychkovskaya Ye.V., Gudkova Ye.S., Muradyan G.A., Medvedeva N.N., Chekisheva T.N., Berdnikov S.I., Semichev Ye.V., Malinovskaya N.A., Salmina A.B., Salmin V.V. Chemical Mechanisms of Cold Plasma Action on Cells. Fundamental'naya i Klinicheskaya Meditsina = Fundamental and Clinical Medicine. 2020;5;4:104–115 (In Russ.)]. Doi: 10.23946/2500-0764-2020-5-4-104-115.
15. Воробьев К.П., Зиннурова А.Б., Бакина О.В., Спирина Л.В., Жаворонок Т.В. Современные представления о применении холодной плазмы в медицинских целях: перспективы и подходы // Медицинский вестник Северного Кавказа. 2024. Т.19. №4. С. 357–362 [Vorob'yev K.P., Zinnurova A.B., Bakina O.V., Spirina L.V., Zhavoronok T.V. Modern Concepts of the Use of Cold Plasma for Medical Purposes: Prospects and Approaches. Meditsinskiy Vestnik Severnogo Kavkaza = Medical News of the North Caucasus. Scientific Journal. 2024;19;4:357–362 (In Russ)]. Doi: 10.14300/mnnc.2024.19080.
16. Wu P.S., Wong T.H., Hou C.W., Chu T.P., Lee J.W., Lou B.S., Lin M.H. Cold Atmospheric Plasma Jet Promotes Wound Healing Through CK2-Coordinated PI3K/AKT and MAPK Signaling Pathways. Molecular & Cellular Proteomics: MCP. 2025;24;5:Art. 100962. Doi: 10.1016/j.mcpro.2025.100962.
17. Петрухина Д.И., Полякова И.В., Горбатов С.А. Биоцидная эффективность нетермальной аргоновой плазмы атмосферного давления // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т.51. №1. С. 86–97 [Petrukhina D.I., Polyakova I.V., Gorbatov S.A. Biocidal Efficiency of Non-Thermal Argon Plasma of Atmospheric Pressure. Tekhnika i Tekhnologiya Pishchevykh Proizvodstv = Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51;1:86–97 (In Russ.)]. Doi: 10.21603/2074-9414-2021-1-86-97.
18. Харламов В.А., Полякова И.В., Губина О.А., Васильева Н.А., Горбатов С.А. Действие нетермальной аргоновой плазмы на культуру Fusarium SPP // Достижения науки и техники АПК. 2025. Т.39. №6. С. 29–34 [Kharlamov V.A., Polyakova I.V., Gubina O.A., Vasil'yeva N.A., Gorbatov S.A. Effect of Non-Thermal Argon Plasma on Fusarium SPP Culture. Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK = Achievements of Science and Technology in Agribusiness. 2025;39;6:29–34 (In Russ.)]. Doi: 10.53859/02352451_2025_39_6_29.
19. Sakudo A., Yagyu Y., Onodera T. Disinfection and Sterilization Using Plasma Technology: Fundamentals and Future Perspectives for Biological Applications. International Journal of Molecular Sciences. 2019;20;20:Art. 5216. Doi: 10.3390/ijms20205216.
20. Terabe Y., Kaneko N., Nakabayashi K., Ando H. Using Plasma to Treat Chronic Foot Ulcer Infections. International Journal of Surgical Wound Care. 2022;33;2:33–36. Doi: 10.36748/ijswc.3.2_33.
21. Фетюков А.И., Шорников В.А., Цицюра А.П., Авдеева Е.А., Петрова Л.А. Лечение трофических язв при различных формах диабетической стопы с использованием холодной плазмы // Скорая медицинская помощь. 2004. Т.5. №3. С. 260–261 [Fetyukov A.I., Shornikov V.A., Tsitsyura A.P., Avdeyeva Ye.A., Petrova L.A. Treatment of Trophic Ulcers in Various Forms of Diabetic Foot Using Cold Plasma. Skoraya Meditsinskaya Pomoshch' = Emergency Medical Care. 2004;5;3:260–261 (In Russ.)].
22. Belov S.V., Gudkov S.V., Danyleiko Y.K., Lukanin V.I., Egorov A.B., Altukhov E.L., Petrova M.V., Yakovlev A.A., Osmanov E.G., Shulutko A.M., Kogan E.A., Kyt'ko O.V., Martynov I.A., Seredin V.P. A Device for Activating Repair Processes Using Low-Temperature Plasma Discharges in Patients with Bedsores: Optimization of Parameters and Assessment of Efficacy. Biomedical Engineering. 2022;56;3:151–156. Doi: 10.1007/s10527-022-10203-5.
23. Samsavar S., Mahmoudi H., Khani M.R., Daneshpazhooh M., Shokri B. Treatment of Chronic Venous Ulcer with Cold Atmospheric Plasma Jet. Case Reports in Dermatology. 2022;14;3:344–349. Doi: 10.1159/000527018.
24. Raissi-Dehkordi N., Ebrahimibagha H., Tayebi T., Moeinabadi-Bidgoli K., Hassani M., Niknejad H. Advancing Chronic and Acute Wound Healing with Cold Atmospheric Plasma: Cellular and Molecular Mechanisms, Benefits, Risks, and Future Directions // Frontiers in Medicine. 2025;12:Art.1527736. Doi: 10.3389/fmed.2025.1527736.
25. Сорочану И.П., Блицын К.С., Дауди Д.И., Жемков Н.И., Печенина А.А., Дмитриева М.А., Гринь Н.А., Асатрян Т.Т., Татаркин В.В., Трунин Е.М., Деев Р.В. Применение крема на основе белков шёлка спидроина, фиброина и серицина для репаративной регенерации кожных покровов in Vivo // Морфология. 2024. Т.162. №4. С. 402–414 [Sorochanu I.P., Blitsyn K.S., Daudi D.I., Zhemkov N.I., Pechenina A.A., Dmitriyeva M.A., Grin' N.A., Asatryan T.T., Tatarkin V.V., Trunin Ye.M., Deyev R.V. Use of a Cream Based on Silk Proteins Spidroin, Fibroin and Sericin for Reparative Regeneration of Skin in Vivo. Morfologiya = Morphology. 2024;162;4:402–414 (In Russ.)]. Doi: 10.17816/morph.633205.
26. Демяшкин Г.А., Вадюхин М.А., Марукян А.Х., Саакян С.В., Каракаева Э.Б.Г., Корякин С.Н., Шаповалова Е.Ю., Канторович А.А., Андриевских А.С. Морфометрические показатели пролиферации и апоптоза кератиноцитов после введения аскорбиновой кислоты при радиационно-индуцированном повреждении кожи // Морфология. 2025. Т.163. №3. С. 200–209 [Demyashkin G.A., Vadyukhin M.A., Marukyan A.Kh., Saakyan S.V., Karakayeva E.B.G., Koryakin S.N., Shapovalova Ye.Yu., Kantorovich A.A., Andriyevskikh A.S. Morphometric Indices of Keratinocyte Proliferation and Apoptosis after Ascorbic Acid Administration in Radiation-Induced Skin Damage. Morfologiya = Morphology. 2025;163;3:200-209 (In Russ.)]. Doi: 10.17816/morph.646329.
27. Парамонов Б.А., Чмырёв И.В., Чуприна А.П., Пожарская Е.М. Профилактика и лечение рубцов кожи после ожогов (основные алгоритмы) // Военно-медицинский журнал. 2024. Т.345. №12. С. 63–66 [Paramonov B.A., Chmyrov I.V., Chuprina A.P., Pozharskaya Ye.M. Prevention and Treatment of Skin Scars after Burns (Basic Algorithms). Voyenno-Meditsinskiy Zhurnal = Russian Military Medical Journal. 2024;345;12:63–66 (In Russ.)]. Doi: 10.52424/00269050_2024_345_12_63.
28. Mamun A.A., Shao C., Geng P., Wang S., Xiao J. Recent Advances in Molecular Mechanisms of Skin Wound Healing and Its Treatments. Frontiers in Immunology. 2024;15:Art.1395479. Doi: 10.3389/fimmu.2024.1395479.
29. Умников А.С., Глазко И.И., Балакин Е.И., Самойлов А.С., Пустовойт В.И. Современные подходы в профилактике и лечении послеожоговых рубцов (систематический обзор) // Вестник трансплантологии и искусственных органов. 2025. Т.27. №2. С. 148–162 [Umnikov A.S., Glazko I.I., Balakin Ye.I., Samoylov A.S., Pustovoyt V.I. Modern Approaches to the Prevention and Treatment of Post-Burn Scars (Systematic Review). Vestnik Transplantologii i Iskusstvennykh Organov = Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs.2025;27;2:148-162 (In Russ.)]. Doi: 10.15825/1995-1191-2025-2-148-162.
30. Суров Д.А., Сизоненко Н.А., Дымников Д.А., Цурупа П.С., Левченко Я.И., Воронина Л.А., Шостка К.Г. Применение низкотемпературной аргоновой плазмы в лечении гнойных ран // Вестник национального медико-хирургического центра им. Н.И.Пирогова. 2024. Т.19. №3. С. 84–90 [Surov D.A., Sizonenko N.A., Dymnikov D.A., Tsurupa P.S., Levchenko Ya.I., Voronina L.A., Shostka K.G. Use of Low-Temperature Argon Plasma in the Treatment of Purulent Wounds. Vestnik Natsional'nogo Mediko-Khirurgicheskogo Tsentra im. N.I.Pirogova = Bulletin of Pirogov National Medical & Surgical Center. 2024;19;3:84-90 (In Russ.)]. Doi: 10.25881/20728255_2024_19_3_84.
31. Zhang N., Yang G., Wu Y., Hu L., Zhao C., Liu H.H., Wu L., Pan J., Liu X. Controlled Release of Cold Atmospheric Plasma by Gelatin Scaffold Enhances Wound Healing Via Macrophage Modulation. ACS Applied Materials & Interfaces. 2025;17;10:15050–15066. Doi: 10.1021/acsami.4c21635.
32. Roux S., Marches A., Galiacy S., Merbahi N., Simon M. Biological Solutions Activated by Cold Plasma at Atmospheric Pressure: a New Therapeutic Approach for Skin Wound Healing. Biomedicine & Pharmacotherapy. 2025;186:Art.118001. Doi: 10.1016/j.biopha.2025.118001.
33. Ma L., Chen Y., Gong Q., Cheng Z., Ran C., Liu K., Shi C. Cold Atmospheric Plasma Alleviates Radiation-Induced Skin Injury by Suppressing Inflammation and Promoting Repair. Free Radical Biology & Medicine. 2023;204:184–194. Doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2023.05.002.
34. Зиновьев Е.В., Асадулаев М.С., Комиссаров И.А., Шемет М.В., Юдин В.Е., Шабунин А.С., Смирнова Н.В., Крюков А.Е., Лукьянов С.А., Стояновский Р.Г., Шалоня Т.А., Арцимович И.В., Костяков Д.В. Возможность применения низкотемпературной атмосферной плазмы и биополимерных раневых покрытий для лечения ожогов кожи III степени (экспериментальное исследование) // Педиатр. 2017. Т.8. №3. С. 23–31 [Zinov'yev Ye.V., Asadulayev M.S., Komissarov I.A., Shemet M.V., Yudin V.Ye., Shabunin A.S., Smirnova N.V., Kryukov A.Ye., Luk'yanov S.A., Stoyanovskiy R.G., Shalonya T.A., Artsimovich I.V., Kostyakov D.V. Possibility of Using Low-Temperature Atmospheric Plasma and Biopolymer Wound Dressings for the Treatment of Third-Degree Skin Burns (Experimental Study). Pediatr = Pediatrician (St. Petersburg). 2017;8;3:23-31 (In Russ.)]. Doi: 10.17816/PED8323-31.
35. Betancourt-Angeles M., Pena-Eguiluz R., Lopez-Callejas R., Dominguez-Cadena N.A., Mercado-Cabrera A., Munoz-Infante J., Rodriguez-Mendez B.G., Valencia-Alvarado R., Moreno-Tapia J.A. Treatment in the Healing of Burns with a Cold Plasma Source. International Journal of Burns and Trauma. 2017;7;7:142–146.

36. Короткий В.Н. Низкотемпературная атмосферная плазма в дерматологии // Клиническая дерматология и венерология. 2017. Т.16. №5. С. 4–11 [Korotkiy V.N. Low-Temperature Atmospheric Plasma in Dermatology. Klinicheskaya Dermatologiya i Venerologiya = Russian Journal of Clinical Dermatology and Venereology. 2017;16;5:4-11(In Russ.)]. Doi: 10.17116/klinderma20171654-10.
37. Isbary G., Morfill G., Schmidt H.U., Georgi M., Ramrath K., Heinlin J., Karrer S., Landthaler M., Shimizu T., Steffes B., Bunk W., Monetti R., Zimmermann J.L., Pompl R., Stolz W. A First Prospective Randomized Controlled Trial to Decrease Bacterial Load Using Cold Atmospheric Argon Plasma on Chronic Wounds in Patients. The British Journal of Dermatology. 2010;163;1:78–82. Doi: 10.1111/j.1365-2133.2010.09744.x.
38. Шиловский Г.А., Сорокина Е.В., Орловский И.В. Транскрипционный фактор NRF2 – мишень активирующих антиоксидантную систему клетки препаратов: перспективы применения при возрастных заболеваниях // Клиническая геронтология. 2021. Т.27. №11-12. С. 57–62 [Shilovskiy G.A., Sorokina Ye.V., Orlovskiy I.V. Transcription Factor NRF2 – a Target of Drugs Activating the Cellular Antioxidant System: Prospects for Use in Age-Related Diseases. Klinicheskaya Gerontologiya = Clinical Gerontology. 2021;27;11-12:57–62 (In Russ.)]. Doi: 10.26347/1607-2499202111-12057-062.
39. Zou X., Peng L., Luo M., Qu Z., Hu G., Liu X., Yan Z., Pokharel S., Xia Y., Jia F. Cold Atmospheric Plasma Enhances Fn14 Signaling in Hair Follicle Stem Cells, Thereby Promoting the Healing of Diabetic Skin Wounds in a Mouse Model. Journal of Immunology Research. 2026;2026;1:Art. e9082774. Doi: 10.1155/jimr/9082774.
40. Маркевич П.С., Филиппов А.В., Долгих Р.Н., Боровкова Н.В., Макаров М.С., Сторожева М.В., Пономарев И.Н., Зеленина Т.А., Земляной А.Б. Влияние низкотемпературной аргоновой плазмы на жизнеспособность и пролиферацию фибробластов in Vitro // Вестник национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова. 2024. Т.19. №4. С. 51–57 [Markevich P.S., Filippov A.V., Dolgikh R.N., Borovkova N.V., Makarov M.S., Storozheva M.V., Ponomarev I.N., Zelenina T.A., Zemlyanoy A.B. Effect of Low-Temperature Argon Plasma on the Viability and Proliferation of Fibroblasts in Vitro. Vestnik Natsional'nogo Mediko-Khirurgicheskogo Tsentra im. N.I. Pirogova = Bulletin of Pirogov National Medical & Surgical Center. 2024;19;4:51-57 (In Russ.)]. Doi: 10.25881/20728255_2024_19_4_51.
41. Busco G., Robert E., Chettouh-Hammas N., Pouvesle J.M., Grillon C. The Emerging Potential of Cold Atmospheric Plasma in Skin Biology. Free Radical Biology & Medicine. 2020;161:290–304. Doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2020.10.004.
42. Okazaki Y., Ishidzu Y., Ito F., Tanaka H., Hori M., Toyokuni S. L-Dehydroascorbate Efficiently Degrades Non-Thermal Plasma-Induced Hydrogen Peroxide. Archives of Biochemistry and Biophysics. 2021;700:Art.108762. Doi: 10.1016/j.abb.2021.108762.
43. Okazaki Y., Ito N., Tanaka H., Hori M., Toyokuni S. Non-Thermal Plasma Elicits Ferrous Chloride-Catalyzed DMPO-OH. Free Radical Research. 2022;56;9-10:595–606. Doi: 10.1080/10715762.2022.2157272.
44. Yang H., Chen M.M., Zhang H.T., Zhou F.S., Zhang L., Sun F., Wang X. Examining Homogeneity of Dielectric Barrier Discharge Using Dispersion Normalization and Local Temperature Difference Methods. Frontiers in Physics. 2023;11:Art.1189371. Doi: 10.3389/fphy.2023.1189371.
45. Shang H., Ning W., Shen S., Wang R., Dai D., Jia S. Atmospheric Pressure Plasma Jet for Surface Treatment: a Review. Reviews of Modern Plasma Physics. 2024;9;1:Art.3. Doi: 10.1007/s41614-024-00177-0.
46. Boeckmann L., Ficht P.K., Bernhardt T., Borchardt T., Ossowska A., Milz W., Helmke A., Bekeschus S., Emmert S. Challenges in the Standardization of in Vitro Cytotoxicity Assays for Comparative Risk Assessment of Cold Atmospheric Pressure Plasma Devices. Scientific Reports. 2026;16;1:Art.10503. Doi: 10.1038/s41598-026-45037-8.
47. Gao M., Guo H., Dong X., Wang Z., Yang Z., Shang Q., Wang Q. Regulation of Inflammation during Wound Healing: the Function of Mesenchymal Stem Cells and Strategies for Therapeutic Enhancement. Frontiers in Pharmacology. 2024;15:Art.1345779. Doi: 10.3389/fphar.2024.1345779.
48. Smith P.C., Martinez C., Martinez J., McCulloch C.A. Role of Fibroblast Populations in Periodontal Wound Healing and Tissue Remodeling. Frontiers in Physiology. 2019;10:Art. 270. Doi: 10.3389/fphys.2019.00270.
49. Bhartiya P., Masur K., Shome D., Kaushik N., Nguyen L.N., Kaushik N.K., Choi E.H. Influence of Redox Stress on Crosstalk between Fibroblasts and Keratinocytes. Biology. 2021;10;12:Art.1338. Doi: 10.3390/biology10121338.
50. Jung J.M., Yoon H.K., Jung C.J., Jo S.Y., Hwang S.G., Lee H.J., Lee W.J., Chang S.E., Won C.H. Cold Plasma Treatment Promotes Full-Thickness Healing of Skin Wounds in Murine Models. The International Journal of Lower Extremity Wounds. 2023;22;1:77–84. Doi: 10.1177/15347346211002144.
51. Frescaline N., Duchesne C., Favier M., Onifarasoaniaina R., Guilbert T., Uzan G., Banzet S., Rousseau A., Lataillade J.J. Physical Plasma Therapy Accelerates Wound Re-Epithelialisation and Enhances Extracellular Matrix Formation in Cutaneous Skin Grafts. The Journal of Pathology. 2020;252;4:451–464. Doi: 10.1002/path.5546.
52. Wang X.X., Liu Z.J., Zhao L.P., Yang H.J., Qin J.M., Zhang J.Q., Zhao J.X., Guan X.W., Zhang W.F., Ma J.L. Synergetic Burns Treatment by Self-Adaption Release System Combined with Cold Atmospheric Plasma. Science China Technological Sciences. 2023;66;10:2808–2823. Doi: 10.1007/s11431-022-2258-x.
53. Пиголкин Ю.И., Квачева Ю.Е. Современные возможности судебно-медицинской экспертизы местной радиационной травмы // Судебно-медицинская экспертиза. 2012. №3. С. 52–55 [Pigolkin Yu.I., Kvacheva Yu.Ye. Modern Possibilities of Forensic Medical Examination of Local Radiation Trauma. Sudebno-Meditsinskaya Ekspertiza = Forensic Medical Expertise. 2012;3:52-55 (In Russ.)].
54. Dejonckheere C.S., Layer J.P., Nour Y., Layer K., Glasmacher A., Wiegreffe S., Fuhrmann A., Caglayan L., Grau F., Sarria G.R., Scafa D., Koch D., Heimann M., Leitzen C., Koksal M.A., Rohner F., Mudder T., Dejonckheere E., Schmeel F.C., Anzbock T., Lindner K., Bachmann A., Abramian A., Kaiser C., Faridi A., Mustea A., Giordano F.A., Stope M.B., Schmeel L.C. Non-Invasive Physical Plasma for Preventing Radiation Dermatitis in Breast Cancer: Results from an Intrapatient-Randomised Double-Blind Placebo-Controlled Trial. Clinical and Translational Radiation Oncology. 2024;44:Art.100699. Doi: 10.1016/j.ctro.2023.100699.
55. Dejonckheere C.S., Torres-Crigna A., Layer J.P., Layer K., Wiegreffe S., Sarria G.R., Scafa D., Koch D., Leitzen C., Koksal M.A., Mudder T., Abramian A., Kaiser C., Faridi A., Stope M.B., Mustea A., Giordano F.A., Schmeel L.C. Non-Invasive Physical Plasma for Preventing Radiation Dermatitis in Breast Cancer: a First-in-Human Feasibility Study. Pharmaceutics. 2022;14;9:Art.1767. Doi: 10.3390/pharmaceutics14091767.
56. Bakker O., Smits P., van Weersch C., Quaaden M., Bruls E., van Loon A., van der Kleij J. Improved Wound Healing by Direct Cold Atmospheric Plasma Once or Twice a Week: a Randomized Controlled Trial on Chronic Venous Leg Ulcers. Advances in Wound Care. 2025;14;1:1–13. Doi: 10.1089/wound.2023.0196.
57. Stratmann B., Costea T.C., Nolte C., Hiller J., Schmidt J., Reindel J., Masur K., Motz W., Timm J., Kerner W., Tschoepe D. Effect of Cold Atmospheric Plasma Therapy vs Standard Therapy Placebo on Wound Healing in Patients with Diabetic Foot Ulcers: a Randomized Clinical Trial. JAMA Network Open. 2020;3;7:Art.e2010411. Doi: 10.1001/jamanetworkopen.2020.10411.
58. Nakayama B., Tapia Garcia L., Serena T. Efficacy of Cold Atmospheric Plasma in Chronic Diabetic Foot Ulcer Management: a Case Report. The American Journal of Case Reports. 2024;25:Art.e945462. Doi: 10.12659/AJCR.945462.
59. Faraji N., Goli R., Parizad N., Ghoushchi R.A., Hassanpour A., Mohammadpour Y. Treating an Unresponsive Diabetic foot Ulcer with Cold Atmospheric Plasma, Maggot Therapy and Alginate Dressing: a Case Report. Journal of Wound Care. 2023;32;Sup8b: lxxv-lxxix. Doi: 10.12968/jowc.2023.0238.
60. Belov S.V., Danyleiko Y.K., Egorov A.B., Lukanin V.I., Tsvetkov V.B., Osmanov E.G., Shulutko A.M., Altukhov E.L., Yakovlev A.A. Activation of Repair Processes in Patients with Bedsores Using Pulsed Radio-Frequency Currents. Biomedical Engineering. 2021;55;3:169–174. Doi: 10.1007/s10527-021-10095-x.
61. Emmert S., Pantermehl S., Foth A., Waletzko-Hellwig J., Hellwig G., Bader R., Illner S., Grabow N., Bekeschus S., Weltmann K.D., Jung O., Boeckmann L. Combining Biocompatible and Biodegradable Scaffolds and Cold Atmospheric Plasma for Chronic Wound Regeneration. International Journal of Molecular Sciences. 2021;22;17:Art. 9199. Doi: 10.3390/ijms22179199.
62. Izadjoo M., Zack S., Kim H., Skiba J. Medical Applications of Cold Atmospheric Plasma: State of the Science. Journal of Wound Care. 2018;27;Sup9:S4-S10. Doi: 10.12968/jowc.2018.27.Sup9.S4.
63. Tan F., Wang Y., Zhang S., Shui R., Chen J. Plasma Dermatology: Skin Therapy Using Cold Atmospheric Plasma. Frontiers in Oncology. 2022;12:Art.918484. Doi: 10.3389/fonc.2022.918484.
64. Kammona O., Tsanaktsidou E., Kiparissides C. Recent Developments in 3D-(Bio)printed Hydrogels as Wound Dressings. Gels. 2024;10;2:Art.147. Doi: 10.3390/gels10020147.
65. Кудряшова И.С., Марков П.А., Костромина Е.Ю., Еремин П.С., Рачин А.П., Гильмутдинова И.Р. Разработка раневых покрытий для регенеративной медицины // Вестник восстановительной медицины. 2021. Т.20. №6. С. 84–95 [Kudryashova I.S., Markov P.A., Kostromina Ye.Yu., Yeremin P.S., Rachin A.P., Gil'mutdinova I.R. Development of Wound Dressings for Regenerative Medicine. Vestnik Vosstanovitel'noy Meditsiny = Bulletin of Rehabilitation Medicine. 2021;20;6:84-95 (In Russ.)]. Doi: 10.38025/2078-1962-2021-20-6-84-95.
66. Атепилева А.М., Сагинова Д.А., Римашевский Д.В., Балгазаров С.С., Рамазанов Ж.К., Каукабаева Г.К., Ахметкаримова Ж.С. Раневые покрытия на основе биополимеров, используемые для заживления ран // Наука и здравоохранение. 2024. Т.26. №2. С. 121–134 [Atepileva A.M., Saginova D.A., Rimashevskiy D.V., Balgazarov S.S., Ramazanov Zh.K., Kaukabayeva G.K., Akhmetkarimova Zh.S. Biopolymer-Based Wound Dressings Used for Wound Healing. Nauka i Zdravookhraneniye = Science & Healthcare. 2024;26;2:121-134 (In Russ.)]. Doi: 10.34689/SH.2024.26.2.016.

67. Soulat A., Mohsenpour T., Roshangar L., Moaddab S.Y., Soulat F. Innovative Therapeutic Approach Targeting Colon Cancer Stem Cells: Transitional Cold Atmospheric Plasma. ACS Omega. 2025;10;12:12109–12121. Doi: 10.1021/acsomega.4c10378.
68. Chakraborty R., Gohain R.B., Talukdar P., Changkakoti L., Biswas S., Mukherjee A.K., Bala A. Pre-clinical Safety Study of Cold Atmospheric Plasma (CAP) Produced by an Inbuilt CAP Device and ROS Mediated Apoptotic Activity in Human Skin Melanoma Cells. Current Pharmaceutical Design. 2026;32;4:306–319. Doi: 10.2174/0113816128335012250122221541.
69. Tahmasebi G., Eslami E., Naserzadeh P., Seydi E., Pourahmad J. Role of Mitochondria and Lysosomes in the Selective Cytotoxicity of Cold Atmospheric Plasma on Retinoblastoma Cells. Iranian Journal of Pharmaceutical Research: IJPR. 2020;19;4:203–215. Doi: 10.22037/ijpr.2020.114165.14703.
70. Wolff C.M., Kolb J.F., Weltmann K.D., von Woedtke T., Bekeschus S. Combination Treatment with Cold Physical Plasma and Pulsed Electric Fields Augments ROS Production and Cytotoxicity in Lymphoma. Cancers. 2020;12;4:Art. 845. Doi: 10.3390/cancers12040845.
71. Estarabadi H., Atyabi S.A., Tavakkoli S., Noormohammadi Z., Gholami M.R., Ghiaseddin A., Irani S. Cold Atmospheric Plasma Induced Genotoxicity and Cytotoxicity in Esophageal Cancer Cells. Molecular Biology Reports. 2021;48;2:1323–1333. Doi: 10.1007/s11033-021-06178-3.
72. He Z., Charleton C., Devine R.W., Kelada M., Walsh J.M.D., Conway G.E., Gunes S., Mondala J.R.M., Tian F., Tiwari B., Kinsella G.K., Malone R., O'Shea D., Devereux M., Wang W., Cullen P.J., Stephens J.C., Curtin J.F. Enhanced Pyrazolopyrimidinones Cytotoxicity Against Glioblastoma Cells Activated by ROS-Generating Cold Atmospheric Plasma. European Journal of Medicinal Chemistry. 2021;224:Art.113736. Doi: 10.1016/j.ejmech.2021.113736.
73. Miron C., Ishikawa K., Kashiwagura S., Suda Y., Tanaka H., Nakamura K., Kajiyama H., Toyokuni S., Mizuno M., Hori M. Cancer-Specific Cytotoxicity of Ringer's Acetate Solution Irradiated by Cold Atmospheric Pressure Plasma. Free Radical Research. 2023;57;2:91–104. Doi: 10.1080/10715762.2023.2201390.
74. Kitajima N., Makihara K., Kurita H. On the Synergistic Effects of Cold Atmospheric Pressure Plasma Irradiation and Electroporation on Cytotoxicity of HeLa Cells. International Journal of Molecular Sciences. 2025;26;3:Art.1093. Doi: 10.3390/ijms26031093.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 03.09.2026. Принята к публикации: 06.10.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received:03.09.2026. Accepted for publication: 06.10.2026.