

Научная статья

УДК 619:616.7

EDN BNHFHL

<https://doi.org/10.22450/1999-6837-2026-20-3-83-91>

**Влияние антиоксиданта ТФ-15 на структурно-функциональную характеристику опорно-двигательного аппарата лабораторных животных при экспериментальном ревматоидном артрите**

**Андрей Валентинович Сахаров<sup>1</sup>, Владлена Евгеньевна Ушкова<sup>2</sup>,  
Александр Александрович Макеев<sup>3</sup>**

<sup>1, 2, 3</sup> Новосибирский государственный педагогический университет

Новосибирская область, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> [asakharov142@yandex.ru](mailto:asakharov142@yandex.ru), <sup>2</sup> [ushkova.vladlena@mail.ru](mailto:ushkova.vladlena@mail.ru), <sup>3</sup> [9628280784@mail.ru](mailto:9628280784@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлены особенности патоморфологических изменений тканей суставного аппарата крыс при моделировании ревматоидного артрита. Уточнены морфогенетические закономерности развития воспаления и деструкции структурных элементов сустава при экспериментальном моделировании данного заболевания. Установлен дифференцированный характер реакции клеток эпителия синовиальной оболочки на повреждение – от легкой в форме гиперплазии до некроза в терминальной стадии. Показано разрушение тканей сустава с развитием паннуса, сублетальных и летальных повреждений клеток и межклеточного вещества гиалинового хряща сустава. Исследована биологическая активность нового синтетического антиоксиданта ТФ-15 (1,4-дигидрокси-2-[(додецилсульфанил)метил]бензол) в отношении защиты тканей сустава при воспроизведении аутоиммунного воспаления у лабораторных крыс. На основании отсутствия выраженных признаков синовита и некроза гиалинового хряща установлен хондропротекторный эффект данного антиоксидантного соединения. Результаты исследований обосновывают эффективность и необходимость применения средств антиоксидантной защиты тканей структурных элементов суставов тазовой конечности крыс при ревматоидном артрите.

**Ключевые слова:** ревматоидный артрит, модель, эксперимент, антиоксидант, сустав, синовиальная оболочка, гиалиновый хрящ

**Для цитирования:** Сахаров А. В., Ушкова В. Е., Макеев А. А. Влияние антиоксиданта ТФ-15 на структурно-функциональную характеристику опорно-двигательного аппарата лабораторных животных при экспериментальном ревматоидном артрите // Дальневосточный аграрный вестник. 2026. Том 20. № 3. С. 83–91. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2026-20-3-83-91>.

Original article

**The effect of the antioxidant TF-15 on the structural and functional characteristics of the musculoskeletal system in laboratory animals with experimental rheumatoid arthritis**

**Andrey V. Sakharov<sup>1</sup>, Vladlena E. Ushkova<sup>2</sup>, Aleksandr A. Makeev<sup>3</sup>**

<sup>1, 2, 3</sup> Novosibirsk State Pedagogical University

Novosibirsk region, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>1</sup> [asakharov142@yandex.ru](mailto:asakharov142@yandex.ru), <sup>2</sup> [ushkova.vladlena@mail.ru](mailto:ushkova.vladlena@mail.ru), <sup>3</sup> [9628280784@mail.ru](mailto:9628280784@mail.ru)

**Abstract.** The features of pathomorphological changes in the tissues of the rat articular apparatus during the modeling of rheumatoid arthritis are presented in the article. The morphogenetic patterns of the development of inflammation and destruction of the structural elements of the joint during the experimental modeling of this disease have been clarified. The differentiated nature

of the response of the synovial membrane epithelial cells to damage has been established. The destruction of the joint tissues with the development of pannus, sublethal and lethal damage to the cells and intercellular substance of the hyaline cartilage of the joint has been shown. The biological activity of a new synthetic antioxidant, TF-15 (1,4-dihydroxy-2-[(dodecylsulfanyl)methyl] benzene), has been studied in terms of protecting joint tissues during the reproduction of autoimmune inflammation in laboratory rats. Based on the absence of pronounced signs of synovitis and hyaline cartilage necrosis, the chondroprotective effect of this antioxidant compound has been established. The results obtained by the authors show the effectiveness and necessity of using antioxidant protection agents for the tissues of the structural elements of the joints of the pelvic limb of rats with rheumatoid arthritis.

**Keywords:** rheumatoid arthritis, model, experiment, antioxidant, joint, synovial membrane, hyaline cartilage

**For citation:** Sakharov A. V., Ushkova V. E., Makeev A. A. The effect of the antioxidant TF-15 on the structural and functional characteristics of the musculoskeletal system in laboratory animals with experimental rheumatoid arthritis. *Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik*. 2026;20;3:83–91. (in Russ.). <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2026-20-3-83-91>.

**Введение.** В соответствии со стратегией научно-технологического развития Российской Федерации особая роль принадлежит созданию и развитию научной базы для реализации высокопродуктивного и экологически безопасного ведения сельскохозяйственного производства, созданию безопасных и качественных продуктов питания [1, 2]. В условиях перевода молочного скотоводства на промышленную основу на многих крупных животноводческих предприятиях возросло количество болезней области дистального отдела конечностей [3, 4]. В этой связи важное значение отводится разработке теоретических основ диагностики, профилактики и лечения болезней животных. В общей структуре инфекционных и незаразных заболеваний как продуктивных, так и непродуктивных животных особое место занимают ортопедические патологии [5].

Среди множества форм заболеваний структур опорно-двигательного аппарата гнойно-некротического характера, таких как гнойные артриты копытцевого и венечного суставов, флегмоны и язвы венчика, пальцевый и межпальцевый дерматит и многие другие, за пределами внимания практикующих врачей остается группа заболеваний иной этиологии. Ревматоидный артрит представляет системное хроническое аутоиммунное воспаление суставов трубчатых костей среднего и малого калибра с прогрессирующей деструкцией гиалинового хряща эпифиза, пластинки роста и субхондральной костной ткани [6–8]. В настоящее время в лечении ревматоидного артрита достигнут определенный

прогресс. Современные методы терапии данного заболевания включают широкий спектр лекарственных средств, эффективно снижающих болевой синдром и воспаление. Однако некоторые патогенетические механизмы ревматоидного артрита остаются недостаточно изученными, что отражается на качестве лечения данной патологии. Считается, что при ревматоидном артрите клетки воспаления активно экспрессируют активные метаболиты кислорода и участвуют в деструкции клеток и межклеточного вещества соединительной ткани [9, 10]. Регуляция активности свободнорадикальных процессов в тканевых компартментах структур опорно-двигательного аппарата, как известно, осуществляется за счет активности системы антиоксидантной защиты. Принимая во внимание, что гиалиновая хрящевая ткань эпифизов суставов, метаэпифизарной пластинки роста у растущих животных не содержит кровеносных сосудов, клетки хондрогенного дифферона нетерпимы к кислороду и отличаются депрессией системы антиоксидантной защиты. В этом случае уточнение роли свободнорадикальных процессов в развитии ревматоидного воспаления, оценка эффективности управления редокс-зависимым гомеостазом в структурах суставного хряща становятся вполне понятными и логичными.

**Целью исследований** явилось экспериментальное обоснование применения средств антиоксидантной защиты гиалиновой хрящевой ткани суставов при моделировании ревматоидного артрита у лабораторных крыс.

Задачи исследования включали:

1. В экспериментах на лабораторных крысах методами морфологического анализа оценить адекватность модели коллаген-индуцированного артрита.

2. Изучить возможность применения нового антиоксиданта ТФ-15 для управления процессами воспаления и деструкции структурных элементов сустава.

**Материал и методы исследований.** Экспериментальная часть работы выполнена в двух сериях экспериментов на самцах крыс линии Вистар 6-месячного возраста. У экспериментальных животных ( $n=40$ ) моделировали коллаген-индуцированный артрит путем однократного введения нативного бычьего коллагена II типа (Sigma) в 0,1 М уксусной кислоте с неполным адьювантом Фрейнда (Difco). За основу протоколов индукции АИА/КИА взята модель из работы [11]. Раствор вводили внутрикожно в области дорсальной поверхности спины в основании хвоста (4–6) точек (по 400 мкг бычьего коллагена II типа на одно животное).

Для дальнейшего эксперимента были отобраны животные с признаками артрита, которые были разделены на две опытные группы по визуальной оценке развития воспаления – припухлость лап. Ее оценивали путем измерения штангенциркулем средней толщины обеих задних лап на 30-е сутки после моделирования артрита. Положительной реакцией считали превышение измеряемого показателя на более 10 мм.

Крыс первой опытной группы не лечили ( $n=28$ ), тогда как крысы второй опытной группы ( $n=31$ ) ежедневно в течение четырех недель перорально получали антиоксидант ТФ-15 в дозе 50 мг на 1 кг массы тела. Антиоксидант ТФ-15 (1,4-дигидрокси-2-[(додецилсульфанил)метил]бензол) синтезирован в Научно-исследовательском институте химии антиоксидантов Новосибирского государственного педагогического университета. Данное вещество принадлежит к классу синтетических антиоксидантов, которое по физическим и химическим свойствам близко к природным многоатомным фенолам и их производным [12]. Контролем служили животные, которые содержались в стандартных условиях вивария и с ними никаких манипуляций не производилось.

На 30 сутки наблюдения крыс всех групп выводили из эксперимента под эфирным наркозом. Фрагменты задней конечности, включая таранно-берцовый сустав (*Articulatio talocruralis*), выделяли единым тканевым комплексом, фиксировали в 10-процентном растворе нейтрального формалина при температуре от нуля до 4 °С, декальцинировали в насыщенном растворе ЭДТА на боратном буфере при уровне pH = 7,2. Обезжизвотание и уплотнение материала проводили в соответствии со стандартной патоморфологической процедурой [13].

Срезы толщиной 5–10 мкм готовили на ротационном полуавтоматическом микротоме SLEE CUT 5062 (Германия). Обзорные препараты окрашивали гематоксилином Бемера и эозином. Суммарные кислые гликозаминогликаны (ГАГ) выявляли в гистохимической реакции с альциановым синим по Сиддху. Локализацию коллагена в параартикулярной ткани, межклеточном веществе гиалинового хряща и костной ткани конечности определяли при постановке реакции по Маллори.

Препараты изучали в проходящем свете с использованием комплекса оптического-структурного анализа Axio Imager.M2 с программным обеспечением для анализа изображений AxioVision Z2 M2 (CARL ZEISS, Германия).

Цифровая обработка материала осуществлялась при помощи CCD-камеры AxioCam HR с программным обеспечением Zen Lite (CARL ZEISS, Германия).

**Результаты исследований и их обсуждение.** На обзорных препаратах в параартикулярной соединительной ткани таранно-берцового сустава животных, у которых моделировали ревматоидный артрит, определяются участки фрагментации и некроза коллагеновых фибрилл, инфильтрации клетками воспаления и формирование гранул.

В тканях связочного аппарата сустава отмечается инфильтрация стромы клетками воспаления, среди которых идентифицируются нейтрофилы и лимфоциты, деструкция межклеточного вещества соединительной ткани. Характерным признаком является замещение плотной оформленной волокнистой соединительной ткани грануляционной тканью с признаками ее активной васкуляризации. В

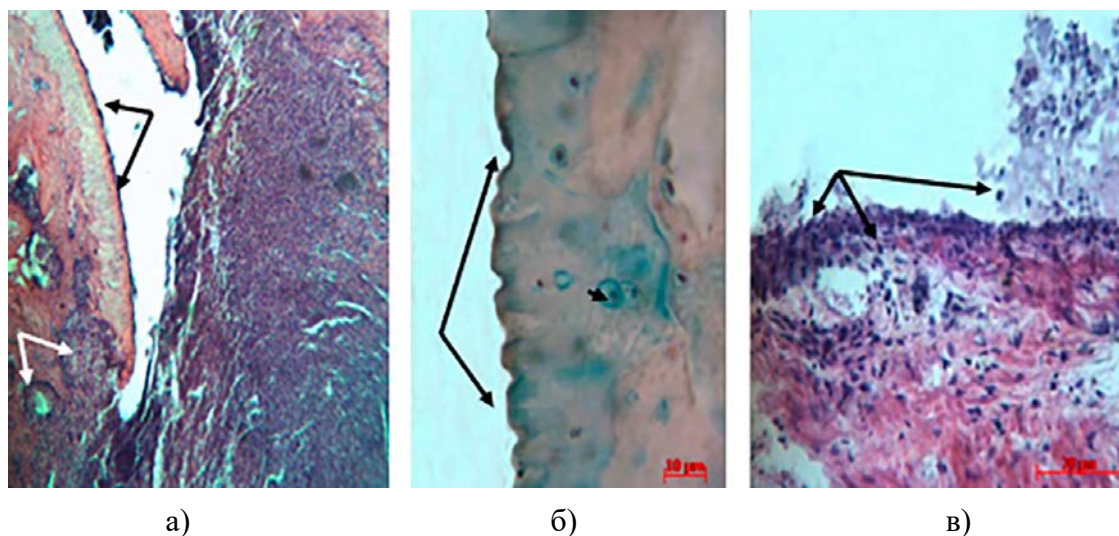
расширенных кровеносных капиллярах регистрируются признаки сладж-феномена эритроцитов, обусловленных, как считается, потерей отрицательного заряда протеогликанами надмембранного комплекса данных клеток. Среди клеток соединительной ткани перивасально определяются нейтрофилы и лимфоциты.

Активный рост грануляционной ткани, содержащей клетки воспалительного инфильтрата, приводит к формированию паннуса, который вызывает деструкцию суставного хряща и замещение костной ткани грануляционной (рис. 1, а). Деструкция суставного хряща за счет активности макрофагов и клеток воспаления приводит к нарушению конгруэнтности суставных поверхностей и формированию многочисленных узур (рис. 1, б). Хрящевая ткань суставных поверхностей характеризуется нарушением тинкториальных свойств, что проявляется в появлении обширных участков в виде секвестров, не имеющих положительной реакции на кислые ГАГ при по-

становке реакции с альциановым синим. В суставной полости определяется инфильтрат, что содержит белково-углеводный компонент и клетки воспаления (рис. 1, в).

Синовиальная оболочка во всех исследуемых образцах животных данной группы характеризуется нарушением ее структурно-функциональной организации. Типичным признаком для всех образцов является отсутствие ее ворсинчатого строения. Среди эпителиоцитов обнаруживается высокое содержание полиморфно-ядерных лейкоцитов (рис. 1, в).

У животных, которым на фоне ревматоидного артрита вводили антиоксидант ТФ-15, в дерме выявляются незначительные признаки дегенеративно-дистрофических изменений межклеточного вещества. Коллагеновые волокна сетчатого слоя дермы имеют типичную для данной ткани архитектуру – формируют крупнопетлистую сеть. Однако регистрируются признаки слабовыраженного отека коллагеновых волокон, особенно в паравасальном ком-



а) светлой стрелкой обозначен синовиальный паннус, темной – деструкция суставного хряща и формирование узур (гематоксилин и эозин, увеличение 200×); б) нарушение зональности строения суставного хряща обозначено головкой стрелки, формирование узур – темной стрелкой (окрашивание по Сиддмену); в) локализация клеток воспалительного инфильтрата в синовиальной оболочке и просвете суставной полости обозначена темной стрелкой (гематоксилин и эозин)

a) the light arrow indicates the synovial pannus, the dark arrow indicates destruction of the articular cartilage and the formation of erosions (hematoxylin and eosin, magnification 200×); б) disruption of the zonal structure of the articular cartilage is indicated by the arrowhead, the formation of erosions is indicated by the dark arrow (Stidman's stain); в) the localization of cells of the inflammatory infiltrate in the synovial membrane and the lumen of the joint cavity is indicated by a dark arrow (hematoxylin and eosin)

**Рисунок 1 – Структурные элементы берцово-таранного сустава и связочного аппарата животных первой опытной группы**  
**Figure 1 – The tarsometatarsal joint and soft tissues of the ligamentous apparatus in animals from the first experimental group**

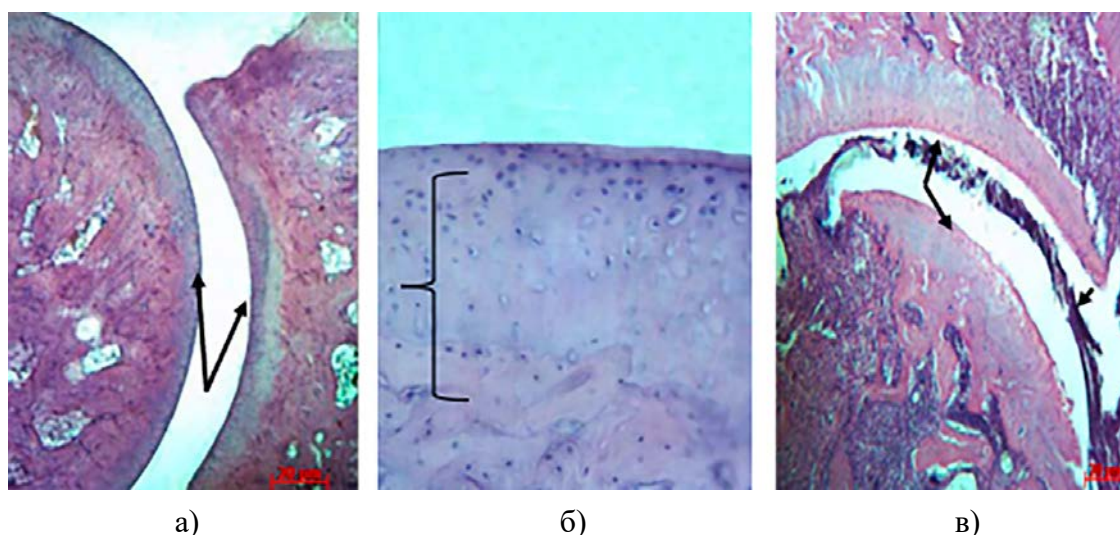
партменте. Стенки преимущественно артериол и венул дермы незначительно утолщены и имеют признаки слабовыраженного мукоидного набухания. В тканях связочного аппарата берцово-таранного сустава структура коллагеновых волокон сохраняет схожую закономерность строения.

При исследовании образцов берцово-таранного сустава крыс второй опытной группы четко определяется суставная полость и поверхности эпифизов костей (рис. 2, а). Обращает внимание, что поверхности костей конгруэнтны, гладкие, не имеют узур и трещин. В структуре суставного хряща определяется характерная для данного вида сочленения костей зональность его строения (рис. 2, б).

При постановке реакции с альциановым синим в территориальном и межтерриториальном матриксе определяется высокое содержание кислых ГАГ (рис. 3, а). Связки, соединяющие суставные поверхности, имеют особенности строения синовиальной оболочки и подлежащей соединительной ткани. Синовиальная оболочка характеризуется повышенной складчатостью (рис. 3, б). Синовиоциты равномерно

покрывают поверхность ворсин и имеют признаки гипертрофии. Как правило, это крупные клетки овальной формы с хорошо выраженным ядром и обильной умеренно базофильной цитоплазмой. При постановке реакции с альциановым синим на поверхности синовиальной оболочки, а также в цитоплазме единичных синовиоцитов обнаруживается интенсивная реакция на суммарные ГАГ. При этом в подлежащей соединительной ткани синовиальной оболочки отсутствуют признаки воспаления, но имеются признаки слабовыраженной дистрофии межклеточного вещества. На отдельных участках синовиальная оболочка лишена синовиоцитов и ее поверхность имеет признаки локального склероза (рис. 3, в).

На участке взаимодействия Шарпеевых волокон и суставной поверхности коллагеновые волокна образуют плотные пучки, которые интегрируют с хрящевой тканью. При этом выраженной деструкции клеток и межклеточного вещества соединительной ткани в данном компартменте не отмечается. В мягких тканях, окружающих связочный аппарат таранно-берцово-

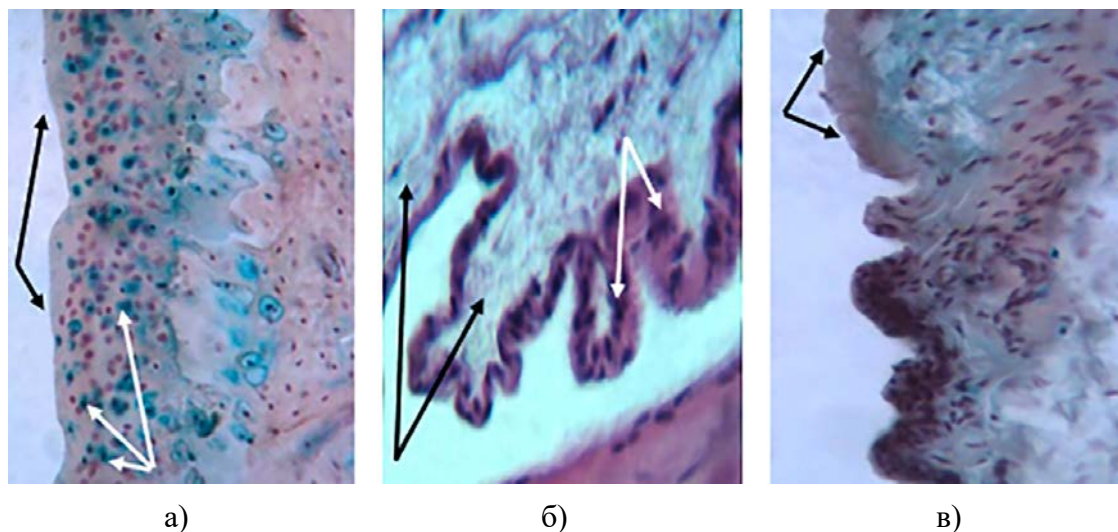


а) сохранение конгруэнтности сустава; б) зональность строения суставного хряща обозначена скобкой (увеличение 400×); в) клетки воспаления в просвете сустава обозначены головкой стрелки, темной стрелкой показана деструкция суставного хряща (гематоксилин-эозин)

a) preservation of joint congruency; б) the zonal structure of the articular cartilage is indicated by a bracket (magnification 400×); в) inflammatory cells in the joint cavity are indicated by the arrowhead, the dark arrow indicates destruction of the articular cartilage (hematoxylin and eosin stain)

**Рисунок 2 – Структурные элементы берцово-таранного сустава и связочного аппарата животных второй опытной группы (а, б) и первой опытной группы (в)**

**Figure 2 – The tarsometatarsal joint and soft tissues in animals from the second experimental group (а, б) and the first experimental group (в)**



а) гиалиновый хрящ суставной поверхности; светлая стрелка – синтетически активные хондроциты суставного хряща (окрашивание по Сиддмену, увеличение 200×); б, в) синовиальная оболочка сустава; темной стрелкой обозначена строма синовиальной оболочки, светлой – гипертрофия клеток эпителия синовиальной оболочки (гематоксилин и эозин, увеличение 400×); головкой стрелки обозначен склероз ворсин синовиальной оболочки (окрашивание по Сиддмену, увеличение 400×)

a) hyaline cartilage of the articular surface; light arrow – synthetically active chondrocytes in the cells of the articular cartilage (Stidman's stain, magnification 200×); б, в) synovial membrane of the joint; the dark arrow indicates the stroma of the synovial membrane; the light arrow indicates the epithelium (hematoxylin and eosin, magnification 400×); the arrowhead indicates sclerosis of the synovial villi (Stidman's stain, magnification 400×)

**Рисунок 3 – Структурные элементы таранно-берцового сустава животных второй опытной группы**

**Figure 3 – Structural elements of the tarsal-tibial joint in animals from the second experimental group**

вого сустава, структура коллагеновых волокон сохраняет схожую закономерность ее строения (рис 3, а). Однако мукоидное набухание коллагеновых волокон стенки кровеносных сосудов крупного калибра и эндотелия является установленной закономерностью и типичным признаком их строения в данном тканевом компартменте.

**Закключение.** 1. Воспроизведенная на лабораторных крысах модель коллаген-индуцированного артрита является адекватной, отражает развитие основных морфогенетических закономерностей моделируемого заболевания через воспаление и деструкцию структурных элементов сустава. Морфологическим отражением указанных процессов является инфильтрация лейкоцитов в параартикулярное тканевое пространство и суставную полость, гиперплазия или в терминальной стадии некроз клеток эпителия синовиальной оболочки, разрушение тканей сустава с развитием паннуса, развитие сублетальных и летальных повреждений клеток и

межклеточного вещества гиалинового хряща сустава.

2. В исследуемых образцах опорно-двигательного аппарата крыс при моделировании коллаген-индуцированного артрита и использовании антиоксиданта ТФ-15 закономерным выступает очаговая гипертрофия синовиальной оболочки в сочетании с редкими локальными участками ее реактивных склеротических изменений, отсутствие признаков синовита и некроза гиалинового хряща.

Результаты работы позволяют сделать вполне обоснованное заключение, что среди многих молекулярно-генетических механизмов развития воспаления, обусловленных действием медиаторов, цитокинов, иммунных комплексов и других специфических белков, высокая роль принадлежит системе антиоксидантной защиты. Это особенно актуально для бессосудистых тканей, в данном случае гиалиновой хрящевой ткани. Особенности метаболизма хондроцитов, связанные с

низким уровнем использования данными клетками кислорода, обуславливают эволюционно закрепившийся низкий уровень экспрессии ими ферментативных и неферментативных антиоксидантов.

Именно это обстоятельство делает настоящим поиском эффективных природных и синтетических антиоксидантных соединений, обеспечивающих регуляцию редокс-гомеостаза в тканевых компартментах сустава. В контексте про-

веденного исследования становится понятным, что при проведении ортопедической диспансеризации продуктивных или непродуктивных животных и выявлении по клинико-морфологическим признакам патологий опорно-двигательного аппарата, соответствующим ревматоидному артриту, применение средств антиоксидантной защиты является одним из эффективных подходов к защите структурных элементов суставов.

### Список источников

1. Ушачев И. Г., Маслова В. В., Колесников А. В. Наращивание объемов агропромышленного производства для обеспечения продовольственной безопасности и увеличения экспортного потенциала АПК России // Экономика региона. 2022. Т. 18. № 4. С. 1178–1193. doi: 10.17059/ekon.reg.2022-4-15. EDN VIABUO.
2. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации : указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003> (дата обращения: 16.07.2026).
3. Концевая С. Ю., Нефедов А. М., Луцай В. И., Лавров С. И., Пекуровский Д. А. Оценка степени хромоты у коров // Аграрная наука. 2021. № 354 (11–12). С. 43–45. doi: 10.32634/0869-8155-2021-354-11-12-43-45. EDN IUDOEА.
4. Комаров В. Ю. Хромота у коров // Вестник аграрной науки. 2021. № 6 (93). С. 25–31. doi: 10.17238/issn2587-666X.2021.6.25. EDN OVKYXP.
5. Качалин М. Д. Клинико-экспериментальное обоснование и внедрение современных методов моделирования и коррекции ортопедических патологий у животных : дис. ... докт. ветеринар. наук. М., 2023. 283 с.
6. Weyand C. M., Goronzy J. J. The immunology of rheumatoid arthritis // Nature Immunology. 2021. Vol. 22. P. 10–18. doi: 10.1038/s41590-020-00816-x.
7. Скупневский С. В., Пухаева Е. Г., Бадтиев А. К., Руруа Ф. К., Батагова Ф. Э., Фарниева Ж. Г. Роль метаболического статуса лимфоцитов в патогенезе ревматоидного артрита // Современная ревматология. 2021. Т. 15. № 5. С. 26–32. doi: 10.14412/1996-7012-2021-5-26-32. EDN DJMQYB.
8. Ouyang Z., Dong L., Yao F. Cartilage-related collagens in osteoarthritis and rheumatoid arthritis: from pathogenesis to therapeutics // International Journal of Molecular Sciences. 2023. Vol. 24. No. 12. Art. 9841. doi: 10.3390/ijms24129841.
9. Рыкунова А. Я., Зверев Я. Ф. Современные представления о патогенезе ревматоидного артрита // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 2024. Т. 68. № 4. С. 59–70. doi: 10.48612/pfiet/0031-2991.2024.04.59-70. EDN VUPPWX.
10. Kaur G., Sharma A., Bhatnagar A. Role of oxidative stress in pathophysiology of rheumatoid arthritis: insights into NRF2–KEAP1 signalling // Autoimmunity. 2021. Vol. 54. No. 7. P. 385–397. doi: 10.1080/08916934.2021.1963959.
11. Baddack U., Hartmann S., Bang H. A chronic model of arthritis supported by a strain-specific periarticular lymph node in BALB/c mice // Nature Communications. 2013. Vol. 4. Art. 1644. doi: 10.1038/ncomms2625.
12. Емельянова И. А., Ягунов С. Е., Хольшин С. В., Кандалинцева Н. В., Просенко О. И. Синтез и антиоксидантные свойства (додecilсульфанил)метильных производных гидрохинона // Известия Академии наук. Серия химическая. 2022. Т. 71. № 10. С. 2199–2206. EDN GZZDYN.
13. Макалиш Т. П., Головкин И. О., Маслова Г. В. Особенности ремоделирования костной ткани при применении антисмысловых олигонуклеотидов в модели ревматоидного артрита // Вестник современной клинической медицины. 2024. Т. 17. Вып. 6. С. 146–153. doi: 10.20969/VSKM.2024.17(6).146-153. EDN JJJFIA.

## References

1. Ushachev I. G., Maslova V. V., Kolesnikov A. V. Increasing agricultural production to ensure food security and boost the export potential of Russia's agro-industrial complex. *Ekonomika regiona*, 2022;18;4:1178–1193. doi: 10.17059/ekon.reg.2022-4-15. EDN VIABUO (in Russ.).
2. Strategy of scientific and technological development of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation No. 145 of February 28, 2024. *Publication.pravo.gov.ru* Retrieved from <https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003> (Accessed 16 July 2026) (in Russ.).
3. Kontsevaya S. Yu., Nefedov A. M., Lutsai V. I., Lavrov S. I., Pekurovsky D. A. Assessment of lameness in cows. *Agrarnaya nauka*, 2021;354(11–12):43–45. doi: 10.32634/0869-8155-2021-354-11-12-43-45. EDN IUOEAE (in Russ.).
4. Komarov V. Yu. Lameness in cows. *Vestnik agrarnoi nauki*, 2021;6(93):25–31. doi: 10.17238/issn2587-666X.2021.6.25. EDN OVXYXP (in Russ.).
5. Kachalin M. D. Clinical and experimental justification and implementation of modern methods for modeling and correcting orthopedic pathologies in animals. *Doctor's thesis*. Moscow, 2023, 283 p. (in Russ.).
6. Weyand C. M., Goronzy J. J. The immunology of rheumatoid arthritis. *Nature Immunology*, 2021;22:10–18. doi: 10.1038/s41590-020-00816-x.
7. Skupnevsky S. V., Pukhaeva E. G., Badtiev A. K., Rurua F. K., Batagova F. E., Farnieva Zh. G. The role of the metabolic status of lymphocytes in the pathogenesis of rheumatoid arthritis. *Sovremennaya revmatologiya*, 2021;15;5:26–32. doi: 10.14412/1996-7012-2021-5-26-32. EDN DJMQYB (in Russ.).
8. Ouyang Z., Dong L., Yao F. Cartilage-related collagens in osteoarthritis and rheumatoid arthritis: from pathogenesis to therapeutics. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023;24;12:9841. doi: 10.3390/ijms24129841.
9. Rykunova A. Ya., Zverev Ya. F. Current concepts on the pathogenesis of rheumatoid arthritis. *Patologicheskaya fiziologiya i eksperimental'naya terapiya*, 2024;68;4:59–70. doi: 10.48612/pfiet/0031-2991.2024.04.59-70. EDN VUPPWX (in Russ.).
10. Kaur G., Sharma A., Bhatnagar A. Role of oxidative stress in pathophysiology of rheumatoid arthritis: insights into NRF2–KEAP1 signalling. *Autoimmunity*, 2021;54;7:385–397. doi: 10.1080/08916934.2021.1963959.
11. Baddack U., Hartmann S., Bang H. A chronic model of arthritis supported by a strain-specific periarticular lymph node in BALB/c mice. *Nature Communications*, 2013;4:1644. doi: 10.1038/ncomms2625.
12. Emelyanova I. A., Yagunov S. E., Holshin S. V., Kandalintseva N. V., Prosenko O. I. Synthesis and antioxidant properties (dodecyl sulfanyl)methyl derivatives of hydroquinone. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya khimicheskaya*, 2022;71;10:2199–2206. EDN GZZDYN (in Russ.).
13. Makalish T. P., Golovkin I. O., Maslova G. V. Features of bone remodeling with the use of antisense oligonucleotides in a model of rheumatoid arthritis. *Vestnik sovremennoi klinicheskoi meditsiny*, 2024;17;6:146–153. doi: 10.20969/VSKM.2024.17(6).146-153. EDN JJFIA (in Russ.).

© Сахаров А. В., Ушкова В. Е., Макеев А. А., 2026

Статья поступила в редакцию 21.07.2026; одобрена после рецензирования 05.09.2026; принята к публикации 08.09.2026.

The article was submitted 21.07.2026; approved after reviewing 05.09.2026; accepted for publication 08.09.2026.

**Информация об авторах**

**Сахаров Андрей Валентинович**, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой биологии и экологии, Новосибирский государственный педагогический университет, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5076-2113>, [asakharov142@yandex.ru](mailto:asakharov142@yandex.ru);

**Ушкова Владлена Евгеньевна**, старший преподаватель кафедры биологии и экологии, Новосибирский государственный педагогический университет, Author ID: 1347278, [ushkova.vladlena@mail.ru](mailto:ushkova.vladlena@mail.ru);

**Макеев Александр Александрович**, кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии и экологии, Новосибирский государственный педагогический университет, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1636-1859>, [9628280784@mail.ru](mailto:9628280784@mail.ru)

**Information about authors**

**Andrey V. Sakharov**, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Biology and Ecology, Novosibirsk State Pedagogical University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5076-2113>, [asakharov142@yandex.ru](mailto:asakharov142@yandex.ru);

**Vladlena E. Ushkova**, Senior Lecturer of the Department of Biology and Ecology, Novosibirsk State Pedagogical University, Author ID: 1347278, [ushkova.vladlena@mail.ru](mailto:ushkova.vladlena@mail.ru);

**Aleksandr A. Makeev**, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Ecology, Novosibirsk State Pedagogical University, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1636-1859>, [9628280784@mail.ru](mailto:9628280784@mail.ru)

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
**The authors declare no conflicts of interests.**