

DOI: <https://doi.org/10.17816/KMJ675775> EDN: EVNMXB

Локальная криотерапия в травматологии и ортопедии: обзор современных подходов и перспектив клинического применения

А.В. Пушкарёв^{1,2}, Н.Ю. Саакян¹, А.В. Шакуров¹, Е.Г. Бычков¹, А.В. Буторина^{1,3}¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия;² Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, г. Москва, Россия;³ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Локальная криотерапия — метод лечения травм, заболеваний костно-мышечной системы и соединительной ткани, а также реабилитации после хирургических вмешательств. С появлением новых технологий — бесконтактного воздействия охлаждёнными газами, дополнительной компрессии и контроля температуры кожи — повысилась эффективность криопроцедур и расширились возможности метода. Однако совершенствование протоколов лечения, определение оптимальных параметров воздействия остаются актуальными задачами. Нами проведён анализ публикаций по применению локальной криотерапии в травматологии и ортопедии для систематизации подходов в клинической практике и определения ключевых принципов развития метода. Представлены результаты анализа исследований различных методов локальной криотерапии, включая применение при заболеваниях опорно-двигательного аппарата, реабилитации после операций на суставах, спортивных травмах и повреждениях костной ткани с акцентом на механизмы действия, факторы, влияющие на эффективность и безопасность использования. Рассмотрены ключевые терапевтические эффекты локальной криотерапии: снижение воспаления, уменьшение болевого синдрома, ускорение функционального восстановления суставов и сокращение потребности в анальгетиках. Перспективным, но пока недостаточно подтверждённым направлением является применение локальной криотерапии для ускорения заживления костной ткани. На данный момент доказательства эффективности в основном получены в доклинических исследованиях на животных моделях. Для подтверждения применимости и безопасности данной методики в клинической практике требуются дополнительные исследования, направленные на оптимизацию параметров воздействия и оценку безопасности, а также необходимы дальнейшие рандомизированные исследования на людях. Установлено, что локальная криотерапия обладает потенциалом в лечении заболеваний и реабилитации после получения травм опорно-двигательного аппарата, но требует дальнейшего изучения для оптимизации режимов проведения в зависимости от области охлаждения и патологии. Необходимы дальнейшие исследования для разработки персонализированных протоколов применения локальной криотерапии с учётом индивидуальных особенностей пациентов, задач терапии и характера патологии.

Ключевые слова: локальная криотерапия; травматология; ортопедия; реабилитация; заболевания суставов; спортивные травмы; костная ткань.

Как цитировать:

Пушкарёв А.В., Саакян Н.Ю., Шакуров А.В., Бычков Е.Г., Буторина А.В. Локальная криотерапия в травматологии и ортопедии: обзор современных подходов и перспектив клинического применения // Казанский медицинский журнал. 2025. Т. 106, № 3. С. 432–445. DOI: 10.17816/KMJ675775 EDN: EVNMXB

DOI: <https://doi.org/10.17816/KMJ675775> EDN: EVNMXB

Local Cryotherapy in Traumatology and Orthopedics: A Review of Current Approaches and Potential Clinical Use

Aleksandr V. Pushkarev^{1,2}, Natalia Y. Saakyan¹, Alexey V. Shakurov¹,
Evgeny G. Bychkov¹, Antonina V. Butorina^{1,3}

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

² Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia;

³ The Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia

ABSTRACT

Local cryotherapy is a treatment method used for injuries, musculoskeletal diseases, connective tissue diseases, and post-surgical rehabilitation. Novel technologies such as non-contact cooling with cold gases, augmented compression, and skin temperature regulation, have improved the effectiveness of cryotherapy and expanded its applications. However, it is still important to improve treatment protocols and determine optimal exposure parameters. Therefore, publications on the use of local cryotherapy in traumatology and orthopedics were reviewed to systematize clinical practice approaches and determine the key principles for the development of the treatment option. This article reviews studies on various local cryotherapy options used to treat musculoskeletal diseases and to rehabilitate patients after joint surgery, sport-related injuries, and bone tissue damage. It describes the mechanisms of action and the factors that influence the treatment effectiveness and safety. Local cryotherapy offers several therapeutic benefits, including reduced inflammation and pain, faster recovery of joint function, and reduced need for analgesics. Although more research is needed to confirm its effectiveness, local cryotherapy shows promise as a treatment for bone tissue healing. Most of the current evidence of effectiveness has been obtained from preclinical studies in animal models. Additional studies are required to confirm the applicability and safety of this treatment option in clinical practice. These studies should aim to optimize treatment parameters and evaluate treatment safety. Further randomized studies in humans are also needed. Local cryotherapy has been shown to effectively treat musculoskeletal diseases and rehabilitate musculoskeletal injuries. However, more research is needed to optimize treatment regimens based on the location of the injury and the area of cooling. Further research is needed to develop personalized, local cryotherapy protocols that consider patient characteristics, therapy goals, and the nature of the disease.

Keywords: local cryotherapy; traumatology; orthopedics; rehabilitation; joint diseases; sport-related injuries; bone tissue.

To cite this article:

Pushkarev AV, Saakyan NYu, Shakurov AV, Bychkov EG, Butorina AV. Local cryotherapy in traumatology and orthopedics: a review of current approaches and potential clinical use. *Kazan Medical Journal*. 2025;106(3):432–445. DOI: 10.17816/KMJ675775 EDN: EVNMXB

АКТУАЛЬНОСТЬ

Локальная криотерапия (ЛКТ) — физиотерапевтический метод лечения воспалительных процессов, травм, заболеваний костно-мышечной системы и соединительной ткани, реабилитации после хирургических вмешательств. Метод основан на кратковременном воздействии низких температур на участки тела с целью достижения терапевтических эффектов [1].

В основе механизма действия ЛКТ лежит комплекс физиологических реакций, возникающих в ответ на воздействие холода [2–4]. К ним относятся:

- вазоконстрикция — сужение кровеносных сосудов в области воздействия, приводящее к уменьшению кровотока и снижению воспалительного процесса [5];
- анальгезия — снижение болевой чувствительности за счёт замедления проведения нервных импульсов и высвобождения эндорфинов [6];
- противовоспалительное действие — уменьшение выработки медиаторов воспаления, таких как простагландины и цитокины [7, 8];
- миорелаксация — снижение мышечного спазма и напряжения [4].

С появлением новых технологий — бесконтактного воздействия охлаждёнными газами, дополнительной компрессии и контроля температуры кожи — повысилась эффективность криопроцедур и расширились возможности метода. Однако совершенствование протоколов лечения остаётся актуальной проблемой [6, 9, 10].

Одним из ключевых аспектов ЛКТ является выбор режима его выполнения, который должен обеспечивать терапевтический эффект при минимальном риске побочных реакций. Это основано на стимулирующем воздействии умеренных доз стрессоров, недостаточных для нанесения вреда организму и реализуется через контролируемые воздействия, позволяющие безопасно достичь терапевтического эффекта [11].

Цель работы — анализ современных публикаций по применению ЛКТ в травматологии и ортопедии для систематизации представлений об имеющихся подходах в клинической практике и основных трендах развития применения данного метода.

Новизна исследования заключается в систематическом анализе современных клинических подходов к ЛКТ и механизмов их воздействия на основании данных международной практики и научных публикаций. Полученные результаты позволят обосновать перспективные направления разработки оптимизированных протоколов.

ЛЕЧЕНИЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ СУСТАВОВ

Заболевания суставов сопровождаются поражением синовиальной оболочки, суставного хряща, связок, сухожилий и костной ткани [12]. ЛКТ применяется для уменьшения воспаления, снятия болевого синдрома, улучшения

функционального состояния суставов и уменьшения приёма анальгетика [13–15]. В табл. 1 представлены ключевые моменты клинических исследований при лечении таких заболеваний, как остеоартрит коленного сустава [13, 14], остеоартроз тазобедренного и коленного суставов [6, 15], ревматоидный артрит коленного сустава [16] и кистей рук [17], энтезит нижних конечностей при спондилоартрите [18], а также тендинит вращательной манжеты плеча [19], локтевого сустава [20] и ахиллова сухожилия [21].

Исследования показали, что применение ЛКТ при заболеваниях суставов способствует выраженному снижению боли, улучшению функции и уменьшению потребности в анальгетиках. Независимо от применяемого метода (контактного или бесконтактного), положительные эффекты отмечаются как после однократного воздействия, так и после курсов лечения. Наиболее устойчивый результат достигается при курсовом применении (6–24 сеанса) с длительностью процедур от 20 до 90 мин, что подтверждено рядом клинических работ [6, 13–19].

Однократное применение ЛКТ приводит к быстрому снижению болевых ощущений и временному улучшению функционального состояния суставов [17]. Независимо от метода эффект длится до 3 ч, причём чем ниже температура, тем быстрее достигается обезболивание [6]. Холод оказывает воздействие на нервные окончания, снижая их возбудимость и замедляя передачу болевых импульсов [22]. Кроме того, вазоконстрикция уменьшает кровоток и секрецию медиаторов воспаления, способствуя снижению отёка и боли [5, 22].

Проведение ЛКТ курсами способствует достижению длительной ремиссии. Зафиксировано снижение интенсивности боли и ремиссия синовита на 3 мес после контактной аппаратной ЛКТ продолжительностью 30–90 мин. У пациентов, проходивших 90-минутные процедуры, частота рецидивов через год была значительно ниже [13]. Это может быть связано с более глубоким охлаждением тканей в зоне поражения, что усиливает терапевтический эффект [23]. Н.А. Mohammed Sadiq и соавт. выявили достоверно более выраженное снижение болевого синдрома и улучшение функциональных показателей суставов в группе ЛКТ (8 нед, 3 сеанса в неделю) при оценке через 2–3 мес по сравнению с контрольной группой [14].

В ряде исследований ЛКТ применялась в комплексе с другими методами физиотерапии и лечебной физкультурой [14, 18, 19]. В этих случаях снижение болевого синдрома, достигнутое благодаря ЛКТ, позволяло пациентам выполнять более активные движения во время лечебной физкультуры, что, в свою очередь, способствовало ускорению восстановления [14, 18, 19]. Таким образом, терапевтический эффект не может быть однозначно отнесён исключительно к ЛКТ, поскольку он обусловлен совокупным воздействием нескольких методов.

Кроме того, исследования, проведённые W. Douzi и соавт., были направлены на изучение изменений состава синовиальной жидкости коленного сустава у пациентов

Таблица 1. Клинические исследования по применению локальной криотерапии при заболевании суставов**Table 1.** Clinical studies on the use of local cryotherapy in joint diseases

Заболевание (область)	Пациенты (n)	Метод ЛКТ/ доп. лечение	Количество сеансов/время воздействия	Зона/режим	Результаты	Источник
ОА коленного сустава	30	Циркулирующая (АГТ-01, Крио-ТехноМед) + диклофенак	1×10/30 мин	Верхний заворот коленного сустава/ снижение t в тканях сустава за 15 мин с 32 до 14 °С, далее поддержание t	В течение 3 мес после ЛКТ — снижение боли при движении и в покое, отсутствие симптомов синовита (100% ремиссия в трёх группах), сопоставимо с внутрисуставными ГКС. После 3 мес — рост синовита. Минимум рецидивов (13%) у группы с 90 мин воздействия к концу года	[13]
	30		1×10 дней/ 60 мин			
	30		1×10 дней/ 90 мин			
	18	Гелевый пакет (48×15×0,5 см) + ЛФК	3×8 нед/ 20 мин	Вокруг сустава/ нач. t –18 °С	Уменьшение боли и увеличение функции через 2 и 3 мес по сравнению с группами без ЛКТ	[14]
ОА тазобедренного сустава	20	Азотная криотерапия + кинезиотерапия	1×10 дней/ 3 мин	Бедра/t –150 °С	Статистически значимое уменьшение боли после криотерапии. Наибольший эффект — в группе ЛКТ (по сравнению с общей криотерапией); обезболивающее и функциональное действие	[15]
ОА коленного и тазобедренного сустава	30	Пакеты со льдом	1×12 дней/ 20–25 мин	Колено или грушевидная мышца и боковая область бедра/ нач. t –12..14 °С	Все способы ЛКТ положительно влияли на течение заболевания. Отказ от лечения: 6% (непереносимость холода), 16% (диклофенак — ЖКТ побочные эффекты). В группе крио-СМТ — флебит. Купирование боли: 3 ч. До купирования у диклофенака — 3 ч, для других принято равной времени процедуры	[6]
	30	Ледяной компресс + СМТ-терапии (одно-временно)	1×12 дней/ 10–12 мин			
	30	Воздушная	1×12 дней/ 4–6 мин	Те же зоны/ на расстоянии 3–4 см, на 1 дм ² кожи — 0,5–1 мин. 3–4 поля, скорость 1370–1550 л/мин, t –30 °С		
	30	Гипербарическая терапия CO ₂	1×12 дней/ 45–75 с	Те же зоны/ 5–6 см, лабильно по 15–16 с на поле, 3–4 поля, t –78 °С		
РА коленного сустава	1	Пакеты со льдом	1/30 мин	t 0 °С, перерыв 15 мин	Положительный эффект на боль и функцию колена после однократного воздействия	[16]
РА руки	15	Воздушная (Cryo 6)	1/10 мин	Тыльная и ладонная стороны/t –30 °С, по 5 мин с каждой стороны	Значительное и немедленное снижение боли и увеличение силы хвата в течение 1 ч ЛКТ без существенной разницы от способа. Временное обезболивание без снижения активности заболевания	[17]
	15	Массаж льдом	1/10 мин	Те же зоны/t 0 °С, по 5 мин с каждой стороны		
Энтезит стопы при спондилоартрите	1	Компрессионная (Cryotool) + ЛФК	2×5 нед/ 20 мин	Левая стопа/лёгкая компрессия	Положительное влияние ЛКТ в комплексе с ЛФК. Может быть альтернативой местному/системному лечению при длительном применении	[18]

Продолжение таблицы 1.

Тендинит (вращательная манжета плеча)	21	Пакеты со льдом + кинезиотейпирование, ЛФК	5×3 дня/20 мин	t 0 °С	Кинезиотейпирование и криотерапия эффективны в комбинации с домашними упражнениями	[19]
Тендинит (эпикондилит локтевого сустава)	28	Азотная (Kriopol R)	1/3 мин	Латеральный надмыщелок и предплечье/10 см, лабильно, t –160 °С	Немедленное уменьшение боли, улучшение безболезненности захвата, повышение мышечного возбуждения	[20]
Тендинит (ахиллово сухожилие)	30	Компрессионная (KoldBlue)	1/30 мин	Средняя часть сухожилия/прерывисто: 3×10 мин с перерывами по 10 мин, t 0 °С	Снижение капиллярного кровотока, восстановление насыщения кислородом через 2 мин после согревания, снижение венозного давления — улучшение микроциркуляции	[21]

Примечание. ОА — остеоартрит; РА — ревматоидный артрит; ЛКТ — локальная криотерапия; ЛФК — лечебная физкультура; СМТ — синусоидальные модулированные токи; ГКС — глюкокортикоиды; t — температура; CO₂ — углекислый газ.

с артритом после применения ЛКТ. Полученные данные показали, что использование криопакетов приводит к статистически значимому снижению концентрации воспалительных маркеров (IL-6, IL-1 β и VEGF), что подтверждает наличие выраженного противовоспалительного действия ЛКТ [7, 8].

Кроме того, в ряде систематических обзоров [24, 25] проанализирована эффективность крио- и термотерапии при остеоартрите и ревматоидном артрите. Показано, что ЛКТ помогает снижать острую боль и воспаление, уменьшая уровни провоспалительных цитокинов (IL-6, IL-1 β , TNF- α), особенно при использовании температур ниже 10 °С. Термотерапия, напротив, улучшает кровообращение и способствует восстановлению тканей, что делает её более подходящей для контроля хронической боли и улучшения функции суставов. Yu. Yao и соавт. [24] отмечают, что криотерапия демонстрирует более высокую эффективность в острой воспалительной фазе, в то время как термотерапия предпочтительна для лечения хронического болевого синдрома и восстановления суставной функции. L. Brosseau и соавт. [25] установили, что массаж льдом обеспечивает более выраженное уменьшение отечности при остеоартрите по сравнению с термотерапией.

Таким образом, ЛКТ является важным компонентом комплексного лечения заболеваний суставов, демонстрируя потенциал в облегчении симптомов и улучшении функционального состояния [6, 13–21]. Исследование, проведенное В.П. Терешенковым и соавт., указывает на то, что длительное воздействие ЛКТ (от 30 до 90 мин) при температуре от 0 до 10 °С может быть более эффективным [13]. Кроме того, данные другого исследования, выполненного К. Knobloch и соавт., свидетельствуют о возможном преимуществе прерывистой криотерапии по сравнению с непрерывной, что требует дальнейшего изучения для определения оптимальных режимов применения [21].

Эффективность ЛКТ при длительном или прерывистом воздействии может быть связана с более глубоким

охлаждением внутренних биотканей и воздействием на локализацию воспалительного процесса [23]. Тем не менее существенным ограничением рассмотренных работ является гетерогенность используемых методов ЛКТ и протоколов, что не позволяет провести сравнительный анализ и установить зависимость между параметрами охлаждения и клиническими исходами (см. табл. 1). Следовательно, для определения оптимальных режимов воздействия, длительности курсов и разработки научно обоснованных протоколов реабилитации с применением ЛКТ необходимы дальнейшие перспективные исследования с четко определёнными критериями включения и стандартизированными методами оценки эффективности.

ПРЕДОПЕРАЦИОННАЯ И ПОСЛЕОПЕРАЦИОННАЯ РЕАБИЛИТАЦИЯ

Результаты анализа клинических исследований, посвящённых применению ЛКТ в период реабилитации после различных операций на суставах представлены в табл. 2. Основными целями назначения ЛКТ являлись снижение послеоперационной боли, уменьшение объёма принимаемых анальгетиков и ускорение функционального восстановления [26, 27]. В частности, были рассмотрены случаи применения ЛКТ после тотального эндопротезирования коленного сустава (ТКА) [26–31], реконструкции передней крестообразной связки (ПКС) [9, 32], частичной менискоэктомии [33] и операций на плечевом суставе [34]. В рассмотренных исследованиях применялись различные контактные способы ЛКТ, включая циркулирующие (с компрессией и без), а также гелевые пакеты и пакеты со льдом. Лечение, как правило, начиналось в период пребывания пациента в стационаре и проводилось с перерывами от 20 до 120 мин в течение дня и длительным ночным перерывом [9, 27, 29, 31, 32, 34], либо назначалось в виде

Таблица 2. Клинические исследования по применению локальной криотерапии в период реабилитации после операции на суставах
Table 2. Clinical studies on local cryotherapy used for rehabilitation after joint surgery

Операция/область	Пациенты (n)	Способ ЛКТ/доп. лечение	Количество сеансов/время воздействия	Зона/режим	Результат	Источник
ТКА (с 1-го дня операции)/коленный сустав	193	Компрессионная (Zamar Therapy Cube)/физиотерапия, анальгетик	4×3 дня/2 ч	Колено/ t 10 °C	Снижение боли и потребности в анальгетиках, ускоренное восстановление функций	[26]
	30	Гелевые пакеты/CPM, анальгетик	1 день — 20 мин × перерывы 30 мин; далее — неконтролируемо	Колено/нач. t –18°C, замена пакета каждые 4 ч	Снижение анальгезии по требованию. Боль <2 баллов по ВАШ. Большее сгибание (98 против 91°), меньший отёк	[27]
	30		Со 2 дня после операции — неконтролируемо			
	52	Компрессионная (бандаж U-sport)/анальгетик	5 раз в день/20 мин	Колено/нач. t –18°C	—	[28]
	100	Циркулирующая (Evercryo)/транексамовая кислота, анальгетик	7 дней после операции/90 мин каждые 120 мин	Колено/t 0 °C, лёд каждые 4 ч	Улучшение функции, снижение боли, отёка, кровопотери, p-LOS без увеличения серьёзных осложнений. Боль и отёк колена были одинаковыми в группах криотерапии независимо от инъекции транексамовой кислоты	[29]
	100	Компрессионная/витамин D	4×7 дней/30 мин	Колено/t 0 °C	Краткосрочные улучшения; витамин D усиливает эффекты через 1 и 3 мес	[30]
	36	Гелевые пакеты (Nexcare™)/анальгетик	Непрерывно	Передняя часть коленного сустава до середины надколенника/нач. t –17°C, смена через 6 ч	Лучший эффект по снижению боли через 8 ч. Наибольшее уменьшение отёка — при циркуляции через 72 ч	[31]
	36	Циркулирующая (Aircast®)/анальгетик		То же/t 0°C, смена через 6 ч		
Реконструкция ПКС (с 1-го дня операции)/коленный сустав	360	Компрессионная прерывистая (CryoNov®)/нефопам внутрь, анальгетик	5 дней, ночь — перерыв/30 мин вкл. — 30 мин выкл.	Бандаж/t 0 °C, низкая компрессия	В группе прерывистой компрессии — быстрое снижение боли по ВАШ в день операции и на 3-й день. ЛКТ привела к более быстрому восстановлению уровня боли, чем в контрольной группе	[9]
	418	Компрессионная статическая (Igloo®)/нефопам в/в, анальгетик	5 дней, ночь — перерыв/30 мин — перерыв 2 ч			
	8	Гелевые пакеты (370×290 мм)	12 ч/20 мин — перерыв 100 мин	Нач. t –12,2±1,5 °C	Контролируемая ЛКТ приводит к более эффективному охлаждению внутренних тканей и соизмеримому охлаждению поверхности кожи в сравнении с гелевыми пакетами. Поддержание температуры при циркуляционном ЛКТ было более плавным и эффективным с точки зрения используемой энергии	[32]
	12	Циркулирующая (CTS100)	12 ч непрерывно	t 9–13 °C		

Продолжение таблицы 2.

Частичная менискэктомия /коленный сустав	31	Пакеты со льдом	3×10 дней	Колено/t 0 °C	Компрессионная ЛКТ показала более положительную динамику восстановления функционального состояния, чем применение пакетов со льдом	[33]
	32	Компрессионная (GIOCO CRYO — 2)		Вокруг колена/t 0 °C		
Операция на плече (с 1-го дня операции)/плечевой сустав	102	Компрессионная (Game Ready GRPro 2.1 с бандажом ATX)/физиотерапия, анальгетик	2 дня непрерывно/30 мин — перерыв 60 мин, ночью — при необходимости; затем 2×день	Плечо/t 1–4°C, низкая прерывистая компрессия, на 3-й день — средняя	Меньше анальгетиков и лучше самооценка функции через 2 нед	[34]
ТКА (на 3–10-е сутки)/коленный сустав	21	Гипербарическая CO ₂ /ЛФК, СРМ	2 раза в день — 6×2 недели/3 мин	Колено/t –78 °C, на расстоянии 10 см, лабильно	ЛКТ улучшает сгибание (115,69 против 100,75°), снижает боль, отёк, улучшает походку	[35]
	20	Компрессионная (Game Ready®)/массаж, физиотерапия, ЛФК	3×21 день/30 мин	Бандаж (Game Ready)/t 4 °C, низкая компрессия	ЛКТ лучше криопакетов: компрессионная криотерапия улучшила пассивное сгибание колена, меньше боль и выпот	[36]
	20	Гелевая пакеты (Actiposche®)/массаж, физиотерапия, ЛФК		Вокруг коленного сустава/нач. t –18 °C		
ТКА (3-й этап реабилитации)/коленный сустав	30	Воздушная (FRIGOSTREAM)/электростимуляция, массаж	1×10/5 мин	Четырёхглавая и икроножная мышцы/t –32 °C, 10 см, лабильно	Улучшение микроциркуляции, устранение отёка, усиление эффекта электростимуляции	[37]
	30	Воздушная (Криоджет 200)/ЛФК	1×10/6–8 мин	Те же зоны/t –30 °C, 9–10 см, овально-щелевая насадка, мощн. 7–8 ед.	Снижение боли, воспаления, вазокорригирующий эффект, улучшение подвижности и качества жизни	[38]

Примечание. ТКА — тотальное эндопротезирование коленного сустава; ПКС — передняя крестообразная связка; ЛКТ — локальная криотерапия; ЛФК — лечебная физкультура; СРМ — непрерывная пассивная мобилизация (Continuous Passive Motion); ВАШ — визуальная аналоговая шкала боли; в/в — внутривенно; t — температура; CO₂ — углекислый газ.

2–5 ежедневных сеансов [26, 28, 30, 33]. В комплекс лечения также входили приём анальгетиков, другие методы физиотерапии [26, 34], инъекции транексамовой кислоты [29], инъекции витамина D [30] и приём нефопама [9]. В результате применения ЛКТ обеспечивалось снижение интенсивности боли [9, 30, 31] и кровопотери [29], уменьшение потребности в анальгетиках [26, 27, 34], увеличение амплитуды движений и функции сустава [26, 27, 30, 33], а также уменьшение отёка [30, 33].

В рассмотренных исследованиях ЛКТ применялась в виде длительных сеансов, особенно в первые сутки после операции, когда наблюдается усиление боли, отёка и скопление крови и синовиальной жидкости в суставе. Холодовая терапия, используемая для купирования этих симптомов, оказывала обезболивающее и противоотечное действие [30, 31], а также способствовала вазоконстрикции и уменьшению кровопотери [29]. Исследование

М.С. Chen и соавт. показало, что применение ЛКТ непосредственно после операции приводит к значительно большей амплитуде сгибания и меньшему отёку коленного сустава по сравнению с началом терапии на 2-й день, что может быть связано с более эффективным подавлением воспалительной реакции и улучшением микроциркуляции [27].

Результаты исследований подчёркивают важность выбора оптимального метода контактной ЛКТ [30, 33, 36]. К. Chareancholvanich и соавт. установили, что увеличение площади охлаждения, охватывающей не только коленный сустав, но и часть четырёхглавой и икроножной мышц, приводит к более значительному снижению боли в раннем послеоперационном периоде (через 8 ч после операции), а применение циркулирующей ЛКТ по сравнению с гелевыми пакетами способствует более эффективному уменьшению отёка в более позднем периоде (через

72 ч) [31]. Важно отметить, что циркулирующая криотерапия обеспечивает более глубокое охлаждение внутренних тканей по сравнению с гелевыми пакетами [31]. Также показана большая эффективность компрессионной ЛКТ по сравнению с ледяными пакетами при применении по 15 мин 3 раза в день в течение 10 дней [33], что позволяет рекомендовать её для более длительного использования в реабилитационном периоде.

Таким образом, на основании рассмотренных данных, наиболее эффективной послеоперационной тактикой может являться применение контактной циркулирующей и компрессионной криотерапии, начиная непосредственно после хирургического вмешательства и продолжая в течение всего стационарного периода в режиме непрерывного охлаждения (с небольшими перерывами). При этом для повышения эффективности обезболивания рекомендуется охватывать не только сустав, но и прилегающие мышцы [31, 36].

В ряде исследований рассматривалось применение ЛКТ после ТКА и выписки из хирургического отделения [35, 36]. Учёные изучали гипербарическую ЛКТ углекислым газом в течение 3 мин [35], а также сравнивали компрессионную ЛКТ и гелевые компрессы, применяемые по 30 мин [36]. Процедуры проводились 2–3 раза в неделю в течение 2–3 нед.

Ограниченная подвижность коленного сустава после операций нередко приводит к снижению физической активности и асимметричной нагрузке на конечности, что подчёркивает важность ранней реабилитации. ЛКТ способствует снижению боли и отёка, облегчая восстановление функции. Исследования показали, что применение ЛКТ позволяет достичь лучших результатов по снижению боли, уменьшению выпота и улучшению амплитуды движений по сравнению с традиционными методами, такими как гелевые пакеты [35, 36]. Основные механизмы действия ЛКТ связаны с уменьшением температуры тканей, замедлением передачи болевых импульсов, снижением воспаления и отёка [39–41]. Кроме того, охлаждение улучшает активацию четырёхглавой мышцы и уменьшает артрогенное мышечное торможение [42].

По оценкам до 25% пациентов испытывают умеренную или сильную боль в колене через 3 мес после ТКА [37], что подчёркивает важность восстановления функциональности и борьбы с болевым синдромом не только в ранний период, но и на более поздних этапах реабилитации. В связи с этим исследована эффективность ЛКТ после ТКА на позднем этапе [37, 38]. Пациентам проводилось 10 ежедневных сеансов воздушной ЛКТ в сочетании с лечебной физкультурой и электростимуляцией четырёхглавой мышцы. Авторы отметили значительное снижение боли, улучшение подвижности сустава и уменьшение отёка [38], что свидетельствует о сохранении положительного эффекта ЛКТ в долгосрочной перспективе.

Таким образом, ЛКТ играет важную роль в предоперационном и послеоперационном восстановлении, в т. ч.

после ТКА, способствуя обезболиванию, снижению отёка и улучшению функции сустава как в ранний, так и в поздний реабилитационный периоды.

ТРАВМЫ СУСТАВОВ И КОСТЕЙ

ЛКТ широко применяется в лечении травм суставов и костей, способствуя уменьшению воспаления и боли на ранних стадиях [43]. Механизм действия ЛКТ включает сужение кровеносных сосудов и уменьшение притока крови к поражённому участку, что позволяет ускорить процесс заживления [5]. При повреждениях суставов часто наблюдается поражение связочного аппарата, мягких тканей и костей, а также скопление синовиальной жидкости [44]. Основной целью реабилитации после травм является увеличение функциональности сустава, уменьшение боли и ускорение возвращения пациента к нормальной жизни [45] или тренировочному процессу для спортсменов [46].

В исследовании M. Waldén и соавт., посвящённом постепенно возникающей боли в ахилловом сухожилии у профессиональных футболистов мужского пола, были описаны локализация, процедуры обследования, диагностика и лечение [47]. Травмы мышц и сухожилий доминировали в структуре травматизма. В рамках наблюдения за 47 элитными клубами УЕФА в течение 2013–2018 гг. за пять сезонов было зарегистрировано 4364 травмы, из которых 95 (2,2%) имели повреждение ахиллова сухожилия в качестве основного диагноза. Среди методов нехирургического лечения, включающих лечебную физкультуру и различные виды физиотерапии, наиболее распространёнными были ЛКТ и эксцентричные тренировки, применяемые в 72% случаев каждая [47].

Несмотря на широкое применение ЛКТ в спортивной медицине для лечения мягкотканых повреждений, критический анализ существующей литературы ставит под сомнение её эффективность в заживлении тканей у людей [48]. Целью работы S. Racinais и соавт. было оценить влияние ЛКТ на восстановление мягких тканей, основываясь на данных, полученных как в исследованиях на животных, так и в ограниченном количестве исследований с участием людей [48]. Методология исследования включала систематический обзор литературы, в ходе которого проанализированы 452 исследования, включая одно исследование на людях и 26 исследований на животных. Результаты показали, что ЛКТ может уменьшить боль в первые 6 ч после травмы, однако её применение более 12 ч способно привести к негативным последствиям из-за возможных задержек в восстановлении тканей. В исследованиях на животных обнаружено, что ЛКТ ограничивает воспаление и замедляет регенерацию тканей, а также снижает уровень PGE2 в сухожилиях. Авторы делают вывод о том, что, несмотря на популярность ЛКТ, научные доказательства её эффективности в заживлении мягких тканей у людей остаются недостаточными. S. Racinais и соавт. подчёркивают важность дальнейших исследований

с участием людей для уточнения протоколов применения ЛКТ и определения её роли в процессе восстановления после спортивных травм [48].

В табл. 3 представлены основные результаты клинических исследований по применению ЛКТ после травм. Были рассмотрены травмы голеностопного сустава [49–51] и растяжение подколенного сухожилия [52]. Растяжение связок вызывает кратковременную неподвижность и потерю функции с риском долгосрочных проблем и повторных травм [51]. В представленных исследованиях применялись контактные способы ЛКТ, проводимые по 3–6 раз в день непосредственно после травмы в течение 3–7 дней [50–52] и 2 раза в день на 3-м этапе реабилитации в течение 30 дней [49].

В исследовании L. Sefiddashti и соавт. изучалась эффективность контактной ЛКТ с использованием ледяных компрессов как в покое, так и в сочетании со статической растяжкой [52]. Было установлено, что дополнительная растяжка во время процедуры приводит к улучшению показателей функциональности и пассивного разгибания, при этом не было выявлено существенных различий в активном разгибании и боли в обеих группах [52]. Кроме того, С.М. Bleakley и соавт. проводили сравнение непрерывного прикладывания пакетов со льдом и варианта с 10-минутным перерывом во время сеанса [51]. Прерывистая ЛКТ после лёгкого или умеренного растяжения связок голеностопного сустава существенно снизила уровень субъективной боли при активном движении через неделю после травмы по сравнению с непрерывной, однако не было выявлено существенной разницы с точки зрения функции, отёка или боли в состоянии покоя [51].

В целом применение ЛКТ приводит к увеличению гибкости, длины шага, скорости ходьбы [49], функциональности сустава, пассивного и активного разгибания, уменьшению боли и отёка [51, 52]. Включение упражнений в комплекс лечения с ЛКТ способствует улучшению функции голеностопного сустава в краткосрочной перспективе [50]. Таким образом, ЛКТ в сочетании с физическими упражнениями ускоряет восстановление и позволяет раньше приступить к тренировочному процессу.

N.K. Sferopoulos описал случаи осложнений после неправильного применения ЛКТ у четырёх детей в возрасте 10–13 лет, получивших тяжёлые спортивные травмы (двое — футбол, двое — волейбол) [53]. У всех пациентов диагностированы повреждения мягких тканей, и для купирования болевого синдрома была назначена ЛКТ. Однако в результате нарушений техники применения ЛКТ (слишком длительное использование охлаждающего спрея и непосредственное нанесение ледяного пакета на кожу без защитной прокладки) у всех пациентов на 2-й день появились признаки холодовых ожогов: покраснение, волдыри, боль и припухлость. При повторном обследовании во всех случаях выявлены переломы, что свидетельствует о недостаточной первичной диагностике. Автор делает вывод о том, что осложнения были вызваны несоблюдением

стандартных мер безопасности, что, вероятно, связано с интенсивной болью, обусловленной основной патологией [53]. Описанные N.K. Sferopoulos случаи-осложнения после неправильного применения ЛКТ наглядно демонстрируют необходимость строгого соблюдения протоколов и мер безопасности при проведении ЛКТ, особенно в педиатрической практике.

Таким образом, для достижения максимального эффекта при лечении травм с применением ЛКТ необходимо сочетать её с лечебной физкультурой и растяжкой, что способствует ускоренному восстановлению функциональности сустава и снижению болевого синдрома. ЛКТ рекомендуется применять непосредственно после травмы, используя прерывистую компрессионную методику для улучшения микроциркуляции и уменьшения отёка. При этом крайне важно строго контролировать параметры воздействия и соблюдать меры предосторожности для предотвращения холодовых ожогов.

УСКОРЕНИЕ ЗАЖИВЛЕНИЯ ТРАВМ КОСТЕЙ

В ряде исследований была изучена методика применения ЛКТ для стимуляции регенерации костной ткани на моделях дефектов кортикального слоя бедренной кости мышей или крыс [54–56]. D. Castano и соавт. в своём исследовании снижали температуру бедренной кости до 19 °C посредством ежедневного 15-минутного погружения конечности в воду при температуре 4–6 °C. Через 28 дней было зафиксировано увеличение регенерации костной ткани. Предполагается, что усиление остеогенеза может быть связано с активацией VEGF-рецепторов, возможно, вследствие кратковременной гипоксии, вызванной холодом [54]. Согласно результатам были получены M. Zakaria и соавт.: 28-дневный курс ежедневных ледяных ванн приводил к статистически значимому усилению регенеративных процессов в костной ткани по сравнению с контролем [56].

A.V. Shakurov и соавт. предложили иную методику ЛКТ, использующую аппарат «Холод-01» (Еламед, РФ). Данный прибор оснащён модулем Пельтье с охлаждающей головкой диаметром 50 мм, обеспечивающим воздействие в течение 7 мин [55]. Данный подход приводит к снижению температуры внутри биоткани на глубине 5 мм на 5,3 °C. В группах, подвергшихся ЛКТ, наблюдалась более зрелая стадия формирования костной структуры: через 6 нед в контрольной группе сохранялись исходные контуры дефекта, в то время как в группе, получавшей ЛКТ, фиксировалось полное закрытие дефекта. Авторы пришли к выводу, что применение 7-минутной ЛКТ дважды в неделю оказывает положительное влияние на заживление костей [55].

M. Zakaria и соавт. также рассмотрели модели перелома бедренной кости и кортикального дефекта [57]. Было установлено, что воздействие холода ускоряет дифференцировку остеобластов, повышает активность щелочной фосфатазы (ALP) и стимулирует синтез и минерализацию

Таблица 3. Клинические исследования по применению локальной криотерапии при травмах**Table 3.** Clinical studies on the use of local cryotherapy in injuries

Травма (область)	Пациенты (n)	Способ ЛКТ/доп. лечение	Количество сеансов/время воздействия	Зона/режим	Результат	Источник
Голеностопный сустав, 3-й этап восстановления	100	Криобёртывание — 1–5 день; массаж льдом — 6–10, 26–30 день; компрессионная — 11–15, 21–25 день; общая (криосауна — 16–20 день)/ЛФК, физиотерапия	Для ЛКТ — 2 раза в день; для общей — 1 раз в день (всего 30 дней)/15 мин; 10 мин; 20 мин; 3 мин — соответственно	Для ЛКТ — голеностоп/ t 0 °C; для общей — всё тело	По сравнению с группой, у которой был стандартный протокол реабилитации, в экспериментальной группе отмечено более сильное увеличение обхвата голени, гибкости, длины шага и скорости ходьбы	[49]
Растяжение связок голеностопного сустава, 1 нед	101	Компрессионная	3×7 дней/10 мин	Голеностоп/t 0 °C	Включение терапевтических упражнений совместно с ЛКТ привело к значительному улучшению краткосрочной функции голеностопного сустава	[50]
Растяжение связок голеностопного сустава	46 43	Пакеты со льдом (20×20 см)	3 дня после травмы каждые 2 ч/20 мин 3 дня после травмы каждые 2 ч/20 мин	Голеностоп/t 0 °C Голеностоп/ t 0 °C, перерыв 10 мин	При применении прерывистой и непрерывной ЛКТ не было существенной разницы с точки зрения функции, отёка или боли в состоянии покоя. Однако прерывистая показала большее снижение субъективной боли при активности через неделю после травмы	[51]
Растяжение подколенного сухожилия (коленный сустав)	19 18	Пакеты со льдом/домашнее лечение Пакеты со льдом/статическая растяжка (одновременно), домашнее лечение	5×6 дней/20 мин	Болезненная точка в области подколенного сухожилия/ t 0 °C	Контактная ЛКТ совместно с растяжкой показала лучшие показатели функциональности и пассивного разгибания	[52]

костного матрикса. M. Zakaria и соавт. предполагают, что ключевую роль в этих процессах играют каналы TRPA1 и TRPM8, активирующие репаративные механизмы и вазоконстрикцию, усиливающиеся в условиях гипоксии. Увеличение концентрации VEGF стимулирует ангиогенез, необходимый для формирования костной ткани, а регуляция RBM3 и PGC-1 α способствует адаптации костных клеток к холоду и усилению остеогенеза, что в совокупности раскрывает потенциал холодовой терапии в лечении костных повреждений [57].

При лечении дефектов значительных размеров предлагается комбинированный подход, включающий ЛКТ в сочетании с использованием имплантатов, покрытых биоактивными материалами [58, 59], или костной крошки [60, 61]. Предварительные результаты апробации ЛКТ в сочетании с пинами (винтами) с покрытиями оказались положительными, однако на данном этапе возможно говорить лишь о пилотном исследовании. Для получения надёжных выводов, основанных на количественных данных, необходимо проведение дополнительных исследований.

ОБСУЖДЕНИЕ

Обзор клинических и доклинических исследований подтверждает широту применения ЛКТ в травматологии и ортопедии. ЛКТ эффективно используется в лечении заболеваний суставов, реабилитации после травм (включая спортивные) и после хирургических вмешательств на суставах.

При лечении заболеваний суставов ЛКТ способствует уменьшению воспаления, снижению болевого синдрома и улучшению их функционального состояния, позволяя уменьшить потребность в анальгетиках. Доказана её эффективность в достижении ремиссии синовита, продолжительность которой зависит от параметров охлаждения. Однократное применение приводит к немедленному обезболивающему эффекту длительностью не менее трёх часов. Однако нет единого мнения о продолжительности и частоте курса лечения, что требует дальнейших исследований для определения оптимальных протоколов.

Применение ЛКТ возможно назвать эффективным элементом послеоперационного ведения пациентов, пере-

нёших различные хирургические вмешательства, такие как ТКА, реконструкция передней крестообразной связки, частичная менискэктомия и операции на плече. В клинической практике ЛКТ целесообразно применять вплоть до выписки пациента из хирургического отделения, а также амбулаторно. Перспективной тактикой представляется непрерывное контактное охлаждение при температуре выше 0 °С с короткими перерывами, охватывающее как сустав, так и прилегающие мышечные ткани. Данный подход направлен на снижение послеоперационной боли, ускорение функционального восстановления и уменьшение потребности в анальгетиках. Учитывая, что в первые дни после операции происходит активное накопление крови и синовиальной жидкости, непрерывная терапия, направленная на устранение этих симптомов и послеоперационной боли, представляется особенно важной.

На более поздних этапах реабилитации ЛКТ также играет важную роль. Она способствует уменьшению отёка и увеличению амплитуды движений в коленном суставе (сгибание и разгибание). Уменьшение болевого синдрома и отёчности, достигаемое с помощью ЛКТ, позволяет начать раннюю активизацию укрепления коленного сустава и восстановление его функциональности посредством лечебной физкультуры. Следует отметить, что ЛКТ остаётся актуальной даже на поздних этапах реабилитации, в частности, у пациентов, испытывающих интенсивную боль через 3 мес после ТКА. В таких случаях частота применения ЛКТ постепенно снижается до ежедневных процедур.

При суставных травмах, в частности, спортивного генеза, ЛКТ также находит широкое применение. Результатом процедур является улучшение функционального состояния сустава, уменьшение боли и отёка. Курсовое применение ЛКТ может способствовать более быстрому возвращению спортсменов к тренировочному процессу. Наибольшая эффективность при лечении травм с применением ЛКТ достигается при её сочетании с лечебной физкультурой и упражнениями на растяжку. ЛКТ рекомендуется применять непосредственно после травмы для купирования воспалительной реакции. Однако следует тщательно дозировать и контролировать воздействие, чтобы избежать риска холодовых ожогов, особенно у детей.

Во всех рассмотренных областях применения ЛКТ эффекты достигаются за счёт криовоздействия на обмен веществ и на нервную систему, что способствует раннему восстановлению функциональной активности. Наиболее чёткие рекомендации касаются способов, продолжительности, частоты и условий применения ЛКТ в послеоперационном периоде. Представляется целесообразным проведение дополнительных исследований, направленных на определение оптимальных режимов ЛКТ, обеспечивающих максимально возможное снижение температуры повреждённых тканей, в особенности синовиальной жидкости, при сохранении безопасности процедуры.

ЛКТ продемонстрировала перспективные результаты в доклинических исследованиях, в частности, при лечении

переломов и дефектов кортикальной части бедренной кости мышей и крыс, существенно ускоряя процесс заживления. Выставлена гипотеза, что усиление остеогенеза под воздействием ЛКТ может быть обусловлено активацией VEGF-рецепторов. Иммунная и костная системы совместно используют множество молекул, в связи с чем сигналы передаются на иммунную систему, которая играет важнейшую роль при восстановлении костной ткани, в т. ч. в тех локациях, на которые криовоздействие не оказывалось. Тем не менее следует учитывать, что результаты, полученные в исследованиях на животных, не могут быть напрямую экстраполированы на человека из-за различий в метаболических особенностях мышечной ткани, толщине кожного покрова и других анатомических характеристиках. В связи с этим для подтверждения эффективности и безопасности ЛКТ в стимуляции остеогенеза у людей необходимо проведение дальнейших клинических исследований перед внедрением в широкую практику. Однако применение ЛКТ может быть перспективно в лечении сложных случаев, при переломах с замедленной консолидацией, в комплексном лечении суставов, переломов у пациентов с сопутствующими заболеваниями, нарушающими процессы нормальной регенерации кости. Идея состоит в том, чтобы стимулировать заживление кости в домашних условиях с использованием стандартного медицинского оборудования, чтобы снизить риск несращений и улучшить результаты её восстановления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЛКТ является эффективным компонентом комплексного лечения заболеваний суставов, послеоперационной реабилитации (например, после эндопротезирования и реконструкции связок) и спортивных травм на различных этапах восстановления. Ключевые эффекты ЛКТ включают уменьшение воспаления и болевого синдрома, улучшение функционального состояния суставов и снижение потребности в анальгетических препаратах.

Частота проведения ЛКТ варьирует в зависимости от стадии реабилитации: в острой фазе после травмы или оперативного вмешательства рекомендуется более частое применение для контроля воспалительной реакции и синовита, в дальнейшем частота процедур постепенно снижается. Особенно эффективным представляется сочетание ЛКТ с лечебной физкультурой, поскольку уменьшение боли и отёка позволяет увеличивать нагрузку на конечность и достигать большей амплитуды движений, тем самым способствуя укреплению мышечного аппарата и повышению функциональности сустава.

Перспективным направлением является использование ЛКТ в лечении повреждений костей, что подтверждается результатами доклинических исследований. Однако для внедрения данной методики в клиническую практику необходимы дополнительные исследования.

Таким образом, ЛКТ обладает значительным потенциалом, но требует дальнейшего изучения для оптимизации режимов применения в различных клинических случаях. Необходимы дальнейшие исследования для разработки персонализированных протоколов применения ЛКТ с учётом индивидуальных особенностей пациентов, целей терапии и характера патологии. Будущие исследования должны быть направлены на совершенствование режимов воздействия (интенсивность, длительность, частота), а также на оценку безопасности применения ЛКТ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. П.А.В. — разработка концепции исследования, проведение исследования, работа с данными, написание черновика, пересмотр и редактирование рукописи; С.Н.Ю. — разработка концепции исследования, проведение исследования, работа с данными, написание черновика, пересмотр и редактирование рукописи; Ш.А.В. — разработка концепции исследования, проведение исследования, работа с данными, написание черновика, пересмотр и редактирование рукописи; Б.Е.Г. — разработка концепции исследования, работа с данными, написание черновика, пересмотр и редактирование рукописи; Б.А.В. — разработка концепции исследования, работа с данными, написание черновика, пересмотр и редактирование рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и достоверностью любой её части.

Благодарности. Авторы выражают благодарность РМАНПО и РНИМУ им. Н.И. Пирогова за ценные консультации, оказанные в процессе подготовки данной работы.

Источник финансирования. Исследование проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда: грант РНФ № 24-79-10153 (<https://rscf.ru/project/24-79-10153>) — в рамках исследований заболеваний и травм суставов, предоперационной и послеоперационной реабилитации; грант РНФ № 20-79-10190 (<https://rscf.ru/project/23-79-50005/>) — в рамках исследований травм костей.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного

использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали три внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: P.A.V.: conceptualization, investigation, data curation, writing—original draft, writing—review & editing; S.N.Yu.: conceptualization, investigation, data curation, writing—original draft, writing—review & editing; Sh.A.V.: conceptualization, investigation, data curation, writing—original draft, writing—review & editing; B.E.G.: conceptualization, investigation, data curation, writing—original draft, writing—review & editing; B.A.V.: conceptualization, investigation, data curation, writing—original draft, writing—review & editing. All authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Acknowledgments: The authors would like to express their gratitude to the Russian Medical Academy of Continuous Professional Education and the Pirogov Russian National Research Medical University for valuable consultations provided during the preparation of this work.

Funding sources: The study was conducted with financial support from the Russian Science Foundation with RSF grants No. 24-79-10153 (<https://rscf.ru/project/24-79-10153>) and No. 20-79-10190 (<https://rscf.ru/project/23-79-50005/>) awarded for research into joint diseases, injuries, and preoperative and postoperative rehabilitation.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this paper.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The review process involved three external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Hermann J. Kryotherapie [Cryotherapy]. *Z Rheumatol*. 2009;68(7):539–541. (In German) doi: 10.1007/s00393-009-0446-2
- Kunkle BF, Kothandaraman V, Goodloe JB, et al. Orthopaedic application of cryotherapy: a comprehensive review of the history, basic science, methods, and clinical effectiveness. *JBJS Rev*. 2021;9(1):e20.00016. doi: 10.2106/JBJS.RVW.20.00016 EDN: QGPJW
- Bleakley C, McDonough S, MacAuley D. The use of ice in the treatment of acute soft-tissue injury: a systematic review of randomized controlled trials. *Am J Sport Med*. 2004;32(1):251–261. doi: 10.1177/0363546503260757
- Malanga GA, Yan N, Stark J. Mechanisms and efficacy of heat and cold therapies for musculoskeletal injury. *Postgrad Med*. 2015;127(1):57–65. doi: 10.1080/00325481.2015.992719
- Kim YH, Baek SS, Choi KS, et al. The effect of cold air application on intra-articular and skin temperature in the knee. *Yonsei medical journal*. 2002;43(5):621–626. doi: 10.3349/ymj.2002.43.5.621
- Dashina TA, Agasarov LG. Effectiveness of various methods of cryotherapy in patients with osteoarthritis. *Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy*. 2020;97(2):20–28. doi: 10.17116/kurort20209702120 EDN: NWQSFZ
- Douzi W, Guillot X, Bon D, et al. 1H-NMR-based analysis for exploring knee synovial fluid metabolite changes after local cryotherapy in knee arthritis patients. *Metabolites*. 2020;10(11):460. doi: 10.3390/metabo10110460 EDN: LEKNVC
- Guillot X, Tordi N, Laheute C, et al. Local ice cryotherapy decreases synovial interleukin 6, interleukin 1β, vascular endothelial growth factor, prostaglandin-E2, and nuclear factor kappa B p65 in human knee arthritis: a controlled study. *Arthritis Research & Therapy*. 2019;21(1):180. doi: 10.1186/s13075-019-1965-0 EDN: PSUIXB
- Moussa MK, Lefevre N, Valentin E, et al. Dynamic intermittent compression cryotherapy with intravenous nefopam results in faster pain recovery than static compression cryotherapy with oral nefopam: post-anterior cruciate

- ligament reconstruction. *J Exp Orthopaed*. 2023;10(1):72. doi: 10.1186/s40634-023-00639-3 EDN: LEBABM
10. Liu MM, Tian M, Luo C, et al. Continuous cryotherapy vs. traditional cryotherapy after total knee arthroplasty: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Front Surg*. 2023;9:1073288. doi:10.3389/fsurg.2022.1073288 EDN: NKGLAE
 11. Ehnert L, Geiser C. What is confirmed in Kneipp therapy? The perspective of internal medicine. *Inn Med*. 2022;63(12):1229–1236. doi:10.1007/s00108-022-01423-8
 12. *Great medical encyclopedia*. Petrovsky BV, editor. 3rd ed. Moscow: Soviet Encyclopedia; 1974–1989. (In Russ.)
 13. Tereshenkov VP, Shevelev OA, Zagorodniy NV, et al. Substantiation of the method of local deep hypothermia for the relief of synovitis of the knee joint in patients with osteoarthritis. *Russian Medicine*. 2023;29(4):300–310. doi: 10.17816/medjrf562715 EDN: HNSDKE
 14. Mohammed Sadiq HA, Rasool MT. Effectiveness of home-based conventional exercise and cryotherapy on daily living activities in patients with knee osteoarthritis: A randomized controlled clinical trial. *Medicine*. 2023;102(18):e33678. doi: 10.1097/MD.00000000000033678 EDN: FNCOLC
 15. Widlak P, Kaczmarek S, Klimkiewicz P, et al. Effects of local and whole-body cryotherapy on hip pain and general activity in the course of coxarthrosis. *Bio-medical Human Kinetics*. 2023;15(1). doi: 10.2478/bhk-2023-0025 EDN: XSIHA
 16. Peres D. Feasibility of the acute physical exercise following Cryotherapy protocol in Rheumatoid Arthritis: A Case report. *Jour of Clin Cas Rep, Med Imag and Heal Sci*. 2023;3(5). doi: 10.55920/JCRMHS.2023.03.001140 EDN: UCBDJU
 17. Laktašić Žerjavić N, Hrkić E, Žagar I, et al. Local cryotherapy, comparison of cold air and ice massage on pain and handgrip strength in patients with rheumatoid arthritis. *Psychiatria Danubina*. 2021;33(Suppl 4):757–761.
 18. Alito A, Talotta R, D'Amico V, et al. The effect of therapeutic exercise and local cryotherapy on lower limb enthesitis in non-radiographic axial spondyloarthritis: A case report. *Journal of Personalized Medicine*. 2024;14(10):1035. doi: 10.3390/jpm14101035 EDN: WPTSMG
 19. Durgut E, Gurses HN, Bilsel K, et al. Short-term effects of cold therapy and kinesio taping on pain relief and upper extremity functionality in individuals with rotator cuff tendonitis: A randomized study. *Medicina*. 2024;60(8):1188. doi: 10.3390/medicina60081188 EDN: NTBOQS
 20. Radecka A, Lubkowska A. Direct effect of local cryotherapy on muscle stimulation, pain and strength in male office workers with lateral epicondylitis, non-randomized clinical trial study. *Healthcare*. 2022;10(5):879. doi: 10.3390/healthcare10050879 EDN: BOTUXU
 21. Knobloch K, Grasmann R, Spies M, Vogt PM. Intermittent KoldBlue cryotherapy of 3×10 min changes mid-portion Achilles tendon microcirculation. *Br J Sports Med*. 2007;41(6):e4. doi: 10.1136/bjsm.2006.030957
 22. Portnov VV. Local cryotherapy in clinical practice. *Kremlin medicine*. 2017;4(2):157–164. (In Russ.) EDN: YODBDX
 23. Saakyan NY, Pushkarev AV. Local cryotherapy investigation on the biotissue phantom. *Refrigeration Technology*. 2022;111(3):181–188. doi: 10.17816/RF112350 EDN: INKTMQ
 24. Yao Yu, Xie W, Opoku M, et al. Cryotherapy and thermotherapy in the management of osteoarthritis and rheumatoid arthritis: A comprehensive review. *Fundamental Research*. 2024. doi: 10.1016/j.fmre.2024.07008 EDN: OADQHL
 25. Brosseau L, Yonge KA, Robinson V, et al. Thermotherapy for treatment of osteoarthritis. *Cochrane Database Syst Rev*. 2003;2003(4):CD004522. doi: 10.1002/14651858.CD004522
 26. Duffaydar H, Dong H, Jebur M, Mughal E. The effects of cryotherapy on early rehabilitation following total knee arthroplasty: a prospective cohort study. *Cureus*. 2023;15(12):e50279. doi: 10.7759/cureus.50279 EDN: HTRXXA
 27. Chen MC, Lin CC, Ko JY, Kuo FC. The effects of immediate programmed cryotherapy and continuous passive motion in patients after computer-assisted total knee arthroplasty: a prospective, randomized controlled trial. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 2020;15(1):379. doi: 10.1186/s13018-020-01924-y EDN: KRYOIP
 28. De Vries AJ, Aksakal HK, Brouwer RW. Effects of 6 weeks of cryotherapy plus compression therapy after total or unicompartmental knee arthroplasty: protocol for a single-centre, single-blind randomised controlled trial. *BMJ Open*. 2024;14(1):e077614. doi: 10.1136/bmjopen-2023-077614 EDN: LYCNVI
 29. Huang X, Li F, Shi W, et al. Efficacy of perioperative cryotherapy combined with intra-articular injection of tranexamic acid in total knee arthroplasty. *Medicine*. 2023;102(29):e34381. doi: 10.1097/MD.00000000000034381 EDN: JWBDM
 30. Li F, Mo Y, Huang X, et al. Cyclic cryotherapy with vitamin D facilitates early rehabilitation after total knee arthroplasty. *Frontiers in Medicine*. 2024;11:1380128. doi: 10.3389/fmed.2024.1380128 EDN: ORELKB
 31. Chareancholvanich K, Keesukpunt W, Pomrattanamaneewong C, et al. Comparison of three cryotherapy techniques for early post-TKA pain control in terms of efficacy and patient satisfaction: a randomized controlled trial. *Arthroplasty*. 2025;7(1):5. doi: 10.1186/s42836-024-00287-7
 32. Rashkovska A, Trobec R, Avbelj V, Veselko M. Knee temperatures measured *in vivo* after arthroscopic ACL reconstruction followed by cryotherapy with gel-packs or computer-controlled heat extraction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2014;22(9):2048–2056. doi: 10.1007/s00167-013-2605-x
 33. Hrubar YO, Hrubar IY, Hrabys NM, et al. Influence of cryotherapy with pulse compression on the functional condition of the knee joint after partial meniscectomy. *Wiad Lek*. 2023;76(1):182–188. doi: 10.36740/WLek202301125 EDN: IFVHDT
 34. Khan M, Phillips SA, Mathew P, et al. Cryo-pneumatic compression results in a significant decrease in opioid consumption after shoulder surgery: a multicenter randomized controlled trial. *Am J Sports Med*. 2024;52(11):2860–2865. doi: 10.1177/03635465241270138 EDN: QKQWQJ
 35. Lee B, Yoon D, Yim J. Effects of an early exercise program with cryotherapy on range of motion, pain, swelling, and gait in patients with total knee arthroplasty: a randomized controlled trial. *Journal of Clinical Medicine*. 2024;13(5):1420. doi: 10.3390/jcm13051420 EDN: TSIVTA
 36. Quesnot A, Mouchel S, Salah SB, et al. Randomized controlled trial of compressive cryotherapy versus standard cryotherapy after total knee arthroplasty: pain, swelling, range of motion and functional recovery. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2024;25(1):182. doi: 10.1186/s12891-024-07310-7 EDN: IMYBNC
 37. Kulchitskaya DB, Fesyun AD, Konchugova TV, et al. The use of electrical stimulation, local air cryotherapy, massage and robotic mechanotherapy with biofeedback in patients after knee replacement in the late postoperative period. *Russian Journal of Environmental and Rehabilitation Medicine*. 2023;1:11–15. EDN: CAQYOD
 38. Kolbakhova SN, Samoilov AS, Fesyun AD, et al. Experience in the use of cryotherapy in patients after total replacement. *Russian Journal of Physiotherapy, Balneology and Rehabilitation*. 2024;22(2):81–86. doi: 10.17816/117482 EDN: GBPVUQ
 39. Jette DU, Hunter SJ, Burkett L, et al. Physical therapist management of total knee arthroplasty. *Phys Ther*. 2020;100(9):1603–1631. doi: 10.1093/ptj/pzaa099 EDN: GZWIEW
 40. Kunkle BF, Kothandaraman V, Goodloe JB, et al. Orthopaedic application of cryotherapy: a comprehensive review of the history, basic science, methods, and clinical effectiveness. *JBJS Rev*. 2021;9(1):e20.00016. doi: 10.2106/JBJS.RVW.20.00016
 41. Chughtai M, Sodhi N, Jawad M, et al. Cryotherapy treatment after unicompartmental and total knee arthroplasty: a review. *J Arthroplasty*. 2017;32(12):3822–3832. doi: 10.1016/j.arth.2017.07.016
 42. Ewell M, Griffin C, Hull J. The use of focal knee joint cryotherapy to improve functional outcomes after total knee arthroplasty: review article. *PM R*. 2014;6(8):729–738. doi: 10.1016/j.pmrj.2014.02.004
 43. Jabbar AW. The use of cryotherapy and heat in the recovery of tendon injuries in running athletes. *Am J Soc Sci Educ Innov*. 2024;6(8):72–83. doi: 10.37547/tajssei/Volume06Issue08-06 EDN: CAQYOD
 44. Petrov SV. *General Surgery: Textbook for Higher Education Institutions*. 2nd ed. Moscow; 2004. 768 p. (In Russ.) ISBN: 5-318-00564-0
 45. Jones CA, Voaklander DC, Johnston DW, Suarez-Almazor ME. Health-related quality of life outcomes after total hip and knee arthroplasties in a community based population. *J Rheumatol*. 2000;27(7):1745–1752.
 46. Ardern CL, Glasgow P, Schneiders A, et al. 2016 Consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *Br J Sports Med*. 2016;50(14):853–864. doi: 10.1136/bjsports-2016-096278
 47. Waldén M, Gajhede Knudsen M, Ekstrand J, et al. Achilles tendon pain in male professional football players — a prospective five-season study of

- 88 injuries from the UEFA Elite Club Injury Study. *Open Access J Sports Med.* 2024;15:171–179. doi: 10.2147/OAJSM.S493843 EDN: KASYAM
48. Racinais S, Dablainville V, Rousse Y, et al. Cryotherapy for treating soft tissue injuries in sport medicine: a critical review. *Br J Sports Med.* 2024;58(20):1215–1223. doi: 10.1136/bjsports-2024-108304 EDN: ADPRGB
49. Simonyan NR, Tkachenko SA. Rehabilitation methods after ankle joint injuries. *Modern Humanities Success.* 2024;6:142–149. doi: 10.58224/2618-7175-2024-6-142-149 EDN: IGBULC
50. Bleakley CM, O'Connor SR, Tully MA, et al. Effect of accelerated rehabilitation on function after ankle sprain: randomized controlled trial. *BMJ.* 2010;340:1964. doi: 10.1136/bmj.c1964
51. Bleakley CM, McDonough SM, MacAuley DC, Bjordal J. Cryotherapy for acute ankle sprains: a randomized controlled study of two different icing protocols. *Br J Sports Med.* 2006;40(8):700–705. doi: 10.1136/bjsm.2006.025932
52. Sefiddashti L, Ghotbi N, Salavati M, et al. The effects of cryotherapy versus cryostretching on clinical and functional outcomes in athletes with acute hamstring strain. *J Bodyw Mov Ther.* 2018;22(3):805–809. doi: 10.1016/j.jbmt.2017.08.007
53. Sferopoulos NK. Skin burns following cryotherapy in misdiagnosed pediatric injuries. *J Bodyw Mov Ther.* 2018;22(3):556–559. doi: 10.1016/j.jbmt.2017.09.006
54. Castano D, Comeau-Gauthier M, Ramirez-Garcia Luna JL, et al. Noninvasive localized cold therapy: a new mode of bone repair enhancement. *Tissue Eng Part A.* 2019;25(7–8):554–562. doi: 10.1089/ten.tea.2018.0191
55. Shakurov AV, Lukina YS, Skriabin AS, et al. Enhanced bone healing using

- local cryostimulation: in vivo rat study. *J Therm Biol.* 2023;113:103501. doi: 10.1016/j.jtherbio.2023.103501 EDN: KPMMFQ
56. Zakaria M, Allard J, Garcia J, et al. Enhancing bone healing through localized cold therapy in a murine femoral fracture model. *Tissue Eng Part A.* 2019;25(7–8). doi: 10.1089/ten.tea.2018.0191 EDN: FPYFEI
57. Zakaria M, Matta J, Honjol Y, et al. Decoding cold therapy mechanisms of enhanced bone repair through sensory receptors and molecular pathways. *Biomedicines.* 2024;12(9):2045. doi: 10.3390/biomedicines12092045 EDN: GJYVCI
58. Skriabin AS, Tsygankov PA, Vesnin VR, et al. Electrophoretic deposition of calcium phosphates on carbon–carbon composite implants: morphology, phase/chemical composition and biological reactions. *Int J Mol Sci.* 2024;25(6):3375. doi: 10.3390/ijms25063375 EDN: ZDLXAU
59. Skriabin AS, Shakurov AV, Vesnin VR, et al. Titanium membranes with hydroxyapatite/titania bioactive ceramic coatings: characterization and in vivo biocompatibility testing. *ACS Omega.* 2022;7(51):47880–47891. doi: 10.1021/acsomega.2c05718 EDN: OICVGA
60. Lukina YuS, Mishchenko BP, Zaytsev VV, et al. Osteoplastic material based on bone matrix resistant to osteoplastic resorption under conditions of express regenerative process in form of carrier for RHBMP. *Inorganic Materials: Applied Research.* 2021;10:26–36. doi: 10.31044/1684-579X-2021-0-10-26-36 EDN: KNTTWT
61. Lukina YS, Zaitsev VV, Gavryushenko NS, et al. Macroporous calcium phosphate matrices prepared using the technology of self-setting cements *Inorganic Materials.* 2021;57(1):81–88. doi: 10.31857/S0002337X21010103 EDN: CJFEMB

ОБ АВТОРАХ

*** Пушкарёв Александр Васильевич**, канд. техн. наук, ведущий инженер, отдел 3.1, и.о. зав., каф. медицинской техники; адрес: Россия, 105005, Москва, ул. Лефортовская набережная, д. 1; ORCID: 0000-0002-1737-7838; eLibrary SPIN: 5796-8324; e-mail: pushkarev@bmstu.ru

Саакян Наталия Юрьевна, студент, инженер, отдел 3.1; ORCID: 0000-0001-6799-5450; eLibrary SPIN: 4390-3138; e-mail: saakyan@bmstu.ru

Шакуров Алексей Валерьевич, д-р техн. наук, заведующий, отдел 3.1; ORCID: 0000-0001-6110-8101; eLibrary SPIN: 1894-4707; e-mail: shakurov@bmstu.ru

Бычков Евгений Геннадьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, отдел 3.1; ORCID: 0000-0002-2050-5298; eLibrary SPIN: 5499-9080; e-mail: bychkov.eg@bmstu.ru

Буторина Антонина Валентиновна, д-р мед. наук, главный научный сотрудник, отдел 3.1, профессор, каф. реабилитации, спортивной медицины и физической культуры; ORCID: 0000-0001-8465-0593; eLibrary SPIN: 8832-1995; e-mail: avbutorina@gmail.com

AUTHORS' INFO

*** Aleksandr V. Pushkarev**, Cand. Sci. (Engineering), Leading Engineer, Depart. 3.1, Acting Head, Depart. of Medical Equipment; address: 1 Lefortovskaya Naberezhnaya st, Russia, Moscow, 105005; ORCID: 0000-0002-1737-7838; eLibrary SPIN: 5796-8324; e-mail: pushkarev@bmstu.ru

Natalia Y. Saakyan, Student, Engineer, Depart. 3.1; ORCID: 0000-0001-6799-5450; eLibrary SPIN: 4390-3138; e-mail: saakyan@bmstu.ru

Alexey V. Shakurov, Dr. Sci. (Engineering), Head, Depart. 3.1; ORCID: 0000-0001-6110-8101; eLibrary SPIN: 1894-4707; e-mail: shakurov@bmstu.ru

Evgeny G. Bychkov, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Depart. 3.1; ORCID: 0000-0002-2050-5298; eLibrary SPIN: 5499-9080; e-mail: bychkov.eg@bmstu.ru

Antonina V. Butorina, MD, Dr. Sci. (Medicine), Chief Researcher, Depart. 3.1, Professor of the Depart. of Rehabilitation, Sports Medicine, and Physical Education; ORCID: 0000-0001-8465-0593; eLibrary SPIN: 8832-1995; e-mail: avbutorina@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author