



Морфологические критерии оценки репаративных процессов в поперечнополосатой скелетной мышечной ткани при использовании модифицированного шовного материала

©О.В. Злобина¹, И.В. Глухова^{1*}, А.В. Глухова¹, С.Я. Пичхидзе²

¹ Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, Саратов, Россия

² Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия

* И.В. Глухова, Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, 410012, Саратов, ул. Большая Казачья д.112, iulianiya.g@mail.ru

Поступила в редакцию 16 апреля 2025 г. Исправлена 10 июня 2025 г. Принята к печати 20 июня 2025 г.

Резюме

Актуальность: Развитие инфекционных осложнений после операции представляет собой значимую проблему современной хирургической практики. Такие осложнения удлиняют срок госпитализации пациентов, ухудшают самочувствие и вызывают образование косметических дефектов в зоне шва. Для предотвращения развития инфекционных осложнений после операций была разработана и успешно протестирована инновационная методика имплантации лабораторных животных новым хирургическим шовным материалом. Материал уникален тем, что покрыт специальным покрытием из гидроксиапатита кальция, обогащённым ионами металлов с доказанными антибактериальными свойствами. Результаты эксперимента подтверждают эффективность предложенной технологии (Патент РФ №RU 2819984 C1 от 28 мая 2024 г.).

Цель: Изучить репаративные процессы в скелетной мышечной ткани после имплантации хирургического шовного материала, модифицированного металл-замещенным гидроксиапатитом кальция в эксперименте.

Материалы и методы: Выполнено экспериментальное исследование на 40 белых крысах-самцах. Для моделирования линейной резаной раны использовали стерильный хирургический скальпель. Рана располагалась над трапецевидной мышцей, смещаясь на 1 см от задней срединной линии тела животного. Длина разреза составила 2,5 см, выполненного сверху вниз вдоль позвоночника. Глубина проникновения составляла примерно 4 мм, включая подкожную жировую и мышечную ткани.

Экспериментатор вручную накладывал швы послойно, используя простые узловые стежки без напряжения тканей. Швы наносились таким образом, чтобы обеспечить точное сопоставление краёв раны. Врач-хирург не обладал информацией о принадлежности используемого шовного материала к той или иной группе. Было сформировано 4 экспериментальные группы по 10 животных, соответственно составу шовного материала (немодифицированный, модифицированный гидроксиапатитом кальция, замещенным цинком, серебром, медью). На 10-е сут. проведен забор образцов мышечной ткани для изготовления гистологических препаратов. При морфологическом исследовании оценивали клеточный состав грануляционной ткани, ее площадь, степень периваскулярного отека, количество гемокapилляров. Результаты проведенных исследований представлены качественными и полуколичественными показателями, такими как поперечная исчерченность и периваскулярный отек. Качественные данные подверглись статистическому анализу с использованием программного комплекса MatLab версии R2018b и специального пакета Statistics Toolbox.

Результаты: При морфометрическом исследовании гистологических образцов было выявлено, что площадь грануляционной ткани в опытной группе значительно меньше, чем в контрольной группе. В частности, показатель площади грануляции в группе, где использовались нити, покрытые цинк-замещенным гидроксиапатитом кальция, оказался на 49% ниже соответствующего показателя в контрольной группе. Также в опытных группах отмечали снижение количества гранулоцитов до 3,6 в поле зрения. При применении модифицированных нитей ткань характеризовалась обилием новообразованных гемокapилляров.

Заключение: При имплантации шовного материала, модифицированного металл-замещенным гидроксиапатитом кальция, в мышечную ткань отмечается снижение выраженности воспаления, развитие условий для регенерации мышечной ткани. Наличие антибактериального эффекта и повышенной регенераторной активности исследуемого материала способно обеспечить актуальную задачу практической хирургии – профилактику развития послеоперационных осложнений в области хирургического вмешательства.

Ключевые слова: модифицированный шовный материал, гидроксиапатит кальция, экспериментальное исследование, антибактериальные хирургические нити, послеоперационное воспаление

Цитировать: Злобина О.В., Глухова И.В., Глухова А.В., Пичхидзе С.Я. Морфологические критерии оценки репаративных процессов в поперечнополосатой скелетной мышечной ткани при использовании модифицированного шовного материала. *Инновационная медицина Кубани*. 2025;10(3):68–75. <https://doi.org/10.35401/2541-9897-2025-10-3-68-75>



Morphological Criteria for Assessing Reparative Processes in Striated Skeletal Muscle Tissue Using Modified Suture Material

©Olga V. Zlobina¹, Iulianiya V. Glukhova^{1*}, Anna V. Glukhova¹, Sergey Ya. Pichkhidze²

¹ Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky, Saratov, Russian Federation

² Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

* Iulianiya V. Glukhova, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky, ulitsa Bolshaya Kazachya 112, Saratov, 410012, Russian Federation, iulianiya.g@mail.ru

Received: April 16, 2025. Received in revised form: June 10, 2025. Accepted: June 20, 2025.

Abstract

Background: The development of infectious postoperative complications remains a significant challenge in modern surgical practice. Such complications prolong patient hospitalization, worsen overall well-being, and cause cosmetic defects in the suture area. To prevent postoperative infectious complications, an innovative method of implanting a new surgical suture material in laboratory animals was developed and successfully tested. The material is unique due to its coating of calcium hydroxyapatite enriched with metal ions known for their antibacterial properties. The experimental results confirm the effectiveness of the proposed technology (Russian Patent No. RU 2819984 C1, dated May 28, 2024).

Objective: To study the reparative processes in skeletal muscle tissue after implantation of surgical suture material modified with metal-substituted calcium hydroxyapatite in experiment.

Materials and methods: An experimental study was conducted on 40 white male rats. To model a linear surgical wound, a sterile surgical scalpel was used. The wound was located over the trapezius muscle, 1 cm lateral to the posterior midline. The incision measured 2.5 cm in length and was made from cranial to caudal along the spine. The penetration depth was approximately 4 mm, including subcutaneous fat and muscle tissue. The experimenter manually placed layered sutures using simple interrupted suture without tissue tension. Stitches were applied to ensure precise approximation of the wound edges. The surgeon was unaware of the group allocation of the suture material. Four experimental groups of 10 animals each were formed, according to the composition of the suture material (unmodified, modified with calcium hydroxyapatite, substituted with zinc, silver, copper). On day 10, muscle tissue samples were taken for histological preparations. Morphological analysis included assessment of cellular composition of granulation tissue, its area, the degree of perivascular edema, and the number of hemocapillaries. The research results are presented with qualitative and semi-quantitative data, such as transverse striation, perivascular edema. Qualitative data were statistically processed using the MatLab R2018b data analysis system of the Statistics Toolbox software package.

Results: Morphometric analysis of histological preparations showed that the area of granulation tissue in the experimental groups was lower than in the comparison group, while the values in the group using filaments modified with zinc-substituted calcium hydroxyapatite were 49% lower compared to the control group. Also, a decrease in the number of granulocytes to 3.6 per high-power field was observed in the experimental group. Application of modified sutures resulted in tissue characterized by a high density of newly formed hemocapillaries.

Conclusions: When implanting suture material modified with metal-substituted calcium hydroxyapatite into muscle tissue, a reduction in the severity of inflammation and the development of conditions favorable for muscle tissue regeneration are observed. The antibacterial properties and enhanced regenerative activity of the tested material may help address a key challenge in surgical practice – the prevention of postoperative complications at the surgical site.

Keywords: modified suture material, calcium hydroxyapatite, experimental study, antibacterial surgical sutures, postoperative inflammation

Cite this article as: Zlobina OV, Glukhova IuV, Glukhova AV, Pichkhidze SYa. Morphological criteria for assessing reparative processes in striated skeletal muscle tissue using modified suture material. *Innovative Medicine of Kuban*. 2025;10(3):68–75. <https://doi.org/10.35401/2541-9897-2025-10-3-68-75>

Введение

Развитие инфекционных процессов в области операционного поля представляет собой серьезную проблему, осложняющую течение послеоперационного периода [1, 2]. Степень тяжести послеоперационных осложнений определяется множеством факторов [3]:

- Иммунологическое состояние: при наличии врожденных или приобретенных нарушений иммунитета инфекция может быстро прогрессировать, вызывая тяжелое ухудшение здоровья пациента.

- Объем операции: малотравматичные вмешательства значительно снижают риск осложнений [4], тогда

как обширные полостные операции повышают опасность осложнений.

- Тип операции: плановые операции сопровождаются меньшим числом случаев инфицирования по сравнению с экстренными вмешательствами [5], поскольку отсутствует возможность полноценной предоперационной подготовки, а сами травмы зачастую носят тяжелый характер.

Актуальность проблемы особенно велика в условиях военно-полевых ситуаций, где невозможность обеспечить условия стерильной среды и высокая частота ранений осколками снарядов приводят к увеличению частоты инфекционных осложнений.

Эта проблема приобретает также особое значение в эстетической хирургии, поскольку любые осложнения, такие как длительное воспаление, способствуют формированию некрасивых рубцов, которые негативно влияют на внешний вид пациента и вызывают значительный психологический дискомфорт. Такие рубцы особенно заметны на открытых участках тела, таких как лицо (после фейслифтинга, блефаропластики, ринопластики), шея и грудь.

Развитие послеоперационных инфекционных осложнений раны приводит к увеличению продолжительности временной нетрудоспособности больных, удлинению длительности пребывания пациентов в стационаре, а также повышает риск формирования косметических дефектов в области шва вследствие длительного воспалительного процесса [4, 5]. На сегодняшний день для профилактики раневых инфекций существуют хирургические нити, обработанные различными антисептическими и антибактериальными средствами, при использовании которых антибактериальное действие наблюдается лишь в области контактирования ткани с нитями. В разработанном и исследуемом нами хирургическом шовном материале – плетеной нити на основе полигликолида – по предварительно разработанной технологии выполнена модификация составом биогенного гидроксиапатита кальция, содержащего ионы металлов. Антибактериальное действие модифицированных нитей в отношении *E. coli* и *S. aureus* подтверждено в ранее проведенных исследованиях [6, 7]. Используемый в экспериментальном материале гидроксиапатит кальция (ГА) представляет собой компонент неорганического происхождения. Данный минерал имеет важное биологическое значение, так как составляет до 50 % от общей массы костной ткани и до 96 % эмали зубов. В медицине ГА применяют в косметологии, стоматологии, травматологии и ортопедии [8] данное вещество используют не только с целью восстановления утраченного объема ткани, но и в качестве носителя лекарственных средств. Гидроксиапатит кальция является полностью биodeградируемым материалом, который совместим с тканями человека и при этом не оказывает иммуногенной активности. Наблюдаемое при микробиологическом исследовании модифицированных нитей увеличение площади антибактериального действия создается благодаря присутствию гидроксиапатита, обладающего сорбирующим эффектом. Металлы, используемые для замещения гидроксиапатита (серебро, медь, цинк), обеспечивают антибактериальное действие в ране, благодаря наличию бактерицидной активности [7].

Осложнения, вызванные инфекцией в послеоперационный период, ведут к удлинению сроков временной потери трудоспособности пациентов, увеличивают продолжительность нахождения в меди-

цинском учреждении и создают повышенный риск появления эстетических дефектов в месте хирургического шва вследствие продолжительных воспалительных реакций [4, 5].

Для предотвращения инфекционных процессов используются специализированные хирургические нити, пропитанные антисептиками и антибиотиками, однако их противомикробное воздействие ограничено областью непосредственного контакта ткани с самими нитями. Нами разработана новая модификация хирургического шовного материала на основе полиэфирной нити (полигликолид), покрытой специально подобранным составом гидроксиапатита кальция, обогащенного металлами. Ранее проведенные эксперименты продемонстрировали бактериостатическое действие предложенных материалов в отношении распространенных патогенных микроорганизмов – кишечной палочки (*Escherichia coli*) и золотистого стафилококка (*Staphylococcus aureus*) [6, 7].

Гидроксиапатит кальция представляет собой неорганический минерал природного происхождения, составляющий значительную долю минеральной составляющей костей (до 50%) и зубной эмали (около 96%). Благодаря своим уникальным свойствам, ГА широко применяется в медицинской практике, особенно в ортопедической, травматологической, стоматологической и косметологической областях [8]. Материал используется не только для восполнения недостающего объема ткани, но и как средство доставки лекарственных препаратов. Важной характеристикой ГА является полная биоразлагаемость и хорошая совместимость с человеческими тканями, при этом материал не вызывает иммунной реакции организма.

Микробиологические исследования показали, что модифицированная нить обладает расширенными антимикробными свойствами, что обеспечивается благодаря способности гидроксиапатита адсорбировать бактерии. Замещение гидроксиапатита ионами серебра, меди и цинка усиливает эффект, обеспечивая дополнительный антибактериальный механизм воздействия на микроорганизмы в очаге воспаления [7].

Цель

Изучить репаративные процессы в поперечнополосатой скелетной мышечной ткани лабораторных животных в эксперименте после имплантации модифицированных нитей.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбраны хирургические синтетические сополимерные плетеные шовные нити Vicryl Plus (ETHICON, USA), модифицированные гидроксиапатитом кальция и замещенные ионами серебра, меди и цинка с использованием ионообменного механизма из азотнокислых солей [6].

Таблица 1
Распределение животных по группам
Table 1
Distribution of animals by groups

№ группы	Группа сравнения	Опытные группы		
	1-я группа (n=10)	2-я группа (n=10)	3-я группа (n=10)	4-я группа (n=10)
Состав шовного материала	Немодифицированный	Модифицированный Zn-замещенным ГА	Модифицированный Ag-замещенным ГА	Модифицированный Cu-замещенным ГА

В качестве экспериментальных животных выбраны беспородные белые крысы-самцы (n=40) массой тела от 300 до 350 г. Содержание животных, предварительные карантинные мероприятия и экспериментальную часть исследования выполняли в виварии ФГБОУ ВО «Саратовского ГМУ им. В.И. Разумовского» с учетом международных, национальных и институциональных стандартов по обращению с лабораторными животными: согласно «Международным рекомендациям по проведению медико-биологических исследований с использованием животных» (ВОЗ, Женева, 1985 г.); Хельсинкской декларации о гуманном отношении к животным; Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях: ЕТС № 123 от 18 марта 1986 г.; Приказу Минздрава России от 1 апреля 2016 г. № 199н «Об утверждении Правил надлежащей лабораторной практики» (зарегистрирован в Минюсте России 15 августа 2016 г. № 43232); ГОСТу 33044–2014. Принципам надлежащей лабораторной практики (введен в действие Приказом Росстандарта от 20 ноября 2014 г. № 1700-ст), Приказу Минздрава СССР «О мерах по дальнейшему совершенствованию организационных форм работы с использованием экспериментальных животных» № 755 от 12.08.1977 г.; протокол исследования одобрен этическим комитетом Саратовского ГМУ им. В.И. Разумовского (протокол №04 от 07.12.2021 г.), в обращении с животными соблюдены юридические и этические нормы.

До начала проведения эксперимента были проведены карантинные мероприятия: в течение 2-х недель крысы содержали в отдельном боксе, после чего животные были случайно распределены на 4 равные группы, в каждой по 10 животных (табл. 1), в зависимости от металла, которым был замещен гидроксипатит кальция для синтеза пропиточного состава имплантируемых нитей: немодифицированный шовный материал; нити, модифицированные Zn-замещенным ГА; нити, модифицированные Ag-замещенным ГА; нити, модифицированные Cu-замещенным ГА.

Для анестезии внутримышечно вводили Zoletil 100 («VirbacSanteAnimale», Франция) и Xylanit 2% (Нита-Фарм, Россия), после чего сбрасывали шерсть на холке и трёхкратно обрабатывали операционное поле 70%-м раствором спирта. При помощи стериль-

ного хирургического скальпеля в проекции трапециевидной мышцы, отступив 1 см от задней срединной линии, формировали линейную резаную хирургическую рану длиной 2,5 см, выполняемую в краниокаудальном направлении на всю толщу кожи, подкожно-жировой клетчатки и на 4 мм в мышечной ткани. После чего экспериментатор вручную ушивал рану послойно простыми узловыми швами без натяжения до сопоставления краев раны, при этом хирург не знал к какой группе относится данный шовный материал. В группе сравнения использовали немодифицированный шовный материал, а в опытных группах применяли модифицированные нити. Для швов на коже применяли немодифицированные нити. В течение 10 дней все животные находились в равных условиях вивария ФГБОУ ВО СГМУ им. В.И. Разумовского, режим кормления – свободный, при комнатной температуре до 22 °С и влажности до 70%. В течение экспериментального исследования животные не контактировали с инфекционными агентами, стрессовым воздействиям не подвергались. Из эксперимента животных выводили на 10-е сут. введением препаратов Zoletil 100 и Xylanit 2%, далее получали образцы мышечной ткани с лигатурой, из которых после фиксации в нейтральном 10%-м забуференном формалине HistoSafe (ЭргоПродакшн, Россия) изготавливали образцы с использованием стандартной гистологической техники. Полученные препараты окрашивали гематоксилином и эозином. Для морфологического анализа гистологических препаратов мышечной ткани применяли микровизор медицинский mVizo-101 ЛОМО для исследования микроструктур биологических объектов в проходящем свете по методу светлого поля и микроскоп проходящего света. Критериями анализа гистологических препаратов при морфометрическом исследовании выбрали клеточный состав грануляционной ткани в зоне повреждения, ее площадь, количество гранулоцитов, макрофагов и лимфоцитов, микроциркуляцию в зоне повреждения оценивали по количеству гемокапилляров, также исследовали выраженность периваскулярного отека, количество клеток фибробластов, сохранение поперечной исчерченности мышечных волокон.

Полученные данные результатов морфометрического исследования обрабатывали с помощью

системы анализа данных MatLab R2018b пакета программ Statistics Toolbox. Чтобы оценить нормальность распределения данных применяли метод Колмогорова-Смирнова. В связи с тем, что получен отличный от нормального характер распределения данных, использовали методы описательной статистики, такие как: определение верхнего и нижнего квартилей (Q25; Q75), расчёт медианы (Me). Для сравнения двух выборок применяли непараметрический критерий Манна-Уитни, различия считали значимыми при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты

В результате морфометрического исследования полученных гистологических препаратов в 1-й группе в 63% случаев отмечалось наличие ярко выраженного периваскулярного отёка в зоне повреждения (табл. 2). Увеличение площади грануляционной ткани в 1-й группе наблюдали в 70% случаев. Количество тонкостенных гемокапилляров, определяемых в грануляционной ткани препаратов группы сравнения, не превышало 5 единиц в поле зрения, что свидетельствует о низкой васкуляризации ткани. При анализе численности гранулоцитов их количество в 1-й группе

в 4,5 раза превышало значения данного морфологического признака 2-й опытной группы, и оказалось в 3 раза выше значений 3-й опытной группы. Следует отметить, что количество макрофагов, наблюдаемое в 1-й группе, оказалось на 30% ниже значений данного критерия во 2-й опытной группе, где было зарегистрировано максимальное значение среди опытных групп (Me=13,5 единиц в поле зрения).

Наличие периваскулярного отека, определяемого при морфометрическом описании грануляционной ткани в препаратах 2-й опытной группы, наблюдалось лишь в 10% случаев. Значения площади грануляционной ткани во 2-й группе (Me=0,067 мм²) оказались на 49% ниже по сравнению с группой контроля (табл. 3). Анализ гистологических препаратов 2-й группы показал усиление васкуляризации: отмечалось увеличение количества тонкостенных новообразованных гемокапилляров синусоидного типа, число которых было на 64% выше, чем в группе сравнения.

При оценке клеточного состава грануляционной ткани во 2-й группе зафиксировано снижение численности гранулоцитов (Me=4,2 клетки в поле зрения), которая в 4 раза уступала показателям группы контроля (Me=16,9 клеток в поле зрения). В составе грануляционной ткани образцов 2-й экспериментальной группы присутствовали фибробласты, количество которых превысило соответствующие показатели 1-й группы на 32%. При изучении гистологических препаратов по показателю поперечной исчерченности мышечных волокон во всех экспериментальных группах обнаружена сохраненность данного признака.

При исследовании образцов мышечной ткани 3-й опытной группы периваскулярный отек в зоне повреждения выявлен в 17% случаев. При оценке площади грануляционной ткани, результаты исследования в 3-й экспериментальной группе оказались ниже значений 1-й экспериментальной группы на 25%.

Таблица 2

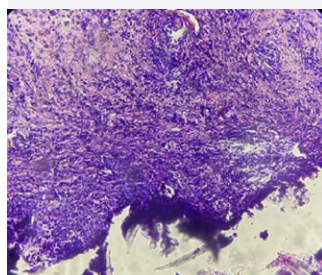
Анализ степени выраженности периваскулярного отека и сохранности поперечной исчерченности мышц

мыщ

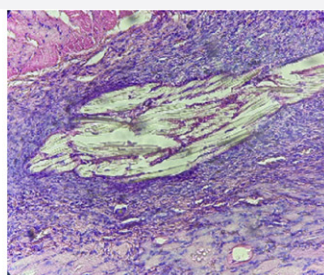
Table 2

Analysis of the severity of perivascular edema and the preservation of muscle transverse striations

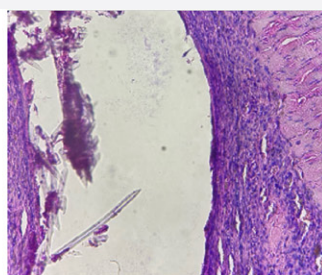
Морфологический признак	1-я группа	2-я группа	3-я группа	4-я группа
Поперечная исчерченность мышечного волокна	+	+	+	+
Периваскулярный отек	+++	-	+	++



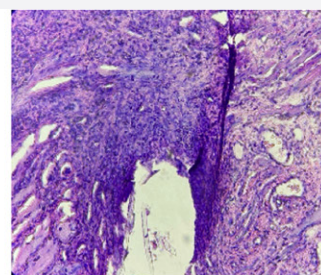
1-я группа



2-я группа



3-я группа



4-я группа

Рисунок 1. Микроскопическая картина васкуляризации грануляционной ткани при имплантации модифицированных нитей (окрашивание гематоксилин-эозином, увел. $\times 20$)

Figure 1. Microscopic picture of granulation tissue vascularization after implantation of modified suture (hematoxylin-eosin staining, $\times 20$ magnification)

Таблица 3

Данные морфологического исследования образцов скелетной мускулатуры после имплантации хирургических нитей

Table 3

Morphological data of skeletal muscle samples after implantation of surgical sutures

Морфологический признак	Значение	1-я группа	2-я группа	3-я группа	4-я группа
Площадь грануляционной ткани, мм ²	Me	0,131	0,067	0,098	0,115
	Q25; Q75	0,116; 0,147	0,049; 0,088	0,072; 0,107	0,110; 0,130
	<i>p</i>	–	*0,001	*0,024	0,175
Количество гемокapилляров в грануляционной ткани, в поле зрения	Me	5,2	14,6	12,3	8,6
	Q25; Q75	3,4; 7,2	11,8; 16,3	10,1; 13,7	7,5; 10,1
	<i>p</i>	–	*0,017	*0,021	*0,046
Количество гранулоцитов в грануляционной ткани, в поле зрения	Me	16,9	4,2	5,8	15,4
	Q25; Q75	15,5; 23,2	2,2; 5,1	3,9; 7,3	12,6; 16,7
	<i>p</i>	–	*0,000	*0,001	0,158
Количество лимфоцитов в грануляционной ткани, в поле зрения	Me	8,2	9,1	10,6	8,9
	Q25; Q75	7,3; 10,5	8,4; 11,2	9,1; 12,7	7,5; 10,8
	<i>p</i>	–	*0,039	*0,015	*0,043
Количество макрофагов грануляционной ткани, в поле зрения	Me	10,4	13,5	11,8	11,6
	Q25; Q75	7,8; 11,2	12,6; 15,3	11,1; 13,6	10,7; 13,8
	<i>p</i>	–	*0,003	*0,027	*0,039
Количество фибробластов в грануляционной ткани, в поле зрения	Me	25,7	38,1	36,3	35,8
	Q25; Q75	22,3; 26,5	35,8; 40,2	33,9; 37,6	33,3; 36,9
	<i>p</i>	–	*0,001	*0,001	*0,002

Прим.: Me – медиана, Q25; Q75 – верхний и нижний квартили, **p*<0,05 – различия статистически значимые по сравнению с группой контроля

Note: Me – median, Q25; Q75 – upper and lower quartiles, **p*<0,05 – differences were statistically significant compared to the control group

В грануляционной ткани группы применения нитей, модифицированных Ag-замещенным ГА, достаточно активны процессы неоангиогенеза – о чём свидетельствует превышение количества гемокapилляров на 58% по сравнению с группой сравнения. При исследовании клеточного состава грануляционной ткани препаратов 3-й опытной группы установлено увеличение количества лимфоцитов на 30% по сравнению с 1-й опытной группой. В то время как число клеток фибробластов в грануляционной ткани 3-й группы на 29% превышало показатели группы сравнения.

При исследовании гистологических препаратов 4-й экспериментальной группы в грануляционной ткани отмечали наличие периваскулярного отека в 35% случаев. Морфометрический анализ образцов 4-й опытной группы показал увеличение количества гемокapилляров в грануляционной ткани на 39% по сравнению с 1-й экспериментальной группой. В исследуемой группе применения шовного материала, модифицированного Cu-замещенным ГА, количество

фибробластов в зоне повреждения превосходит значения 1-й опытной группы на 28%.

Микроциркуляция в зоне повреждения лучше всего развита во 2-й опытной группе, в которой применялся шовный материал, модифицированный ГА и ионами цинка; в этой группе зарегистрировано максимальное количество гемокapилляров. В 3-й опытной группе с использованием ГА с ионами серебра отмечено наибольшее количество лимфоцитов в грануляционной ткани. Описанное наблюдение возможно за счет иммуномодулирующей способности катионов серебра [9], а также их стимулирующего влияния на систему клеточного иммунитета.

Обсуждение

Полученные данные морфологического анализа гистологических препаратов при экспериментальной имплантации модифицированного хирургического шовного материала имеют практическое значение для предварительной оценки качества разработанного

материала. Проведенные исследования необходимы для оценки противовоспалительной и регенераторной активности модифицированных хирургических нитей, а также для изучения реакции мягких тканей на их имплантацию. Так, во 2-й опытной группе зафиксировано максимальное снижение количества гранулоцитов, что свидетельствует о выраженном противовоспалительном действии ионов цинка. Это подтверждает ранее полученные данные об антибактериальной активности модифицированных нитей *in vitro*.

Наиболее значительное снижение площади грануляционной ткани наблюдается во 2-й группе, что является прогностически благоприятным критерием и говорит о снижении выраженности воспалительной реакции мягких тканей на имплантацию модифицированных нитей, за счет чего может снизиться риск послеоперационных осложнений.

В клеточном составе грануляционной ткани в обеих экспериментальных группах отмечается рост числа макрофагов. Макрофаги играют ключевую роль в регенерации мышечной ткани, выполняя функции фагоцитоза поврежденных и некротизированных мышечных волокон, способствуя их лизису, кроме того, они секретируют сигнальные молекулы, которые индуцируют пролиферацию, активацию и дифференцировку миосателлитов – резервных клеток поперечно-полосатой мышечной ткани [10, 11]. Таким образом, макрофаги участвуют в регенеративных процессах скелетной мышцы, способствуя восстановлению тканевых структур.

Во всех опытных группах применения модифицированных нитей наблюдается усиление микроциркуляции в виде увеличения количества мелких, незрелых, тонкостенных капилляров, в отличие от группы применения немодифицированного шовного материала. Это обусловлено способностью ионов кальция участвовать в ангиогенезе, опосредованном вазоэндотелиальным фактором роста [12] посредством инициации процессов миграции и пролиферации клеток эндотелия сосудов. Также реваскуляризация тканей имеет важное значение в регенерации мышечной ткани [13, 14], так как при недостаточном формировании микроциркуляторного русла и развитии гипоксии возможно проведение неполной регенерации с возникновением фиброза, препятствующего восстановлению функции поврежденного мышечного волокна.

Также стоит отметить, что во всех экспериментальных группах клеточный состав грануляционной ткани характеризуется превалированием макрофагов над лимфоцитами, что может говорить о развитии благоприятных условий для регенерации поперечно-полосатой скелетной мышечной ткани за счет активации ее камбиального резерва. Увеличение на 30% количества фибробластов во всех опытных группах обеспечивает укрепление внеклеточного матрикса

с формированием каркаса для мышечной ткани. Существуют исследования [15], описывающие стимулирующее влияние фибробластов на миогенные предшественники и дифференцировку мышечных клеток, обеспечивающее полное созревание миофибрилл после травматического повреждения.

Заключение

Морфологический анализ репаративных процессов в мышечной ткани после имплантации модифицированных нитей свидетельствует о снижении выраженности послеоперационного воспалительного процесса по сравнению с использованием немодифицированного хирургического шовного материала. Это говорит о более благоприятных условиях для регенерации мышечной ткани при применении последних.

Особенно заметен противовоспалительный эффект при использовании модифицированного хирургического шовного материала, обработанного составом на основе гидроксиапатита кальция, замещенного ионами цинка, что подтверждает его перспективность в клинической практике. Такой материал способствует более быстрому и эффективному восстановлению тканей, повышая качество хирургических вмешательств и снижая риск послеоперационных осложнений.

Вклад авторов

Разработка концепции и дизайна исследования:

О.В. Злобина, С.Я. Пичхидзе, И.В. Глухова

Проведение статистического анализа: А.В. Глухова, С.Я. Пичхидзе

Написание статьи: О.В. Злобина, И.В. Глухова, А.В. Глухова

Редактирование текста: О.В. Злобина, С.Я. Пичхидзе, И.В. Глухова

Утверждение окончательной версии: О.В. Злобина, И.В. Глухова, А.В. Глухова, С.Я. Пичхидзе

Author contributions

Concept and design: Zlobina, Pichkhidze, Glukhova

Statistical analysis: Glukhova, Pichkhidze

Manuscript drafting: Zlobina, Glukhova, Glukhova

Final approval of the version to be published: Zlobina, Glukhova, Glukhova Pichkhidze,

Литература / References

1. Шаповалов В.К., Грицаев И.Е., Таюрский Д.А. Опыт лечения имплант-ассоциированных раневых осложнений после операций на позвоночнике. *Инновационная медицина Кубани*. 2022;(3):64–70. <https://doi.org/10.35401/2541-9897-2022-25-3-64-70>

Shapovalov V.K., Gritsaev I.E., Tayursky D.A. Experience in the treatment of implant-associated wound complications after spinal surgery. *Innovative Medicine of Kuban*. 2022;(3):64–70. (In Russ). <https://doi.org/10.35401/2541-9897-2022-25-3-64-70>

2. Bruce J, Knight R, Parsons N, et al. Wound photography for evaluation of surgical site infection and wound healing after lower limb trauma. *The Bone & Joint Journal*. 2021;103-B(12):1802–1808. PMID: 34847717. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.103B12.BJJ-2021-0447.R1>

3. Fahmy MD, Clegg DJ, Deek AJ, et al. Preoperative Nutritional Laboratory Values, Demographics, and Wound Healing Following Facial Trauma Surgery: Which Variables Predict Postoperative Complications? *The Journal of Craniofacial Surgery*. 2023;34(6):1732-1736. PMID: 37316998. <https://doi.org/10.1097/SCS.00000000000009484>
4. Wang S, Zhang K, Hu JL, et al. Endoscopic resection of the pancreatic tail and subsequent wound healing mechanisms in a porcine model. *World Journal of Gastroenterology*. 2019;25(21):2623-2635. PMID: 31210714. PMCID: PMC6558443. <https://doi.org/10.3748/wjg.v25.i21.2623>
5. Каранадзе В.А., Гринь А.А., Кордонский А.Ю. Факторы риска развития инфекции области хирургического вмешательства при лечении пациентов с травмами и заболеваниями грудного и поясничного отделов позвоночника: результаты ретроспективного исследования. *Хирургия позвоночника*. 2020;17(3):100-107. <https://doi.org/10.14531/ss2020.3.100-107>
- Karanadze VA, Grin AA, Kordonskiy AY. Risk factors for surgical site infection in thoracic and lumbosacral spine surgery: retrospective study results. *Russian Journal of Spine Surgery*. 2020;17(3):100-107. (In Russ) <https://doi.org/10.14531/ss2020.3.100-107>
6. Злобина О.В., Бугаева И.О., Глухова И.В., Глухова А.В., Пичхидзе С.Я. Экспериментальная модификация и исследование антибактериального хирургического шовного материала. *Сибирское медицинское обозрение*. 2023;(1):51-56. <https://doi.org/10.20333/25000136-2023-1-51-56>
- Zlobina OV, Bugaeva IO, Glukhova IV, Glukhova AV, Pichkhidze SYa. Experimental modification and investigation of antibacterial surgical suture material. *Siberian Medical Review*. 2023;(1):51-56. (In Russ) <https://doi.org/10.20333/25000136-2023-1-51-56>
7. Злобина О.В., Бугаева И.О., Глухова И.В., и др. Оценка морфологических изменений в коже при имплантации модифицированного шовного материала в эксперименте. *Сибирское медицинское обозрение*. 2023;(4):42-48. <https://doi.org/10.20333/25000136-2023-4-42-48>
- Zlobina OV, Bugaeva IO, Glukhova IV et al. Assessment of morphological changes in tissue during implantation of modified suture material in an experiment. *Siberian Medical Review*. 2023;(4):42-48. (In Russ) <https://doi.org/10.20333/25000136-2023-4-42-48>
8. Zaed I, Cardia A, Stefani R. From Reparative Surgery to Regenerative Surgery: State of the Art of Porous Hydroxyapatite in Cranio-plasty. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(10):5434. PMID: 35628245. <https://doi.org/10.3390/ijms23105434>
9. Adebayo-Tayo BC, Ogunleye GE, Ogbole O. Biomedical application of green synthesized silver nanoparticles using the filtrate of *Trichoderma viride*: Anticancer and immunomodulatory potentials. *Polimery w medycynie*. 2019;49(2):57-62. PMID: 32484611. <https://doi.org/10.17219/pim/116086>. PMID: 32484611.
10. Chazaud B. Inflammation and Skeletal Muscle Regeneration: Leave It to the Macrophages! *Trends in Immunology*. 2020;41(6):481-492. PMID: 32362490. <https://doi.org/10.1016/j.it.2020.04.006>
11. Дремина Н.Н., Трухан И.С., Шурыгина И.А. Роль системы миосателлитов в процессах мышечной репарации. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2021;(10):47-54.

Dremina NN, Trukhan IS, Shurygina IA. The role of the myo-satellite system in the processes of muscle repair. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2021;(10):47-54. (In Russ).

12. Ahmad A, Nawaz MI. Molecular mechanism of VEGF and its role in pathological angiogenesis. *Journal of Cellular Biochemistry*. 2022;123(12):1938-1965. PMID: 36788624. PMCID: PMC9926536. <https://doi.org/10.1002/jcb.30344>

13. Batan S, Kuppuswamy S, Wood M, et al. Inhibiting anti-angiogenic VEGF165b activates a miR-17-20a-Calcipressin-3 pathway that revascularizes ischemic muscle in peripheral artery disease *Communications Medicine*. 2024;4(1):3. PMID: 38182796. PMCID: PMC10770062. <https://doi.org/10.1038/s43856-023-00431-5>

14. Jacobsen NL, Morton AB, Segal SS. Angiogenesis precedes myogenesis during regeneration following biopsy injury of skeletal muscle. *Skeletal Muscle*. 2023;13(1):3. PMID: 36788624. PMCID: PMC9926536. <https://doi.org/10.1186/s13395-023-00313-3>

15. Mackey AL, Magnan M, Chazaud B, Kjaer M. Human skeletal muscle fibroblasts stimulate in vitro myogenesis and in vivo muscle regeneration. *The Journal of physiology*. 2017;595(15):5115-5127. PMID: 28369879. PMCID: PMC5538230. <https://doi.org/10.1113/JP273997>

Сведения об авторах

Злобина Ольга Вячеславовна, к. м. н., доцент, заведующая кафедрой гистологии, Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского (Саратов, Россия). <https://orcid.org/0000-0002-9506-7210>

Глухова Иулиания Вячеславовна, студент 6-го курса, Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского (Саратов, Россия). <https://orcid.org/0000-0003-4840-4744>

Глухова Анна Вячеславовна, студент 6-го курса, Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского (Саратов, Россия). <https://orcid.org/0000-0001-9945-2290>

Пичхидзе Сергей Яковлевич, д. т. н., профессор, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина (Саратов, Россия). <https://orcid.org/0000-0001-6513-9386>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author credentials

Olga V. Zlobina, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, Head of the Department of Histology, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky (Saratov, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0002-9506-7210>

Iulianiya V. Glukhova, 6th year student, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky (Saratov, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0003-4840-4744>

Anna V. Glukhova, 6th year student, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky (Saratov, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0001-9945-2290>

Sergey Ya. Pichkhidze, Dr. Sci. (Tech), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Saratov, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0001-6513-9386>

Conflict of interest: none declared.