



Оценка репаративного потенциала фотодинамической терапии при заживлении постлучевых ран на биологической модели

А. С. Яковенко¹, С. Л. Ачинович¹, Л. П. Зайцева¹, З. А. Дундаров²

¹Гомельский областной клинический онкологический диспансер, г. Гомель, Беларусь

²Гомельский государственный медицинский университет, г. Гомель, Беларусь

Резюме

Цель исследования. В условиях эксперимента с использованием биологической модели изучить репаративный эффект фотодинамической терапии (ФДТ) при лечении постлучевых язв.

Материалы и методы. В условиях эксперимента на модели крыс сформированы постлучевые язвы при помощи локального облучения бустом в дозе 40 Гр. После применения ФДТ в отношении постлучевых язв исследован темп их эпителизации, клинические и морфологические паттерны течения раневого процесса. При оценке эффективности применены следующие критерии: клиническая оценка краев и дна ран, раневого отделяемого, характер и объем грануляций, фибрина; гистологические и цитологические паттерны эпителизации (количество лейкоцитов, нейтрофилов, фибробластов в ране, наличие сосудов, реактивные изменения клеток).

Результаты. Исследованы клинические, гистологические, цитологические аспекты влияния метода на заживление постлучевых язв. После фотооблучения в группах исследования отмечается ускорение дебридмента ран, уменьшение площади ран, объема экссудата, раннее появление грануляций. Эффект расценивается как дозозависимый: в группе двукратного фотооблучения он выражен сильнее, чем в группе однократного фотооблучения.

Заключение. Выполненное исследование позволило систематизировать имеющиеся данные, доказало, что ФДТ эффективна в отношении постлучевых язв с целью их полной эпителизации или ускоренной подготовки к пластическому замещению.

Ключевые слова: *постлучевая язва, раневой процесс, фотодинамическая терапия, дебридмент ран*

Вклад авторов. Яковенко А.С.: концепция и дизайн исследования, поиск и обзор литературы, экспериментальное исследование, обработка и обсуждение полученных данных, редактирование; Ачинович С.Л., Зайцева Л.П.: экспериментальное исследование, обработка и обсуждение полученных данных, редактирование; Дундаров З.А.: концепция и дизайн исследования, обзор литературы, обработка и обсуждение полученных данных, проверка критически важного содержания, редактирование, утверждение рукописи для публикации.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источники финансирования. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Для цитирования: Яковенко АС, Ачинович СЛ, Зайцева ЛП, Дундаров ЗА. Оценка репаративного потенциала фотодинамической терапии при заживлении постлучевых ран на биологической модели. Проблемы здоровья и экологии. 2026;23(3):67–77. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2026-23-3-08>

Assessment of the reparative potential of photodynamic therapy in the healing of post-radiation wounds in a biological model

Alexey S. Yakovenko¹, Sergej L. Achinovich¹, Larisa P. Zaitseva¹,
Zalimhan A. Dundarov²

¹Gomel Regional Clinical Oncology Centre, Gomel, Belarus

²Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

Abstract

Objective. To study the reparative effect of photodynamic therapy (PDT) in the treatment of radiation-induced ulcers under experimental conditions using a biological model.

Materials and methods. Post-radiation ulcers were induced using local irradiation with a boost dose of 40 Gy were formed in an experimental model on rats. After PDT was applied to the post-radiation ulcers, the rate of their epithelialization, as well as clinical and morphological patterns of the wound healing process, were studied. The following criteria were used to assess effectiveness: clinical evaluation of the wound edges and bed, wound discharge, the nature and volume of granulations, fibrin; histological and cytological patterns of epithelialization (the number of leukocytes, neutrophils, fibroblasts in the wound, presence of vessels, reactive changes in cells).

Results. The clinical, histological, and cytological aspects of the method's effect on the healing of post-radiation ulcers were studied. After phototherapy, the study groups showed accelerated wound debridement, reduced wound area and exudate volume, and earlier appearance of granulation tissue. The effect is considered dose-dependent: it was more pronounced in the group with two phototherapy sessions than in the group with a single phototherapy session.

Conclusion. The conducted study made it possible to systematize the available data, It proved that PDT is effective against post-radiation ulcers with the aim of their complete epithelialization or accelerated preparation for plastic replacement.

Keywords: *post-radiation ulcer, wound process, photodynamic therapy, wound debridement*

Author contributions. Yakovenko A.S.: study concept and design, literature search and review, experimental study, data processing and discussion, editing; Achinovich S.L., Zaitseva L.P.: experimental study, data processing and discussion, editing; Dundarov Z.A.: study concept and design, literature review, data processing and discussion, critical content review, editing, and approval of the manuscript for publication.

Conflict of interest. None.

Funding. The study was conducted without sponsorship.

For citation: Yakovenko AS, Achinovich SL, Zaitseva LP, Dundarov ZA. Assessment of the reparative potential of photodynamic therapy in the healing of post-radiation wounds in a biological model. *Health and Ecology Issues*. 2026;23(3):67–77. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2026-23-3-08>

Введение

Лучевая терапия — эффективный метод лечения злокачественных новообразований, некоторых доброкачественных опухолей. Помимо онкологии метод применяется в ревматологии, дерматологии. Улучшение дозиметрического контроля, использование новых методик облучения и современной аппаратуры, а также адекватная подготовка пациентов привели к снижению частоты развития местных лучевых повреждений [1]. Однако 5–15 % пациентов после окончания лечения имеют различные лучевые осложнения. Одним из наиболее часто встречающихся осложнений является постлучевая язва кожи [2]. Местные лучевые повреждения отличаются торпидностью к лечению различными медикаментозными средствами [3].

Патогенез развития лучевых язв многогранен и включает в себя окислительный стресс, воспаление, повреждение сосудов и фиброз [4] с последующей тканевой ишемией. Апоптоз кератиноцитов возникает из-за окислительного стресса и повреждения ДНК, вызванного ионизирующим излучением. Сосудистая дисфункция вызвана воспалительными цитокинами и повреждением эндотелиальных клеток, что приводит к воспалению и повреждению кожных покровов. При дозах облучения свыше 20 Гр увеличивается проницаемость сосудистой стенки и объемный кровоток, что способствует локальной гиперемии и дезорганизации структуры сосудистой сети, нарушению кровообращения, последующе-

му компенсаторному спазму, облитерации артерий, атрофии гладких мышц в сосудистой стенке и развитию ишемии и лучевого фиброза [5].

Особенностями лучевой язвы являются длительная экссудация и медленное отторжение некротизированной ткани вследствие недостаточной иммунной реактивности [4]. Грануляция ослаблена, вследствие чего окончательные сроки эпителизации могут исчисляться годами. Установлена корреляция между степенью разнообразия микробного представительства, наличием биопленок и длительностью течения лучевого дерматита: период разрешения положительно коррелировал с бактериальным разнообразием на различных таксономических уровнях [5].

Ведущим методом лечения лучевых язв на сегодняшний день считается хирургическое закрытие дефекта. Однако хирургическое вмешательство не гарантирует ожидаемый результат. Пересадка свободного кожного лоскута, пластика локальным лоскутом, микрососудистые закрытия дефектов — все это может сопровождаться рецидивом постлучевой язвы ввиду нарушения трофики и микроциркуляции, тканевой ишемии и фиброза в зоне облучения. Все это говорит о необходимости изучения новых методик лечения постлучевых язв или подготовки их к пластическому замещению.

Фотодинамическая терапия — перспективный, но малоизученный метод лечения хронических ран различной этиологии, в том числе и постлучевых язв. В основе метода лежит фото-

облучение предварительно сенсибилизированной ткани. После введения фотосенсибилизатора происходит его накопление в тканях. При воздействии света длиной волны 665 нм происходит избирательная фотодеструкция фотосенсибилизатора с высвобождением синглетного кислорода и других свободных радикалов. В результате развивается асептический некроз фотооблученной ткани с последующей деструкцией опухолевого очага.

Репаративные эффекты ФДТ в отношении постлучевых язв изучены недостаточно. Согласно имеющимся данным, применение ФДТ на область постлучевой язвы способствует ее заживлению [6].

Цель исследования

В условиях эксперимента с использованием биологической модели изучить репаративный эффект ФДТ при лечении постлучевых язв.

Материалы и методы

Исследование выполнено на 11 взрослых крысах линии Wistar, содержащихся в условиях стационарного вивария Института радиобиологии Национальной академии наук Беларуси при температуре $22,0 \pm 1,0$ °C, 12/12 час. цикле: день/ночь, без ограничений по воде и пище. Все операции с животными в эксперименте строго соответствовали международным нормам Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях. Эксперимент одобрен этическим комитетом Гомельского государственного медицинского университета (протокол № 4 от 19.09.2025).

Перед экспериментом все животные были распределены на 3 группы методом блочной рандомизации:

1. ЛЯ-ОС-1 (лучевая язва, основная группа — 1) — 4 особи. После формирования лучевой язвы в отношении животных данной группы применяется один сеанс ФДТ.

2. ЛЯ-ОС-2 (лучевая язва, основная группа — 2) — 4 особи. После формирования лучевой язвы в отношении животных данной группы применяется 2 сеанса ФДТ с интервалом 5 дней.

3. ЛЯ-к (лучевая язва, контрольная группа) — 3 особи. После формирования лучевой язвы в отношении животных данной группы метод ФДТ не применяется.

Для моделирования лучевой язвы заднюю левую конечность крыс эпилировали (освобождали от шерсти) и подвергали локальному однократному облучению бустом участок площадью 3х3 см в дозе 40 Гр с помощью рентгеновской установки биологического назначения X-Rad 320 Precision X-ray Inc. Облучение выполнялась на следующих параметрах: напряжение на трубке — 320 кВ, сила тока — 12,5 мА, мощность дозы — 498,8 сГр/мин, фильтр № 2 (1,5 мм Al, 0,25 мм Cu, 0,75 мм Sn), расстояние до объекта — 40 см. Локальное облучение задней конечности животного достигалось экранированием окружающих тканей при помощи защитной свинцовой пластины толщиной 1,2 см. После перерыва (5 суток) для реализации лучевого эффекта в зоне облучения сформирован дефект тканей площадью 25х25 мм. В блок удаляемых тканей включалась кожа, подкожная жировая клетчатка (ПЖК), поверхностная фасция. Спустя 3 недели в зоне облучения была сформирована лучевая язва без явной тенденции к заживлению. На 26-е сутки выполнялся забор тканей на гистологическое и цитологическое исследование. Процедура ФДТ выполнялась на 26-е сутки расфокусированным лучом на устройстве «УПЛ ФДТ» при следующих параметрах:

- длина волны — 665 нм;
- выходная мощность — 0,5 Вт;
- экспозиция — 1 мин;
- плотность мощности — 0,5 Вт/см²;
- энергия — 50 Дж;
- расстояние от поверхности раны — 10 ± 2 мм;
- диаметр пятна облучения — 10 ± 2 мм.

На 5-е сутки после 1-го сеанса ФДТ в группе ЛЯ-ОС-2 сеанс выполнялся повторно на прежних параметрах с предварительным забором биоматериала. Перевязки животным выполнялись через день стандартным способом с применением антисептиков. По мере необходимости удалялся струп, рана намеренно оставлялась открытой. Через 2 недели (на 40-е сутки) животные выводились из эксперимента. Образцы клеток и тканей забирались на морфологическое исследование. На протяжении эксперимента через день выполнялась клиническая оценка раны по унифицированной системе оценки хронических ран MEASURE [7]. Параметры клинической оценки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры клинической оценки хронических ран по системе MEASURE

Table 1. Parameters of the clinical assessment of chronic wounds according to the MEASURE system

Параметр	Наблюдение
M (measure) — размер раны	Длина, ширина, площадь
E (exudate) — экссудат	Качество, объем
A (appearance) — внешний вид раны	Описание внешнего вида раны, тканей
S (suffering) — боль	Оценка болевого синдрома
U (undermining) — деструкция	Наличие затеков, карманов, полостей
R (reevaluate) — наблюдение	Регулярный клинический контроль параметров
E (edge) — края раны	Описание краев раны

Цитологические препараты готовили методом равномерного распределения биоматериала на предметных стеклах с последующей воздушной фиксацией. Окрашивание выполняли комбинированным методом: May-Grünwald (эозин-метиленовый синий) с докраской по Романовскому (азур-эозин). Морфологический анализ проводили на микроскопе Leica DM 1000: первичная оценка (изучение паттернов) — при увеличении $\times 10$, верификация цитоморфологических изменений — иммерсионной микроскопией ($\times 100$).

Исходный материал подвергали стандартной гистологической обработке. Для фиксации использовали 10%-ный нейтральный забуференный формалин, последовательно обрабатывали серией спиртов с возрастающей концентрацией, дегидратировали в о-ксилоле и заливали в парафин. Гистологические срезы толщиной 4 мкм окрашивали гематоксилином и эозином. Окрашенные препараты исследовали и фотографировали с помощью цифровой камеры Olympus SC20 (разрешение 1596×1196 пикселей) в 5 полях зрения. Использовались объективы $\times 10$, $\times 40$ микроскопа Olympus CX41 RF. Для определения количества лимфоцитов и нейтрофильных гранулоцитов (нейтрофилов) подсчитывали их количество в поле зрения микроскопа на большом увеличении, а также определяли процентное соотношение распадающихся дегранулированных нейтрофилов по отношению к интактным нейтрофилам (объектив $\times 40$; окуляр $\times 10$), при этом диаметр поля зрения составил 0,53 мм, площадь поля зрения — $0,22 \text{ мм}^2$, минимальное количество полей зрения — 5.

Обработка и анализ данных выполнялись с использованием программного обеспечения R (V.4.5.0), с применением библиотеки tidyverse (V.2.0.0), пакетов ggstatsplot (V.0.12.1), rstatix (V.0.7.2), ggplot2 (V.4.0.0), PMCMRplus (V.1.9.12). Данные представлены медианой,

25-м и 75-м квартилями. При сравнении групп применялся метод Краскела — Уоллиса с последующим апостериорным тестом Данна. Анализ связи категориальных признаков выполнялся при помощи теста χ^2 -квадрат Пирсона.

Результаты и обсуждение

В группах сравнения до проведения ФДТ отмечается уплотнение краев ран, экссудат обильный, преимущественно гнойный, у части животных — слизистый.

Целью проведения статистического анализа были критическая оценка и интеграция данных, полученных во всех экспериментальных группах, а также выявление статистических параметров данных планиметрии в зависимости от использования метода ФДТ.

Для выявления статистических различий в заживлении постлучевых ран без и с использованием ФДТ проводили оценку показателей площади ран, полученных при проведении планиметрического исследования ран.

На 1-е сутки эксперимента (26-е сутки после проведения облучения) была оценена площадь ран во всех группах наблюдения, она была сопоставима во всех группах и равна $552 (529; 563.5) \text{ мм}^2$ в группе контроля, $563.5 (551.5; 581.25) \text{ мм}^2$ — в группе ЛЯ-ОС-1 и $551.5 (522; 575.25) \text{ мм}^2$ в группе ЛЯ-ОС-2 ($p = 0,68$).

Далее, в группах ЛЯ-ОС-1 и ЛЯ-ОС-2 был проведен курс ФДТ.

На 5-е сутки эксперимента была отмечена статистически значимая разница в размере экспериментальных лучевых ран: в контрольной группе средний размер раны составил $552 (529; 563.5) \text{ мм}^2$; в группе ЛЯ-ОС-1, где был проведен 1 курс ФДТ, — $232 (220.5; 243.75) \text{ мм}^2$; в группе ЛЯ-ОС-2 также после 1-го курса ФДТ — $209.5 (191.75; 224.25) \text{ мм}^2$ ($p = 0,03$).

Далее в группе ЛЯ-ОС-2 был проведен 2-й сеанс ФДТ.

На 14-е сутки эксперимента проводили повторное измерение площади раны. Результаты выполненных исследований также выявили наличие статистически значимых различий в площади раны у крыс, не получавших лечения, и у крыс, лечение которых проводили с применением ФДТ: в контрольной группе средний размер раны составил 210 (201; 210) мм², во второй экспериментальной группе ЛЯ-ОС-1 — 126 (117.5; 132) мм²; в третьей ЛЯ-ОС-2 — 33.5 (31; 37.5) мм² ($p = 0,01$).

Учитывая вышеизложенные результаты планметрических измерений, можно сделать вывод, что применение ФДТ в экспериментальных группах ЛЯ-ОС-1 и ЛЯ-ОС-2 оказывает выраженный клинический эффект на уменьшение площади раневой поверхности. Динамика основных параметров оценки ран по системе MEASURE представлена в таблице 2.

Таблица 2. Динамика основных параметров оценки ран по системе MEASURE
Table 2. Dynamics of the main parameters of wound assessment using the MEASURE system

Признак		26-е сутки (лучевая язва сформирована)			31-е сутки (после 1 сеанса фотооблучения в группах ЛЯ-ОС-1, ЛЯ-ОС-2)			40-е сутки (выведение из эксперимента, 2 сеанса фотооблучения в группе ОС-2)		
		ЛЯ-к (n = 3)	ЛЯ-ОС-1 (n = 4)	ЛЯ-ОС-2 (n = 4)	ЛЯ-к (n = 3)	ЛЯ-ОС-1 (n = 4)	ЛЯ-ОС-2 (n = 4)	ЛЯ-к (n = 3)	ЛЯ-ОС-1 (n = 4)	ЛЯ-ОС-2 (n = 4)
Характер грануляций	Мелкозернистые	—	—	—	0 (0)	4 (100)	4 (100)	3 (100)	0 (0)	0 (0)
	Крупнозернистые	—	—	—	—	—	—	0 (0)	4 (100)	4 (100)
	Отсутствуют	3 (100)	4 (100)	4 (100)	3 (100)	0 (0)	0 (0)	—	—	—
p		p = 0.913-			p = 0,004*			p = 0,004*		
Площадь грануляций	Менее 50 % раны	—	—	—	0 (0)	3 (75.)	3 (75)	1 (33.33)	0 (0)	0 (0)
	50–95 % раны	—	—	—	0 (0)	1 (25)	1 (25)	1 (33.33)	3 (75)	1 (25)
	Более 95 % раны	—	—	—	—	—	—	0 (0)	1 (25)	3 (75)
	Отсутствуют	3 (100)	4 (100)	4 (100)	3 (100)	0 (0)	0 (0)	1 (33.33)	0 (0)	0 (0)
p		p = 0.913			p = 0,027*			p = 0,15		
Реактивные изменения фибробластов	Имеются	1 (33.33)	2 (50)	2 (50)	1 (33.33)	4 (100)	4 (100)	1 (33.33)	4 (100)	4 (100)
	Отсутствуют	2 (66.6)	2 (50)	2 (50)	2 (66.67)	0 (0)	0 (0)	2 (66.6)	0 (0)	0 (0)
p		p = 0.885			p = 0,038*			p = 0,038*		

Продолжение таблицы 2

End of Table 2

Признак		26-е сутки (лучевая язва сформирована)			31-е сутки (после 1 сеанса фотооблучения в группах ЛЯ-ОС - 1, ЛЯ-ОС-2)			40-е сутки (выведение из эксперимента, 2 сеанса фотооблучения в группе ОС-2)		
		ЛЯ-к (n = 3)	ЛЯ-ОС-1 (n = 4)	ЛЯ-ОС-2 (n = 4)	ЛЯ-к (n = 3)	ЛЯ-ОС-1 (n = 4)	ЛЯ-ОС-2 (n = 4)	ЛЯ-к (n = 3)	ЛЯ-ОС-1 (n = 4)	ЛЯ-ОС-2 (n = 4)
Тканевой детрит	Дерма	—	—	—	—	—	—	0 (0)	2 (50)	4 (100)
	ПЖК	0 (0)	0 (0)	1 (25)	0 (0)	3 (75)	3 (75)	0 (0)	2 (50)	0 (0)
	Поверхностная фасция	3 (100)	3 (75)	3 (75)	0 (0)	1 (25)	1 (25)	3 (100)	0 (0)	0 (0)
	Собственная фасция	0 (0)	1 (25)	0 (0)	3 (100)	0 (0)	0 (0)	—	—	—
p		p = 0,453			p = 0,027*			p = 0,005*		
Фибробласты	Незначительно	1 (33.3)	2 (50)	2 (50)	1 (33.3)	2 (50)	4 (100)	2 (66.6)	0 (0)	0 (0)
	Умеренно	—	—	—	0 (0)	2 (50)	0 (0)	0 (0)	3 (75)	0 (0)
	Выражено	—	—	—	—	—	—	0 (0)	1 (25)	4 (100)
	Отсутствует	2 (66.6)	2 (50)	2 (50)	2 (66.6)	0 (0)	0 (0)	1 (33.3)	0 (0)	0 (0)
p		p = 0.885			p = 0,037*			p = 0,007*		
Нити фибрина	Скудные	1 (33.3)	1 (25)	2 (50)	0 (0)	3 (75)	2 (50)	0 (0)	1 (25)	1 (25)
	Умеренные	2 (66.6)	3 (75)	2 (50)	3 (100)	1 (25)	2 (50)	3 (100)	0 (0)	0 (0)
	Многочисленные	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Отсутствуют	—	—	—	—	—	—	0 (0)	3 (75)	3 (75)
p		p = 0.757			p = 0,139			p = 0,027*		

Окончание таблицы 2

End of Table 2

Признак		26-е сутки (лучевая язва сформирована)			31-е сутки (после 1 сеанса фотооблучения в группах ЛЯ-ОС-1, ЛЯ-ОС-2)			40-е сутки (выведение из эксперимента, 2 сеанса фотооблучения в группе ОС-2)		
		ЛЯ-к (n = 3)	ЛЯ-ОС-1 (n = 4)	ЛЯ-ОС-2 (n = 4)	ЛЯ-к (n = 3)	ЛЯ-ОС-1 (n = 4)	ЛЯ-ОС-2 (n = 4)	ЛЯ-к (n = 3)	ЛЯ-ОС-1 (n = 4)	ЛЯ-ОС-2 (n = 4)
Площадь фибрина, %	0–20	—	—	—	—	—	—	0 (0)	0 (0)	1 (25)
	21–40	—	—	—	—	—	—	0 (0)	1 (25)	3 (75)
	41–60	0 (0)	0 (0)	1 (25)	0 (0)	1 (25)	1 (25)	1 (33)	3 (75)	0 (0)
	61–80	1 (33.3)	1 (25)	3 (75)	1 (33)	2 (50)	2 (50)	2 (66.6)	0 (0)	0 (0)
	81–100	2 (66.6)	3 (75)	0 (0)	2 (66)	1 (25)	1 (25)	—	—	—
	Отсутствует	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*Статистически значимые различия между сравниваемыми группами $p < 0,05$.

При клинической оценке состояния ран по стандартизированной шкале оценки MEASURE (основные пункты отражены в таблице 2) прослеживается статистически более быстрая смена фаз раневого процесса в группе ЛЯ-ОС-2 в сравнении с группой ЛЯ-к ($p < 0,05$).

Тенденция к заживлению ран прослеживается во всех группах, однако в группе ЛЯ-ОС-2 она выражена сильнее, в то время как в контрольной группе степень эпителизации выражена значительно меньше.

При цитологическом исследовании в контрольной группе отмечалось увеличение объема межучного вещества, а также присутствие клеточных элементов с признаками постлучевого патоморфоза. Характерно повышение количества лейкоцитов и элементов хронического воспаления, умеренное содержание нитей фибрина и слабая выраженность сосудистого компонента. Различия цитологической картины в группах сравнения представлены на рисунках 1, 2.

При микроскопии определяется измененный фон препарата. Он представлен обильным

количеством гомогенного серозного экссудата, визуализируется инфильтрация сегментоядерными лейкоцитами, указывающая на активную фазу воспалительной реакции. Клеточный состав представлен элементами фибробластического ряда, характеризующимися признаками постлучевого патоморфоза: клеточный и ядерный полиморфизм с явлениями дегенеративных изменений хроматина (глыбчатость, неравномерность распределения). Несмотря на наличие атипичных черт, обусловленных лучевым воздействием, структурная организация клеток сохранена в пределах доброкачественных реактивных изменений.

Фон препарата оценивается как чистый: экссудативный компонент и лейкоциты отсутствуют. В поле зрения определяются организованные скопления (пласты) клеток фибробластического ряда. Клетки демонстрируют признаки реактивных изменений: умеренное увеличение размеров клеток и ядер, базофилия цитоплазмы.

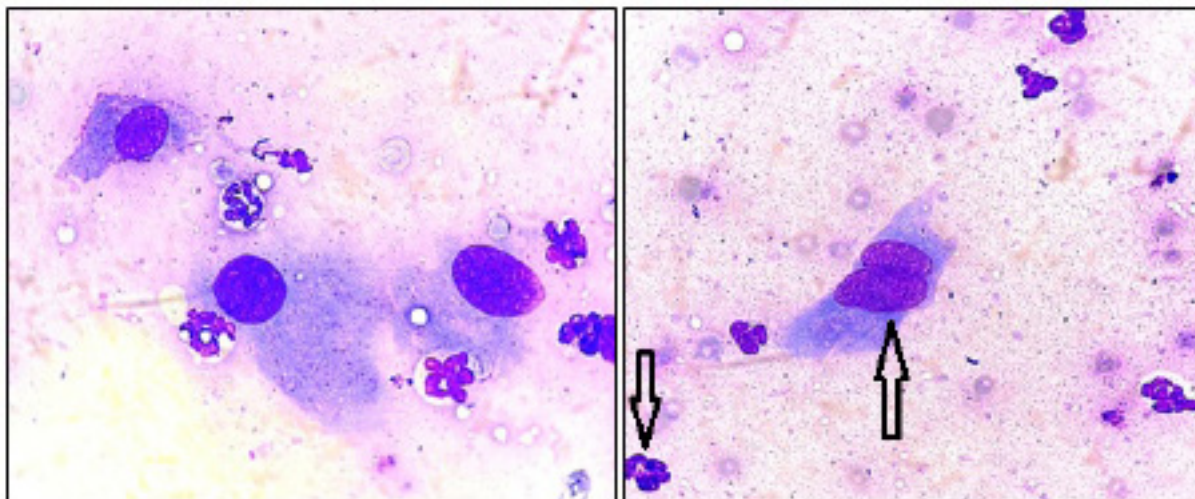


Рисунок 1. Цитологический препарат (группа ЛЯ-к).

Фон препарата — обильный серозный экссудат, лейкоциты, клетки фибробластического ряда с признаками постлучевого патоморфоза (указано стрелкой).

Окраска: по Романовскому. Увеличение: $\times 1000$ (объектив $\times 100$, окуляр $\times 10$)

Figure 1. Cytological preparation (group ЛЯ-к).

Preparation background — abundant serous exudate, leukocytes, fibroblast-like cells with signs of post-radiation pathomorphosis (indicated by the arrow).

Stain: Romanovsky. Magnification: $\times 1000$ (lens $\times 100$, ocular $\times 10$)

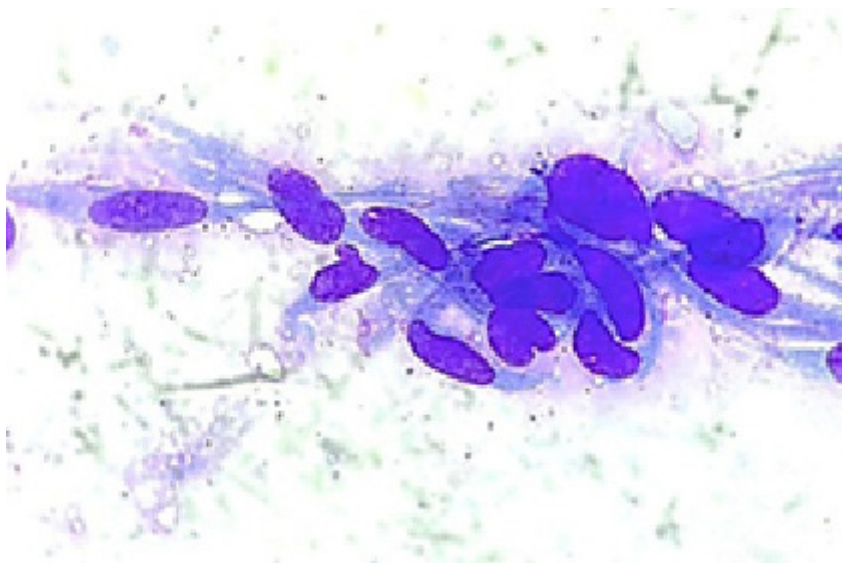


Рисунок 2. Цитологический препарат (группа ЛЯ-ОС-2).

Фон препарата чистый, в поле зрения скопления клеток фибробластического ряда с реактивными изменениями.

Окраска: по Романовскому. Увеличение: $\times 1000$ (объектив $\times 100$, окуляр $\times 10$)

Figure 2. Cytological preparation (group ЛЯ-ОС-2).

Preparation background is clear, and there are clusters of fibroblast-like cells with reactive changes per field.

Staining: Romanovsky. Magnification: $\times 1000$ (lens $\times 100$, ocular $\times 10$)

По мере купирования воспалительного процесса отмечалось появление в ране единичных фибробластов с реактивными изменениями, уменьшение количества лейкоцитов, элементов воспаления, увеличение сосудистого компонента. В группах ЛЯ-ОС-1 и ЛЯ-ОС-2 количество элементов воспаления, нейтрофилов уменьша-

лось быстрее, отмечалось более раннее (уже после 1 сеанса ФДТ) появление фибробластов, уменьшение количества нитей фибрина.

Токсическая зернистость нейтрофилов наблюдалась в меньшей степени. При взятии мазков-отпечатков из ран в контрольной группе клеточный материал отделялся и наносился на

стекло более легко, чем в исследуемых группах, что свидетельствует о более выраженной степени воспалительной реакции в группе ЛЯ–к.

Различия в значениях морфологических показателей на разных этапах лечения представлены в таблице 3.

Таблица 3. Различия в значениях морфологических показателей на разных этапах лечения
Table 3. Differences in the values of morphological indicators at different stages of treatment

Признак	ЛЯ-к (n = 3)	ЛЯ-ОС-1 (n = 4)	ЛЯ-ОС-2 (n = 4)	Критерий значимости, p
Лимфоциты				
26-е сутки эксперимента (1 сеанс ФДТ группы ОС-1 и ОС-2)	19 (17.5; 20.5)	18.5 (18; 19)	18.5 (18; 19.25)	p = 0.913
31-е сутки эксперимента (2 сеанс ФДТ группа ОС-2)	19 (17.5; 20.5)	17.5 (16.75; 18)	17 (16.75; 17.25)	p = 0.546
40-й день эксперимента (окончание)	18 (16.5; 18.5)	16 (15.75; 16)	14 (13.75; 14.25)	p = 0.036. Апостериорные сравнения: p _{к-ОС1} = 0.568 p _{к-ОС2} = 0.05 p _{ОС1-ОС2} = 0.10
Нейтрофилы				
До начала лечения	356 (352; 365)	360 (356.25; 361.25)	352.5 (348.75; 355.25)	p = 0.447
После 1 сеанса ФДТ	356 (352; 365)	119 (117.25; 120.5)	118.5 (117.5; 119.25)	p = 0.0473
После 2-го сеанса ФДТ	249 (244; 257.5)	96.5 (92.25; 99.5)	18.5 (15.5; 20.75)	p = 0.0116 Апостериорные сравнения: p _{к-ОС1} = 0.1762 p _{к-ОС2} = 0.0092 p _{ОС1-ОС2} = 0.176
Соотношение нейтрофилы/лейкоциты				
До начала лечения	17.6 (16.86; 18.55)	19.19 (19.01; 19.51)	19.2 (18.44; 19.54)	p = 0.815
После 1 сеанса ФДТ	17.6 (16.86; 18.55)	17.56 (16.37; 19.12)	16.68 (16.29; 16.91)	p = 0.628
После 2-го сеанса ФДТ	17.4 (17.25; 17.75)	14.3 (13.78; 14.8)	9.82 (9.37; 9.93)	p = 0.0116 Апостериорные сравнения: p _{к-ОС1} = 0.176 p _{к-ОС2} = 0.0092 p _{ОС1-ОС2} = 0.176

Как видно из данных таблицы 3, в группе ЛЯ-к количество нейтрофилов в тканях до начала лечения — 356 (352; 365) — было больше, чем в группе ЛЯ-ОС-1 (p = 0,0092) (30,75 (117,25; 120,5)). Данные изменения связаны с динамикой заживления ран, но наилучшие результаты были достигнуты в группе ЛЯ-ОС-2 после 2-го сеанса ФДТ [8], что отражено на рисунке 3.

Повышенный уровень соотношения нейтрофилы/лимфоциты (индекс НЛС) характерен для ранней (острой) стадии воспалительной реакции и уменьшается по мере заживления [9].

Индекс НЛС в тканях в группе ЛЯ-к — 17,4 (17,25; 17,75) был выше, чем в группе ЛЯ-ОС-2 после 2 сеансов ФДТ 9,82 (9,37; 9,93) (p = 0,0092). Лучшие результаты были достигнуты в группе ЛЯ-ОС-2 после 2 сеансов ФДТ.

В 1-е сутки воспалительной реакции в тканях возрастает количество распадающихся нейтрофильных гранулоцитов, после 3 суток в результате резорбции фрагментов нейтрофилов макрофагами количество распадающихся нейтрофилов в тканях уменьшается [10].

Как видно на рисунках, в группе ЛЯ-ОС-2 до начала лечения (рисунок 3А) в стромальном компоненте определяется большое количество нейтрофильных гранулоцитов, отек, мелкие новообразованные сосуды в составе грануляционной ткани. После 1 курса ФДТ количество нейтрофильных гранулоцитов в строме уменьшено, грануляционная ткань более зрелая: увеличивается количество коллагеновых волокон, уменьшается отек, стенки сосудов утолщены (рисунок 3Б). После 2-го курса ФДТ количество нейтрофиль-

ных гранулоцитов в строме значительно уменьшено, грануляционная ткань более зрелая с большим количеством коллагеновых волокон,

сосуды более крупные с утолщенными стенками (рисунок 3В).

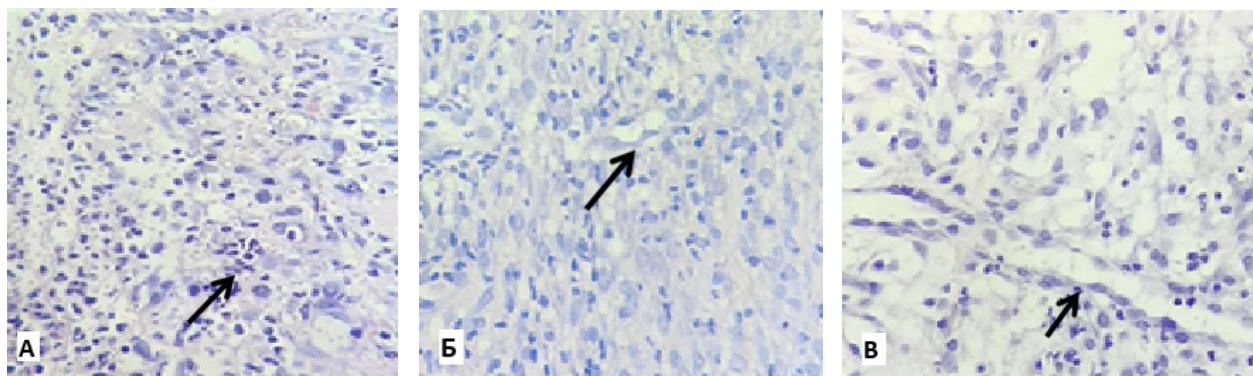


Рисунок 3. Динамика гистологической картины на различных этапах лечения:

А — до начала лечения: в строме повышенное количество нейтрофильных гранулоцитов, новообразованные сосуды в составе грануляционной ткани (указано стрелкой); Б — после 1 сеанса ФДТ: в строме повышенное количество нейтрофильных гранулоцитов, новообразованные сосуды в составе организуемой грануляционной ткани (указано стрелкой); В — после 2 сеансов ФДТ: в строме количество нейтрофильных гранулоцитов уменьшилось, новообразованные сосуды указаны стрелкой.

Окраска: гематоксилин и эозин. Увеличение: $\times 400$ (объектив $\times 40$, окуляр $\times 10$)

Figure 3. Dynamics of the histological picture at various stages of treatment:

А — before treatment: increased number of neutrophilic granulocytes in the stroma, newly formed vessels in the granulation tissue (indicated by the arrow); Б — after 1 session of FDT: increased number of neutrophilic granulocytes in the stroma, newly formed vessels in the organizing granulation tissue (indicated by the arrow); В — after 2 PDT sessions: the number of neutrophilic granulocytes in the stroma has decreased, and the newly formed vessels are indicated by the arrow.

Staining: hematoxylin and eosin. Magnification: $\times 400$ (lens $\times 40$, ocular $\times 10$)

Заключение

Полученные данные подтверждают перспективность ФДТ в лечении постлучевых язв. При попарном сравнении исследовательских и контрольных групп выявлено статистически значимое различие в скорости заживления поражений. Методика способствует регенеративным процессам за счет подавления хронического воспаления, что делает ее эффективным инструментом для дебридмента хронических ран. Помимо этого, ФДТ стимулирует неоангиогенез, индуцирует пролиферацию фибробластов и кератиноцитов,

способствуя тем самым созреванию грануляционной ткани. Вместе с тем ФДТ постлучевых язв остается недостаточно изученным направлением, ее применение ограничено в клинической практике и отсутствует в официальных клинических протоколах. Настоящее исследование систематизировало существующие данные и подтвердило, что ФДТ может иметь эффект в комплексном лечении постлучевых язв, обеспечивая полную эпителизацию или ускоряя подготовку тканей к пластическому замещению.

Список литературы / References

1. Пасов В.В., Терехов О.В. Новые подходы в консервативном лечении глубоких поздних лучевых повреждений мягких тканей. *Радиация и риск*. 2010;19(2):58-64.
Pasov VV, Terexhov OV. New approaches in conservative treatment of deep late radiation soft tissue damage. *Radiation and Risk*. 2010;19(2):58-64. (In Russ.).
2. Богданчикова П.В., Набока М.В. Проблемы поздних лучевых повреждений кожи и возможности их лечения. *Научный вестник Омского государственного медицинского университета*. 2024; 4(1):54-63.
DOI: <https://doi.org/10.61634/2782-3024-2024-13-54-63>
Bogdanchikova PV, Naboka MV. Problems of Late Radiation Skin Damage and Treatment Options. *Scientific Bulletin of Omsk State Medical University*. 2024;4(1):54-63. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.61634/2782-3024-2024-13-54-63>
3. Бардычев М.С. Лечение местных лучевых повреждений. *Лечащий врач*. 2003;(5):78-79.
Bardychchev MS. Treatment of Local Radiation Injuries. *Lechashchiy vrach*. 2003;(5):78-79. (In Russ.).
4. Cheng J, Dong J, Fang Y, Zhang X, Dang X. Radiation-induced skin injury: a review of pathophysiology, assessment, management, and re-irradiation protocols. *Front Oncol*. 2026;15:1736717.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fonc.2025.1736717>
5. Полонская А.С., Миченко А.В., Круглова Л.С., Ша-тохина Е.А., Львов А.Н. Микробиом кожи у онкологических пациентов при зуде и других кожных токсических реакциях на фоне противоопухолевой терапии. *Consilium Medicum*. 2023;25(6):400-405.
DOI: <https://doi.org/10.26442/20751753.2023.6.202302>

Polonskaya AS, Michenko AV, Kruglova LS, Shatokhina EA, Lvov AN. Skin microbiome in cancer patients with itching and other skin toxic reactions during antitumor therapy. *Consilium Medicum*. 2023;25(6):400-405.
DOI: <https://doi.org/10.26442/20751753.2023.6.202302>

6. Красносельский Н., Пушкарь Е. Влияние фотодинамической терапии на состояние АО-системы организма у животных с инфицированными лучевыми язвами. *Украинский радиологический журнал*. 2019;27(4):244-249.

Krasnoselsky N, Pushkar E. The effect of photodynamic therapy on the state of the AO system of the body in animals with infected radiation ulcers. *Ukrainian Radiological Journal*. 2019;27(4):244-249. (In Russ.).

7. Славников И.А., Дундаров З.А., Ярец Ю.И. Клинико-морфологические особенности острых и хронических ран. *Журнал Гродненского государственного медицинского университета*. 2021; 19(1):55-63.
DOI: <https://doi.org/10.25298/2221-8785-2021-19-1-55-63>

Slavnikov IA, Dundarov ZA, Yarets Yul. Clinical and Morphological Features of Acute and Chronic Wounds. *Journal of the Grodno State Medical University*. 2021;19(1):55-56. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.25298/2221-8785-2021-19-1-55-63>

8. Ларичев А.Б., Чистяков А.Л., Комлев В.П. Заживление раны и первичная результативность первичного шва в хирургии новообразований мягких тканей головы и шеи. *Раны и раневые инфекции*. 2014;1(1):22-27.

Larichev AB, Chistyakov AL, Komlev VL. Wound healing and primary effectiveness of primary suture in surgery of soft tissue neoplasms of the head and neck. *Wounds and Wound Infections*. 2014;1(1):22-27. (In Russ.).

9. Гринь О.О., Бабаев М.А., Котельникова Е.О., Грекова М.С. и др. Прогностическая значимость гематологических индексов при реконструктивных операциях на аорте: проспективное наблюдательное исследование. *Вестник интенсивной терапии им А.А. Салтанова*. 2024;(1):82-93.
DOI: <https://doi.org/10.21320/1818-474X-2024-1-82-93>

Grin OO, Babaev MA, Kotelnikova EO, Grekova MS, et al. Predictive Significance of Hematological Indices in Reconstructive Aortic Surgery: A Prospective Observational Study. *Vestnik Intensivnoy Terapii im. A.A. Saltanova*. 2024;(1):82-93. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.21320/1818-474X-2024-1-82-93>

10. Шурыгина И.А., Каня О.В., Дремина Н.Н., Шурыгин М.Г. Способ патоморфологической оценки возраста перенесенного инфаркта миокарда. *Современные технологии в медицине*. 2017;9(2):126-130.
DOI: <https://doi.org/10.17691/stm2017.9.2.15>

Shurygina IA, Kanya OV, Dremina NN, Shurygin MG. Method of pathomorphological assessment of myocardial infarction age. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2017; 9(2):126-130. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.17691/stm2017.9.2.15>

Информация об авторах / Information about the authors

Яковенко Алексей Сергеевич, врач онколог-хирург онкологического отделения № 6, У «Гомельский областной клинический онкологический диспансер», Гомель, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3596-2667>

e-mail: Dr.YakovenkoAS@yandex.by

Ачинович Сергей Леонидович, врач-патологоанатом (заведующий) патологоанатомического отделения, У «Гомельский областной клинический онкологический диспансер», Гомель, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0977-5481>

e-mail: ser.achinowitch2017@yandex.ru

Зайцева Лариса Петровна, заведующий централизованной цитологической лабораторией, У «Гомельский областной клинический онкологический диспансер», Гомель, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7638-9364>

e-mail: larysazaitsava2802@gmail.com

Дундаров Залимхан Анварбекович, д.м.н., профессор, заведующий кафедрой хирургических болезней № 2, УО «Гомельский государственный медицинский университет», Гомель, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8561-691X>

e-mail: dundarovz@gmail.com

Alexey S. Yakovenko, Oncologist Surgeon at the Oncology Department No. 6, Gomel Regional Clinical Oncology Centre, Gomel, Belarus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3596-2667>

e-mail: Dr.YakovenkoAS@yandex.by

Sergej L. Achinovich, Pathologist, Head of Pathology Department, Gomel Regional Clinical Oncology Centre, Gomel, Belarus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0977-5481>

e-mail: ser.achinowitch2017@yandex.ru

Larisa P. Zaitseva, Head of the Centralized Cytology Laboratory, Gomel Regional Clinical Oncology Centre, Gomel, Belarus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7638-9364>

e-mail: larysazaitsava2802@gmail.com

Zalimhan A. Dundarov, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Surgical Diseases No. 2, Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8561-691X>

e-mail: dundarovz@gmail.com

Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Яковенко Алексей Сергеевич
e-mail: Dr.YakovenkoAS@yandex.by

Alexey S. Yakovenko
e-mail: Dr.YakovenkoAS@yandex.by

Поступила в редакцию / Received 10.03.2026

Поступила после рецензирования / Accepted 13.05.2026

Принята к публикации / Revised 04.09.2026