

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ –
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ БИОФИЗИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ИМЕНИ А.И. БУРНАЗЯНА»

На правах рукописи

Величко Максим Николаевич

**Применение термографии в комплексной системе реабилитации
спортсменов высокой квалификации после реконструкции передней
крестообразной связки**

3.1.33. Восстановительная медицина, спортивная медицина, лечебная
физкультура, курортология и физиотерапия, медико-социальная реабилитация

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Научный руководитель:
член-корреспондент РАН,
доктор медицинских наук, профессор
Самойлов Александр Сергеевич

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ТЕРМОГРАФИИ В РЕАБИЛИТАЦИИ СПОРТСМЕНОВ С ТРАВМАМИ КОЛЕННОГО СУСТАВА	18
1.1. Распространенность травм передней крестообразной связки у спортсменов высокой квалификации	18
1.2. Биологическая интеграция аутотрансплантата передней крестообразной связки в норме	23
1.3. Причины несостоятельности трансплантата передней крестообразной связки	25
1.4. Актуальные современные критерии построения программ реабилитации после пластики передней крестообразной связки	30
1.5. Термографический контроль восстановления после травм опорно- двигательного аппарата в спортивной медицине	36
1.5.1. Физические основы термографии	36
1.5.2. Использование тепловидения в реабилитации и спортивной медицине	38
1.5.3. Термографическая оценка воспаления в суставах	39
1.5.4. Термографическая оценка ответа конечностей на физическую нагрузку	43
1.5.5. Термография в оценке динамики восстановления после травм	435
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	47
2.1. Организация исследования, характеристика выборки	47
2.2. Методы диагностики травм коленного сустава	52

2.2.1. Сбор анамнеза.....	52
2.2.2. Клинический осмотр.....	53
2.2.3. Оценка функции коленного сустава.....	54
2.2.4. Инструментальные методы диагностики	55
2.2.4.1. Антропометрия нижней конечности и гониометрия коленного сустава	55
2.2.4.2. Магнитно-резонансная томография коленного сустава	55
2.2.4.3. Исследование коленных суставов при помощи инфракрасной термографии.....	59
2.3. Методы лечения	67
2.3.1. Хирургическое лечение	67
2.3.2. Методы медицинской реабилитации	68
2.3.2.1. Лечебная физкультура	70
2.3.2.2. Физиотерапевтические процедуры	77
2.4. Методы статистической обработки	80
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. АНАЛИЗ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ СПОРТСМЕНОВ С ОСЛОЖНЕННЫМ И НЕОСЛОЖНЕННЫМ ТЕЧЕНИЕМ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОГО ПЕРИОДА.	84
3.1. Общие сведения о пациентах.....	84
3.2. Анализ термографических данных пациентов.....	86
3.3. Построение решающего правила	92
3.4. Влияние характера внутрисуставного повреждения на предоперационные термографические показатели и риск осложненного течения после первичной реконструкции передней крестообразной связки	98

3.4.1. Связь характера повреждения с развитием неблагоприятных событий, осложняющих течение послеоперационного периода	102
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОСЛЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЕРЕДНЕЙ КРЕСТООБРАЗНОЙ СВЯЗКИ КОЛЕННОГО СУСТАВА. ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЦЕНТИЛЬНЫХ КРИВЫХ. РЕЗУЛЬТАТЫ АНКЕТИРОВАНИЯ	
4.1. Динамика термографических показателей и перцентильное представление данных	105
4.2. Интерпретация результатов термографии, полученных посредством перцентильного визуального представления данных	108
4.2.1. Типичные отклонения по данным перцентильной визуализации при осложненном течении послеоперационного периода	109
4.2.2. Возвращение термографических параметров к норме при осложненном и неосложненном течении послеоперационного периода.....	114
4.2.3. Термографическая оценка после 180 суток после реконструкции передней крестообразной связки.....	121
4.2.4. Концепция термографического аналитического инструмента для индивидуализации программ реабилитации	128
4.3. Оценка результатов анкетирования	142
4.3.1. Результаты анкетирования пациентов с осложненным и неосложненным течением послеоперационного периода	Ошибка! Закладка не определена.
4.3.2. Результаты анкетирования пациентов в зависимости от возраста, пола и сроков от травмы до реконструкции.....	146
4.3.3. Влияние типа аутотрансплантата на результаты анкетирования.....	146

4.4. Связь результатов МРТ-диагностики и термографических параметров у пациентов с осложненным и неосложненным течением послеоперационного периода	149
4.4.1. Межгрупповые различия по МРТ-параметрам	150
4.4.2. Корреляции между МРТ-параметрами и термографическими показателями внутри групп пациентов с осложненным и неосложненным течением послеоперационного периода	151
ГЛАВА 5. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДА	155
5.1. Сопоставление с данными литературы.....	155
5.2. Ограничения метода.....	160
5.3. Перспективы дальнейших исследований	161
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	162
ВЫВОДЫ	163
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	168
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	170
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	172
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Рекомендации по реабилитации при разрыве ПКС, основанные на принципах доказательной медицины	206
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Опросники, использованные в работе	210
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Описательная статистика параметров пациентов с осложненным и неосложненным течением послеоперационного периода в целом и их сравнение для всех этапов исследования (до и после операции).....	212
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Описательная статистика параметров пациентов с неосложненным и осложненным течением послеоперационного периода на входе в исследование	216

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Описательная сравнительная статистика параметров пациентов с инфекционно-воспалительными и другими неблагоприятными клиническими событиями	222
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Анализ достоверности различий показателей между временными блоками в группе пациентов с неосложненным течением послеоперационного периода	231
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Анализ достоверности различий показателей между временными блоками в группе пациентов с осложненным течением послеоперационного периода	240
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Перцентильные кривые, отражающие температурные диапазоны в течение года после реконструкции ПКС у пациентов с неосложненным течением послеоперационного периода	246
ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Алгоритм практического использования термографических данных – «термографический аналитический инструмент»	249
ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Классификация отборочных и подтверждающих термографических критериев по периодам наблюдения	249
ПРИЛОЖЕНИЕ 11. Краткие анамнестические данные пациентов с осложненным течением послеоперационного периода	249
ПРИЛОЖЕНИЕ 12. Внедрение результатов диссертационного исследования.....	249

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Разрывы передней крестообразной связки (ПКС) являются одними из самых неблагоприятных спортивных травм вследствие длительных сроков восстановления и относительно низкого процента возвращения атлетов в спорт на прежний уровень мастерства (А. Hallen и др., 2024; М. Manojlovic и др., 2024). Именно поэтому экономические и социальные последствия травм ПКС настолько значительны для спортсменов и спортивных организаций любого уровня. Среди профессиональных европейских футболистов травмы ПКС вышли на второе место по частоте после повреждений задней группы мышц бедра. При этом связанная с ними финансовая нагрузка на спортсмена составляет порядка 84 499 евро (L. Pulici и др., 2023).

В настоящее время точные данные о распространенности разрывов ПКС среди профессиональных спортсменов отсутствуют, однако известно, что такие травмы чаще встречаются в игровых командных видах спорта (J. Martinez-Calderon и др., 2025). Если ориентироваться на общепопуляционные исследования то, например, по некоторым оценкам, в Соединенных Штатах Америки (США) ежегодно фиксируется 200 000 травм ПКС, половина из которых требует реконструктивных вмешательств (S. Neeraj, 2018). При этом количество реконструкций, проводимых в год, между странами отличается мало.

Спорт высших достижений нередко является движущей силой развития высоких технологий в медицине. Одни технологии используются для улучшения спортивных результатов, другие позволяют предотвратить травмы и ускорить процесс реабилитации. Примером последних является инфракрасная термография (ИТ) (А.М. Морозов и др., 2018; М.Г. Воловик и И.М. Долгов, 2018; Е.Е. Ачкасов и др., 2019; И.М. Долгов и др., 2023; J.C.B. Marins и др., 2015). ИТ за последние два десятилетия окончательно вышла из статуса экспериментальной техники и заняла свое место в арсенале неинвазивных методов клинической визуализации. Изменения кожной температуры отражают локальные вариации кровотока,

степень воспалительной активности и особенности теплообмена тканей, а потому чувствительны к перегрузке, микротравматизации и восстановительным процессам в опорно-двигательном аппарате (E.F.J. Ring, 2012). В спортивной медицине ИТ стала инструментом повседневного мониторинга, позволяющим улавливать патологическую асимметрию и динамику температурного ответа на нагрузку у спортсменов высокой квалификации (D.G. Moreira и др., 2017; D. Rojas-Valverde и др., 2021; L. Masur и P. Dürking, 2024). При реабилитации после реконструкции ПКС этот метод может рассматриваться как часть многоканальной системы принятия решений об увеличении нагрузки и допуска к занятиям спортом в дополнение к функциональным тестам и опросникам (L. De Marziani и др., 2024; V.L. Escamilla-Galindo и др., 2025).

Исследования и обзоры последних лет фиксируют широкий спектр применения ИТ для контроля тренировочного процесса: от раннего распознавания локальной перегрузки и отслеживания эволюции восстановления до верификации симметричности термографических паттернов после хирургических вмешательств (A. Straburzyńska-Lupa и др., 2022; A. Szurko и др., 2022). При этом авторы сходятся в том, что термография должна оставаться частью многофакторной оценки состояния сустава и ее следует дублировать силовыми, прыжковыми и функциональными пробами, изокинетическим тестированием и оценкой субъективного состояния спортсменов посредством опросников (A. Straburzyńska-Lupa и др., 2022; L. Masur и P. Dürking, 2024).

В настоящее время в литературе имеются указания на несколько принципов использования термографии в реабилитации после травм коленного сустава. Во-первых, в ряде исследований было предложено до начала интенсивных нагрузок формировать индивидуальный «температурный профиль» обоих коленных суставов. При термографическом скрининге именно он может являться отправной точкой для суждения о динамике (V.L. Escamilla-Galindo и др., 2025). Во-вторых, было установлено, что оценка ответа на нагрузку в согласованные временные отрезки (до, сразу после и через 5-20 минут восстановления) выявляет атипичную задержку гипертермии и может служить индикатором перегрузки

коленных суставов (E.F.J. Ring и K. Ammer, 2012; L. De Marziani и др., 2024). В-третьих, устойчивое сохранение локальной гипертермии коленного сустава на стороне операции – особенно в сочетании с клиническими симптомами и функциональными нарушениями – может служить сигналом к коррекции программы реабилитации (объем/интенсивность, соотношение объема общей и специфической для вида спорта нагрузки, удлинение восстановительных окон и т.д.) (E.F.J. Ring и K. Ammer, 2012; D.G. Moreira и др., 2017; V.L. Escamilla-Galindo и др., 2025). Таким образом, включение термографии в многофакторные алгоритмы наряду с изокинетическим тестированием, общеизвестными прыжковыми и беговыми тестами, опросниками и медицинской визуализацией (МРТ, УЗИ) делает принятие решения о возврате в спорт более обоснованным и прозрачным для спортсмена и его штаба (A. Straburzyńska-Lupa и др., 2022; V.L. Escamilla-Galindo и др., 2025).

Степень разработанности темы исследования

Несмотря на достаточную теоретическую и эмпирическую базу термографии в спортивной медицине, остаются методические разночтения. Основной дефицит знаний лежит в области валидированных порогов и прогностической ценности абсолютных температурных показателей и температурной асимметрии после конкретных вмешательств, например реконструкции связок коленного сустава (L. Masur и P. Düring, 2024; Escamilla-Galindo и др., 2025). Описанные в литературе температурные критерии не позволяют прогнозировать повторные травмы оперированного сустава и гарантировать безопасные сроки возвращения к спортивным нагрузкам (D. Rojas-Valverde и др., 2021; B. Trovato и др., 2024). На результаты термографического исследования могут влиять дополнительные переменные: толщина мягких тканей, потоотделение и охлаждение, фототип кожи, анатомические вариации. Это диктует необходимость проведения дополнительных исследований с отслеживанием долгосрочных результатов после реконструкции передней

крестообразной связки у спортсменов элитного уровня (D.G. Moreira и др., 2017; A. Szurko, 2022).

Требуется интеграция инфракрасной термографии в клиническую практику в комплексе с другими объективными клиническими и функциональными индикаторами состояния суставов (L. Masur и P. Düking, 2024; L. Petrigna и др., 2024; Escamilla-Galindo и др., 2025), что подтверждает актуальность темы данной диссертационной работы.

Цель исследования

Повышение эффективности комплексной реабилитации и медицинского контроля спортсменов высокой квалификации после реконструкции передней крестообразной связки путем разработки, статистического обоснования и внедрения термографического аналитического инструмента, способствующего объективной оценке состояния коленного сустава и поддерживающего принятие клинических решений об осложненном или неосложненном вариантах течения послеоперационного периода.

Задачи исследования

1. Выполнить термографическое обследование коленных суставов спортсменов высокой квалификации с разрывом передней крестообразной связки в предоперационном и послеоперационном периодах в соответствии с современными протоколами и подтвердить статистическую достоверность различий значений термографических параметров в группах осложненного и неосложненного течения послеоперационного периода.

2. Выполнить сравнительный анализ групп спортсменов с осложненным и неосложненным течением в различные сроки после операции с учетом данных термографии, анкетирования, магнитно-резонансной томографии и разработать критерии благоприятного,стораживающего и неблагоприятного клиникотермографических профилей восстановления спортсменов.

3. Сформулировать критерии для индивидуализации реабилитации на основании термографических данных.

Научная новизна исследования

Впервые предложен и статистически обоснован термографический аналитический инструмент для комплексной оценки состояния коленного сустава у спортсменов высокой квалификации после реконструкции передней крестообразной связки, включающий предоперационный расчетный индекс f со значением 0,169 и систему референсных перцентильных кривых динамики термографических параметров и календарных тепловых карт, количественно характеризующих термографические показатели при неосложненном течении послеоперационного периода для ключевых временных интервалов после операции.

Впервые количественно показана диагностическая и прогностическая информативность в исследуемой выборке предоперационных и послеоперационных термографических показателей для стратификации риска осложненного течения после реконструкции передней крестообразной связки с выделением благоприятного, настораживающего и неблагоприятного клинико-термографических профилей восстановления через сопоставление с данными специализированных опросников и магнитно-резонансной томографии.

Впервые сформулированы термографические критерии в составе комплексной критериально-ориентированной реабилитации спортсменов высокой квалификации после реконструкции передней крестообразной связки, входящие в термографический аналитический инструмент, позволяющий управлять темпом прохождения восстановительных этапов, дозировать тренировочные нагрузки на каждом из этапов и способствовать обоснованному принятию решения о допуске к занятиям спортом.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость исследования заключается в расширении представлений о взаимосвязи структурных, функциональных и термографических изменений в коленном суставе спортсменов после реконструкции передней крестообразной связки, в том числе о роли длительной локальной воспалительно-

микроциркуляторной активности и особенностей температурного профиля в формировании осложненного и неосложненного вариантов послеоперационного течения.

Полученные данные о динамике термографических показателей в сопоставлении с результатами анкетирования и магнитно-резонансной томографии углубляют понимание механизмов адаптации трансплантата и околоуставных тканей к восстановительной нагрузке и дополняют современные концепции критериально-ориентированной и персонифицированной реабилитации спортсменов.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы определяется разработкой и внедрением термографического аналитического инструмента, реализованного, в том числе, в виде программного приложения, который поддерживает предварительную стратификацию риска осложненного течения и динамическую оценку восстановления в составе комплексного клинико-инструментального обследования.

Использование инфракрасной термографии в сочетании с функциональными тестами, специализированными опросниками и магнитно-резонансной томографией может способствовать повышению эффективности комплексной реабилитации и медицинского контроля спортсменов после реконструкции передней крестообразной связки, снижению количества неблагоприятных исходов хирургического лечения путем своевременного выявления признаков осложненного послеоперационного течения, а также потенциальному повышению обоснованности решений о сроках возвращения к тренировочной и соревновательной деятельности, что соответствует положениям паспорта специальности 3.1.33 о разработке немедикаментозных, цифровых и персонифицированных здоровьесберегающих технологий в восстановительной и спортивной медицине.

Методология и методы исследования

Исследование выполнено как одноцентровое наблюдательное продольное когортное исследование с ретроспективным и проспективным компонентами и повторными термографическими измерениями. Ретроспективная часть включала анализ медицинских данных за период с 2018 по 2024 годы. Последующее проспективное наблюдение проведено с октября 2024 г. по декабрь 2025 г. Внутрисубъектное сопоставление проводили между оперированным и контралатеральным коленными суставами, межгрупповое – между спортсменами с осложненным и неосложненным послеоперационным течением. Под осложненным течением послеоперационного периода понимали наличие клинически значимых неблагоприятных событий после реконструкции ПКС, включая инфекционно-воспалительные процессы, несостоятельность трансплантата связки и травматические его повреждения, независимо от механизма их возникновения, потребовавшие дополнительного обследования, изменения лечебно-реабилитационной тактики или повторного вмешательства.

Объектом исследования являлись спортсмены высокой квалификации с разрывом передней крестообразной связки до и после ее реконструкции. Предмет исследования составили термографические показатели коленных суставов и их динамика на этапах предоперационной подготовки и послеоперационной реабилитации в сопоставлении с клиническими данными, результатами специализированных опросников и магнитно-резонансной томографии.

Выбор методов исследования определялся поставленной целью и задачами. В работе использованы: клиническое обследование, сбор анамнеза, клинический осмотр, специализированные опросники, антропометрия, гониометрия, магнитно-резонансная томография коленного сустава и инфракрасная термография. В комплекс лечебно-восстановительных мероприятий входили хирургическое лечение, лечебная физкультура и физиотерапевтические воздействия.

Статистическая обработка результатов выполнена с использованием современных методов медицинской статистики. Для анализа применяли методы

описательной статистики, непараметрические критерии для зависимых и независимых выборок, корреляционный анализ, методы оценки диагностической информативности признаков и математического моделирования, использованные для построения прогностического правила, перцентильных кривых распределения температур для термографического аналитического инструмента. Критический уровень статистической значимости принимали равным 0,05.

Положения, выносимые на защиту

1. Инфракрасная термография у спортсменов высокой квалификации с разрывом передней крестообразной связки до и после ее реконструкции выявляет статистически значимую межстороннюю температурную асимметрию по большинству исследованных показателей и в большинстве временных блоков как у пациентов с осложненным, так и неосложненным течением послеоперационного периода с уровнями значимости $p < 0,05$, что подтверждает способность метода регистрировать динамику состояния коленного сустава на дооперационном и послеоперационном этапах комплексной реабилитации.

2. Разработанный термографический аналитический инструмент, включающий предоперационное прогностическое правило с расчетным пороговым значением прогностического индекса $f \geq 0,169$, и площадью под кривой зависимости чувствительности от единицы минус специфичность 0,78 и опорные перцентильные кривые послеоперационной динамики термографических параметров для временного интервала с первых суток до года после операции позволяет прогнозировать осложненное течение послеоперационного периода, стратифицировать спортсменов по уровню риска его развития и выделять благоприятный, настораживающий и неблагоприятный клинико-термографические профили восстановления.

3. Использование разработанного термографического аналитического инструмента в системе критериально-ориентированной реабилитации после реконструкции передней крестообразной связки у спортсменов высокой квалификации поддерживает принятие клинических решений при

индивидуализации восстановительных программ за счет контроля темпа увеличения нагрузки или временной остановки реабилитации при неблагоприятном клинико-термографическом профиле и обоснованного расширения физических и специфических для вида спорта нагрузок при устойчивой нормотермии и благоприятной клинико-инструментальной и субъективной динамике, что потенциально способствует повышению эффективности комплексной реабилитации и медицинского контроля и снижению риска неблагоприятных исходов реконструкции передней крестообразной связки.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на III региональной научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы лечения хронической боли», Красноярск, 2021; на научно-практической конференции X международного конгресса «Безопасный спорт – 2023», Москва, 2023; на научно-практической конференции с международным участием «Спортмедфорум – 2023», Санкт-Петербург, 2023; на научно-практической конференции XII международного конгресса «Безопасный спорт – 2025», Москва 2025; на XVII международном симпозиуме по спортивной медицине и реабилитологии под эгидой Первого МГМУ им. И.М. Сеченова, Москва, 2025.

Апробация диссертации выполнена на кафедре восстановительной медицины, курортологии и физиотерапии, сестринского дела с курсом спортивной медицины медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (протокол № 6 от 26.06.2025 г.).

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы внедрены в практическую деятельность Центра комбинированных поражений ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, гандбольного клуба «Ростов-Дон», Общероссийской общественной организации «Федерация гандбола России». Материалы исследования использованы в учебном процессе МБУ ИНО

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, кафедры реабилитации, спортивной медицины и физической культуры Института профилактической медицины им. З.П. Соловьева ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России (Пироговский Университет), а также в образовательной деятельности МБУ ИНО ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие на всех этапах планирования и выполнения диссертационной работы. Диссертантом были определены цель, задачи работы и методы исследования. Автор лично выполнил все указанные в работе хирургические операции, обеспечил сбор материала, определял лечебно-реабилитационную тактику, а также проводил оценку состояния коленного сустава посредством инфракрасной термографии, МРТ и клинического осмотра на всех этапах реабилитации.

Автор лично проводил анализ полученных результатов с применением современных методов статистической обработки.

Диссертантом разработан лекционный материал, используемый в образовательном процессе на кафедре восстановительной медицины, курортологии и физиотерапии, сестринского дела с курсом спортивной медицины МБУ ИНО ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России.

Публикации по теме диссертации

По материалам диссертационного исследования опубликовано 3 печатных работы. Все 3 статьи в рецензируемых журналах, включенных в Перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ для публикации результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени. Зарегистрирована 1 база данных и один патент на изобретение.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности: 3.1.33. Восстановительная медицина, спортивная медицина, лечебная физкультура, курортология и физиотерапия, медико-социальная реабилитация, а именно п. 4. «Разработка и внедрение здоровьесберегающих технологий превентивной, трансляционной, персонифицированной и цифровой медицины с использованием природных лечебных факторов и других средств немедикаментозной терапии», п. 5. «Разработка методов рационального использования физических упражнений, прочих средств физической культуры и спорта для укрепления здоровья, профилактики и лечения заболеваний, повышения физической работоспособности. Определение эффективных мероприятий по предупреждению заболеваний и травм у спортсменов, наиболее рациональных гигиенических условий физического воспитания. Разработка средств и методов медицинского контроля за функциональным состоянием лиц, занимающихся спортом, а также программ восстановления нарушенных функций и реабилитации спортсменов».

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 260 страницах и включает введение, обзор литературы, главу материалов и методов, две главы собственных исследований, главу обсуждения, заключение, выводы, практические рекомендации, список литературы и приложения. Список литературы содержит 288 источников: 12 отечественных и 276 – зарубежных. Изложенный материал иллюстрирован 35 таблицами и 14 рисунками.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ТЕРМОГРАФИИ В РЕАБИЛИТАЦИИ СПОРТСМЕНОВ С ТРАВМАМИ КОЛЕННОГО СУСТАВА

1.1 Распространенность травм передней крестообразной у спортсменов высокой квалификации

Одной из сложностей в анализе распространенности разрывов ПКС является описание данных инцидентов с использованием разной терминологической базы. Так, в некоторых исследованиях сообщается о количестве травм ПКС в пересчете на одного спортсмена в день, тогда как в других – о количестве травм на одного атлета с учетом экспозиции атлета травмирующему фактору (определяется как случай участия данного атлета в одной игре или тренировочной сессии, несущей теоретический риск получения травмы) [170].

В этом контексте представляет интерес единственная на текущий момент всероссийская серия наблюдений с прямой оценкой частоты травм ПКС в профессиональном спорте в когорте игроков Российской премьер-лиги (РПЛ) за 12 сезонов (2010-2021/22). Авторами было зарегистрировано 100 разрывов ПКС у 85 игроков. Интенсивность травм составила 0,476 на 1000 игровых часов в матчах РПЛ и 0,562 на 1000 игровых часов в матчах еврокубков. 96,5% игроков вернулись к соревновательной деятельности [37].

Федеральные клинические рекомендации РФ от 2024 года описывают эпидемиологию травм ПКС с опорой на зарубежные данные (США, Скандинавия, Германия) и подтверждают, что разрывы ПКС преобладают среди связочных повреждений и чаще встречаются у молодых физически активных пациентов. При этом конкретных национальных показателей для РФ документ не приводит [5]. В отечественной рецензируемой литературе встречается указание на частоту новых разрывов ПКС 36,9-60,9 случаев на 100 000 населения в год. Однако это цифры

мировой литературы, цитируемые в российском журнале для контекстного сопоставления [10].

В автореферате одной из отечественных диссертаций на тему реконструкции ПКС приведены оценки потребности в хирургическом лечении травм коленного сустава на основании оценки обращаемости: не менее 129,6 операций на 100 000 взрослого населения в год для травм коленного сустава в целом и 43,7 на 100 000 – для сочетанных повреждений с разрывом ПКС. К сожалению, эти данные не отражают распространенность травм ПКС, а являются лишь прокси-показателем хирургической потребности, зависящим от доступности помощи и структуры потоков пациентов в конкретном регионе [11].

На сегодняшний момент в Российской Федерации отсутствует единый национальный регистр травм и реконструкций ПКС. Большинство доступных оценок представляют собой локальные данные (отдельные клиники, регионы, спортивные лиги). Это затрудняет получение сопоставимых популяционных показателей (на 100 000 человеко-лет) и оценок в разрезе пола и возраста в масштабе всей страны. Указанные выше [37] цифры по РПЛ (на 1000 игровых часов) отражают только мужской профессиональный футбол и не могут быть экстраполированы на всю популяцию. В настоящее время только Норвегия, Дания и Швеция имеют национальные реестры, фиксирующие все случаи реконструкции ПКС, что косвенно отражает травматизм, связанный с разрывами этой связки [82, 258]. При этом Дания является единственной страной, в которой внесение данных о травмах ПКС в государственный реестр является обязательным [162]. Основываясь на данных указанных выше реестров, частота травм ПКС составляет в Норвегии 34 на 100 000 человек, в Дании – 38 на 100 000 человек и 32 на 100 000 человек – в Швеции.

В других исследованиях, где использовались данные о количестве поданных страховых заявлений на возмещение по случаю травмы ПКС, количество травм ПКС составило 32 случая на 100 000 человек в Германии (на основе данных 1990-х годов) [258], 37 случаев на 100 000 человек в Новой Зеландии (на основе данных с 1 июля 2000 года по 30 июня 2005 года) и 29 на

100 000 человек в США (по данным с 1997 по 2006 год) [103]. В целом эти данные свидетельствуют о небольшой разнице в показателях травматизма, связанного с ПКС между разными странами [103].

Самостоятельным направлением в исследовании травматизма является определение риска получения травмы ПКС отдельно для спортсменов мужского и женского пола. В некоторых исследованиях было показано, что спортсменки в контактных видах спорта и в состязаниях без контакта, но с высокоэнергетическими нагрузками с вращением при приземлении, травмировали ПКС чаще, чем мужчины [53]. Данные выводы подтверждаются и другими исследованиями. В одном авторы отмечают, что риск получить травму для видов спорта, где имеются высокоэнергетические приземления после вращения тела в воздухе среди женщин, был выше, более чем в 3 раза. Это, по мнению авторов, подтверждает наличие нервно-мышечного дефицита, типично демонстрируемого спортсменками в сравнении со спортсменами мужчинами [53, 153, 275]. В другом исследовании подтверждены аналогичные риски для спортсменок, участвующих в контактных видах спорта. Женщины получали травмы ПКС в 3 раза чаще, чем мужчины [33]. По данным других аналогичных исследований спортсменки, участвующие в контактных видах спорта и в состязаниях без контакта, но с высокоэнергетическими нагрузками при приземлении с вращением, также имели больший риск получения травмы ПКС, чем мужчины. Напротив, риск получения травмы ПКС для спортивных состязаний, ограниченного контакта и бесконтактных видов спорта был одинаков для двух полов [21]. Хотя имеются и работы, не выявляющие гендерных различий, например, при анализе травматизма у военнослужащих обоего пола [137].

Таким образом, травмы ПКС остаются одной из наиболее значимых проблем в профессиональном спорте. Они отличаются распространенностью и ведут к длительной утрате трудоспособности, снижению игрового времени и спортивных показателей, а у части спортсменов – к завершению карьеры [132]. Отмечаемый рост числа травм ПКС в профессиональном спорте во многом связан с расширением соревновательного календаря и периодами перегрузки, когда

команды играют с интервалами менее четырех суток, что сопровождается повышением матчевой травматизации [249]. Параллельно с этим, эволюция спортивных игр характеризуется увеличением доли высокоинтенсивных действий (рост дистанции высокоинтенсивного бега и числа спринтов за последние сезоны в топовых лигах), что повышает нагрузку на коленный сустав и увеличивает частоту опасных для ПКС эпизодов [251]. Существенный вклад в общее бремя травматизма вносит и ускоренный переход женских любительских лиг в профессиональные, где риск повреждения ПКС выше. Эти тенденции увеличивают абсолютное число таких травм и связанные с ними суммарные потери времени в спорте [32]. Совокупность вышеперечисленных факторов, а именно, нарастания соревновательной экспозиции спортсменов, интенсификации матчевой деятельности и увеличения сегмента спортсменов с более высоким индивидуальным риском объясняет актуальность изучения вопросов травматизации ПКС в спорте и необходимость приоритизации научных разработок в данной области.

В современной литературе при разрыве ПКС обсуждаются две базовые стратегии лечения: структурированная реабилитация (консервативное ведение) с возможностью отсроченной операции и хирургическая реконструкция. Выбор тактики определяется уровнем спортивной активности, целями (возврат в спорт с ротационными нагрузками на коленный сустав, контактные виды спорта, или к тренировкам с преимущественно прямолинейной нагрузкой), выраженностью клинической нестабильности и наличием сопутствующих повреждений [60, 96, 179, 271, 272]. Необходимо отметить, что по современным представлениям при разрывах ПКС до сих пор остается место для консервативного лечения. Международный консенсус Panther Symposium [271] указывает, что у пациентов, ориентированных преимущественно на прямолинейные движения в коленном суставе, в качестве приемлемого варианта ведения может рассматриваться неоперативная тактика со структурированной прогрессирующей реабилитацией. Показанием к реконструкции ПКС в таких случаях может стать персистирующая функциональная нестабильность и/или повторные эпизоды явного ощущения

«выхода сустава» [271]. Рандомизированные клинические исследования длительностью более 5 лет не показали превосходства раннего хирургического лечения над реабилитацией с отсроченной реконструкцией [272]. Систематический обзор и метаанализ, касающиеся изолированных разрывов ПКС, также подтверждают, что достоверного превосходства реконструкции над неоперативным ведением по ряду долгосрочных исходов доказать не удалось (качество доказательств ограничено), однако реконструкция дает лучшую механическую стабильность [179]. В консенсусах и клинических руководствах подчеркивается, что у молодых и высокоактивных пациентов, планирующих возвращение к видам спорта с прыжковыми, срезающими и ротационными нагрузками на коленный сустав, при наличии показаний предпочтительна ранняя анатомическая реконструкция, поскольку при отсрочке операции возрастает риск вторичных повреждений менисков и суставного хряща. В заявлении американской академии хирургов-ортопедов отдельно отмечается, что увеличение риска дополнительных внутрисуставных повреждений при несостоятельной ПКС происходит уже в первые 3 месяца. Поэтому при наличии показаний реконструкцию следует выполнять «как можно раньше» [60, 271]. В российских клинических рекомендациях хирургическое лечение рекомендовано при хронической нестабильности, затрудняющей обычную ходьбу и выполнение профессиональной (в т.ч. спортивной) деятельности. В них также указано, что консервативное лечение не следует рассматривать как окончательный метод при наличии показаний к операции и отсутствии противопоказаний [5]. Основной хирургический метод лечения при наличии показаний к операции – артроскопическая реконструкция ПКС. Метод подразумевает формирование костных каналов в бедренной и большеберцовой костях, проведение трансплантата, который замещает ПКС, и фиксацию его различными способами [5, 60]. У молодых активных пациентов для снижения риска несостоятельности трансплантата предпочтение следует отдавать аутооттрансплантатам перед аллотрансплантатами. При выборе аутооттрансплантата допустимы различные варианты (связка надколенника, сухожилие четырехглавой мышцы бедра,

сухожилия подколенных мышц и др.). Выбор всегда является компромиссом рисков и преимуществ. Например, использование трансплантата из связки надколенника может снижать риск повторного разрыва и инфекции, а трансплантата из подколенных сухожилий – уменьшать риск боли в переднем отделе коленного сустава и боли при опоре на колено [60]. В отдельных случаях у пациентов высокого риска допускается проведение дополнительных внесуставных вмешательств (реконструкция так называемой «переднелатеральной связки» или латеральный экстраартикулярный тенодез) для снижения риска повторного разрыва и улучшения функции, как минимум, в краткосрочной перспективе [60]. Альтернативный хирургический подход – первичный шов ПКС, в том числе с внутренним армированием связки («внутренний ортез») [35]. В последние годы этот подход обсуждается главным образом в контексте проксимальных разрывов ПКС, но систематические обзоры демонстрируют неоднородность результатов и ограниченность доказательной базы. Поэтому при наличии показаний к операции предпочтительнее реконструкция ПКС, а не шов из-за меньшего риска последующих ревизионных вмешательств [60, 179]. Независимо от выбранной стратегии, ключевым компонентом лечения остается этапная, критериально-ориентированная реабилитация. Если хирургическая техника выполнения операции была верной, то именно реабилитация в итоге определяет функциональный исход и безопасность возврата в спорт [5, 60, 271].

1.2 Биологическая интеграция аутотрансплантата передней крестообразной связки в норме

Восстановление нормальной функции коленного сустава после операции во многом зависит от созревания трансплантата в направлении биологической структуры, сходной с нативной ПКС. Интеграция в костных каналах и метапластические изменения в трансплантате ПКС называют лигаментизацией [228, 256].

При проведении гистологического анализа ткани трансплантата в экспериментах на животных обычно выделяют следующие стадии процесса лигаментизации: раннюю стадию, стадию ремоделирования и стадию созревания [41, 158]. С биомеханической точки зрения трансплантат ПКС наиболее уязвим именно в фазе ремоделирования, когда он слаб механически и больше подвержен травматизации [228, 54]. Ключевым выводом систематического обзора Claes с соавт. [243], посвященного анализу современной литературы о лигаментизации трансплантата ПКС, является то, что процесс лигаментизации у человека состоит из тех же фаз, что и у животных, однако продолжительность фаз значительно больше. Особенно это касается фазы ремоделирования [243].

В одном из систематических обзоров [189] изучались данные по процессу лигаментизации аутооттрансплантата ПКС. Результаты лигаментизации в чисто мягкотканом трансплантате сравнивали с таковым для трансплантата из связки надколенника [189]. Сравнение показало, что лигаментизация в трансплантате из подколенных сухожилий проходит с существенной задержкой фазы ремоделирования. Ремоделирование трансплантата из подколенных сухожилий регистрируется в сроки между 12 и 24 месяцами [189]. Аутооттрансплантат из связки надколенника проходит фазу ремоделирования раньше: между 6-12 месяцами после операции [189].

Глубокое понимание биологических процессов, происходящих в трансплантатах у человека, необходимо для оптимизации методов реконструкции ПКС и поддержания здоровья суставов в долгосрочной перспективе [130, 189].

Неинвазивное изучение трансплантата ПКС и этапов его приживления у людей реализуется посредством многообразия доступных в настоящее время методов визуализации [198]. Восстановление сигнальных характеристик, свойственных нативным связкам по данным МРТ, было продемонстрировано в срок два года после операции. Vogl с соавт. [199] провели двухлетнее проспективное исследование с использованием магнитно-резонансной томографии (МРТ) с контрастным усилением, в котором оценивался процесс лигаментизации трансплантата ПКС. Кровоток в трансплантате стал максимально

напоминать нативную ПКС через два года наблюдения [199]. Zaffagnini с соавт. [177] изучал гистологические изменения, свойственные процессу лигаментизации в аутотрансплантате из связки надколенника, через 6, 12, 24, 48 и 120 месяцев после пластики ПКС с использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Результаты исследования показали, что прогрессирующие ультраструктурные изменения в направлении нативной ПКС наблюдались в сроки ближе к 24 месяцам [177]. Примечательно, что никаких дальнейших изменений по данным ПЭМ через 24 месяца после операции уже не наблюдалось [177]. В исследованиях наблюдалась высокая вариабельность результатов, но в среднем более длительные сроки наблюдения указывали на полное структурное и морфологическое сходство трансплантата с нативной ПКС [74, 88, 94, 117]. Основываясь на указанных выше данных, многие авторы считают, что после реконструкции ПКС, отсрочка возврата в спорт примерно до двух лет, вероятно, обеспечит более полную интеграцию трансплантата и, возможно, послужит фактором профилактики несостоятельности трансплантата [74, 88, 94, 117].

1.3 Причины несостоятельности трансплантата передней крестообразной связки

Несмотря на то, что после пластики ПКС, в спорт на том или ином уровне возвращаются около 81% пациентов [111], достаточно регулярно наблюдаются случаи разрыва и несостоятельности трансплантата. При пятилетнем наблюдении в систематическом обзоре Wright с соавт. обнаружили частоту разрыва трансплантата, составляющую 5,8% [183]. Webster с соавт. сообщили о сходных цифрах частоты разрыва трансплантата в 4,5% [286].

Термины «разрыв трансплантата» и «несостоятельность трансплантата» часто используются взаимозаменяемо. Несостоятельность трансплантата – это неспецифический термин. Он может использоваться как для обозначения разрыва трансплантата, так и его недостаточной механической прочности, которая может сопровождаться или не сопровождаться клиническими проявлениями. Он

употребляется, в том числе для случаев, когда в результате реконструкции ПКС, не удалось достичь желаемого функционального результата [76].

Термин «разрыв трансплантата» обычно используют для обозначения травматического разрыва ранее функционирующего трансплантата ПКС. Однако при этом все равно стоит иметь в виду, что разрыв трансплантата может быть вызван последствиями некорректно выполненной реконструкции ПКС. Например, трансплантат, который ущемляется в межмышечковой вырезке из-за избыточно переднего расположения бедренного туннеля, может быть, в некотором смысле, «обречен» с самого начала и подвержен разрушению при минимальной нагрузке. Таким образом, травма может сыграть в его судьбе лишь небольшую роль [76].

С другой стороны, ранняя несостоятельность трансплантата, например, из-за плохого контроля ротационной стабильности колена вследствие неверного расположения туннеля, может препятствовать возвращению пациента к высокому уровню активности из-за эпизодов нестабильности. Субъективно они могут восприниматься как травмы. Кроме того, функция конечности может остаться удовлетворительной, несмотря на значительную слабость трансплантата, определяемую по данным клинического осмотра или контрольной МРТ [76].

Частота повторных разрывов по данным систематических обзоров составляет $\approx 4-6\%$ при наблюдении более 5 лет [148], однако возврат к соревновательному спорту возможен лишь в 55% случаев, что подчеркивает расхождение между анатомической и функциональной успешностью операции [111].

В клинической практике можно выделить три ключевых сценария: (а) травматический, вследствие повторного разрыва ранее функционирующего трансплантата; (б) сценарий ранней несостоятельности трансплантата вследствие технических погрешностей операции (неанатомичное расположение туннелей, неадекватная фиксация и т.д.); (в) биологическая несостоятельность трансплантата как исход нарушения инкорпорации и лигаментизации при правильном положении трансплантата, в том числе на фоне инфекции [161, 215, 224].

Таким образом, этиология неудовлетворительных исходов реконструкции ПКС многофакторна и условно все причины неудач можно классифицировать на травматические, технические и связанные с пациентом причины [64, 81, 224]. По данным анализа многоцентровых серий ревизионных вмешательств, технические ошибки составляют до 2/3 всех причин неудовлетворительного исхода пластики ПКС, а повторные травмы – большую часть оставшихся случаев. Наиболее частая техническая причина несостоятельности аутотрансплантата – неверное положение бедренного туннеля [81, 224].

У молодых активных пациентов применение аллотрансплантатов ассоциировано с более высокой частотой несостоятельности (до 25%) по сравнению с аутотрансплантатами ($\approx 9-10\%$) [25, 165, 192, 200]. Ряд метаанализов и обзорных работ подтверждают больший риск неудач для аллотрансплантатов, особенно при облучении ткани трансплантата в процессе заготовки [16, 18, 92, 155]. Тем не менее, отдельные серии исследований показывают близкие с аутотрансплантатами результаты при строгом отборе пациентов [18, 92]. В возрастной группе ≤ 18 лет вероятность ревизии после аллотрансплантации значительно выше [184].

Сравнение результатов операции с применением в качестве аутотрансплантата сухожилия связки надколенника и сгибателей бедра (подколенные сухожилия) по данным литературы приводит к неоднозначным выводам. Проспективные и реестровые исследования чаще показывают повышенный риск ревизии для трансплантатов из сгибателей [14, 200], тогда как ряд когортных исследований и рандомизированное исследование не выявили клинически значимых различий по исходам, за исключением меньшей доли травматических эпизодов в группе сухожилия связки надколенника [26, 69, 108, 141, 214, 255].

Небольшой диаметр (< 8 мм для трансплантатов из сгибателей) может умеренно повышать риск ранней ревизии, особенно у пациентов моложе 20 лет [120, 160]. В нескольких исследованиях указанная ассоциация подтверждена не была, что не позволяет рассматривать диаметр трансплантата как

самостоятельный главный предиктор неудовлетворительного исхода вмешательства [20, 133, 255].

Выраженная предоперационная гипермобильность крупных суставов, в том числе коленного, также может приводить к ухудшению результатов реконструкции ПКС и должна учитываться при предоперационном планировании [164].

Молодой возраст является наиболее устойчивым предиктором повторного повреждения и ревизионного вмешательства. Частота несостоятельности трансплантата у пациентов в возрасте младше 20 лет превышает аналогичный показатель у более взрослых пациентов в 3-10 раз [26, 20, 120, 133, 237]. Данные национальных реестров (Дания, Норвегия, Швеция) подтверждают повышенный риск ранней ревизии в группах 13-19 и 15-19 лет [14, 161, 182, 188, 195, 207, 260].

Возврат к спортивным нагрузкам в видах спорта с выраженными срезающими и ротационными элементами увеличивает риск повторной травмы коленного сустава в 2-4 раза [34, 133, 140, 214, 230, 284]. Возвращение в спорт ранее 7 месяцев после реконструкции ПКС может повышать риск травмы трансплантата по сравнению с более поздними сроками возвращения [30], хотя часть исследований не подтверждает влияние ранних сроков возврата в спорт на исход операции [237]. Контактный механизм первичной травмы также ассоциирован с повышенным риском последующей несостоятельности трансплантата [133, 214].

После реконструкции ПКС сохраняются «рискованные» двигательные стереотипы: дефицит контроля ротации бедра, слабость сгибателей коленного сустава и нарушение постурального контроля [282]. Если в ходе реабилитации не удастся избавиться от этих неоптимальных паттернов движения, то, по данным проспективных исследований, они являются предиктором повторной травмы ПКС [52], нередко и контралатерального коленного сустава [125, 142, 160, 206, 212, 286].

Влияние пола на вероятность несостоятельности трансплантата ПКС противоречиво. Отдельные серии исследований указывают на больший риск у

молодых мужчин либо у женщин 15-18 лет, тогда как данные крупных реестров и когорты MOON не подтвердили независимого влияния фактора пола [14, 26, 30, 69, 91, 110, 120, 134, 141, 161, 225, 231, 237, 241, 255, 260]. Высокий индекс массы тела сам по себе не является надежным предиктором ревизионной реконструкции [120, 160, 225], хотя его отрицательное влияние на риск первичных бесконтактных травм у женщин было отчасти подтверждено [204]. Положительный семейный анамнез травмы ПКС удваивает риск повторного повреждения трансплантата [133, 241].

Увеличение наклона плато большеберцовой кости кзади усиливает переднюю трансляцию большеберцовой кости и имеет статистически достоверную связь как с первичным повреждением ПКС, так и с риском новой травмы после реконструкции. При наклоне плато около 12° риск разрыва трансплантата возрастает кратно [102, 183, 246, 286].

Неанатомичное расположение, в частности чрезмерно вертикальная ориентация бедренного туннеля, – наиболее частая техническая причина, приводящая к ревизии [81, 224]. Отмечена связь с разрывом трансплантата и более заднего расположения тиббиального канала в серии длительных наблюдений [255]. Есть данные, которые указывают на несколько больший риск ревизии при сверлении бедренного канала из антеромедиального доступа по сравнению с транстибиальным доступом (возможен эффект кривой обучения) [134, 240]. Надежная оценка смещения и миграции трансплантата требует специальных методик (например, радиостереометрии), однако грубая несостоятельность фиксации как причина ревизии встречается относительно редко ($\approx 2-5\%$) [19, 81, 181, 231, 224].

Биологическая несостоятельность подразумевает недостаточную интеграцию и лигаментизацию при корректной хирургической технике. Возможные детерминанты это: особенности иммунного ответа, избыточная ранняя нагрузка, инфекция [104, 116, 215]. Частота истинно «биологических» неудач оценивается в 3-5% [215], тогда как инфекционные осложнения регистрируются примерно в 2% случаев [161, 224].

Пропущенные повреждения вторичных стабилизаторов (например, заднелатерального комплекса) выявляются у части пациентов с ревизиями и являются самостоятельным фактором риска [81, 211, 224]. Выраженные варусные или вальгусные деформации коленного сустава усугубляют нестабильность при повреждении коллатеральных связок, однако патологическая ось нижней конечности как самостоятельная причина ревизии в литературе отмечается относительно редко (~3%) [81, 106].

Следует учесть, что в сравнении с первичной реконструкцией ПКС, любая ревизионная операция характеризуется менее предсказуемыми клиническими и функциональными результатами [22, 36, 86, 216]. Выбор трансплантата при ревизионном вмешательстве определяется возможными причинами первичной неудачи, состоянием костных каналов, доступностью аутоклеток и необходимостью дополнительной стабилизации антеролатеральных структур [114, 213, 217]. В связи с этим, планированию первичного вмешательства следует уделять самое пристальное внимание.

1.4 Актуальные современные критерии построения программ реабилитации после пластики передней крестообразной связки

В настоящее время для восстановления силы оперированной нижней конечности, нормализации подвижности суставов и нервно-мышечного контроля рутинной практикой считается использование программ послеоперационной реабилитации. Однако, по сей день нет единого мнения относительно оптимальной программы реабилитации для безопасного и эффективного возвращения спортсменов на предоперационный уровень активности [174]. Систематический обзор 33 рандомизированных клинических исследований, касающихся реабилитации пациентов после реконструкции ПКС показал, что некоторые исследования имели существенные методологические недочеты и их выводы статистически не достоверны [221, 222]. Авторы обзора пришли к выводу, что в комплексной реабилитации в той или иной мере доказана

эффективность электромиостимуляции, ЛФК с произвольными движениями и нейромышечных тренировок [221]. В рандомизированном исследовании 74 пациентам после пластики ПКС назначали либо программу нейромышечной тренировки, либо традиционную схему силовых тренировок. После этого пациентов наблюдали в течение 2 лет [222]. Пациенты, которые были распределены в группу нейромышечной тренировки, сообщили о более высоких показателях общей функции коленного сустава и более низком уровне боли во время занятий. Пациенты, которые практиковали силовые тренировки, продемонстрировали большую силу мышц задней группы бедра через 2 года после пластики [222]. Интенсивность силовых тренировок позитивно влияла и на восстановление мощности разгибателей [250].

Тем не менее, не было никаких существенных различий между двумя группами в баллах шкалы Cincinnati через 1 и 2 года [222].

Есть данные, что прогрессивная пятинедельная программа упражнений после травмы способна существенно улучшить функцию коленного сустава [17]. Grindem с соавт. [90, 100, 129] сравнили результаты анкетирования пациентов, перенесших реконструкцию ПКС перед операцией и через 2 года после нее. Одни пациенты прошли прогрессивную предоперационную и послеоперационную реабилитацию, другие – лечение согласно обычным стандартам ведения пациентов в лечебном учреждении. Пациенты, которые были включены в программу предоперационной и послеоперационной реабилитации, продемонстрировали значительно более высокие показатели по данным опросника KOOS во всех подшкалах до операции и через 2 года после нее, чем пациенты в группе стандартной медицинской помощи [129]. Представляет интерес, что по результатам исследования [121], в котором через 2-4 года сравнивали результаты реконструкции ПКС у спортсменов, которые в первые 3 месяца после операции проходили программу реабилитации на дому или под наблюдением физиотерапевта, в группе, которая занималась дома, имелись значительно более высокие показатели по данным опросника качества жизни. Значительных различий в полноте разгибания колена, амплитуде движений, угле

сгибания, силе мышц нижних конечностей и по шкале IKDC в данном исследовании обнаружено не было [121]. Содержание оптимальной программы реабилитации до сих пор неизвестно, а отсутствие стандартного протокола реабилитационного лечения является основным ограничением на пути безопасного возвращения спортсменов к соревновательной деятельности. Независимо от протокола послеоперационной реабилитации, состояние тканей и функция оперированной конечности после пластики ПКС нормализуются почти через два года после операции или позже. Так, лигаментизация трансплантата связки, как было сказано выше, заканчивается через 2-3 года, а нормализация термографических показателей после пластики ПКС, по данным некоторых авторов, происходит более чем через 1,5 года после завершения курса реабилитации [62]. Комбинация временных критериев и комплексных функциональных критериев имеет решающее значение для возвращения к занятиям с высоким уровнем активности. При этом существует мнение, что ускоренный и агрессивный подход к реабилитации может наносить спортсмену ущерб.

Хирургические методы и программы послеоперационной реабилитации, безусловно, являются предметом постоянных дебатов и научных исследований. Важно отметить, что независимо от хирургических методов и протоколов реабилитации, спортсмены, возвращающиеся к активности слишком рано, до восстановления исходного состояния здоровья и функций коленного сустава, имеют повышенный риск разрыва трансплантата ПКС. Найденные в литературе данные указывают на то, что задержка с возвращением в спорт высших достижений почти до двух лет, скорее, полезна для здоровья атлетов.

По данным литературы, весь реабилитационный процесс после реконструкции ПКС обычно принято делить на несколько этапов. Большинству пациентов, которые не относятся к профессиональным спортсменам, обычно достаточно завершить первый этап, который заключается в устранении грубых двигательных нарушений с возвратом к уровню нагрузок, соответствующему повседневной активности [76].

В ходе восстановления пациенты могут проходить этапы, акцентирующие внимание на более требовательных видах активности – бег, прыжки и ротационные нагрузки, включая специфические для спорта навыки. Маршрутизация по этим этапам реабилитации идет в соответствии со строгими функциональными критериями. Цели послеоперационной реабилитации у различных пациентов будут неодинаковы. Следовательно, в задачи реабилитационной бригады во главе с оперировавшим хирургом входит и определение критериев достаточности реабилитации. В конечном счете, успех лечения должен оцениваться индивидуально, исходя из персонального запроса пациента [76].

При построении программы реабилитации многие придерживаются общих принципов, впервые подробно изложенных в протоколе Медицинского центра при Университете Питтсбурга в США. Этот протокол опирается, где это релевантно, на современные литературные данные. Процесс принятия решений о возобновлении занятий спортом согласно протоколу основан на структурированных объективных клинических и функциональных тестах, а также на результатах субъективных опросников [15, 50, 173]. Однако до сих пор сведений о том, какими конкретно должны быть наполнение и длительность программ реабилитации для гарантированного успешного возвращения в спорт, недостаточно [75].

Принципы реабилитации остаются неизменными на протяжении всего процесса. После овладения базовыми навыками движения следуют упражнения на увеличение мышечной силы и нервно-мышечного контроля, а для перехода к каждому следующему этапу должны быть соблюдены определенные критерии. Для повышения спортивной работоспособности и профилактики повторных травм рекомендуют обучение балансу, проприоцепции, двигательному контролю, ловкости и плиометрическим нагрузкам [29, 84, 93, 101, 125, 178, 245].

Адекватная сила четырехглавой мышцы бедра является критичным компонентом восстановления и предиктором высокой производительности при динамической нагрузке после пластики ПКС [229, 239]. Дефицит силы

четырёхглавой мышцы бедра может быть одним из многих компонентов, повышающих риск повторной травмы коленного сустава после возвращения к занятиям спортом [229]. Для оценки силы четырёхглавой мышцы бедра по возможности должна использоваться изометрическая или изокинетическая динамометрия, поскольку она обеспечивает надежное измерение силы изолированной мышцы [229].

В тех случаях, когда динамометрия недоступна, рекомендуется исследование силы мышц при помощи тренажера для разгибания коленного сустава с одним максимальным усилием [47, 83]. Данное исследование не проводится до тех пор, пока не устранены все возможные причины ограничения объема движения.

Индекс симметрии конечности рассчитывается как результат умножения на 100 частного от деления результатов теста с максимальным разгибанием оперированного коленного сустава на результат теста с максимальным разгибанием здорового коленного сустава. Тест на разгибание коленного сустава на тренажере является предпочтительным, потому что он изолирует мускулатуру четырёхглавой мышцы бедра [83]. Тестирование силы мышц бедра должно проводиться на регулярной основе, чтобы гарантировать, что сила не уменьшается и, в идеале, нарастает [83].

Нейромышечный контроль проводится с помощью трех основных тестов с прогрессивными критериями для каждого этапа реабилитации [55]. Шаг с остановкой и удержанием равновесия на одной ноге представляет собой весьма отдаленную оценку качества бега с выявлением патологической механики движений и возможной боли [55]. Для этого пациент делает шаг своей обычной длины больной ногой на ровной поверхности с перекатом с пятки на носок. Длина зашагивания постоянно увеличивается, чтобы, в итоге, имитировать бег. Спортсмены должны быть способны выполнить 30 зашагиваний с удержанием равновесия, с естественным движением в коленном суставе без его чрезмерного сгибания. Для выявления двигательных нарушений используется тест с приседанием на одной ноге. Для этого пациент должен присесть десять раз на

одной ноге, сгибая ее до угла 45 градусов или более, в зависимости от фазы реабилитации. Выявляют отклонения в виде использования компенсаторных паттернов, с потерей равновесия, проваливанием таза на контралатеральной стороне, а также чрезмерного отведения или приведения бедра или чрезмерного поворота бедра внутрь или вспомогательных движений тела [101].

Тест Y-баланса является инструментом сравнения стабильности конечностей и в ряде работ его показания коррелируют с риском получения повторной травмы [107, 122, 208, 235, 276].

Современные международные основы реабилитации при разрыве ПКС, основанные на принципах доказательной медицины, вкратце представлены в Приложении 1.

Как было сказано ранее, за последние десятилетия реабилитация перешла от протоколов, основанных на сроках после операции, к индивидуализированному и основанному на функциональных критериях подходу. Переход от одной фазы реабилитации к другой происходит только тогда, когда функция нижних конечностей соответствует определенным критериям. Этот, основанный на критериях, подход призван гарантировать, что увеличение нагрузки не превысит функциональные и биологические возможности конкретного коленного сустава [56, 105, 147]. Однако на практике существует ряд трудностей в реализации данного подхода.

Например, при реабилитации необходимо учитывать все многообразие сопутствующих разрыву ПКС внутрисуставных повреждений. Эти травмы накладывают свои ограничения на план реабилитации. И иногда для ее продолжения требуется дополнительная хирургическая коррекция, например, по поводу несостоятельного шва мениска [80]. Кроме того, сведений относительно того, как следует модифицировать реабилитацию у пациентов, оперированных с использованием менее распространенных трансплантатов (например, пластика ПКС с использованием аутооттрансплантата сухожилия четырехглавой мышцы, сухожилия длинной малоберцовой мышцы и т.д.), на современном этапе недостаточно. Все это свидетельствует в пользу разработки универсального

инструмента для рутинного контроля за функциональным состоянием оперированного коленного сустава.

1.5 Термографический контроль восстановления после травм опорно-двигательного аппарата в спортивной медицине

1.5.1 Физические основы термографии

Температура, применительно к телу человека, является «мерилом его усредненной кинетической энергии» [186]. Для отображения температуры используют различные шкалы. Наиболее известными являются шкалы в градусах Цельсия, Кельвина и Фаренгейта. В большинстве стран мира используется шкала Цельсия. В международной системе единиц температура выражается в градусах шкалы Кельвина (К).

В теле человека перенос тепла происходит между различными его структурами, а также между телом и одеждой [1, 2, 6, 8]. Что касается переноса тепла через ткани человеческого тела, то это медленный процесс, который, например, в конечностях зависит от коэффициента теплопроводности мышц и температурного градиента между мышцами и кожей [7, 119, 150]. По этой причине перенос тепла за счет теплопроводности облегчается, когда повышается температурный градиент между мышцей и кожей, в основном за счет испарения пота во время тренировки или во время тренировки в холодной окружающей среде [79, 119].

Конвекция – это теплопередача при контакте твердого тела с жидким или газообразным [46, 77]. В человеческом теле конвекция реализуется рассеиванием тепла через кровоток. Кровь нагревается в «ядре» тела, затем нагревает кожу при прохождении через нее. Конвекция также объясняет влияние ветра на кожу, который способствует испарению с нее пота [77, 156].

Обычно человеческое тело испускает больше теплового излучения, чем поглощает, из-за того, что окружающая среда холоднее. Однако в непосредственной близости от теплых предметов или горячих сред (например,

пожара) это излучение поглощается организмом, что приводит к нагреву тела [277].

Тепловое излучение – это тип теплопередачи, который регистрируется тепловизионной камерой, в то время как теплопроводность и конвекцию важно учитывать для получения корректных значений при проведении термографии. Теплопроводность и конвекция могут влиять на температуру кожи и, следовательно, на интенсивность излучения [28, 169, 218].

Длины волн теплового излучения составляют от 760 нм до 1 мм. Инфракрасный спектр обычно рассматривают в трех диапазонах: ближний инфракрасный, средний инфракрасный и дальний инфракрасный. Основная причина такого деления заключается в том, что объекты излучают обычно в одном диапазоне больше, чем в других [279]. Например, человеческое тело излучает больше в дальнем инфракрасном диапазоне [123, 127].

Закон Стефана-Больцмана свидетельствует, что мощность излучения абсолютно черного тела прямо пропорциональна площади его поверхности и четвертой степени температуры: $E = \sigma T^4$ (где σ – постоянная Стефана-Больцмана) [279]. То есть, небольшие изменения температуры приводят к значительным изменениям излучательной способности. Это соотношение объясняет возможность расчета температуры по излучающей способности объекта и идентификацию областей с разной температурой. Можно сказать, что закон Стефана-Больцмана является основным законом, обуславливающим клиническое использование инфракрасной термографии.

Инфракрасное излучение ведет себя аналогично лучам видимого спектра. Его распространение можно описать с использованием принципов геометрической оптики [279]. В однородных материалах инфракрасное излучение распространяется по прямой линии, как и видимые лучи. Кроме того, к инфракрасному излучению применимы геометрические принципы отражения и преломления лучей. В связи с этим, такие характеристики поверхностей, как гладкость или шероховатость, влияют на излучение и поглощение инфракрасного спектра и используются в различных областях промышленности [242, 279].

При визуализации человеческого тела эти соображения важны для понимания того, почему по границе тела значения температур обычно занижены. Потеря инфракрасного излучения из-за сложной формы очертаний при термографии является важным источником ошибки [27, 226, 280].

В спортивной медицине наиболее важным «материалом», который изучают при помощи термографии, является кожа человека. Коэффициент излучения кожи находится в диапазоне 0,97-0,99 со стандартным отклонением 0,01 [144, 227, 238, 270]. В научных исследованиях излучательную способность кожи принято считать равной 0,98. Это означает, что кожа является хорошим источником инфракрасного излучения, и можно достаточно точно рассчитать ее температуру.

Итак, все тела, которые имеют температуру выше абсолютного нуля, излучают инфракрасное излучение, а инфракрасные камеры способны его фиксировать. Излучаемая абсолютно черным телом энергия пропорциональна четвертой степени его температуры. Это соотношение объясняет чувствительность тепловых камер. Кожа является хорошим источником инфракрасного излучения (излучательная способность 0,98), что имеет большое значение для использования термографии в медицине. В исследованиях на людях необходимо учитывать терморегуляцию [63, 65, 77, 119, 127, 151, 159, 277].

1.5.2 Использование тепловидения в реабилитации и спортивной медицине

Инфракрасная термография помогает в процессе реабилитации посредством количественной оценки процесса возвращения поврежденного сегмента к нормотермии [39]. В настоящее время перечень работ, посвященных использованию термографии в реабилитации после реконструкции ПКС, ограничен.

Автор докторской диссертации [62], включавшей данные о 25 пациентах после реконструкции ПКС делает вывод о том, что восстановление температурной симметрии происходит значительно позже, чем срок завершения формальной реабилитации.

Одним из наиболее перспективных направлений ИТ является изучение теплового отклика на тренировку с целью контроля переносимости нагрузок. Тепловая информация с визуализацией активированных различными упражнениями мышечных областей создает основу для прогностического анализа. Сочетание термографической информации с данными о километраже по данным датчиков системы глобального позиционирования и сведениями о субъективном восприятии нагрузок, а также частоте сердечных сокращений может использоваться в предсказании индивидуальной реакции спортсмена на различные реабилитационные стимулы. Примером может служить реализация термографического контроля высокоинтенсивной интервальной тренировки и ее вариаций (повторная спринтерская тренировка, интервальная спринтерская тренировка, короткие или длинные тренировки) с оценкой воздействия на одну или несколько мышечных областей. Построение по-настоящему индивидуальных реабилитационных программ с использованием термографии возможно, только если известно, какой отклик дает то или иное реабилитационное воздействие и как его интерпретировать [3].

1.5.3 Термографическая оценка воспаления в суставах

В одном из первых исследований, посвященных клиническому использованию температурных данных области коленного сустава, была описана методика отслеживания острого воспаления суставов у пациента с ревматоидным артритом. Локальная температура позволила судить об эффективности противовоспалительных препаратов быстрее и с меньшими затратами, чем другие методы количественной оценки воспаления [71].

В целом, из литературного анализа следует, что выраженность воспаления и эффект противовоспалительной терапии у человека определить количественно довольно трудно [72, 197, 219, 220]. Именно поэтому, для объективизации ответа на противовоспалительное лечение делаются попытки использовать метод термографии суставов. И, согласно научным данным, этот метод является очень удобным и точным [72, 219, 220].

Коленный сустав человека более других подходит для изучения воспалительной реакции при помощи различных методов, в том числе посредством термографии. В этом суставе просто осуществить доступ к внутрисуставному пространству, легко удалить синовиальный выпот, возникающий во время острых эпизодов воспаления, связанного с ревматоидным и другими артритами. Надколенник, в свою очередь, является удобной областью получения серии показаний температуры в положении полного разгибания коленного сустава. Именно поэтому, в литературе больше всего работ, посвященных изучению воспаления именно в коленном суставе. Поскольку кожа человека, независимо от ее пигментации, является почти идеальным излучателем инфракрасного излучения, существует прямая зависимость между температурой и излучательной способностью поверхности кожи [72, 219, 220].

В одном из самых ранних фундаментальных исследований динамики локальной температуры коленного сустава [128] замеры проводились на суставах здоровых добровольцев и пациентов с артритом. При этом помимо оценки температуры кожи выполняли исследование внутрисуставной температуры посредством термодатчика, которую вводили через инъекционную иглу. Авторы пришли к выводу, что количество выпота практически не влияет на температуру, а лишь на скорость ее изменения во времени. В этом исследовании была выявлена корреляция ($r = 0,65$) внутрисуставной температуры с температурой кожи над суставом. Таким образом, замеры температуры околосуставных тканей при некоторых формах артрита, позволяют получить достаточно точную информацию о выраженности воспаления в суставе, так как температура синовиальной жидкости напрямую зависит от гиперемии синовиальной оболочки [124, 128].

В исследовании пациентов с гонартрозом [40] получены средние значения для температуры здоровых коленей ($25,83^{\circ}\text{C}$) и для коленных суставов пациентов с остеоартрозом ($28,75^{\circ}\text{C}$). После нагрузок наблюдался прирост средней температуры на $1,15^{\circ}\text{C}$ для группы с остеоартрозом и на $2,31^{\circ}\text{C}$ для здоровых пациентов [40].

При помощи инфракрасной термографии исследовали различные состояния опорно-двигательного аппарата: комплексный региональный болевой синдром [59, 66], ювенильный полиартрит, ревматоидный артрит, остеоартрит [43, 44, 48, 89, 131, 149, 185, 187, 247].

Bhowmik с соавт. изучал воспаление и его термографический ответ в коленном суставе при остеоартрозе (ОА) и ревматоидном артрите (РА) [185]. Он обнаружил, что у пациентов с РА наблюдалось двустороннее повышение температуры, в то время как при ОА повышение температуры было асимметричным.

Lerkvaleekul с соавт. оценивали использование инфракрасной термографии и УЗИ в диагностике артрита суставов запястья [247]. Средние и максимальные температуры, оцененные с помощью инфракрасной термографии в интересующей области, были выше в группе с активным артритом, чем в группе с неактивным артритом и здоровой контрольной группой. Кроме того, температура в подгруппе тяжелых артритов была значительно выше, чем в подгруппе легкого течения. Индекс распределения теплового излучения следовал той же тенденции: в группе пациентов с артритом средней и тяжелой степени этот показатель был значительно выше, чем у здоровых людей. Результаты ясно показали связь между тяжестью артрита и изменениями абсолютной температуры.

Denoble с соавт. использовали термографию для обследования пациентов с ОА коленного сустава [187]. И, хотя результаты не были статистически значимыми, связь между температурой и тяжестью патологии была обнаружена, как и в предыдущем исследовании. Так, температура коленного сустава, измеренная над надколенником, была выше у пациентов с 3 ст. артроза ($30,5^{\circ}\text{C}$), чем у пациентов со 2 ст. ($30,1^{\circ}\text{C}$).

Powite с соавт. [131] изучили связь между болью и степенью воспаления суставов с помощью ИТ у детей от 4 до 16 лет с ювенильным РА. Была зафиксирована значительная корреляция между болью и температурой больного сустава. В этом смысле следует особо подчеркнуть роль термографии в объективизации уровня боли. Дело в том, что существуют исследования, которые

подтверждают, что на суждение начинающих медработников о выраженности боли и необходимости назначать анальгетики влияют пол пациента, цвет его кожи и возраст [253].

Hegedűs с соавт. оценивали эффективность низкоуровневого лазерного лечения ОА коленного сустава и использовали термографию для проверки терапевтического эффекта [248]. Пациентов с ОА, получавших низкоуровневое лазерное лечение, сравнивали с нелечеными контрольными пациентами. Эффективность лечения для уменьшения боли у пациентов оценивали по субъективной шкале боли от 0 до 10, чувствительности коленного сустава к давлению и измерению температуры кожи сустава с помощью ИТ до, во время и после лечения. В других исследованиях термография была успешно использована для оценки эффективности иглоукалывания и препаратов гиалуроновой кислоты [99, 244].

Необходимо учитывать, что боль при остеоартрозе имеет многофакторное происхождение и что термографические изменения следует интерпретировать преимущественно как отражение воспалительного компонента заболевания, а не выраженности болевого синдрома [87, 145, 263, 267].

Вышеперечисленные исследования подтверждают, что термография может успешно использоваться для количественной оценки воспалительного ответа суставов при различных патологиях, многие из которых существенно обременяют систему здравоохранения [58].

Но некоторые факторы могут значимо влиять на характеристики фиксируемого термографией излучения. К ним можно отнести особенности оборудования, окружающую температуру, изменения расстояния между суставом и камерой, угол измерения и внутренние факторы, такие как изменчивость кровотока из-за состава крови (реология) и/или механические нарушения местного кровотока (например, тромбоз глубоких вен) [287]. Эти факторы необходимо учитывать при клиническом применении инфракрасной термографии.

Другим потенциальным ограничением для использования ИТ в клинической практике является фактор стоимости. В минимальной конфигурации на современном этапе термография подразумевает наличие ИК-камеры и персонального компьютера с локально установленным или облачным программным обеспечением. Расходные материалы обычно не требуются. При этом комплект камеры и персонального компьютера со специализированным ПО должен быть зарегистрирован как изделие медицинского назначения. Следует отметить, что по сравнению с другими неинвазивными системами, способными распознавать изменения перфузии кожи, связанные с воспалением суставов, такими как лазерная доплеровская флоуметрия или лазерная спектр-визуализация, оборудование для термографии значительно дешевле [67].

1.5.4 Термографическая оценка ответа конечностей на физическую нагрузку

Fernandez-Cuevas I. [109] в своем исследовании получил важные результаты касательно термографического ответа на физическую нагрузку. Согласно его исследованию, местная температура реагирует на аэробные тренировки в различных областях тела по-разному. В проекции основных задействованных мышц, сразу после аэробной нагрузки наблюдается незначительное снижение температуры в сравнении со значением до упражнений. За этим следует увеличение местной температуры и сохранение повышенных значений в течение 8-часового периода восстановления. В проекции вспомогательных мышечных групп местная температура сразу после аэробных упражнений снижается, после чего она в течение часа восстанавливается до начальных значений и остается стабильной в течение всего периода восстановления с более высокими числами по сравнению со значениями покоя [109].

При аэробных упражнениях суставная температура заметно увеличивается сразу после тренировки, возвращаясь к значениям покоя через 2-4 часа после окончания упражнения. Далее она остается стабильной в течение всего периода восстановления [109].

Существует явная тенденция, заключающаяся в поддержании симметричной двусторонней тепловой реакции конечностей и однонаправленных изменений температуры барабанной перепонки после аэробных упражнений и в течение первых 8 часов восстановления.

Местная температура в зависимости от области интереса демонстрирует также специфическую реакцию на силовые тренировки. Сразу после силовых упражнений температура мышечных областей снижается по сравнению с начальными значениями. После этого следует постепенный подъем ее в течение 8-часового периода восстановления с двумя пиками между 4 и 6 часами после окончания упражнения [109].

Выделение тепла после скоростных тренировок имеет тенденцию концентрироваться в мышечных областях, близких к температурному ядру тела.

Автор обнаружил, что влияние физических упражнений длится не менее 8 часов, так как температурные изменения в большей части мышечных регионов интереса сохранялись в пределах указанного срока [109].

Инфракрасная термография позволяет выявлять отсроченные изменения, связанные с постнагрузочной мышечной болью [262], особенности температурного ответа коленного сустава на разминку [254] и даже реакцию нижних конечностей на механотерапию у пациентов с параличом нижних конечностей [143].

Перспективным направлением использования термографии в спортивной медицине является не только анализ абсолютных температурных значений, но и пространственной неоднородности температурного рисунка [95].

Необходимо заметить, что при интерпретации любых абсолютных температурных значений необходимо учитывать привычный уровень физической активности пациента [265].

1.5.5 Термография в оценке динамики восстановления после травм

С учетом высокой стоимости затрат на лечение разрывов ПКС у спортсменов высокой квалификации, логично рассмотреть любые варианты

предотвращения данной группы спортивных травм [98, 118]. В этом контексте инфракрасная термография обладает огромным потенциалом. С помощью нее может быть создан стартовый тепловой профиль конкретного спортсмена или атлетов внутри дисциплины или команды. В таком случае можно будет оценить любое отклонение температуры конкретной области и если ситуация возникает в результате перегрузок или неблагоприятного заживления после травм, то оценить, а также скорректировать причину появления тепловых аномалий можно будет еще до того, как произойдет усугубление повреждения [245].

Возможность использования термографии для динамического контроля восстановления показана и при повреждениях голеностопного сустава. После реактивной гипертермической реакции происходило уменьшение температурной асимметрии [201].

В соответствии с концепцией анатомической пропорциональности, в норме тепловой отклик является симметричным. При сравнении симметричных частей тела приемлемыми по разным источникам считаются разницы до $0,25^{\circ}\text{C}$ [278]; $0,4^{\circ}\text{C}$ [191]; $0,5^{\circ}\text{C}$ [266, 274] или $0,62^{\circ}\text{C}$ [107]. Более высокие значения разницы температур могут говорить о воспалительных [24, 50, 144, 243] или дегенеративных процессах [138, 191].

Таким образом, обзор литературных источников свидетельствует о том, что применение термографии в спортивной медицине имеет ряд нерешенных вопросов. В частности, отсутствуют общепринятые нормативы термографических показателей коленного сустава для послеоперационного периода. Непонятно, можно ли использовать имеющиеся рискованные шкалы для заключения о благоприятном или осложненном его течении. Данные говорят об актуальности изучения реакции коленного сустава на реабилитационную нагрузку при помощи инфракрасной термографии. Разработка методики термографического контроля за реабилитацией может быть направлена на выявление потенциальных случаев осложненного течения послеоперационного периода на основании предоперационных данных и скрининга после вмешательства. В первом случае целью будет являться контроль допуска спортсменов на операцию на основании

предоперационного термографического статуса травмированного сустава. Во втором – динамическая оценка состояния оперированного сустава на всех этапах реабилитации посредством визуального контроля значений температуры коленного сустава пациента относительно опорных кривых распределения температурных показателей.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Организация исследования, характеристика выборки

Исследование проводилось на базе Центра комбинированных поражений ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. В исследовании на различных этапах приняли участие 183 спортсмена разных видов спорта, членов Сборных команд РФ. Юридическим обоснованием вовлечения спортсмена в исследование являлось подписанием ими информированного согласия пациента на участие в исследовании и на использование его медицинских данных в научных целях. Также были определены следующие критерии включения, невключения и исключения пациентов из исследования.

Критериями включения в исследование стали:

- пациент, являющийся спортсменом, действительным членом сборных команд РФ;
- возраст 18 лет и старше;
- передняя нестабильность коленного сустава на фоне разрыва ПКС;
- реконструкция ПКС с использованием аутотрансплантата.

В настоящей работе термин «разрыв ПКС» использован для обозначения ведущего повреждения в коленном суставе, определявшего переднюю нестабильность с необходимостью реконструкции передней крестообразной связки. Но в исследование были включены как изолированные разрывы ПКС, так и сочетания разрывов ПКС с повреждением менисков, суставного хряща и частичным повреждением отдельных стабилизирующих структур коленного сустава. Ведущим клиническим симптомом при этом оставалась передняя нестабильность, а характер сопутствующих повреждений и объем дополнительных внутрисуставных вмешательств регистрировали и учитывали при последующем анализе.

Критериями невключения пациентов в исследование были:

- возраст младше 18 лет;

- клинико-лабораторные признаки инфекции в суставе на момент входа в исследование;
- наличие в анамнезе других операций на травмированном коленном суставе;
- использование трансплантата из неаутологичных тканей (синтетических лент, аллотрансплантата);
- ведущие симптомы недостаточности других связок помимо ПКС;
- беременность;
- нарушение сознания, психические расстройства, выраженный когнитивный дефицит;
- декомпенсация хронических заболеваний;
- острые инфекции;
- стабильное повышение температуры тела выше 37,5°C;
- злокачественные новообразования;
- тяжелая форма анемии;
- развившийся тромбоз, тромбофлебит в оперированной конечности;
- инфекционные заболевания кожных покровов оперированной конечности, в т.ч. рожистое воспаление;
- частные противопоказания для проведения низкочастотной магнитотерапии, электростимуляции и воздействия электростатическим полем (наличие имплантированных электростимуляторов, том числе электрокардиостимулятора, эпилепсии, индивидуальной непереносимости данных факторов).

Критериями исключения пациентов из исследования были определены:

- отказ пациента от дальнейшего участия в исследовании;
- декомпенсация хронических заболеваний;
- развитие острого воспалительного процесса, не связанного с операцией на коленном суставе.

Исследование проведено с соблюдением этических принципов и требований в соответствии с Хельсинской декларацией «Этические принципы медицинских исследований с привлечением человека» (2008) и было одобрено локальным этическим комитетом ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России (выписка из протокола № 119а от 16.10.2024).

На первом этапе был проведен анализ данных литературы по выявленной проблеме. Проанализированы основные варианты использования инфракрасной термографии в спортивной медицине и направления медицинской реабилитации после пластики ПКС, основанные на критериях.

На втором этапе проанализирован общий массив термографических данных спортсменов до операции и после нее в группе неосложненного и осложненного течения послеоперационного периода. Отнесение пациента к группе осложненного течения осуществляли независимо от результатов термографии на основании детального анализа каждого неблагоприятного клинического события с сопоставлением контрольной МРТ, результатов анкетирования, физикального осмотра, клинических анализов и данных ревизионной артроскопии, там, где это было релевантно. Из 183 спортсменов, включенных в исследование, мужчин было 92 (50,3%), а женщин – 91 (49,7%). Все спортсмены на момент включения в исследование были членами сборных команд РФ по различным видам спорта (рис. 1).

На третьем этапе исследования выполнена проверка состоятельности гипотезы о наличии достоверных термографических отличий между оперированной и неоперированной конечностями в группе пациентов с осложненным и неосложненным течением послеоперационного периода. Произведена сегментация данных на временные блоки и выполнена статистическая проверка состоятельности такого разделения. При этом подтверждали наличие отличий конкретного параметра в разных временных блоках, а также сохранение различий между оперированной и неоперированной конечностями для каждого временного блока.

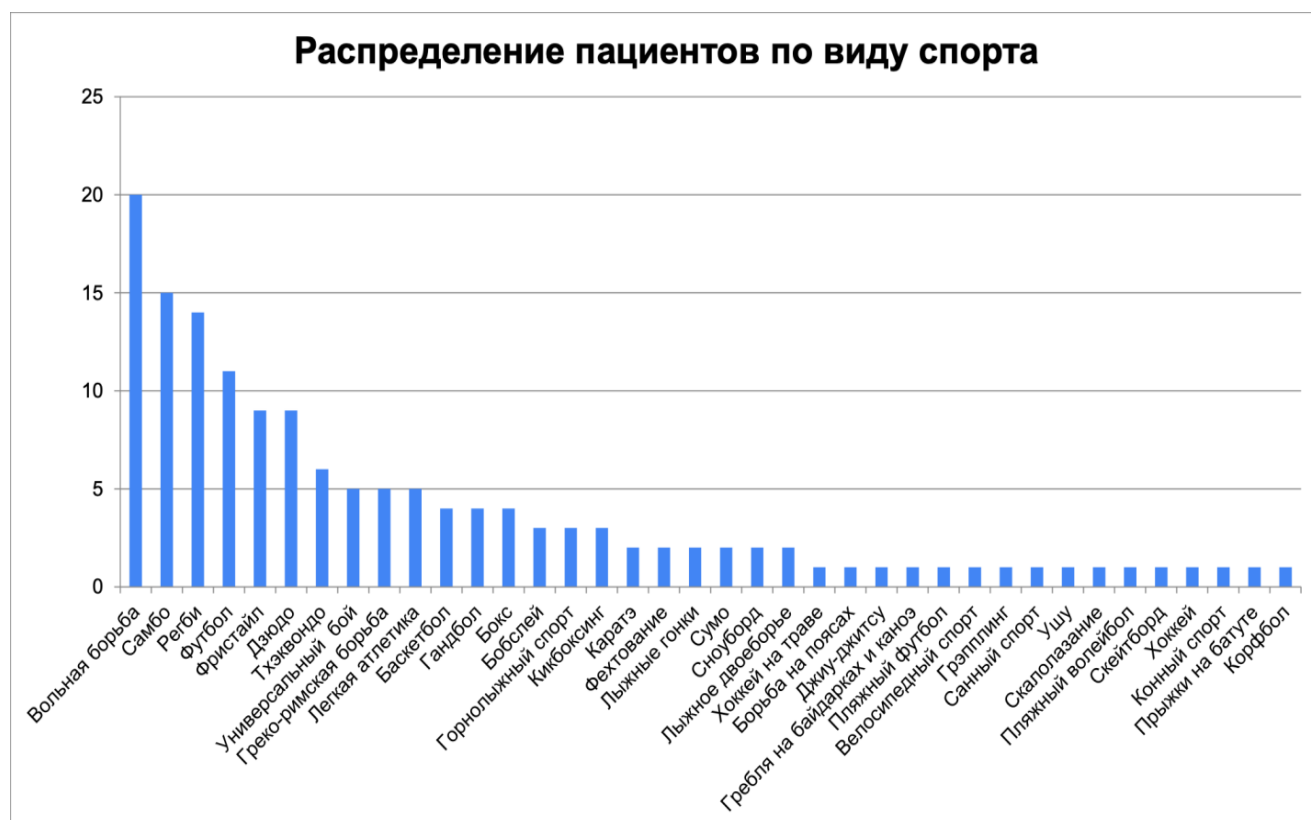


Рисунок 1 – Распределение пациентов по виду спорта

На четвертом этапе было сформулировано решающее правило для прогнозирования осложненного течения по данным термографических показателей, полученных в предоперационном периоде. Был выполнен анализ термографических данных пациентов в послеоперационном периоде и осуществлено перцентильное представление данных.

Для анализа сроков возвращения термографических параметров к нормотермии были использованы ранее полученные и частично опубликованные автором данные о нормальных температурах коленного сустава у профессиональных спортсменов из отдельной независимой когорты. Она включала 160 профессиональных спортсменов, членов сборных команд РФ (73 мужчин (45,6%) и 87 женщин (54,4%)). У всех обследованных спортсменов по данным углубленного медицинского обследования не было указаний на патологию коленных суставов. Исследование проведено по тому же протоколу с использованием того же тепловизионного комплекса, что и в основной выборке данного исследования. Распределение пациентов по возрасту было ненормальным

($p < 0,001$, медиана возраста 21 год, половина включенных пациентов была в интервале от 20 до 25 лет, минимальный возраст 18 лет, максимальный – 41 год). Сравнение правой и левой ног у здоровых спортсменов в указанной когорте не выявило статистически значимых различий по термографическим данным при использовании как параметрических, так и непараметрических критериев ($p > 0,05$ для t-критерия и критерия Вилкоксона).

Далее были сформулированы критерии благоприятного,стораживающего и неблагоприятного клинико-термографических профилей восстановления и концепция термографического аналитического инструмента для выявления осложненного течения послеоперационного периода.

На пятом этапе были обобщены и систематизированы полученные результаты, уточнены выводы, сформулированы критерии индивидуализации послеоперационной реабилитации на основании термографических данных.

Исходное комплексное диагностическое обследование спортсменов проводилось при поступлении в Центр комбинированных поражений до начала операции или реабилитационных мероприятий, затем – перед выпиской. При наличии соответствующих показаний обследования проводились чаще. Наполнение обследования, кратность и исследуемые показатели представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Методы исследования на различных этапах реабилитации

Методы диагностики	При поступлении	После курса лечения
Фазы 1-2		
Осмотр врача ортопеда-травматолога	+	+
Осмотр спортивного врача	+	+
Лабораторная диагностика: Общий анализ крови, биохимический анализ крови, общий анализ мочи	+	+

Продолжение таблицы 1

Методы диагностики	При поступлении	После курса лечения
Рентгенография коленного сустава (только для фазы I)		+
Гониометрия	+	+
Инфракрасная термография коленных суставов	+	+
МРТ коленного сустава	+	
Фазы 3-5		
Осмотр спортивного врача	+	+
Осмотр врача ортопеда-травматолога	+	+
МРТ коленного сустава	+	
Антропометрия нижних конечностей	+	+
Исследование компонентного состава тела	+	
Исследование координационных способностей при помощи стабиллоплатформы «Кобс»	+	+
Исследование силовых и мощностных характеристик нижних конечностей при помощи роботизированного биомеханического комплекса «Кон-Трекс»	+	+

2.2 Методы диагностики травм коленного сустава

2.2.1 Сбор анамнеза

В Центре комбинированных поражений на этапе сбора анамнеза особое значение придавали информации о виде спорта, продолжительности спортивной

карьеру, квалификационном уровне, а также информации о ранее перенесенных травмах и заболеваниях.

У спортсменов уточняли характер жалоб, их давность и условия возникновения. Фиксировали локализацию и продолжительность симптомов. Указывали пол, возраст, рост и вес спортсмена.

Уточняли положение коленного сустава в момент травмы, травмирующий фактор и время, прошедшее от момента травмы до операции. В медицинской карте фиксировали, была ли получена травма во время тренировки или соревнований. Отмечали все ранее перенесенные травмы и хирургические вмешательства, равно, как и их осложнения.

2.2.2 Клинический осмотр

Клинический осмотр проводили по принятой в клинике методике. Для этого оценивали наличие или отсутствие отклонений нормальной анатомической оси нижних конечностей [205], наличие явной деформации и отека при визуальном осмотре. Выполняли силовое мануальное мышечное тестирование нижних конечностей по шкале от 0 до 5 баллов согласно принятым критериям [23, 57]. Дополнительно выполняли исследование силы мышц при помощи ручного электронного динамометра. Проверяли наличие динамических блокад и хруста. Оценивали стабильность надколенника. Выполняли тесты, специфичные для повреждения связок (варусный стресс-тест, вальгусный стресс-тест [42], тест Лахмана [172], тесты переднего и заднего «выдвижного ящика», тест ротационного смещения (pivot shift test)), и тесты повреждения менисков (тест Мак-Мюррея (McMurrey test), тест Аплея (Appley test), тесты Штейнман I и Штейнман II (Steinmann I-II tests), тест Фессали (Fessaly test) [85]). Все тесты выполнялись как на оперированной, так и на контралатеральной нижней конечности.

2.2.3 Оценка функции коленного сустава

Субъективная оценка функции коленного сустава после операции выполнялась в два этапа при помощи специализированных опросников: международного субъективного опросника состояния коленного сустава IKDC (International Knee Documentation Committee Subjective Knee Form), опросника Lysholm и шкалы Cincinnati. Для первого этапа анкетирования медиана срока после операции составила 503 суток, для второго 1495 суток.

Опросник IKDC – специализированный инструмент, позволяющий оценить выраженность симптомов и функциональный статус пациентов с травмами и заболеваниями коленного сустава, включая разрывы ПКС. Результат оценивается по шкале от 0 до 100 баллов. Чем выше балл, тем меньше выраженность симптомов и выше уровень функциональной и спортивной активности [9]. Из всех использованных опросников является самым «глобальным» и может сглаживать отдельные проблемы, например нестабильность или ограничения в специфических движениях.

Опросник Lysholm предназначен для оценки состояния пациентов с повреждениями ПКС и менисков. Шкала включает 8 разделов, охватывающих симптомы (например, наличие отека и чувство нестабильности) и жалобы пациента. Итоговый результат шкалы от 0 до 100 баллов, где более высокие значения соответствуют меньшей выраженности симптомов и лучшему функциональному состоянию [257]. Хорошо отражает механические симптомы, блокирования, наличие нестабильности. Но менее полно, чем другие опросники, позволяет оценить спортивную активность и субъективную готовность спортсмена к увеличению нагрузок.

Шкала оценки функции коленного сустава Cincinnati (Cincinnati Knee Rating System) состоит из 8 вопросов, которые включают оценку уровня боли, наличия выпота и нестабильности, уровня повседневной активности, а также возможности выполнить базовую нагрузку и прыжки. Итоговый балл варьируется от 6 до 100 баллов, где больший балл соответствует лучшему функциональному состоянию коленного сустава [51]. Этот опросник больше ориентирован на оценку

профессиональной спортивной функциональной активности и состоятельности связок на фоне нагрузки.

Объединенная форма, включающая все 3 опросника, представлена в Приложении 2.

2.2.4 Инструментальные методы диагностики

2.2.4.1 Антропометрия нижней конечности и гониометрия коленного сустава

Всем спортсменам проводили сегментарное измерение длины конечностей при помощи сантиметровой ленты.

Гониометрию коленного сустава выполняли при помощи электронного двуплечевого гониометра с угловой шкалой 0-180°. Пациент располагался на жесткой кушетке в положении лежа на спине. Для исключения компенсаторных движений таз фиксировался рукой исследователя. Ось гониометра располагалась на уровне латерального мыщелка бедренной кости (ориентир – латеральный надмыщелок). Неподвижное плечо гониометра ориентировалось вдоль продольной оси бедра и направлялось к большому вертелу бедренной кости [180]. Подвижное плечо располагалось вдоль оси голени и направлялось к латеральной лодыжке.

Для оценки ограничения объема движения ориентировались на общепринятые нормы движений. Для определения объема движения при выполнении двигательных заданий, а также для оценки проприоцептивной чувствительности использовали технику трекинга светоотражающих маркеров в редакторе Kinovea®.

2.2.4.2 Магнитно-резонансная томография коленного сустава

Целями применения МРТ-диагностики в ходе исследования были предоперационная оценка состояния травмированных структур коленного сустава, контроль анатомического положения трансплантата и хода лигаментизации после операции. Была проверена гипотеза о наличии связей

между состоянием трансплантата по данным МРТ и термографическими параметрами.

Исследования коленных суставов проводились на МР-томографах GE Signa Architect и Siemens Magnetom Sola с напряженностью магнитного поля 3 Тл и 1,5 Тл соответственно. Использовалась специализированная коленная катушка. Во время исследования пациент лежал на спине, коленный сустав в положении легкого сгибания ($5-10^\circ$). Сканирование выполняли в аксиальной, сагиттальной, корональной (в послеоперационном периоде – дополнительно косо-сагиттальная) плоскостях. Толщина среза составляла 3 мм. Матрица: 320×320 или выше. Поле обзора – 14-16 см.

Протокол стандартного дооперационного обследования включал в себя следующие последовательности. PD-weighted FatSat (proton density weighted fat saturation) – изображения, взвешенные по протонной плотности с подавлением сигнала от жира в сагиттальной, аксиальной (для оценки проксимального места прикрепления связки) и корональной плоскостях с целью визуализации связочного аппарата, менисков, суставного хряща, отекоподобных поражений костного мозга. T1-weighted spin echo – T1-взвешенное спин-эхо для сагиттальной плоскости с целью оценки анатомических взаимоотношений и сигнала от костного мозга, костных фрагментов, линий переломов, субстрата выпота. T2-weighted turbo spin echo – T2-взвешенное турбо спин-эхо с подавлением сигнала от жировой ткани – аксиальная и корональная плоскости, для выявления отека костного мозга, субстрата выпота. Дополнительные специализированные последовательности применяли по клиническим показаниям; их показатели в статистический анализ не включали.

Протокол послеоперационного обследования (через 3, 6 и 12 месяцев после вмешательства) включал последовательности: PD-weighted FatSat (сагиттальная, корональная плоскости) для оценки сигнала от трансплантата, расположения туннелей и сигнала от них, хряща и менисков. T2 weighted FatSat – T2-взвешенное изображение с подавлением сигнала от жира (аксиальная плоскость) для выявления отека, синовита, реакции костного мозга. T1-weighted spin echo –

T1-взвешенное спин-эхо (сагиттальная плоскость) для визуализации хода и анатомического положения трансплантата, стенок костных туннелей, для визуализации синовиальной оболочки.

Для оценки состояния трансплантата передней крестообразной связки использовались критерии, суммированные в Таблице 2. Описательные характеристики включали:

- анатомическое положение трансплантата. Сигнальные характеристики трансплантата условно характеризовали по степени интенсивности: I – гипоинтенсивный сигнал (зрелый трансплантат); II-III – умеренно гиперинтенсивный (реорганизация волокон); IV – диффузно гиперинтенсивный (признаки несостоятельности или частичного разрыва трансплантата);
- размер и структура костных туннелей, признаки остеолита;
- состояние фиксаторов (интерферентных винтов, пуговиц);
- наличие синовиальной оболочки вокруг трансплантата;
- оценку менисков, хряща и синовии (признаки перегрузки, фиброза или воспаления);
- объем суставного выпота и состояние жирового тела Hoffa;
- зоны отекоподобного поражения и ремоделирования крыши межмыщелковой ямки (gouf-импинджмент).

Таблица 2 – Основные критерии оценки состояния трансплантата ПКС по данным МРТ, использованные в работе

№	Наименование методики	Суть оценки	Интерпретация
1	Условная четырехступенчатая градация интенсивности МР-сигнала трансплантата	Оценка интенсивности МР-сигнала трансплантата по сравнению с ЗКС (PD/T2): I – изо- или гипоинтенсивный; II – слегка повышенный, с видимой волокнистостью; III – умеренно повышенный, неоднородный; IV – диффузно гиперинтенсивный, без волокнистости	I – зрелый трансплантат; II – ремоделирование; III-IV – возможная несостоятельность/воспаление; обязательна оценка в динамике

Продолжение таблицы 2

№	Наименование методики	Суть оценки	Интерпретация
2	Коэффициент сигнал/шум	$SNQ = \frac{Сигнал_{ПКС} - Сигнал_{ЗКС}}{Сигнал_{фон}}$	Используется в комплексной оценке. Абсолютные значения для нормы и патологии достоверно не определены
3	Относительный показатель неоднородности магнитно-резонансного сигнала	$rSD = \frac{SD_{ПКС}^2}{SD_{ЗКС}^2}$	Также используется в комплексной оценке. Абсолютные значения для нормы и патологии достоверно не определены
4	Ангуляция задней крестообразной связки	Первая линия (а) между проксимальной (бедренной) и дистальной (большеберцовой) точками прикрепления ЗКС. Перпендикулярно проводилась вторая линия (б) до наиболее удаленной точки изгиба связки. Норма б/а = 0,27±0,06	>0,33 – патологический угол (ангуляция ЗКС)
5	Смещение голени	Оценивается смещение большеберцовой кости относительно бедренной в мм.	Используется в комплексной оценке. Абсолютные значения для нормы и патологии достоверно не определены

Значение SNQ определяли по формуле (1) как отношение разности между средней интенсивностью сигнала в двух областях интереса передней крестообразной связки и интенсивностью сигнала задней крестообразной связки к величине фонового сигнала воздуха:

$$SNQ = \frac{Сигнал_{ПКС} - Сигнал_{ЗКС}}{Сигнал_{фон}} \quad (1)$$

Относительный показатель неоднородности магнитно-резонансного сигнала rSD рассчитывали по формуле (2) как отношение дисперсии интенсивности сигнала трансплантата ПКС к дисперсии интенсивности сигнала ЗКС:

$$rSD = \frac{SD_{ПКС}^2}{SD_{ЗКС}^2} \quad (2)$$

Коэффициент угла задней крестообразной связки определяли на сагиттальных срезах, где четко визуализировались ее бедренная и большеберцовая точки фиксации. Линию «а» проводили между проксимальной и дистальной точками прикрепления ЗКС, затем к ней строили перпендикулярную линию «б» до наиболее удаленной точки изгиба связки. Норма: $b/a = 0,27 \pm 0,06$. Показатель b/a более 0,33 трактовали как наличие ангуляции задней крестообразной связки.

Смещение голени оценивали на сагиттальных изображениях в зоне, расположенной между кортикальным контуром, прилежащим к ЗКС в межмышечковой вырезке, и наиболее латеральным срезом с визуализацией латерального мыщелка бедренной кости. Через задние кортикальные контуры латерального мыщелка бедренной кости и латерального мыщелка большеберцовой кости проводили две вертикальные линии, параллельные рамке изображения. Расстояние между этими линиями измеряли в миллиметрах и использовали для характеристики переднего либо заднего подвывиха большеберцовой кости относительно бедренной.

2.2.4.3 Исследование коленных суставов при помощи инфракрасной термографии

Термографическое исследование проводили с использованием камеры NEC Thermo Tracer TH9100 (NEC Corporation Ltd., Япония). Чувствительность прибора составляла 0,04 К, а погрешность измерения – $\pm 2\%$ в температурном диапазоне от 0 до 60°C. Размер матрицы камеры – 320×240 пикселей.

Термограммы анализировали в программном комплексе медицинской обработки и анализа тепловизионных изображений «TVision» (ООО «Дигносис»,

Москва; регистрационное удостоверение Росздравнадзора № РЗН 2021/15932 от 02.08.2022).

Условия проведения съемки были следующими. Во время обследования спортсмены стояли на платформе высотой до 4-5 см для исключения влияния температуры пола. Регистрацию изображений выполняли на фоне матового белого экрана размером 100×200 см. Температуру, влажность и атмосферное давление в помещении фиксировали переносной метеостанцией RSTQ779 и поддерживали в пределах стабильных значений, как того требуют стандартные протоколы [203]. Средняя температура в помещении поддерживалась в пределах $21^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ (стандартные условия проведения термографических исследований [113]). Влажность составляла не более 60%, а атмосферное давление за весь период наблюдений в среднем составляло $757,5 \pm 7$ мм рт. ст. Площадь кабинета, в котором проводилось обследование, составляла около 65-70 м².

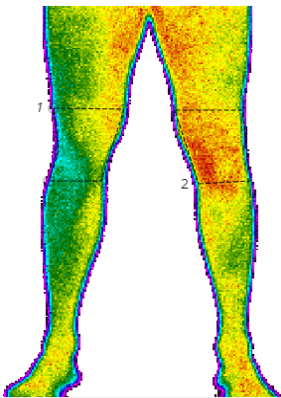
Все обследования выполняли в утренние часы – с 9:00 до 10:00. Термограммы получали до начала реабилитационных мероприятий. Обследование проводили накануне операции либо утром в день вмешательства. Затем в индивидуально определяемые сроки до завершения реабилитации, которая могла продолжаться более года. Исключали нанесение перед обследованием кремов на область сустава, проведение массажа, прием душа в течение 8 часов перед обследованием, а также обильный прием пищи, кофе. Курение и прием алкоголя спортсменами были исключены [218]. Перед съемкой пациент проходил адаптацию к окружающим условиям в течение 10-15 минут [113]. Исследование проводили в коротких шортах. Камера находилась на расстоянии 2,5 м от коленных суставов спортсмена [218]. Сначала выполняли обзорную съемку нижних конечностей спереди, с латеральной и медиальной сторон, а также сзади; затем те же ракурсы регистрировали крупным планом для области коленных суставов.

При последующем анализе термографических изображений на каждой конечности выделяли несколько зон интереса. Выбор зон интереса был продиктован необходимостью максимально вовлечь в анализ травмированные

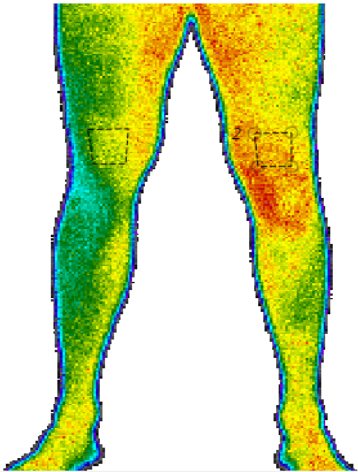
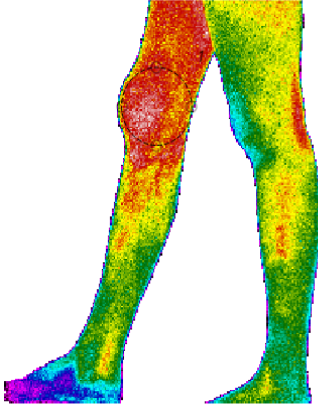
ткани. А именно, собственно область коленного сустава и зоны забора сухожильных аутотрансплантатов на бедре и голени, соответствующие анатомическим областям regio genus anterior et posterior, regio femoralis anterior et posterior, regio cruralis anterior et posterior. В данном исследовании подход, при котором несколько анатомических областей объединяют в одну, сочли нерациональным, поскольку кожа над суставами и мышцами по-разному реагирует на аэробную нагрузку [109]. Поэтому объединение мышечных и суставных зон для одного измерения считали методически необоснованным.

При реконструкции ПКС аутотрансплантат мог быть забран из структур разгибательного аппарата коленного сустава, включая сухожилие четырехглавой мышцы бедра и связку надколенника. В таких случаях на ранних этапах исследования дополнительно оценивали резервные зоны температурных измерений. Все термографические параметры, использованные в работе, и их обозначения по зонам интереса приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Обозначения термографических параметров по зонам интереса

Зона интереса	Термографические параметры
Область коленного сустава спереди А. Согласно гламорганскому протоколу (код ВКА) 	Min, Max, Средн. – минимальное, максимальное и среднее значения кожной температуры неоперированной конечности в зоне интереса «Область коленного сустава спереди» Min Inv, Max Inv, Средн. Inv – минимальное, максимальное и среднее значение кожной температуры оперированной ноги, в зоне интереса «Область коленного сустава спереди»
	Вычисленные параметры: Delta Min, Delta Max, Delta Средн. – разница между минимальными, максимальными и средними значениями для данной зоны интереса между оперированной и неоперированной ногой. <i>Здесь и далее Delta параметр это результат вычитания из значения температуры стороны планируемой или выполненной реконструкции температуры контралатеральной стороны.</i>

Продолжение таблицы 3

Зона интереса	Термографические параметры
Область коленного сустава спереди Б. Снимок надколенника по DeNoble 	Patellar Min, Patellar Max, Patellar Средн. – минимальное, максимальное и среднее значения кожной температуры неоперированной конечности в зоне интереса «область коленного сустава спереди – снимок надколенника по DeNoble» Patellar Inv Min, Patellar Inv Max, Patellar Inv Средн. – минимальное, максимальное и среднее значения кожной температуры оперированной конечности в зоне интереса «область коленного сустава спереди – снимок надколенника по DeNoble» Вычисленные параметры: Delta Patellar Min, Delta Patellar Max, Delta Patellar Средн. – разница между минимальными, максимальными и средними значениями для данной зоны интереса между оперированной и неоперированной ногой
Медиальный ракурс коленного сустава (резервное измерение) 	Med Min, Med Max, Med Средн. – минимальное, максимальное и среднее значения кожной температуры неоперированной конечности в зоне интереса «Медиальный ракурс коленного сустава» Med Min Inv, Med Max Inv, Med Средн. Inv – минимальное, максимальное и среднее значение кожной температуры оперированной ноги, в зоне интереса «Медиальный ракурс коленного сустава» Вычисленные параметры: Delta Med Min, Delta Med Max, Delta Med Средн. – разница между минимальными, максимальными и средними значениями для данной зоны интереса между оперированной и неоперированной ногой

Продолжение таблицы 3

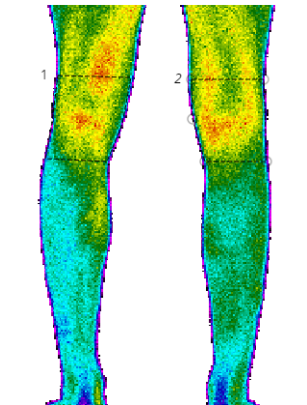
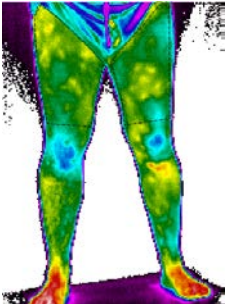
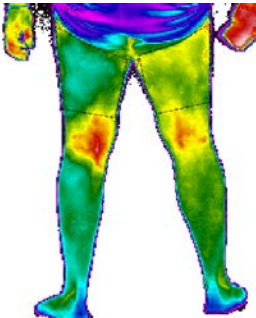
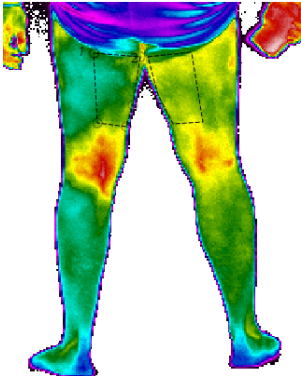
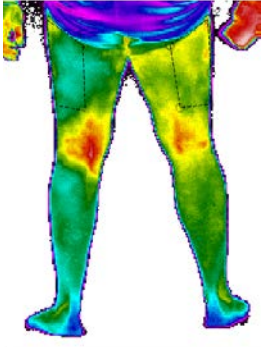
Зона интереса	Термографические параметры
Латеральный ракурс коленного сустава (также резервное измерение) 	Lat Min, Lat Max, Lat Средн. – минимальное, максимальное и среднее значения кожной температуры неоперированной конечности в зоне интереса «Латеральный ракурс коленного сустава» Lat Inv Min, Lat Inv Max, Lat Inv Средн. – минимальное, максимальное и среднее значение кожной температуры оперированной ноги, в зоне интереса «Латеральный ракурс коленного сустава» Вычисленные параметры: Delta Lat Min, Delta Lat Max, Delta Lat Средн. – разница между минимальными, максимальными и средними значениями для данной зоны интереса между оперированной и неоперированной ногой
Подколенная область 	Posterior Min, Posterior Max, Posterior Средн. – минимальное, максимальное и среднее значения кожной температуры неоперированной конечности в зоне интереса «подколенная область» Posterior Inv Min, Posterior Inv Max, Posterior Inv Средн. – минимальное, максимальное и среднее значение кожной температуры оперированной ноги, в зоне интереса «подколенная область» Вычисленные параметры: Delta Posterior Min, Delta Posterior Max, Delta Posterior Средн – разница между минимальными, максимальными и средними значениями для данной зоны интереса между оперированной и неоперированной ногой

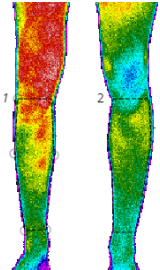
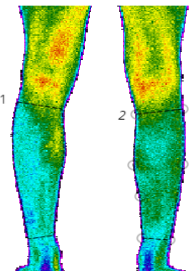
Таблица 3 – Продолжение

Зона интереса	Термографические параметры
Область бедра спереди Единая область от паховой складки вниз до линии, проведенной горизонтально на 5-6 см. над верхним краем надколенника с боковыми границами по контуру бедра 	Fem anterior Min, Fem anterior Max, Fem anterior Средн. – минимальное, максимальное и среднее значения кожной температуры неоперированной конечности в зоне интереса «Область бедра спереди»
	Fem anterior Inv Min, Fem anterior Inv Max, Fem anterior Inv Средн. – минимальное, максимальное и среднее значение кожной температуры оперированной ноги, в зоне интереса «Область бедра спереди»
	Вычисленные параметры: Delta Fem anterior Min, Delta Fem anterior Max, Delta Fem anterior Средн. – разница между минимальными, максимальными и средними значениями для данной зоны интереса между оперированной и неоперированной ногой
Область бедра сзади А. Единая область от ягодичной складки до линии по верхнему краю бедренных мышечков с боковыми контурами по границам бедра 	Fem posterior Min, Fem posterior Max, Fem posterior Средн. – минимальное, максимальное и среднее значения кожной температуры неоперированной конечности в зоне интереса «Область бедра сзади А»
	Fem posterior Inv Min, Fem posterior Inv Max, Fem posterior Inv Средн. – минимальное, максимальное и среднее значение кожной температуры оперированной ноги, в зоне интереса «Область бедра сзади А»
	Вычисленные параметры: Delta Fem posterior Min, Delta Fem posterior Max, Delta Fem posterior Средн. – разница между минимальными, максимальными и средними значениями для данной зоны интереса между оперированной и неоперированной ногой

Продолжение таблицы 3

Зона интереса	Термографические параметры
Область бедра сзади Б. Медиальная задняя зона 	Fem posterior Min, Fem posterior Max, Fem posterior Средн. – минимальное, максимальное и среднее значения кожной температуры неоперированной конечности в зоне интереса «Область бедра сзади – медиальная задняя зона» Fem posterior Inv Min, Fem posterior Inv Max, Fem posterior Inv Средн. – минимальное, максимальное и среднее значение кожной температуры оперированной ноги, в зоне интереса «Область бедра сзади – медиальная задняя зона» Вычисленные параметры: Delta Fem posterior Min, Delta Fem posterior Max, Delta Fem posterior Средн. – разница между минимальными, максимальными и средними значениями для данной зоны интереса между оперированной и неоперированной ногой
Область бедра сзади В. Латеральная задняя зона 	Fem posterior Min, Fem posterior Max, Fem posterior Средн. – минимальное, максимальное и среднее значения кожной температуры неоперированной конечности в зоне интереса «Область бедра сзади – латеральная задняя зона» Fem posterior Inv Min, Fem posterior Inv Max, Fem posterior Inv Средн. – минимальное, максимальное и среднее значение кожной температуры оперированной ноги, в зоне интереса «Область бедра сзади- латеральная задняя зона» Вычисленные параметры: Delta Fem posterior Min, Delta Fem posterior Max, Delta Fem posterior Средн. – разница между минимальными, максимальными и средними значениями для данной зоны интереса между оперированной и неоперированной ногой

Продолжение таблицы 3

Зона интереса	Термографические параметры
Область голени спереди От уровня головки малоберцовой кости (или бугристости большеберцовой кости) до уровня основания лодыжек (до самого узкого места на голени над лодыжками) 	Crus anterior Min, Crus anterior Max, Crus anterior Средн. – минимальное, максимальное и среднее значения кожной температуры неоперированной конечности в зоне интереса «Область голени спереди» Crus anterior Inv Min, Crus anterior Inv Max, Crus anterior Inv Средн. – минимальное, максимальное и среднее значение кожной температуры оперированной ноги, в зоне интереса «Область голени спереди»
	Delta Crus anterior Min, Delta Crus anterior Max, Delta Crus anterior Средн. – разница между минимальными, максимальными и средними значениями для данной зоны интереса между оперированной и неоперированной ногой
Область голени сзади От уровня головки малоберцовой кости до уровня лодыжек (до самого узкого места на голени над лодыжками). 	Crus posterior Min, Crus posterior Max, Crus posterior Средн. – минимальное, максимальное и среднее значения кожной температуры неоперированной конечности в зоне интереса «Область голени сзади» Crus posterior Inv Min, Crus posterior Inv Max, Crus posterior Inv Средн. – минимальное, максимальное и среднее значение кожной температуры оперированной ноги, в зоне интереса «Область голени сзади».
	Delta Crus posterior Min, Delta Crus posterior Max, Delta Crus posterior Средн. – разница между минимальными, максимальными и средними значениями для данной зоны интереса между оперированной и неоперированной ногой

2.3 Методы лечения

2.3.1 Хирургическое лечение

Реконструкцию ПКС в большинстве случаев выполняли без наложения турникета. Через стандартные переднелатеральный и переднемедиальный доступы проводили артроскопическую ревизию коленного сустава. При разрывах менисков выполняли шов или резекцию поврежденных участков; при наличии показаний проводили удаление нестабильных фрагментов хряща и микрофрактурирование хрящевых дефектов. Для восстановления связочного аппарата использовали исключительно сухожильные аутооттрансплантаты. В работе применяли трансплантаты из подколенных сухожилий, сухожилия длинной малоберцовой мышцы, сухожилия четырехглавой мышцы бедра и связки надколенника (рис. 2).

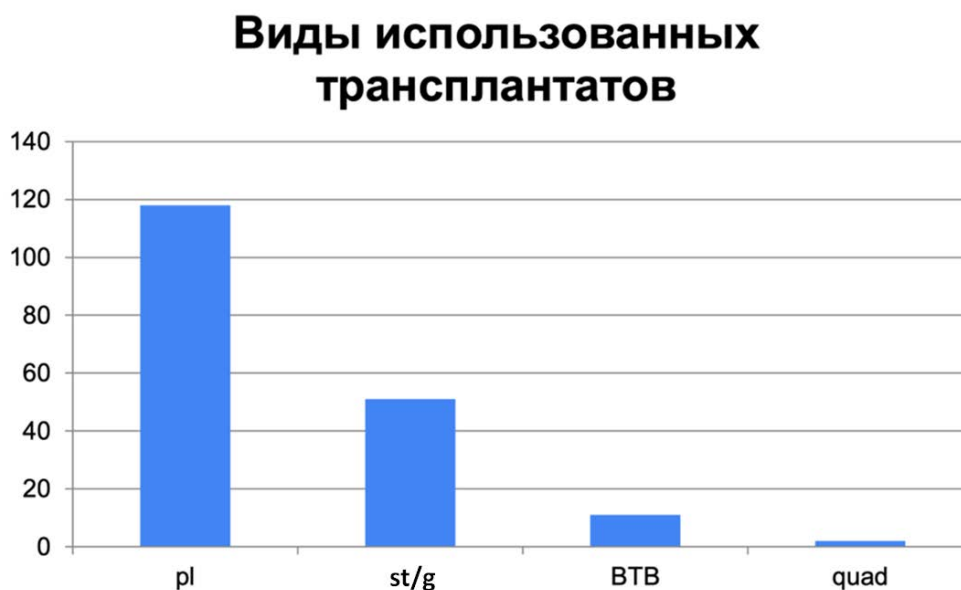


Рисунок 2 – Виды использованных аутооттрансплантатов в количественном выражении

(pl – peroneus longus, трансплантат из сухожилия длинной малоберцовой мышцы;
 st/g – трансплантат из сухожилий полусухожильной и тонкой мышц;
 BTB – bone-tendon-bone, трансплантат из сухожилия связки надколенника;
 quad – quadriceps, трансплантат из сухожилия четырехглавой мышцы бедра)

Обязательным условием считали получение трансплантата диаметром не менее 8 мм. С целью профилактики инфекционных осложнений аутоотрансплантат на 2 минуты погружали в раствор ванкомицина. Дальнейшую фиксацию трансплантата выполняли с учетом типа и размера трансплантата. Использовали следующие варианты фиксации трансплантата: на бедренной кортикальной пуговице и тиббиальном интерферентном винте, двух кортикальных пуговицах по методике “все внутри”, либо при помощи интерферентных винтов при использовании трансплантата из связки надколенника или сухожилия четырехглавой мышцы бедра.

После артроскопической оценки положения и натяжения трансплантата, а также исключения его ущемления при разных углах сгибания коленного сустава, суставную полость многократно промывали физиологическим раствором. Послеоперационные раны в проекции доступов и зоны забора трансплантата ушивали послойно; дренирование сустава не выполняли. Нижние конечности бинтовали эластическими бинтами, после чего коленный сустав фиксировали ортезом с регулируемым углом сгибания.

В операционном протоколе отдельно отражали все сопутствующие повреждения коленного сустава: разрывы менисков, дефекты хрящевого покрова и повреждения связочных структур. Также подробно фиксировали выполненные внутрисуставные вмешательства, включая шов или резекцию менисков, микрофрактурирование и дебридмент.

2.3.2 Методы медицинской реабилитации

Краткий обзор и наполнение лечебно-реабилитационных мероприятий всех фаз медицинской реабилитации после реконструкции ПКС, использованных в настоящем исследовании, приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Лечебно-реабилитационные мероприятия в разные фазы медицинской реабилитации

Лечебно-реабилитационные мероприятия	1-я фаза	2-я фаза	3-я фаза	4-я фаза	5-я фаза
Медикаментозная терапия					
анальгетическая терапия нестероидными противовоспалительными средствами и опиоидными анальгетиками по показаниям	✓				
антикоагулянтная терапия	✓				
периоперационная антибактериальная профилактика по показаниям	✓				
гастропротективная терапия	✓				
лечебное питание с коррекцией нутритивного статуса	✓				
Физиотерапия					
локальная компрессионная криотерапия	✓				
низкочастотная низкоинтенсивная магнитотерапия	✓				
локальная электростимуляция	✓				
глубокая осцилляция импульсным низкочастотным электростатическим полем		✓			
вазоактивная селективная электростимуляция		✓	✓	✓	
функциональная электростимуляция			✓		
Двигательная реабилитация					
лечебная физкультура	✓	✓	✓	✓	✓
аппаратная механотерапия и кинезотерапевтическая коррекция	✓				
ранняя изокинетическая роботизированная механотерапия с биомеханическим контролем движений		✓	✓	✓	✓
стабилометрическая тренировка на опорной платформе с биологической обратной связью				✓	✓
циклическая аэробная тренировка на велоэргометре				✓	✓

Продолжение таблицы 4

Лечебно-реабилитационные мероприятия	1-я фаза	2-я фаза	3-я фаза	4-я фаза	5-я фаза
Ортопедические средства					
ортезирование	✓				
Использование костылей	✓				
Эрготерапия	✓				
Занятия с психологом	✓				

2.3.2.1 Лечебная физкультура

В настоящем исследовании лечебную физкультуру проводили в соответствии с методическими рекомендациями ФМБА России [4]. Послеоперационную реабилитацию условно разделяли на 5 фаз (табл. 5). Переход к каждой следующей фазе разрешали только после достижения критериев предыдущего этапа.

Таблица 5 – Краткое описание фаз медицинской реабилитации

Фаза реабилитации	Цели фазы
I фаза Ориентировочные сроки от 0 до 2 недель после хирургического вмешательства	• Достижение полного пассивного разгибания в коленном суставе • Контроль послеоперационной боли и отека • Объем движений в диапазоне от 0 до 90 градусов • Начало дозированной осевой нагрузки на оперированную конечность • Предотвращение атрофии четырехглавой мышцы бедра • Обучение самостоятельному выполнению программы реабилитации в домашних условиях
II фаза ≈ со 2 по 6 неделю после операции	• Объем движений в коленном суставе в диапазоне от 0 до 125 градусов • Восстановление нормальной подвижности надколенника • Регресс выпота и периартикулярного отека (допускается наличие минимального внутрисуставного выпота) • Нивелирование анталгической походки • Подъем на ступ 20 см без боли, с полным контролем ноги

Продолжение таблицы 5

Фаза реабилитации	Цели фазы
III фаза ≈с 6 по 14 неделю после операции	• Восстановление полного объема движений в оперированном коленном суставе • Возможность безболезненного спуска по лестнице с высотой ступеней 20 см, с адекватным мышечным контролем • Увеличение переносимости повседневных нагрузок • Увеличение гибкости связочного аппарата нижней конечности и эластичности мышц • Защита пателло-фemorального сочленения от перегрузок
IV фаза ≈с 14 по 22 неделю после операции	• Бег трусцой без боли • Сила и гибкость нижней конечности максимальные для повседневной активности • Симметрия более 75% по результатам прыжкового теста
V фаза ≈22-24 недели – до возврата в спорт	• Отсутствие предчувствия нестабильности и боли при выполнении задач, специфических для вида спорта • Максимальное восстановление силы и гибкости, соответствующее конкретным видам спорта • Симметрия >85% по результатам прыжкового теста

Программа подразумевала эволюцию сложности двигательных задач от щадящих упражнений на начальном этапе до полного восстановления функциональных возможностей. При принятии решения о возможности перехода от фазы к фазе календарные сроки сочетали с клиническими критериями готовности к увеличению нагрузки, включая выраженность боли, объем выпота, диапазон движений, качество походки и результаты прохождения контрольных двигательных тестов.

Программа всегда строилась с акцентом на защиту трансплантата ПКС. Для этого соблюдали ряд условий:

1. расширение амплитуды движений, увеличение осевой нагрузки и сопротивления допускали только при отсутствии в течение 24 часов после занятия усиления боли и/или выпота в оперированном коленном суставе;

2. во время выполнения упражнений контролировали физиологическую ось нижней конечности: не допускали динамического вальгусного отклонения, резких поворотов на опорной ноге и иных ротационных движений в коленном суставе;

3. в раннем послеоперационном периоде ограничивали нагрузки, способные усиливать переднее смещение голени. Преимущество отдавали упражнениям в закрытой кинематической цепи и изометрической работе мышц бедра; изолированное разгибание коленного сустава выполняли в щадящем диапазоне и с минимальным сопротивлением.

Начиная со второй фазы, для коррекции функционального состояния применяли комплекс AIDFLEX ООО «Реафит», Россия (регистрационное удостоверение на медицинское изделие от 03 февраля 2022 года № РЗН 2022/16478). Комплекс обеспечивал управляемую кинезотерапию с дозированием сопротивления и объема нагрузки, что позволяло восстанавливать амплитуду движений, сегментарную стабильность и нейромышечный контроль в функциональной цепи «таз – бедро – колено – голеностопный сустав».

Цель занятий заключалась в формировании биомеханически правильного и устойчивого двигательного стереотипа нижней конечности с последующей подготовкой пациента к следующему этапу восстановления.

При работе на комплексе решали следующие задачи: восстановление полного разгибания и постепенное увеличение сгибания в коленном суставе; развитие стабильности коленного сустава и пояснично-тазовой области; нормализация мышечного тонуса и межмышечного взаимодействия; повышение силовой выносливости в субмаксимальном режиме; улучшение координации и проприоцепции с контролем оси конечности и профилактикой динамического вальгуса коленного сустава.

AIDFLEX давал возможность сопровождать движение, ограничивать амплитуду и точно дозировать сопротивление. Разгрузка и внешняя поддержка позволяли включать упражнения в закрытой кинематической цепи при

сохранении техники и снижении вероятности компенсаторных двигательных стереотипов.

Методику применяли при готовности пациента ко второй фазе: после заживления тканей, при контролируемой боли, минимальном выпоте, разрешенной опоре, переносимости активных движений и удовлетворительном качестве походки. Основанием для уменьшения или пересмотра нагрузки служили усиление боли или отека после тренировки, признаки нестабильности либо воспалительная реакция.

Занятия проводили 3-4 раза в неделю по 30-45 минут в течение двухнедельного стационарного курса. Каждая процедура включала разминку, работу над объемом движений с акцентом на симметричное разгибание, упражнения на сегментарную стабильность в закрытой цепи с контролем оси конечности и стабилизацией таза и туловища, блок для тонуса и силовой выносливости (12-20 повторений, 2-4 подхода в темпе, контролируемом пациентом), координационно-проприоцептивные задания и заключительную часть.

Усложнение программы выполняли постепенно: уменьшали степень разгрузки, увеличивали амплитуду и сопротивление, а также повышали координационную сложность при сохранении правильной техники. Возможность увеличения нагрузки оценивали по отсутствию усиления боли и отека в течение 24 часов после занятия, устойчивому контролю оси конечности и улучшению объема движений по данным гониометрии и функциональных проб.

Упражнения ЛФК выполняли в динамическом, статодинамическом и статическом режимах с использованием утяжелителей для нижних конечностей, эластичных петель и лент, балансировочных подушек и кругов.

Начиная с 3 и 4 фазы, спортсмены продолжали реабилитацию в условиях ЦСМиР ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России в стационарном или амбулаторном формате по методикам, подробно описанным в диссертации Хана А.В.

Раннюю изокинетическую роботизированную механотерапию с биомеханическим контролем движений проводили с использованием комплекса «КОН-ТРЕКС» [12] (Регистрационный номер медицинского изделия ФСЗ 2008/03232 от 20.05.2024). Комплекс использовали для количественной оценки и направленной тренировки функций опорно-двигательного и нейромышечного аппарата спортсмена с учетом амплитуды движений, развиваемого усилия и заданной скорости. Такой формат позволял регистрировать состояние мышц и суставов и одновременно дозированно формировать необходимые режимы мышечной работы в контролируемых условиях. Комплекс давал возможность воспроизводить изокинетический режим, то есть движение с постоянной скоростью при изменяющемся сопротивлении, а также задавать эксцентрическую нагрузку, при которой мышца работает на удлинении. Компенсация силы тяжести повышала точность дозирования, поскольку нагрузка не искажалась массой сегментов тела и элементов оборудования.

Использование комплекса снижало вероятность перегрузки мышц и связочного аппарата за счет контроля усилия и диапазона движений. Биологическая обратная связь позволяла специалисту и спортсмену сразу корректировать интенсивность и характер упражнения. Заданные траектории соответствовали анатомии движения и обеспечивали щадящую физиологичную нагрузку на суставы и мягкие ткани.

Программы тренировок, на РБК «КОН-ТРЕКС» модуль MJ представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Протокол тренировочной программы спортсменов с использованием модуля MJ РБК «КОН-ТРЕКС»

Режим	Изокинетический-баллистический, кон/кон						
Подход	1	2	3	4	5	6	7
Кол-во повторений, сек	10-12	10-12	12-15	12-15	15-20	15-20	8-10
Скорость, °/сек	60-90	60-90	120	120	180	180	30-45
Пауза между подходами, сек	60	60	60	60	60	60	-

Эффективность тренировок на роботизированном биомеханическом комплексе «КОН-ТРЕКС» оценивали по интегральным показателям: силовым характеристикам (максимальная, средняя и удельная сила), скоростным параметрам (максимальная и средняя скорость движения), а также времени достижения максимального мышечного усилия.

В третьей и четвертой фазах программу дополняли тренировками на компьютеризированной платформе с биологической обратной связью HUBER 360, LPG SYSTEMS (Франция) (регистрационное удостоверение на медицинское изделие от 23 апреля 2018 года № РЗН 2018/7064).

HUBER 360 представляет собой многоосевую моторизованную платформу с визуальным управлением, позволяющую дозировать нагрузку по направлению, величине усилия и параметрам движения.

До начала курса на платформе и далее один раз в 1-2 недели проводили стандартизированную оценку функционального состояния с использованием встроенных тестов: устойчивости, равновесия в стойке на одной ноге, Фукуда, пределов стабильности, подвижности, силы и координации. Нагрузку увеличивали только при отсутствии реактивного выпота и усиления боли, а также при сохранении качества двигательного контроля, включая ось конечности и профилактику динамического вальгуса. Таким образом, применяли общий принцип увеличения нагрузки в закрытых кинематических цепях после реконструкции ПКС.

Для 3 фазы (примерно с 6-8 недели до 14 недель после операции) целями тренировок были нейромышечный контроль и увеличение силы в закрытой кинематической цепи для формирования устойчивого постурального контроля и симметричного распределения нагрузки. Кроме того, акцент делался на развитие силовой выносливости стабилизаторов тазобедренного и коленного суставов, обучение корректным паттернам «присед/ступенька/перенос веса» с визуальным биоуправлением.

Типовая структура тренировки с использованием комплекса была следующей. Частота – 2-3 занятия в неделю. Длительность – 20-30 минут (чистое время работы на платформе 12-18 минут).

Упражнения на баланс и координацию (6-10 минут): режим «осанка и баланс» (posture & balance) с биоуправлением (перенос веса тела, удержание цели на экране, коррекция центра давления); движение платформы (низкая динамика) – преимущественно простые траектории с наклоном платформы до 3-5° с низкой скоростью.

Упражнения на динамическое укрепление (8-12 минут): в режиме «динамического укрепления» (dynamic strengthening) с контролем направления/величины усилия по экрану (суперпозиция произвольного усилия на фоне движений платформы); упражнения преимущественно в закрытой цепи – полуприсед, зашагивание, статодинамические удержания. Прогрессия от более стабильных к менее стабильным позициям выполнялась с ориентиром на переносимость, следуя общей логике реабилитации после реконструкции ПКС.

Интервальный блок (2-6 минут, по переносимости): 4-6 интервалов по 30-45 секунд работы / 30-45 секунд отдыха на умеренной интенсивности (контроль боли/выпота в оперированном суставе).

Критерии приостановки тренировочного процесса или его прекращения в 4 фазе: появление/нарастание выпота, боль больше привычной, ухудшение техники выполнения (динамический вальгус, «провал» таза), снижение контроля по экрану обратной связи.

В 4 фазе (>14-16 недель после операции до 22-24 недель) динамическую стабилизацию выполняли с целью подготовки к бегу и плиометрическим нагрузкам. Целями тренировок были повышение мощности и скорости нейромышечного ответа, многоплоскостная стабилизация (контроль вальгуса, ротационных перегрузок на оперированный коленный сустав).

Типовая структура тренировки с использованием комплекса была следующей: частота – 2 занятия в неделю на платформе + 2-3 тренировки в зале;

длительность занятия – 25-35 минут (чистое время работы на платформе 15-22 минуты).

Структура занятия включала динамическую стабилизацию (8-12 минут) в режиме «осанка и баланс» с усложнением (односторонняя опора, перенос веса с быстрыми коррекциями по экранной цели). Использовались следующие параметры платформы: наклон до 5-10°, скорость умеренная с постепенным приближением к верхним техническим пределам (10°; до 1 об/с) только при хорошей переносимости.

Блок для тренировки силы и координации (10-15 минут) в режиме динамического укрепления с акцентом на эксцентрический контроль, симметрию усилия и отсутствие динамического вальгуса: 6-10 повторений на подход или 30-60 секунд работы / 30-60 секунд отдыха, 3-5 серий.

Реактивный блок (3-6 минут), включающий короткие высококоординационные задания (быстрые коррекции, «попадание в цель») с приоритетом техничности выполнения и контролем движения.

Критерии увеличения нагрузок в V фазе: отсутствие реактивного отека/боли на следующие сутки после тренировки, стабильные результаты выполнения тестов на платформе.

2.3.2.2 Физиотерапевтические процедуры

Локальная криотерапия с элементами прессотерапии проводилась на аппарате «GameReady» (Avanos Medical, Inc., США, регистрационное удостоверение на медицинское изделие от 07 декабря 2017 года № ФСЗ 2009/04010) Применение физиотерапевтического метода начинается с 1-го дня после операции.

На оперированный коленный сустав надевали специальный бандаж-манжету и осуществляли одновременное воздействие холода (температурой до 2°C) и переменной пневмокомпрессией, что уменьшает боль, отек и ускоряет восстановление после травм и операций. Процедура проводилась ежедневно на протяжении 15 минут. Курс лечения составлял 10 процедур.

Импульсная магнитотерапия в сочетании с вакуумно-роликовым воздействием проводилась на аппарате MANTIS (Mantis S.r.L., Италия, регистрационное удостоверение на медицинское изделие № РЗН 2015/2642 от 29.04.2015 г.) для улучшения микроциркуляции, лимфодренажа, уменьшения отека, стимуляции регенеративных процессов с первых суток после операции. Воздействие магнитного поля было в режиме стохастического резонанса (диапазон частоты от 0,01 кГц до 1 МГц с амплитудой не более 5 В). Терапия проводилась на область коленного сустава в четырех позициях: над надколенником, под надколенником, с медиальной и латеральной сторон). Продолжительность процедуры составляла 20 минут, курс – 10 ежедневных процедур.

Применение электростатического поля на аппарате «Хивамат 200» (HIVAMAT 200, PHYSIOMED, Германия, регистрационное удостоверение на медицинское изделие № РЗН 2017/5597 от 12.04.2017 г.) – это разновидность физиотерапевтического лечения, при котором на ткани воздействует переменное электростатическое поле, вызывающее их глубокие ритмичные колебания, воздействующие на кожу, подкожную клетчатку, соединительную ткань, мышечные, венозные и лимфатические структуры, и достигается выраженный лимфодренажный, противоотечный и обезболивающий эффект.

Применение данного метода начиналось в сроки, соответствующие второй фазе реабилитации. В работе была использована программа «отек», при которой воздействие осуществляется на частотах 120 и 180 Гц в течение 25 минут. При помощи аппликатора проводились привычные массажные приемы (поглаживание, растирание, разминание) на область оперированного сустава с захватом нижней трети бедра и верхней трети голени. Курс составлял 10 ежедневных процедур.

Селективная вазоактивная электростимуляция аппаратом BodyDrain (PHYSIOMED, Германия, регистрационное удостоверение на медицинское изделие № РЗН 2017/5487 от 08.08.2017 г.) была направлена на усиление лимфатического и венозного оттока и восстановление баланса жидкости в тканях за счет слабых импульсных токов специально заданной формы, которые

стимулируют гладкие миоциты сосудов, улучшая дренаж, в сроки, обычно соответствующие второй фазе реабилитации. На область оперированной конечности по ходу сосудов накладывались 4 электрода с вакуумными насадками для помпажа лимфатических узлов. На аппарате BodyDrain выбиралась программа «Стимуляция», при которой сила тока постепенно увеличивается до появления у пациента чувства «внутреннего биения» (низкочастотный электрический ток частотой 2 Гц и с максимальной силой 75 мА). Во вторую фазу (со второй недели после операции) вазоактивную электростимуляцию проводили через день в течение 20 минут, курсом из 10 процедур. В третью и четвертую фазу при сохранении отека оперированной конечности процедуры аппаратного лимфодренажа продолжали проводить с кратностью 1 раз в неделю.

Функциональную электростимуляцию (ФЭС) проводили с использованием электротерапевтического аппарата PHYSIODYN-Basic (PHYSIOMED, Германия, регистрационное удостоверение на медицинское изделие № РЗН 2017/5556 от 03.04.2017 г.), направленного на мобилизацию и стимуляцию мышц, а также стимуляцию кровообращения.

В рамках третьей фазы (6-14 недель) ФЭС применяли как дополнение к лечебной физкультуре для улучшения произвольной активации мышц, улучшения нейромышечного контроля и повышения толерантности к силовым нагрузкам без добавления внешних отягощений [152].

Целью стимуляции являлось: рекрутирование четырехглавой мышцы бедра (в т.ч. ее медиальной головки) и/или синергистов; улучшение совместной активации мышц, стабилизирующих коленный сустав (квадрицепс, задняя группа мышц бедра, ягодичные) в закрытых кинематических цепях; повышение качества двигательного контроля при функциональных тренировках для профилактики динамического вальгуса (полуприсед, шаг/ступенька, выпады с ограниченной амплитудой). Перед стимуляцией оценивали состояние кожи, наличие боли/выпота, переносимость тренировочной нагрузки за предшествующие сутки. Кожу в зоне электродов очищали и высушивали.

Использовали следующие типовые схемы наложения электродов:

- квадрицепс (канал 1): один электрод проксимально по ходу прямой мышцы бедра, второй – дистально-медиально в зоне проекции *m. vastus medialis* (или дистально-латерально при акценте на *m. vastus lateralis*);
- задняя группа бедра или ягодичные мышцы (канал 2): электроды по ходу мышцы для коактивации и контроля положения таза/коленного сустава.

Интенсивность стимуляции подбирали индивидуально до четко видимого и функционально значимого сокращения без боли, без усиления выпота при условии отсутствия уменьшения объема движений на следующий день.

Использовали два базовых подхода: (А) силовая стимуляция квадрицепса и (В) «функциональная» стимуляция, синхронизированная с выполнением упражнений.

Процедуры проводились 2-3 раза в неделю. Курс составлял 8-12 процедур.

2.4 Методы статистической обработки

Числовые данные при распределении, близком к нормальному, представляли в виде среднего значения и стандартного отклонения; при асимметричном распределении – в виде медианы и межквартильного размаха $Me [Q1; Q3]$. Для некоторых описательных таблиц дополнительно приводили минимальное и максимальное значения. Категориальные данные представляли в виде абсолютного количества и доли наблюдений. Проверку на нормальность выполняли тестом Колмогорова-Смирнова. С учетом асимметричного распределения большинства показателей, малой численности подгрупп и выраженного «эффекта потолка» при анализе результатов анкетирования для сравнительного анализа преимущественно использовали непараметрические критерии. При сравнении числовых данных двух несвязанных групп, использовали U-критерий Манна-Уитни. Для сравнения трех и более несвязанных групп использовали критерий Краскела-Уоллиса. Для сравнения двух связанных групп использовали критерий Вилкоксона. Для установления связей между параметрами использовали корреляционный анализ Спирмена. Категориальные показатели сопоставляли с помощью точного критерия Фишера, а при

достаточных ожидаемых частотах использовали критерий χ^2 Пирсона. Для чувствительности и специфичности поздних диагностических критериев 95% доверительные интервалы рассчитывали методом Уилсона.

При одновременной проверке нескольких статистических гипотез использовали следующие поправки. Для сопоставления результатов трех опросников в пределах первого и второго этапов анкетирования, а также для анализа показателей времени до первого зафиксированного возврата к нормотермии использовали последовательную поправку Холма. При поисковом сопоставлении 18 термографических параметров у пациентов с инфекционно-воспалительными и иными неблагоприятными клиническими событиями применяли процедуру Беньямини-Хохберга. Статистически значимыми считали скорректированные значения $p \leq 0,05$. Корреляционный анализ МРТ-параметров и термографических показателей носил поисковый характер, поэтому для него приводили номинальные значения p без поправки на множественные сравнения.

Для анализа срока до первого документированного возвращения термографического показателя в нормативный диапазон применяли метод Каплана-Мейера. Наблюдения без документированной нормализации цензурировали на дату последнего доступного обследования в пределах анализируемого периода. Для сравнения кривых групп с осложненным и неосложненным течением использовали логранговый критерий. Влияние варианта послеоперационного течения исследовали с помощью модели пропорциональных рисков Кокса с отношением мгновенных рисков и 95% доверительным интервалом.

Считалось, что при выполнении единичных сравнений со значением $p \leq 0,05$ имеется статистически значимое различие между сравниваемыми значениями. При проверке семейств статистических гипотез решение принимали по скорректированным значениям p .

Для визуального отображения изменения температуры коленного сустава во времени использовали перцентильное представление данных. Перцентильные кривые демонстрировали распределение температурных показателей в зависимости от срока после операции и от начала реабилитации. При построении

перцентильных кривых применяли LMS-метод [70]. Перцентильные кривые строили с помощью программы, созданной в RStudio на языке R с обращением к процедурам пакета GAMLSS [236].

При построении перцентильных кривых использовали все термографические исследования пациентов неосложненной группы. Значения параметров, отражавших разницу температур одноименных зон на оперированной и контралатеральной конечности, были увеличены на 100 для соблюдения положительности данных, обрабатываемых процедурами GAMLSS. После построения перцентильных кривых расчетные значения были уменьшены на 100, для того чтобы диапазон значений конечных перцентильных кривых соответствовал диапазону исходных данных.

При построении перцентильных кривых было использовано t -распределение Бокса-Кокса. Сглаживание проводилось с помощью кубических сплайнов с 4-6 степенями свободы, переменную времени (сутки от операции) предварительно преобразовывали возведением в степень 0,25. Устанавливалось ограничение в 20 итераций и модель считалась построенной при достижении стабильного минимального глобального отклонения. Дополнительно проводился визуальный контроль адекватности смоделированных перцентилей сравнением с рассчитанными непосредственно на основании данных в рамках временных блоков.

Для построения решающего правила, которое на предоперационном этапе позволяет оценить вероятность осложненного варианта течения, использовали метод логистической регрессии. Построение было разделено на 3 этапа. На первом этапе исследования были определены показатели термометрии для включения в математическую модель. Были выявлены корреляционные связи посредством корреляционного анализа (критерий Спирмена, коэффициент корреляции r считался значимым при $p < 0,05$). На втором этапе была построена математическая модель, позволяющая разделить пациентов на группы по исходам в осложненный и неосложненный вариант течения послеоперационного периода с помощью метода логистического регрессионного анализа. Формула (3) бинарной логистической регрессии выглядела следующим образом:

$$f(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}, \quad (3)$$

где f — расчетный прогностический индекс осложненного течения послеоперационного периода, а z — линейный предиктор логистической регрессии.

На третьем этапе были рассчитаны значения прогностического индекса осложненного течения и построена ROC-кривая, позволяющая оценить разделяющую способность полученной модели. По полученным значениям f для пациентов была определена точка отсечения, как максимальное значение суммы чувствительности и специфичности. Затем, с учетом скрининговой направленности решающего правила и приоритета чувствительности над специфичностью был выбран более низкий рабочий порог $f=0,169$, обеспечивавший чувствительность 77,8% и специфичность 70,4%.

Анализ результатов выполняли поэтапно. На первом этапе описывали общий массив данных и характеристики групп пациентов с осложненным и неосложненным течением. На втором этапе изучали термографические показатели и проверяли наличие статистически значимых различий между оперированной и контралатеральной конечностями в обеих группах. На третьем этапе формировали решающее правило для прогноза осложненного течения по предоперационным термографическим данным. На четвертом этапе анализировали послеоперационные наблюдения. На пятом этапе выполняли перцентильное представление данных для последующего выявления отклонений, характерных для осложненного течения.

Восстановление пропущенных значений не выполняли. Каждый анализ проводился по доступным наблюдениям с полным набором необходимых для него данных. Фактическую численность выборки указывали отдельно для каждого расчета.

Статистические расчёты выполняли в программах STATISTICA 10.0 (StatSoft, Inc., США) и IBM SPSS Statistics 23.0 (IBM Corp., США).

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. АНАЛИЗ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ СПОРТСМЕНОВ С ОСЛОЖНЕННЫМ И НЕОСЛОЖНЕННЫМ ТЕЧЕНИЕМ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОГО ПЕРИОДА

3.1 Общие сведения о пациентах

В исследование было включено 183 пациента (92 мужчины (50,3%) и 91 женщина (49,7%). Распределение пациентов по возрасту и ИМТ было ненормальным ($p < 0,001$, медиана возраста 22 года, половина включенных пациентов была в интервале от 19 до 28 лет, минимальный возраст – 18 лет, максимальный – 51 год; медиана ИМТ составила $23,73 \text{ кг/м}^2$, половина включенных пациентов была в интервале от $21,61$ до $25,72 \text{ кг/м}^2$, минимальный ИМТ – $18,1 \text{ кг/м}^2$, максимальный – $43,96 \text{ кг/м}^2$) (табл. 7).

Таблица 7 – Общая характеристика пациентов

Параметр	N	p	$m \pm \sigma$	Q1	Me-	Q3
Возраст	183	<0,001	$24,45 \pm 6,67$	19	22	28
Рост		0,200	$173,75 \pm 10,2$	167	174	180
Вес		0,004	$74,61 \pm 13,34$	63	73	83
ИМТ		<0,001	$24,48 \pm 4,23$	21,61	23,73	25,72

Примечание: N – численность группы; m – среднее значение; σ – стандартное отклонение;
Me – медиана; Q1 и Q3 – нижний и верхний квартили; p1 – уровень значимости по критерию Колмогорова-Смирнова;

Далее было выполнено сравнение групп пациентов с осложненным и неосложненным течением послеоперационного периода по возрасту, росту, весу и индексу массы тела. Статистически значимых различий при этом обнаружено не было (табл. 8).

Таблица 8 – Сравнение пациентов с осложненным и неосложненным течением послеоперационного периода по возрасту, росту, весу и индексу массы тела

	Пациенты с неосложненным течением							Пациенты с осложненным течением							p2
Параметр	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q3	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q3	
Возраст	146	p<0,001*	24,8	7,1	19,0	22,0	29,0	37	0,017	23,00	4,44	19,50	22,00	25,00	0,512
Рост	146	0,200	173,3	10,0	167,0	173,0	180,0	36	0,200	175,53	10,79	169,25	175,50	184,00	0,238
Вес	146	0,002	74,4	16,0	63,0	72,0	83,0	36	0,197	75,43	17,65	58,00	74,00	85,00	0,804
ИМТ	146	p<0,001*	24,60	4,25	21,70	23,80	25,97	36	0,001	24,18	4,23	21,21	23,62	25,10	0,470

Примечание: N – численность группы; m – среднее значение; σ – стандартное отклонение; Me – медиана; Q1 и Q3 – нижний и верхний квартили; p1 – уровень значимости по критерию Колмогорова-Смирнова; p2 – уровень значимости по критерию Манна-Уитни

В ходе выполнения работы для различных расчетов из базы данных, содержащей 183 пациента, каждый раз отбирали хирургические эпизоды или данные по уникальным пациентам, содержащие максимально полные сведения. Таким образом, из 37 пациентов с осложненным течением из-за отсутствия валидных термографических данных у одного пациента в сравнительных расчетах использовали параметры 36 пациентов. Для разработки решающего правила из общей когорты было отобрано 116 случаев с валидными предоперационными термограммами. Для анализа термографических рисунков, характерных для осложненного течения по перцентильным кривым, в сроки до 1 года после операции были отобраны 177 хирургических эпизодов (147 неосложненного течения и 30 осложненного). Для анализа первого этапа анкетирования (через 503 суток после операции) было доступно 100 хирургических эпизодов: 89 неосложненного течения и 11 осложненного. Для второго этапа (через 1495 суток после операции) использовали 90 наблюдений: 81 случай неосложненного и 9 случаев осложненного течения. Для проверки гипотезы о зависимости результатов анкетирования от возраста и пола пациентов полные сведения получены для 101 уникального пациента для

первого этапа анкетирования и для 92 уникальных пациентов на втором этапе. При этом было 63 уникальных пациента, которым обследование проводилось как на первом, так и втором этапах. В каждом разделе эти сведения будут оговорены отдельно.

3.2 Анализ термографических данных пациентов

Спортсменам было выполнено термографическое исследование коленных суставов по описанной выше методике. Полные данные во всей когорте были доступны для следующих параметров: Min Inv, Max Inv, Средняя Inv, Min, Max, Средняя, Delta Min, Delta Max, Delta Средн., Patellar Inv Min, Patellar Inv Max, Patellar Inv Средн, Patellar Min, Patellar Max, Patellar Средн, Delta Patellar Min, Delta Patellar Max, Delta Patellar Средн. Основные показатели для передней области коленного сустава были доступны у всех 183 пациентов, а термографические показатели пателлярной области – у 180 спортсменов. При этом 14 из 18 показателей имели ненормальное распределение, соответственно по большинству, данные описывались как медиана, верхний и нижний квартили (табл. 9).

Таблица 9 – Обобщенные значения термографических параметров для всей когорты пациентов на входе в исследование

Параметр	N	p	m	σ	Q1	Me-	Q3
Min Inv	183	<0,001	29,6	2,5	28,1	30,2	31,5
Max Inv	183	0,080	32,9	1,7	31,7	33,1	34,2
Средняя Inv	183	0,002	31,4	1,8	30,1	31,7	32,8
Min	183	<0,001	29,1	2,5	27,7	29,8	30,8
Max	183	0,042	32,2	1,6	31,2	32,4	33,4
Средняя	183	0,004	30,7	1,8	29,4	31,0	32,0

Продолжение таблицы 9

Параметр	N	p	m	σ	Q1	Me-	Q3
Delta Min	183	<0,001	0,6	1,2	-0,1	0,4	1,0
Delta Max	183	<0,001	0,7	0,9	0,0	0,5	1,2
Delta Средн.	183	<0,001	0,7	0,9	0,1	0,5	1,2
Patellar Inv Min	180	0,060	30,5	2,0	29,4	30,8	32,0
Patellar Inv Max	180	0,200	31,9	1,8	30,9	31,9	33,3
Patellar Inv Средн.	180	0,051	31,2	1,9	30,2	31,3	32,6
Patellar Min	180	<0,001	29,8	2,0	28,4	30,3	31,3
Patellar Max	180	0,018	31,2	1,9	29,9	31,5	32,6
Patellar Средн.	180	0,002	30,5	2,0	29,1	30,9	31,9
Delta Patellar Min	180	<0,001	0,7	1,1	0,0	0,6	1,2
Delta Patellar Max	180	<0,001	0,7	1,2	-0,1	0,4	1,3
Delta Patellar Средн.	180	<0,001	0,7	1,3	-0,1	0,5	1,3

Примечание: N – численность группы; m – среднее значение; σ – стандартное отклонение;

Me – медиана; Q1 и Q3 – нижний и верхний квартили; p1 – уровень значимости по критерию Колмогорова-Смирнова;

Как уже было сказано ранее, осложненное течение послеоперационного периода было выявлено у 37 пациентов (20,2%). При этом у 9 (4,9%) человек неблагоприятные клинические события условно обозначали как «инфекционно-воспалительные», а у 28 пациентов (15,3%) неблагоприятные события были отнесены в группу, не связанную с инфекционно-воспалительными процессами и включали случаи идиопатической несостоятельности трансплантата передней крестообразной связки и явные травматические его повреждения. Краткие анамнестические характеристики каждого случая осложненного течения

отражены в приложении 11. Статистически достоверных различий между группами пациентов с осложненным и неосложненным течением при анализе термографических данных на входе в исследование и для всего массива измерений в основном получено не было (приложение 3 и приложение 4).

Исключение составили значения параметров Delta Lat Min, Delta Med Min, Delta Med Max, Delta Med Средн., а также параметров, описывающих заднюю поверхность коленного сустава. Однако в связи с малым количеством замеров для данных областей, эти параметры были исключены из дальнейшего анализа.

Распределение данных в большинстве случаев соответствовало ненормальному распределению и поэтому для сравнения групп использовались непараметрические критерии (критерии Манна-Уитни, критерий Вилкоксона и критерий Краскела-Уоллиса). Статистически значимых различий между группами пациентов с осложненным и неосложненным течением при анализе всего массива термографических данных, имеющихся у пациентов на входе в исследование без учета срока после операции, также получено не было. У одного пациента из группы осложненного течения валидные данные на входе отсутствовали. В связи с этим в расчете использовались данные по 36 пациентам (приложение 4).

Поскольку в послеоперационном периоде у ряда пациентов были выявлены неблагоприятные клинические события, которые мы условно отнесли в группу «инфекционно-воспалительных», далее внутри группы пациентов с осложненным течением была выполнена проверка гипотезы о наличии статистически достоверных различий термографических показателей между этой подгруппой и остальными пациентами с осложненным течением. При этом у одного пациента с инфекционно-воспалительным вариантом осложненного течения валидные входные данные отсутствовали. Таким образом, в анализ вошли данные о 8 пациентах данной подгруппы. Анализ показал отсутствие статистически достоверных различий между термографическими показателями пациентов с инфекционно-воспалительными неблагоприятными клиническими событиями и другими вариантами осложненного течения на всех этапах

обследования ($p > 0,05$) (приложение 5). В связи с этим, для дальнейших расчетов в данном разделе все пациенты с осложненным течением были объединены в единую группу.

В таблице 10 представлена сегментация всего массива термографических данных на временные блоки. Изначально сегментация была произведена эмпирически на основании формальной логики течения восстановительных процессов в оперированном суставе. Однако такое деление требует статистического подтверждения как для группы пациентов с неосложненным, так и осложненным течением послеоперационного периода. Приведенная сегментация основывалась на клинических и эмпирических суждениях, а подтверждением являлось наличие достоверных различий большинства термографических параметров от группы к группе (приложения 6 и 7).

Таким образом, в работе была утверждена сегментация на следующие временные блоки. В первый временной блок включены параметры, полученные в сроки от -6 (6 суток до операции) до 0 суток (день операции), во второй – от 1 до 2 суток после операции, в третий – от 3 до 6 суток после операции, в четвертый – от 7 до 14 суток после операции, в пятый – от 15 до 30 суток после операции, в шестой – от 31 до 75 суток после операции, в седьмой – от 76 до 190 суток после операции, в восьмой – от 191 до 2235 суток после операции.

Таблица 10 – Сравнение показателей пациентов с осложненным течением на разных сроках наблюдения

Период исследования, суток*	[-6;0] суток	[1;2] дня	[3;6] суток	[7;14] суток	[15;30] суток	[31;75] суток	[76;190] суток	>190 суток
Параметр	p (4;14)	p (5;8)	p (4;2)	p (9;14)	p (3;8)	p (7;23)	p (6;20)	p (2;21)
Min Inv	0,671	0,456	0,439	0,020	0,307	0,418	0,301	0,029
Max Inv	0,958	0,180	0,439	0,006	0,307	0,508	0,273	0,022

Продолжение таблицы 10

Период исследования, суток*	[-6;0] суток	[1;2] дня	[3;6] суток	[7;14] суток	[15;30] суток	[31;75] суток	[76;190] суток	>190 суток
Средняя Inv	0,633	0,456	0,439	0,014	0,683	0,677	0,180	0,022
Min	1	0,881	0,439	0,053	0,683	0,122	0,273	0,038
Max	0,832	0,655	0,439	0,053	0,683	0,239	0,738	0,022
Средняя	0,832	0,881	0,439	0,028	0,683	0,230	0,394	0,029
Delta Min	0,167	0,180	0,121	0,205	0,014	0,607	0,001	0,743
Delta Max	0,595	0,025	0,439	0,317	0,683	0,573	0,0201	0,623
Delta Средн.	0,111	0,052	1	0,205	0,101	0,122	0,009	0,662
Patellar Inv Min	0,750	0,456	0,439	0,028	0,220	0,540	0,583	-
Patellar Inv Max	0,958	0,297	0,439	0,014	0,220	0,607	0,715	-
Patellar Inv Средн	0,832	0,456	0,439	0,014	0,221	0,607	0,761	-
Patellar Min	0,524	0,881	0,439	0,072	0,838	0,249	0,128	-
Patellar Max	0,750	0,655	0,121	0,125	0,838	0,220	0,161	-
Patellar Средн	0,671	0,881	0,439	0,083	0,838	0,270	0,121	-
Delta Patellar Min	0,167	0,025	1	0,257	0,041	0,155	0,021	-
Delta Patellar Max	0,203	0,025	1	0,072	0,041	0,073	0,015	-
Delta Patellar Средн.	0,202	0,024	1	0,095	0,041	0,122	0,010	-

Примечание: первый блок – от -6 до 0 суток, второй блок – от 1 до 2 суток, третий блок – от 3 до 6 суток, четвертый блок – от 7 до 14 суток, пятый блок – от 15 до 30 суток, шестой блок – от 31 до 75 суток, седьмой блок – от 76 до 190 суток, восьмой блок – более 190 суток.

Далее была проверена гипотеза о наличии статистически значимых отличий термографических параметров для травмированного и контралатерального суставов внутри каждого временного блока для пациентов с неосложненным и осложненным течением (табл. 11).

Таблица 11 – Анализ статистических отличий термографических параметров травмированного и контралатерального коленного суставов внутри временных блоков в группах пациентов с неосложненным и осложненным течением

Пара сравнения/временной блок	N	1	2	3	4	5	6	7	8
Пациенты с неосложненным течением									
Min Inv – Min	99	0,002*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,001*
Max Inv – Max	99	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,024*
Средняя Inv – Средняя	99	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,007*
Patellar Inv Min – Patellar Min	99	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,033*
Patellar Inv Max – Patellar Max	99	0,067	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,016*
Patellar Inv Средн. – Patellar Средн.	99	0,021*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,036*
Пациенты с осложненным течением									
Min Inv – Min	18	0,117	0,123	0,064	0,001*	0,004*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
Max Inv – Max	18	0,039*	0,012*	0,002*	0,001*	0,003*	p<0,001*	p<0,001*	0,024*
Средняя Inv – Средняя	18	0,020*	0,012*	0,002*	0,001*	0,003*	p<0,001*	p<0,001*	0,001*

Продолжение таблицы 11

Пара сравнения/временной блок	N	1	2	3	4	5	6	7	8
Patellar Inv Min – Patellar Min	18	0,024*	0,017*	0,001*	0,001*	0,003*	p<0,001*	p<0,001*	0,008*
Patellar Inv Max – Patellar Max	18	0,058	0,012*	0,001*	0,001*	0,003*	p<0,001*	p<0,001*	0,273
Patellar Inv Средн. – Patellar Средн.	18	0,061	0,012*	0,001*	0,001*	0,003*	p<0,001*	p<0,001*	0,122

Примечание: p – уровень значимости (критерий Вилкоксона), *при p<0,05 имеется статистически значимое различие между оперированной конечностью и неоперированной конечностью

В результате анализа подтвержден вывод о том, что статистически значимые различия большинства параметров между травмированным и контралатеральным коленными суставами существуют в обеих группах пациентов практически на всех временных отрезках исследования. Таким образом, разрыв ПКС и последующая ее хирургическая реконструкция сопровождаются устойчивой межсторонней температурной асимметрией, выраженность которой изменяется во времени.

3.3 Построение решающего правила

Построение решающего правила для выявления в предоперационном периоде пациентов, у которых вероятно осложненное течение, включал следующие этапы:

1. анализ межгрупповых различий рассматриваемых термографических параметров пациентов до операции с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни;

2. поиск оптимального решающего правила путем построения модели логистической регрессии в прямом пошаговом режиме в программе SPSS v.23;
3. определение оптимальной точки отсечения с помощью ROC-анализа и максимизации индекса Юдена;
4. скользящий экзамен (перекрестная проверка методом исключения по одному наблюдению) для оценки чувствительности и специфичности разработанного правила.

Из общей когорты в анализ включены данные о 116 пациентах, у которых имелись валидные предоперационные данные. Данные о росте и массе тела имелись только у 91 пациента с неосложненным течением и у 18 – с осложненным. Внутригрупповое сравнение термографических показателей у мужчин и женщин в группах осложненного и неосложненного течения не выявило статистически значимых различий (табл. 12).

Таблица 12 – Анализ статистических отличий термографических параметров в группе пациентов, отобранных для построения решающего правила

Параметр	Группа неосложненного течения							Группа осложненного течения							Сравнение двух групп (с ослож. и без), Р-значения
	N	Медиана	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Минимум	Максимум	Сравнение мужчин и женщин, Р-значение	N	Медиана	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Минимум	Максимум	Сравнение мужчин и женщин, Р-значение	
Возраст	98	23,5	19,0	31,3	18,0	51,0	0,468	18	21,5	19,0	25,0	18,0	35,0	0,754	0,179
Рост	91	173,0	165,0	180,0	150,0	200,0	p<0,001*	18	177,0	166,8	186,3	152,0	197,0	0,003*	0,317
Вес	91	73,0	64,0	83,0	50,0	140,0	p<0,001*	18	76,0	57,8	94,5	50,0	116,0	0,003*	0,579
ИМТ	91	24,1	22,2	26,0	18,1	44,0	0,030*	18	24,2	21,6	26,3	20,3	35,8	0,023*	0,912
Min Inv	98	30,1	28,3	31,3	23,6	33,2	0,685	18	31,4	30,1	32,0	28,2	32,8	0,859	0,014*
Max Inv	98	32,5	31,4	33,9	28,0	35,1	0,459	18	33,5	32,6	34,3	31,7	35,6	0,894	0,028*
Средняя I _{nv}	98	31,3	29,8	32,6	26,4	34,0	0,524	18	32,2	31,5	33,4	29,8	34,1	0,398	0,011*
Min	98	30,0	28,5	30,9	21,5	33,2	0,850	18	30,9	30,5	31,4	27,5	32,3	0,286	0,006*

Продолжение таблицы 12

Параметр	Группа неосложненного течения							Группа осложненного течения							Сравнение двух групп (с ослож. и без), Р-значения
	N	Медиана	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Минимум	Максимум	Сравнение мужчин и женщин, Р-значение	N	Медиана	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Минимум	Максимум	Сравнение мужчин и женщин, Р-значение	
Max	98	32,5	31,5	33,5	28,0	35,5	0,267	18	33,3	32,3	33,8	31,1	35,0	0,534	0,076
Средняя	98	31,1	29,9	32,2	26,1	34,1	0,459	18	32,0	31,4	32,7	29,4	33,3	0,248	0,013*
Delta Min	98	0,2	-0,3	0,5	-3,5	3,5	0,611	18	0,5	-0,2	0,8	-2,1	1,2	0,625	0,282
Delta Max	98	0,2	-0,1	0,5	-1,8	1,7	0,598	18	0,3	-0,1	0,6	-0,9	2,1	0,625	0,348
Delta Средн.	98	0,2	-0,2	0,6	-1,0	2,8	0,946	18	0,4	0,0	0,9	-0,8	1,3	1,000	0,172
Patellar In v Min	98	30,5	29,2	31,8	25,2	33,6	0,421	18	31,9	30,3	32,7	28,7	34,0	0,477	0,004*
Patellar In v Max	98	31,7	30,7	33,0	26,9	34,4	0,377	18	32,6	31,1	33,7	30,1	35,2	0,398	0,024*
Patellar In v Средн	98	31,0	30,0	32,3	25,9	34,0	0,264	18	32,3	30,7	33,3	29,6	34,5	0,505	0,009*
Patellar Min	98	30,4	28,8	31,3	24,9	33,9	0,485	18	31,4	30,6	31,9	28,1	33,8	0,213	0,007*
Patellar Max	98	31,6	30,5	32,7	26,3	34,6	0,290	18	32,5	31,4	33,3	29,5	34,3	0,286	0,048*
Patellar Средн	98	31,0	29,8	32,0	25,4	34,1	0,289	18	32,0	31,0	32,6	28,8	34,0	0,155	0,017*
Delta Patellar Min	98	0,2	-0,3	0,7	-1,7	2,4	0,618	18	0,4	-0,1	1,0	-1,0	2,6	1,000	0,217
Delta Patellar Max	98	0,0	-0,3	0,6	-1,4	1,9	0,741	18	0,3	-0,1	1,1	-1,6	2,6	0,722	0,147
Delta Patellar Средн	98	0,1	-0,2	0,6	-1,5	2,3	0,626	18	0,3	-0,2	0,8	-1,5	2,6	0,756	0,183

Примечание: при $p < 0,05$ имеется статистически значимое различие между оперированной конечностью и контралатеральной конечностью.

В связи с этим пол при разработке решающего правила не учитывали. В пошаговый отбор включали сначала параметры, имевшие значимые различия между группами. Затем дополняли не отличающимися параметрами и позже старались минимизировать количество параметров, включенных в модель. Для исследования было выбрано две модели-кандидата: модель, включающая 3 параметра (Delta Patellar Min, Patellar Min, Patellar Max), и модель, включающая 6 параметров (Patellar Inv Max, Patellar Inv Средн, Patellar Max, Patellar Средн, Delta Patellar Max, Delta Patellar Средн) (рисунок 3).

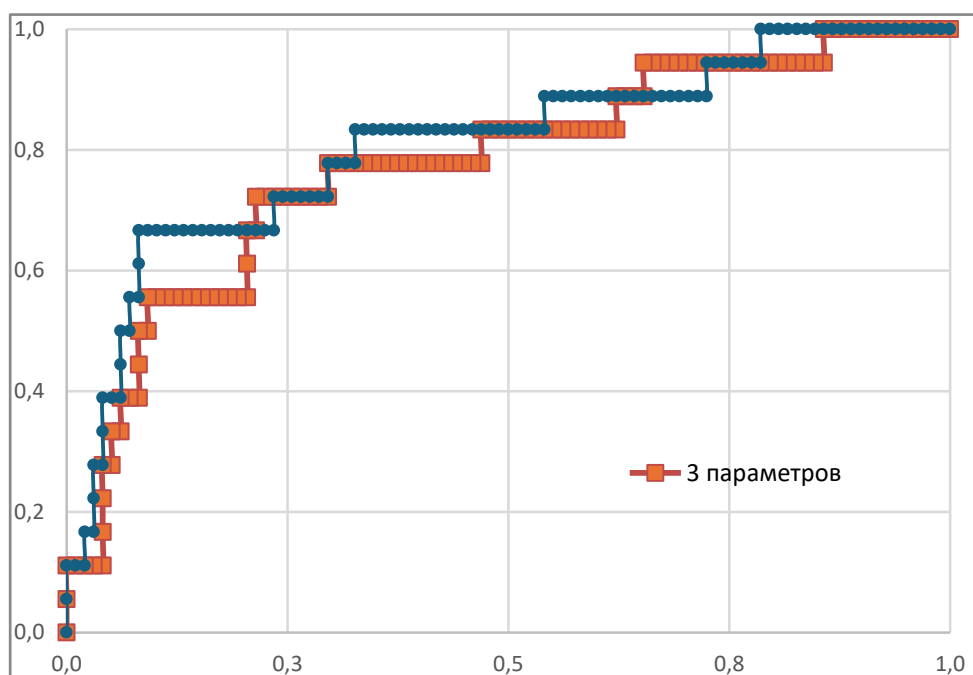


Рисунок 3 – ROC-кривые моделей 3 и 6 параметров

Обе модели имели сопоставимую с учетом 95% доверительного интервала (ДИ) площадь под ROC-кривой (табл. 13).

Таблица 13 – Площадь под ROC-кривой и доверительные интервалы двух моделей-кандидатов

	Площадь под ROC-кривой	Стд. ошибка	p-значение	95% Доверительный интервал	
				Нижняя граница	Верхняя граница
Модель с 3 параметрами	0,777	0,063	p<0,001	0,654	0,901
Модель с 6 параметрами	0,810	0,061	p<0,001	0,691	0,928

Модель с 3 параметрами имела одну точку, удовлетворяющую критерию максимизации индекса Юдена – $f = 0,217$, что соответствовало чувствительности 72,2% и специфичности 78,6% (индекс Юдена 0,508). Поскольку для задачи скрининговой диагностики важнее высокая чувствительность, чем высокая специфичность, точка отсечения была сдвинута на $f = 0,169$, при которой чувствительность составила 77,8% и специфичность – 70,4% (индекс Юдена 0,482).

Модель с 6 параметрами имела два локальных максимума индекса Юдена: $f = 0,283$ с индексом Юдена 0,585 и $f = 0,141$ с индексом Юдена 0,507. Чувствительность составила 66,7% и 83,3%, специфичность – 91,8% и 67,3% соответственно. В обоих случаях одно из значений клинически не удовлетворительно, поэтому был рассмотрен случай $f = 0,160$ с индексом Юдена 0,481, чувствительностью 77,8% и специфичностью 70,4%.

Чувствительность, специфичность и прогностическая ценность положительного (ПЦПР) и отрицательного результата (ПЦОР) обеих моделей с выбранными точками отсечения были оценены с помощью метода скользящего экзамена. Результаты представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Оценка «решающего правила» на обучающей выборке методом скользящего экзамена

	Модель с 3 параметрами	Модель с 6 параметрами
Точка отсечения	0,169	0,160
Чувствительность на обучающей выборке	78	78
Специфичность на обучающей выборке	70	70
Чувствительность в скользящем экзамене	72*	67
Специфичность в скользящем экзамене	68*	67
Прогностическая ценность положительного результата на обучающей выборке	32	32
Прогностическая ценность отрицательного результата на обучающей выборке	95	95

Продолжение таблицы 14

	Модель с 3 параметрами	Модель с 6 параметрами
Прогностическая ценность положительного результата в скользящем экзамене	29	27
Прогностическая ценность отрицательного результата в скользящем экзамене	93	92

Клинически приемлемые чувствительность и специфичность обоих правил на обучающей выборке были одинаковыми – 78% и 70% соответственно. Но при скользящем экзамене правило трех параметров показало несколько лучшие результаты. Вероятно, меньшая устойчивость правила шести переменных объясняется слишком малым объемом группы пациентов с осложненным течением, использованной при «обучении» модели. При увеличении объема группы обучения правило шести переменных может потенциально показать лучшие результаты. Тем не менее, на текущем этапе для применения в составе комплексной клинико-инструментальной оценки и дальнейшей проспективной валидации предлагается следующее решающее правило. На предоперационном этапе после выполнения термографического исследования рассчитывается значение f по формуле (4):

$$f = \frac{1}{1+e^{-z}}, \quad (4)$$

где $z = 0,870 * DeltaPatellarmin + 1,913 * Patellarmin - 1,524 * Patellarmax - 12,129$.

Если $f < 0,169$, делается вывод о маловероятности осложненного течения (среди пациентов с отрицательным результатом осложненное течение выявлено в 5,5% случаев). Если $f \geq 0,169$, делается вывод о повышенном риске осложненного течения послеоперационного периода (в исследуемой выборке осложненное течение было выявлено у 32,6% пациентов с положительным результатом решающего правила).

3.4 Влияние характера внутрисуставного повреждения на предоперационные термографические показатели и риск осложненного течения после первичной реконструкции передней крестообразной связки

Для анализа в данном разделе из общей когорты было отобрано 116 предоперационных наблюдений, для которых имелись детальные сведения о характере внутрисуставной патологии, подтвержденные данными МРТ и последующим интраоперационным осмотром сустава. При этом 54 случая были отнесены к изолированному поражению ПКС, а 62 – к сочетанным повреждениям. Следует отметить известную условность такого разделения, так как ведущим клиническим симптомом у пациентов обеих групп все равно оставалась передняя нестабильность, связанная с дефицитом функции ПКС.

Было установлено, что срок между травмой и операцией в сравниваемых группах не различался: медиана составила 85,5 [39,8; 241,5] суток при изолированном повреждении и 85,0 [31,0; 305,0] суток при сочетанных повреждениях (критерий Манна-Уитни, $p=0,997$). Таким образом, группы были сопоставимыми по давности травмы.

Статистически значимого предоперационного различия термографических параметров между изолированным повреждением ПКС и сочетанными повреждениями обнаружено не было. Ни один из 18 анализируемых термографических параметров не достиг статистической значимости. Следовательно, сам по себе факт сочетанного повреждения не приводит к устойчивым и воспроизводимым изменениям предоперационного температурного профиля. Подробные результаты сравнения приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Предоперационные температурные параметры при изолированном и сочетанном повреждении ПКС

Параметр	Изолированное повреждение ПКС (n=54)	Сочетанные повреждения (n=62)	p
min inv	30,12 [28,70; 31,38]	30,42 [29,02; 31,60]	0,734
max inv	32,98 [31,58; 33,86]	32,64 [31,69; 33,99]	0,812

Продолжение таблицы 15

Параметр	Изолированное повреждение ПКС (n=54)	Сочетанные повреждения (n=62)	p
Средняя inv	31,62 [30,11; 32,62]	31,52 [30,39; 32,69]	0,894
min	30,07 [28,72; 30,91]	30,23 [28,98; 31,25]	0,674
max	32,81 [31,55; 33,60]	32,49 [31,74; 33,50]	0,678
Средняя	31,31 [29,94; 32,17]	31,27 [30,11; 32,28]	0,958
Delta min	0,36 [-0,29; 0,66]	0,21 [-0,22; 0,54]	0,468
Delta max	0,20 [-0,12; 0,37]	0,14 [-0,10; 0,59]	0,857
Delta Средн.	0,23 [-0,18; 0,51]	0,24 [-0,12; 0,68]	0,823
Patellar inv min	30,80 [29,50; 31,78]	30,75 [29,48; 32,02]	0,736
Patellar inv max	31,89 [30,85; 33,07]	31,76 [30,86; 33,04]	0,932
Patellar inv средн.	31,31 [30,17; 32,37]	31,12 [30,27; 32,55]	0,978
Patellar min	30,52 [29,23; 31,31]	30,46 [29,17; 31,47]	0,901
Patellar max	31,79 [30,52; 32,86]	31,70 [30,60; 32,58]	0,698
Patellar средн	31,13 [29,83; 32,19]	31,03 [29,85; 31,97]	0,784
Delta Patellar min	0,16 [-0,20; 0,66]	0,23 [-0,26; 0,74]	0,738
Delta Patellar max	0,09 [-0,23; 0,45]	0,14 [-0,22; 0,80]	0,505
Delta patellar средн.	0,06 [-0,18; 0,52]	0,17 [-0,21; 0,77]	0,640

Наиболее заметные по величине, но статистически незначимые отклонения наблюдались в тех случаях, когда разрыву ПКС сопутствовало повреждение мениска, который в дальнейшем подлежал сшиванию. В этом случае некоторые термографические параметры перед операцией были несколько выше, чем в случаях, где мениск подлежал резекции (рис. 4, табл. 16).

Таблица 16 – Наиболее выраженные описательные отклонения медиан относительно изолированного повреждения ПКС

Сочетание повреждений	Наиболее выраженные отличия от изолированного разрыва ПКС
ПКС+резекция мениска (n=41)	max inv: -0,44 °C; max: -0,43 °C; Средняя inv: -0,42 °C; Patellar inv min: -0,41 °C; Patellar inv средн: -0,38 °C
ПКС+шов менисков (n=18)	min inv: +0,67 °C; Patellar max: +0,55 °C; Patellar средн: +0,38 °C; Patellar min: +0,37 °C; min: +0,36 °C
Прочие сочетанные (n=3)	max inv: -0,52 °C; min inv: +0,43 °C; Delta min: -0,42 °C; Delta Patellar min: -0,41 °C; max: -0,38 °C

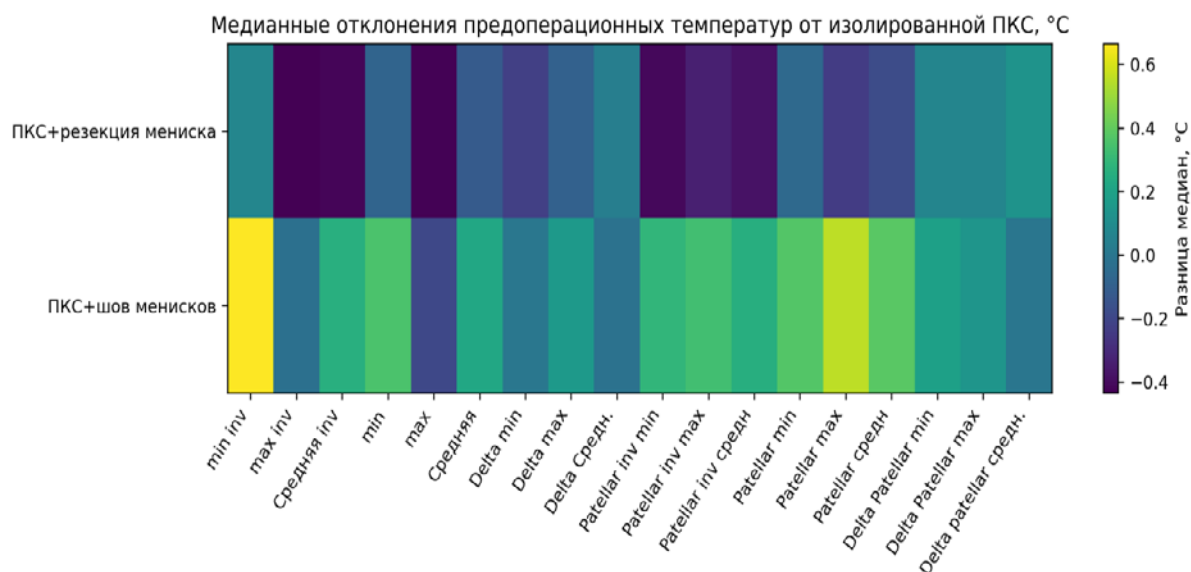


Рисунок 4 – Медианные отклонения предоперационных температур от уровня изолированного повреждения ПКС. Положительные значения соответствуют повышению температуры, отрицательные – снижению

Сопоставление значений f между изолированным и сочетанным повреждением ПКС не выявило статистически значимой зависимости этого показателя от характера внутрисуставной травмы (табл. 17, рис. 5). Медиана f при изолированном повреждении ПКС составила 0,103 [0,049; 0,195], при сочетанных повреждениях – 0,143 [0,050; 0,280]; критерий Манна-Уитни – $p=0,149$. Аналогично не выявлено значимого различия и по доле пациентов, попадавших в зону высокого риска по порогу 0,169: 29,6% против 41,9% соответственно; точный критерий Фишера – $p=0,182$; отношение рисков – 1,42; 95% доверительный интервал – 0,85-2,34 (табл. 17).

Таблица 17 – Предоперационный показатель f в зависимости от варианта повреждения внутрисуставных структур

Группа	f , медиана [Q1; Q3]	Высокий риск, n (%)	95% ДИ для доли высокого риска
ПКС ($n=54$)	0,10 [0,05; 0,19]	16 (29,6%)	19,1-42,8%
ПКС+резекция мениска ($n=41$)	0,14 [0,05; 0,30]	17 (41,5%)	27,8-56,6%
ПКС+шов менисков ($n=18$)	0,15 [0,05; 0,29]	8 (44,4%)	24,6-66,3%
Прочие сочетанные ($n=3$)	0,15 [0,09; 0,22]	1 (33,3%)	6,1-79,2%

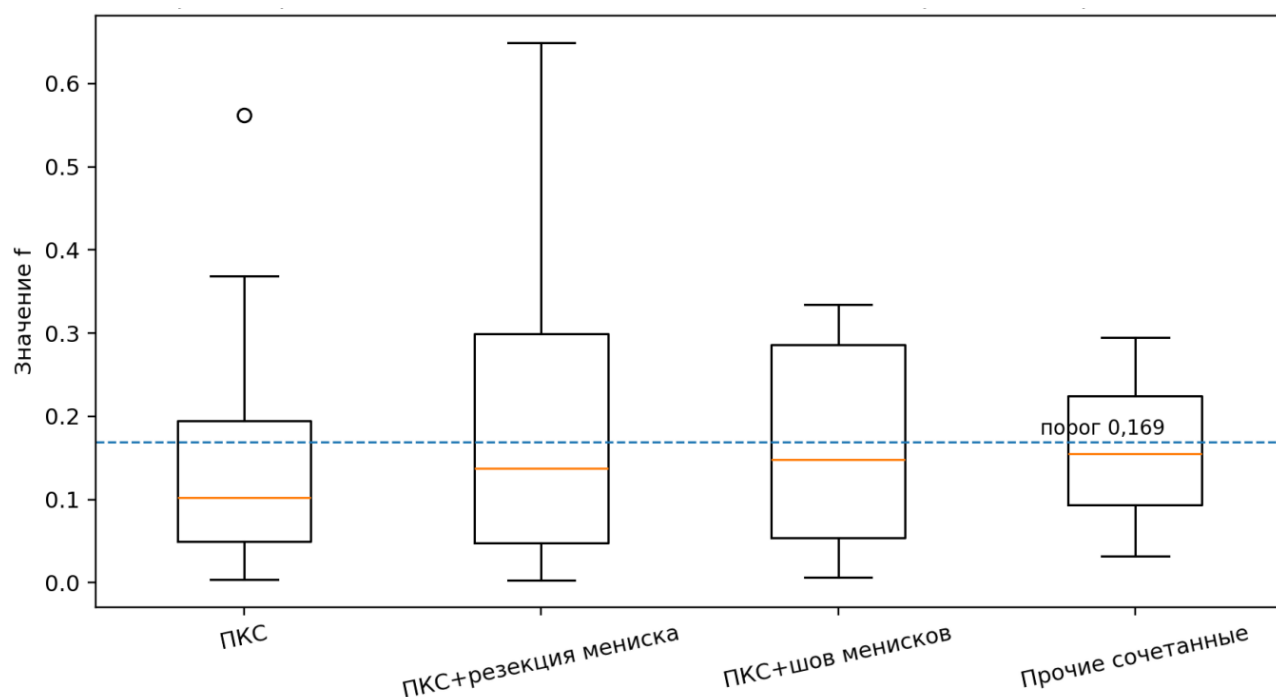


Рисунок 5 – Предоперационный показатель f в зависимости от варианта повреждения. Пунктирной линией обозначен порог 0,169

Дополнительное сопоставление трех наиболее часто представленных вариантов повреждения (изолированная ПКС, ПКС+резекция мениска, ПКС+шов менисков) также не подтвердило влияния вида сочетанного повреждения на f : критерий Краскела-Уоллиса $H=1,99$; $p=0,371$.

Статистически значимой связи индекса f с изолированным или сочетанным повреждением ПКС в нашей выборке не выявлено. Следовательно, расчетный индекс f не должен рассматриваться как прямой термографический маркер тяжести внутрисуставного повреждения.

Вместе с тем проведенный статистический анализ не позволяет утверждать, что характер повреждения не влияет на прогностическую эффективность решающего правила. Скорее он свидетельствует о том, что на рост f оказывает влияние не столько объем травмы сам по себе, сколько конкретный функциональный предоперационный термографический профиль пациента (рис. 5).

3.4.1 Связь характера повреждения с развитием неблагоприятных клинических событий, осложняющих течение послеоперационного периода

Для проверки гипотезы о связи неблагоприятных клинических событий с сочетанным характером повреждения после удаления эпизодов с неполными данными из общей когорты было выделено 177 эпизодов. Из них 95 эпизодов с изолированным повреждением ПКС и 82 эпизода сочетанных повреждений. Среди 95 изолированных повреждений ПКС неблагоприятные клинические события развились в 16 случаях (16,8%; 95% доверительный интервал 10,6-25,6%; табл. 18). Среди 82 эпизодов сочетанных повреждений неблагоприятные клинические события были зарегистрированы в 14 случаях (17,1%; 95% доверительный интервал 10,2-27,3%). Статистически значимых различий между группами выявлено не было: точный критерий Фишера $p=1,000$; отношение рисков 1,01; 95% доверительный интервал 0,53-1,95; отношение шансов 1,02; 95% доверительный интервал 0,46-2,23.

Таким образом, само по себе наличие дополнительного внутрисуставного повреждения не сопровождалось ростом частоты неблагоприятных клинических событий.

На следующем этапе были сопоставлены отдельные варианты операций в контексте выявленных неблагоприятных клинических событий (табл. 18, рис. 6). Больше всего данных было в следующих подгруппах: изолированные разрывы ПКС ($n=95$), ПКС в сочетании с резекцией мениска ($n=53$) и разрыв ПКС в сочетании со швом менисков ($n=23$). Общий анализ таблицы сопряженности для этих трех категорий не выявил различий по частоте развития осложненного течения ($\chi^2=0,38$; $p=0,826$).

Следовательно, статистически значимых «опасных» сочетаний повреждений в нашей выборке не выявлено. При достаточной численности подгрупп ни одно сочетание не продемонстрировало убедительного повышения риска развития неблагоприятных клинических событий в сравнении с изолированной реконструкцией ПКС.

Таблица 18 – Частота неблагоприятных клинических событий по отдельным вариантам операции

Вариант операции	n	Неблагоприятные клинические события, n (%)	95% ДИ
ПКС	95	16 (16,8%)	10,6-25,6%
ПКС+резекция мениска	53	10 (18,9%)	10,6-31,4%
ПКС+шов менисков	23	3 (13,0%)	4,5-32,1%
ПКС+большеберцовая колл. связка	3	1 (33,3%)	6,1-79,2%
ПКС+большеберцовая колл. связка+шов менисков	1	0 (0,0%)	0,0-79,3%
ПКС+малоберцовая колл. связка	1	0 (0,0%)	0,0-79,3%
Пластика ПКС+ антеролатеральных структур	1	0 (0,0%)	0,0-79,3%

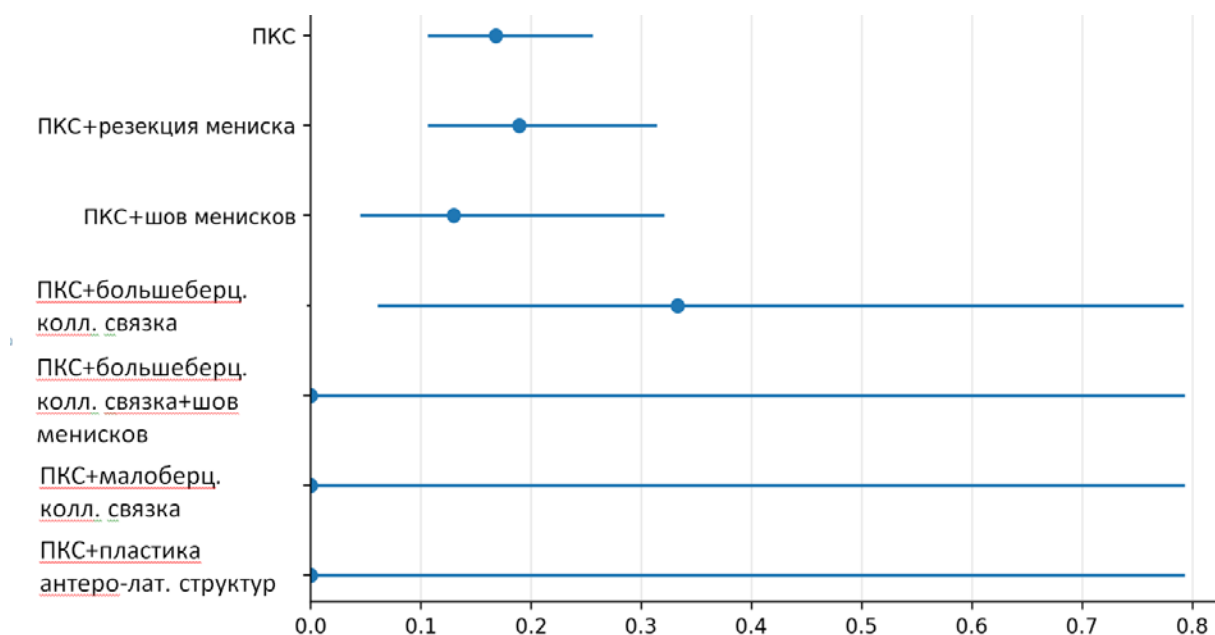


Рисунок 6 – Частота неблагоприятных клинических событий при различных вариантах операции с 95% доверительными интервалами.

По оси X – доля неблагоприятных клинических событий, по оси Y – варианты хирургических вмешательств. 95% доверительные интервалы представлены горизонтальными отрезками

Полученные данные позволяют сделать несколько принципиальных выводов. Во-первых, в рамках описанных выше сочетаний, наличие нескольких второстепенных повреждений на фоне основного разрыва ПКС само по себе не приводит к формированию отдельного предоперационного термографического фенотипа, а предоперационная термография интегрально отражает состояние тканей, в котором морфологическая составляющая является важным, но не единственным ведущим фактором.

Во-вторых, отсутствие статистически доказанной связи между характером повреждения и осложненным течением указывает на то, что решающее значение имеет не столько характер повреждения, сколько особенности течения раннего послеоперационного периода, состояние мягких тканей, организация реабилитации, индивидуальная реактивность организма и иные факторы. Наконец, редкая встречаемость некоторых сочетаний повреждений в данном материале не позволяет надежно ответить на вопрос о риске осложненного течения при вовлечении, например, боковых стабилизаторов или при более сложной травме, вовлекающей несколько внутрисуставных структур. Для таких выводов необходима отдельная выборка с большим числом наблюдений.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОСЛЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЕРЕДНЕЙ КРЕСТООБРАЗНОЙ СВЯЗКИ КОЛЕННОГО СУСТАВА. ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЦЕНТИЛЬНЫХ КРИВЫХ. РЕЗУЛЬТАТЫ АНКЕТИРОВАНИЯ. СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ МРТ

4.1 Динамика термографических показателей и перцентильное представление данных

Как уже было сказано в материалах и методах, при статистической обработке результатов для наглядного представления динамических изменений температур коленного сустава во времени нами были использованы перцентильные кривые (перцентильные графики). По сути, это референсные кривые распределения термографических показателей коленных суставов (P3, P10, P25, P50, P75, P90, P97), на которые наносили индивидуальные значения параметров конкретных пациентов. Перцентильное представление данных в доступной для восприятия форме отображает распределение значений термографических параметров коленных суставов пациентов, у которых не были зафиксированы какие-либо неблагоприятные клинические события (т.е. с неосложненным течением), в зависимости от времени, прошедшего после операции. При построении перцентильного представления данных был использован LMS-метод [70].

До перцентильного представления данные пациентов с неосложненным течением послеоперационного периода для любого из термографических параметров на временных графиках выглядят как обычное множество точек. Ниже приведено такое представление для одного из термографических показателей ($\min inv$) после первичного анализа базы данных пациентов с

неосложненным течением послеоперационного периода (рис. 7). Использовать такой график в клинической практике крайне неудобно.

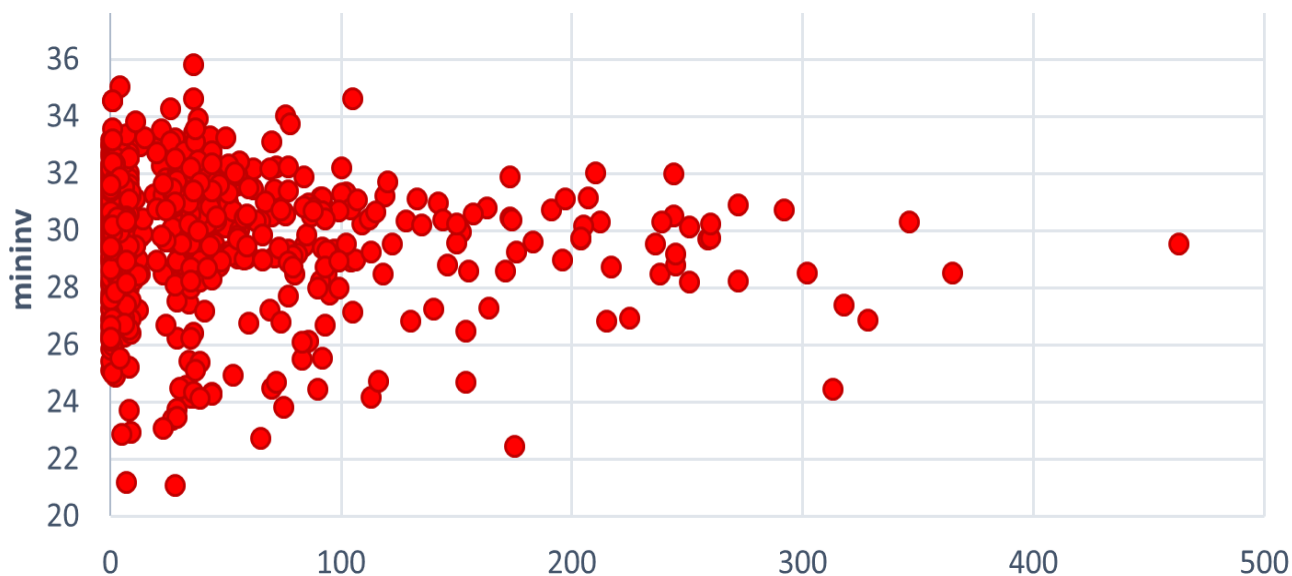


Рисунок 7 – Точечное представление значений для одного из термографических параметров на временном графике. Представлены все значения данного параметра, зафиксированные у пациентов с неосложненным течением послеоперационного периода. По оси Y – значение термографического показателя в градусах °C, по оси X – количество суток после операции

При перцентильном представлении данных можно легко увидеть, выходили ли значения того или иного термографического параметра пациента за пределы значений, соответствующих неосложненному течению послеоперационного периода, или нет. Для этого достаточно поместить точку с данными пациента на графике и определить ее расположение по отношению к ближайшим перцентильным кривым. На графиках рисунка 8 представлены семь перцентильных кривых, каждая из которых отсекает полосу значений, соответствующую частотному распределению (снизу вверх) 3%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 97% каждого термографического параметра при нормальном течении послеоперационного периода в конкретный момент времени. Опорные перцентильные кривые для каждого из параметров представлены в приложении 7.

Для примера на график наложены значения нескольких пациентов с благоприятным и неблагоприятным течением послеоперационного периода.

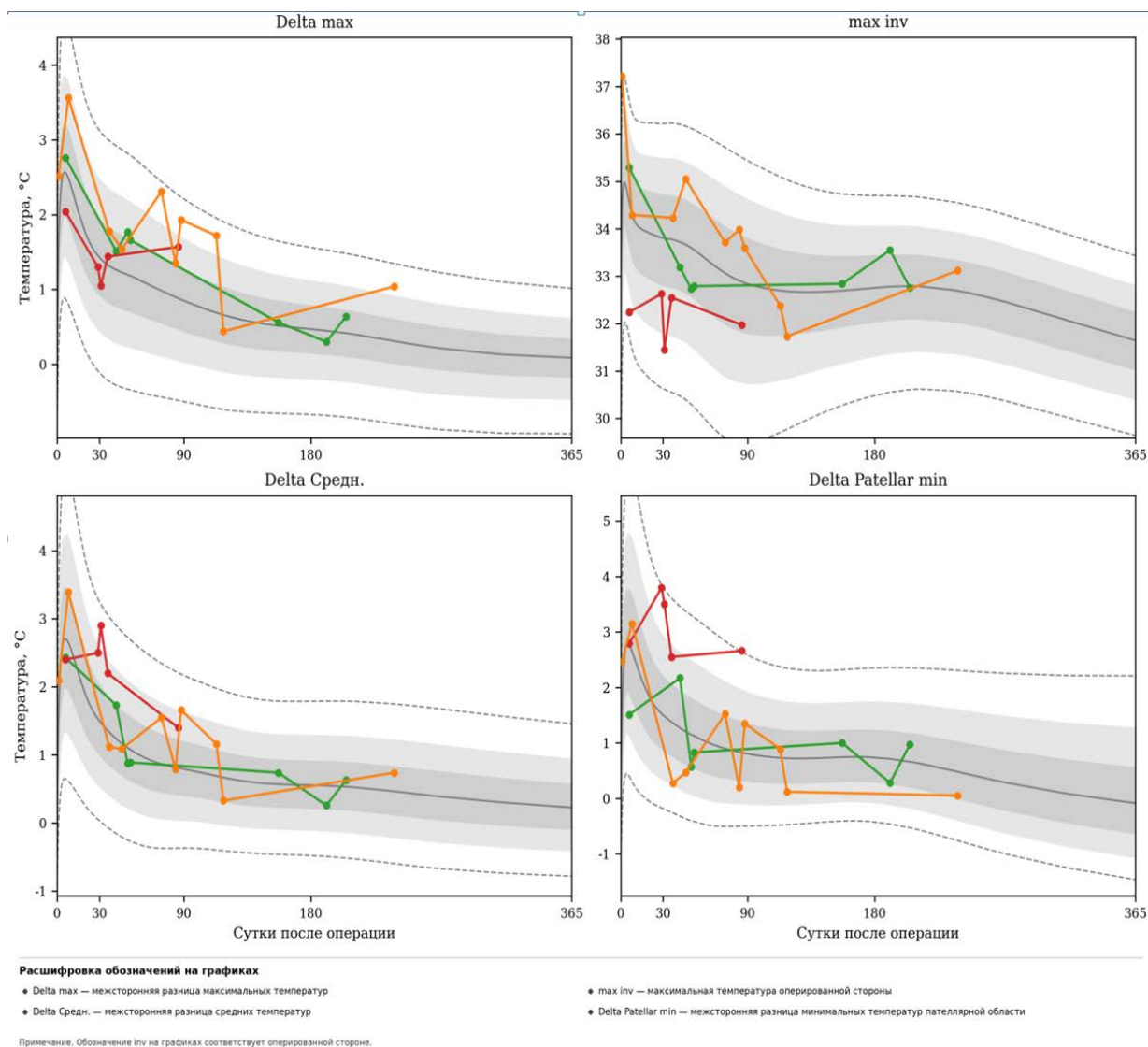


Рисунок 8 – Представление частотного распределения значений термографических параметров в виде перцентильных кривых на временных графиках. По оси Y – значение термографического параметра в градусах °C, по оси X – время в сутках после операции. Точки представляют собой значения термографических параметров конкретного пациента, наложенные на перцентильные кривые. Зеленая кривая – динамика параметра у пациента с неосложненным течением послеоперационного периода, красная – динамика у пациента с инфекционно-воспалительным неблагоприятным клиническим событием, оранжевая – динамика у пациента с неинфекционным неблагоприятным клиническим событием

4.2 Интерпретация результатов термографии, полученных посредством перцентильного визуального представления данных

На данном этапе работы единицей анализа являлся хирургический эпизод. Каждый эпизод в базе данных включал в себя подробную запись о пациенте, перенесшем первичную реконструкцию ПКС, с серией термографических наблюдений по 18 параметрам. Краткая характеристика выборки пациентов для данного анализа представлена в таблице 19.

Таблица 19 – Характеристика материала данного этапа исследования

Показатель	Значение
Исходное число термографических записей	625
Количество уникальных пациентов	183
Количество операционных эпизодов	183
Операционные эпизоды, пригодные для сопоставления с перцентильными кривыми 0-365 суток	177
Эпизоды с неосложненным течением	147
Эпизоды с осложненным течением	30
из них с инфекционно-воспалительными неблагоприятными клиническими событиями	8
из них с неинфекционными неблагоприятными клиническими событиями	22
Послеоперационные наблюдения в диапазоне 1-365 суток	498

Результат каждого послеоперационного термографического наблюдения «накладывали» на перцентильные графики, помещая полученное значение каждого из термографических параметров в одну из следующих зон: зона ниже 3-го перцентиля, 3-10-й перцентиль, 10-25-й, 25-50-й, 50-75-й, 75-90-й, 90-97-й перцентили и зона выше 97-го перцентиля. При дальнейшем анализе

использовали эмпирическое правило, согласно которому благоприятным считалось нахождение значений термографических параметров внутри интервала от 10-го до 90-го перцентиля. Значительным отклонением считали выход значений за пределы 3-го или 97-го перцентиля.

Другими словами, в динамике при визуальной оценке перцентильного представления данных удержание траектории любого термографического параметра в центральной части перцентильного поля (т.е. наиболее часто в зонах 25-50-го либо 50-75-го перцентилей) было принято рассматривать как типичную картину неосложненного послеоперационного течения.

На основании формальной логики был сформулирован перечень визуальных термографических правил (признаков), которые для каждого хирургического эпизода оценивали по принципу: присутствует он или отсутствует. Из сочетания нескольких признаков было сформулировано объединенное правило визуальной оценки. Посредством статистического анализа для каждого формализованного признака была рассчитана его чувствительность, специфичность, прогностическая ценность положительного и отрицательного результата и отношения правдоподобия. Для правила объединенной визуальной оценки вычисляли площадь под характеристической ROC-кривой.

На данном этапе все вышеперечисленные признаки и правило следует рассматривать лишь как исследовательские предположения. Диагностическая ценность и эффективность каждого из них нуждается в проверке на внешних данных, которые не были бы основой для их первичного формулирования и статистической оценки.

4.2.1 Типичные отклонения по данным перцентильной визуализации при осложненном течении послеоперационного периода

В группе пациентов с осложненным течением послеоперационного периода траектории значений термографических параметров значительно чаще выходили за пределы эталонного интервала P10-P90.

Наибольшую диагностическую значимость на различных этапах имели Delta max, Max Inv, Delta Средн., Patellar Inv Min, Patellar Inv Max, Patellar Inv Средн., Delta Patellar Min и Delta Patellar Max. Для последующего изложения эта совокупность обозначена как «8 отобранных параметров» (табл. 20).

Таблица 20 – Наиболее информативные термографические параметры

Параметр	Клиническое содержание	Основная роль в алгоритме
Delta max	межсторонняя разница максимальных температур	Важный показатель как для раннего, так и отсроченного контроля; строгий признак атипичного хода траектории восстановления; входит в раннюю чувствительную триаду
Delta Patellar Min	межсторонняя разница минимальной температуры пателлярной области	Чувствительный показатель раннего и промежуточного временных этапов; входит в раннюю чувствительную триаду при превышении P90
Patellar Inv Min	минимальная температура пателлярной области оперированной стороны	Чувствительный ранний показатель локального пателлярного профиля; повышение >P90 входит в раннюю триаду, снижение <P3 трактуется отдельно как универсальный атипичный признак
Max Inv	максимальная температура оперированной стороны	Ранний признак локальной гипертермии; важен в сочетании с Patellar Inv Max
Delta Средн.	межсторонняя разница средних температур	Показатель стойкой межсторонней асимметрии; наиболее информативен после 60-90 суток
Patellar Inv Max	максимальная температура пателлярной области оперированной стороны	Признак локальной пателлярной гипертермии; важен в сочетании с max inv
Patellar Inv Средн.	средняя температура пателлярной области оперированной стороны	Характеризует устойчивость изменений температурного профиля пателлярной области
Delta Patellar Max	межсторонняя разница максимальной температуры пателлярной области	Отражает отсроченную пателлярную асимметрию; оценивается после 60 суток

При одновременном сопоставлении 18 термографических параметров контроль множественных сравнений осуществляли методом Беньямини-Хохберга. Значимых статистических различий по значениям параметров между группами пациентов с инфекционными и неинфекционными неблагоприятными клиническими событиями после поправки на множественные сравнения не получено.

Однако это в значительной степени объясняется малочисленностью инфекционных неблагоприятных клинических событий. Описательный анализ свидетельствует, что при инфекционно-воспалительных неблагоприятных событиях в сроки позже 60 суток после хирургического вмешательства характерны попадания в верхние перцентильные зоны показателей Delta Patellar Max и Delta Patellar Средн., а также более выраженные смещения значений части параметров оперированной стороны в нижние перцентильные диапазоны в сроки до 35 суток. Для группы пациентов с неинфекционными неблагоприятными клиническими событиями таких закономерностей выявлено не было.

В практическом аспекте необходимо различать три группы перцентильных диагностических признаков: а) универсальные признаки и эмпирические правила, применимые на любом сроке после операции; б) признаки, основанные на отклонении конкретных параметров в определенные временные окна; в) сочетанные отклонения параметров, применимые для оценки отдельного визита или динамики. Все эти элементы следует использовать совместно, но с разной целью. Универсальные правила применяют для отбора пациентов в группу риска. Визуальные признаки, основанные на конкретных отклонениях и временных окнах – для уточнения диагноза, а сочетания отклонений параметров – для дополнительного подтверждения и оценки эпизода, в котором имеется несколько наблюдений.

Наиболее сбалансированным универсальным правилом следует считать выявление двух и более из восьми отобранных параметров в зоне выше 90-го перцентиля хотя бы на одном визите. Повторное превышение 90-го перцентиля

одним параметром в двух последовательных исследованиях является подтверждающим признаком стойкого неблагополучия. Волнообразная траектория любого параметра отражает нестабильность адаптации к нагрузке и требует сопоставления с клиническими данными.

Следует отметить, что для корректного использования двух последних правил необходимо четко определить величину интервала между наблюдениями. В базе данных дополнительно был проанализирован временной шаг между соседними послеоперационными термографическими обследованиями в когорте пациентов со сроками наблюдения от 1 до 365 суток. Медиана интервала наблюдения между двумя обследованиями составила 14 [7; 35] суток (325 интервалов), а для трехкратных исследований полный временной размах составил 42 [28; 76,5] суток (191 последовательность). Эти интервалы и должны служить для корректного использования вышеперечисленных перцентильных правил.

Отдельно следует обозначить «раннюю чувствительную триаду». В нее входят $\Delta \max > P90$, $\text{Patellar Inv Min} > P90$ и $\Delta \text{Patellar Min} > P90$. Положительным признаком считается наличие хотя бы одного из трех описанных отклонений.

Отклонение Patellar Inv Min ниже P3 является самостоятельным универсальным признаком атипичного хода траектории и не является элементом триады.

Анализ показал, что при наблюдении за термографической динамикой полезно выполнять оценку не только отклонений по отдельным термографическим параметрам, но и по их сочетаниям. В этом контексте наиболее типичным ранним вариантом неблагоприятной послеоперационной термографической динамики является совместное отклонение параметров оперированного коленного сустава $\Delta \max$ Inv и Patellar Inv Max за пределы интервала P10-P90. Такое сочетание имеет чувствительность 50,0% и специфичность 72,7%. Наиболее строгим признаком неблагоприятного прогноза является одновременное превышение 90-го перцентиля по $\Delta \max$ и $\Delta \max$ Inv.

Данное сочетание не подходит для первичного отбора, так как встречается редко, но при его обнаружении требуется расширенная диагностика с использованием дополнительных методов исследования.

Анализ сочетаний параметров демонстрирует, что сочетание $\text{max inv} + \text{Patellar inv max}$ чаще встречается на ранних сроках после операции и при благоприятном течении частота его появления постепенно нивелируется. Сочетания $\text{Delta max} + \text{Delta Средн.}$ и $\text{Delta Patellar min} + \text{Delta Patellar max}$ при осложненном течении «накапливаются» на сроках 91-180 суток. Наиболее строгим сочетанием остается $\text{Delta max} + \text{max inv}$ выше 90-го перцентиля. При его появлении следует использовать дополнительные методы обследования для поиска возможных причин осложненного течения (рис. 9).

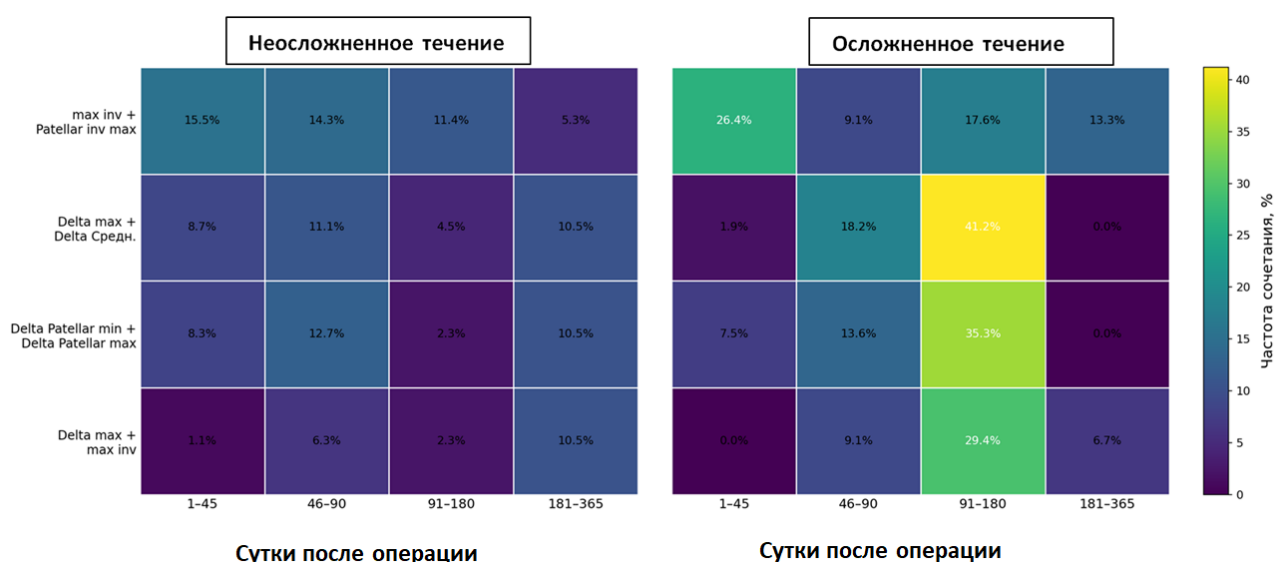


Рисунок 9 – Динамика характерных сочетаний параметров по временным окнам для пациентов с осложненным и неосложненным течением

Отдельного описания требует объединенная визуальная шкала. Суть ее состоит в том, что при наличии нескольких наблюдений у конкретного пациента проверяют наличие или отсутствие четырех признаков: 1) $\text{Delta max} > P90$ после 60 суток; 2) $\text{Delta Средн.} > P90$ после 60 суток; 3) $\text{Max Inv} < P10$ в первые 35 суток; 4) $\text{Patellar Inv Min} > P90$ либо $< P3$. Затем подсчитывают число присутствующих признаков от 0 до 4. Площадь под характеристической кривой для этой шкалы

составила 0,747, что соответствует умеренной разделяющей способности. Важно, что шкала применима только при наличии наблюдений, позволяющих оценить соответствующие временные окна; отсутствие обследования в нужном окне не должно автоматически приравниваться к отсутствию признака.

В практическом ключе наличие даже одного из указанных в данной шкале признаков может быть основанием для усиленного наблюдения за пациентом. Такой подход обеспечивает чувствительность 73,3% и прогностическую ценность отрицательного результата 92,6%. Если же одновременно присутствуют три и более признака при достаточной длительности наблюдения, специфичность шкалы возрастает до 98,6%, а прогностическая ценность положительного результата – до 81,8%, что позволяет с высокой вероятностью считать послеоперационную траекторию патологической.

4.2.2 Возвращение термографических параметров к норме при осложненном и неосложненном течении послеоперационного периода

Ранее автором настоящей диссертации был выполнен анализ нормальных значений термографических параметров у 160 спортсменов сборных команд. В качестве «нормы» в контексте данного раздела был принят интервал значений от минимального значения 15-ого перцентиля до максимального из 85-ого для каждого термографического параметра. Указанные интервалы составляли для нормы средней температуры передней поверхности коленного сустава (Средн.) от 29,4 до 31,6°C. Для средней температуры пателлярной области (Patellar Средн.) – от 29,02 до 31,3°C. Разброс нормальных значений для дельты средних температур передней области коленного сустава (Delta Средн.) составлял от -0,39 до 0,4. Для разницы температур пателлярной области (Delta Patellar.) диапазон нормальных значений составлял от -0,6 до 0,5.

Далее был выполнен статистический анализ возвращения в нормальный диапазон следующих параметров: средней температуры интактной стороны (Средн.), средней температуры оперированной стороны (Inv Средн.),

межсторонней разницы средних температур (Delta Средн.), средней температуры области надколенника (Patellar Средн.), средней температуры области надколенника оперированной стороны (Patellar Inv. Средн.), межсторонней разницы температур пателлярной области (Delta Patellar).

В качестве базового показателя был принят срок до первого послеоперационного обследования, на котором тот или иной параметр впервые вошел в диапазон нормальных значений.

Как минимум однократное попадание в нормальный диапазон в сроки до 12 месяцев после операции было зарегистрировано для всех шести анализируемых термографических параметров. Но сроки первой документированной нормализации и количество попаданий в нормальный диапазон для различных термографических параметров к этому сроку существенно различались.

Осложненное течение оказывало статистически значимое влияние на сроки возвращения к норме для всех шести рассматриваемых термографических параметров.

С учетом одновременного анализа шести показателей, значения уровня статистической значимости корректировали последовательным методом Холма. Выявленные различия сохранили статистическую значимость, а скорректированные значения p находились в диапазоне от 0,0015 до 0,0048.

Наиболее выраженное замедление нормализации наблюдалось для межсторонних разниц температур, особенно для Delta Patellar (отношение рисков 0,35; 95% ДИ 0,19-0,65) и Delta Средн. (отношение рисков 0,40; 95% ДИ 0,21-0,78). При этом наличие осложненного течения не только уменьшало вероятность ранней нормализации, но и приводило к существенному сдвигу сроков восстановления по шкале времени вправо (табл. 21 и рис. 10).

Таблица 21 – Влияние осложненного варианта течения на сроки возвращения температурных параметров к норме

Параметр	Неослож., к 90-м суткам	Ослож., к 90-м суткам	Ме неослож., (сут.)	Ме ослож., (сут.)	ОР (95% ДИ)
средняя температура интактной стороны (Средн.)	83,5%	58,2%	13	44	0,50 (0,32-0,80)
средняя температура оперированной стороны (Inv. Средн.)	70,0%	42,6%	44	140	0,45 (0,27-0,76)
межсторонняя разница средних температур (Delta Средн.)	48,7%	25,0%	112	>180	0,40 (0,21-0,78)
средняя температура пателлярной области интактной стороны (Patellar Средн.)	83,8%	55,1%	10	60	0,46 (0,29-0,74)
средняя температура пателлярной области оперированной стороны (Patellar Inv. Средн.)	79,8%	53,9%	27	73	0,44 (0,27-0,71)
межсторонняя разница температур пателлярной области (Delta Patellar)	61,1%	31,7%	35	>180	0,35 (0,19-0,65)

Примечание: ОР – отношение рисков для группы осложненного течения по сравнению с группой неосложненного; значение <1 указывает на более медленное достижение нормы. Для межсторонней разницы средних температур и межсторонней разницы температур пателлярной области в группе осложненного течения медиана в пределах 180 суток не достигнута. Для шести одновременно анализируемых показателей применялась поправка Холма на множественные сравнения.

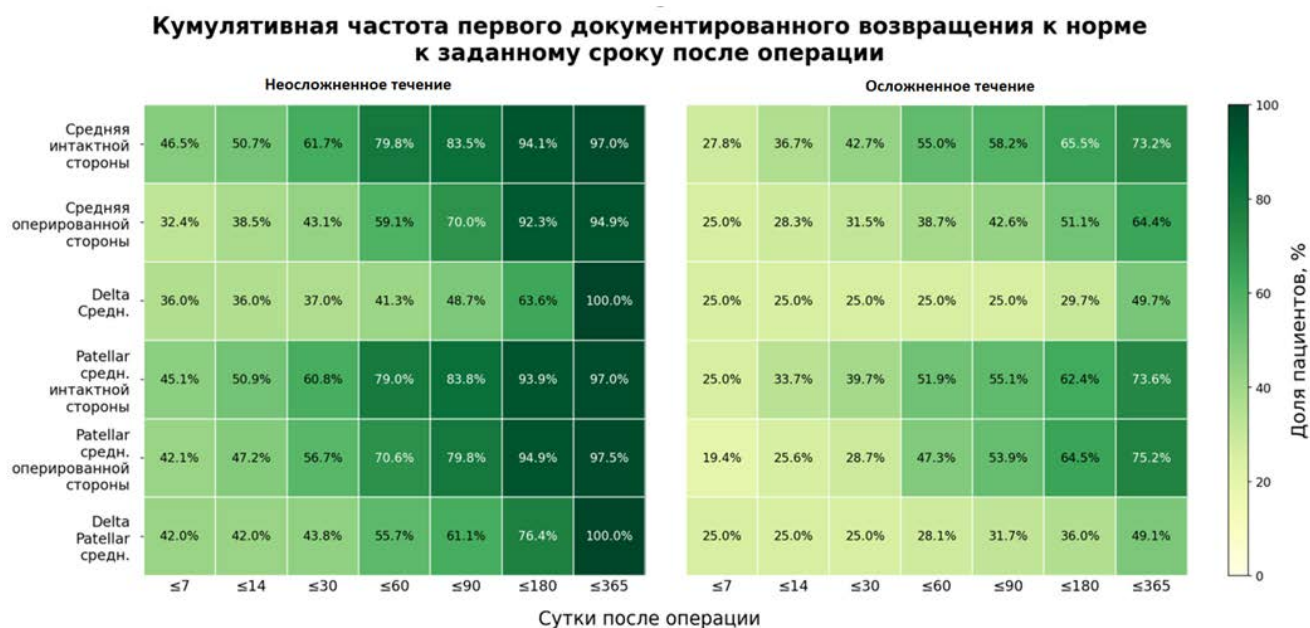


Рисунок 10 – Кумулятивная частота первого документированного возвращения к норме к заданному сроку после операции в группах пациентов с осложненным и неосложненным течением послеоперационного периода

Единая кумулятивная тепловая карта отвечает на вопрос, у какой доли пациентов термографический параметр хотя бы один раз попал в нормальный диапазон к заданному сроку после операции. В таком варианте календарный контур целесообразно использовать на протяжении всего первого года после операции. Однако его нельзя отождествлять с достижением стойкой нормотермии. Важно различать три варианта событий: первое документированное возвращение параметра к норме, нахождение параметра в нормальном диапазоне на конкретном визите и стойкую нормотермию в серии наблюдений. В связи с этим ситуация, при которой к 180 суткам у большинства пациентов хотя бы один раз зафиксирована нормотермия, не противоречит тому, что после 180 суток лишь часть отдельных поздних наблюдений стабильно находится в пределах нормы. Первая нормализация локальной температуры автоматически не ведет к ее устойчивому сохранению.

Анализ кумулятивной тепловой карты показывает, что при неосложненном течении к 90-м суткам после операции у большинства пациентов как минимум один раз была задокументирована нормотермия по параметрам средней

температуры интактной стороны (Средн.), средней температуры оперированной стороны (Inv. Средн.), средней температуры интактной пателлярной области (Patellar Средн.) и средней температуры пателлярной области оперированной стороны (Patellar Inv. Средн.). Оба дельта-показателя восстанавливаются гораздо медленнее. В связи с этим для них окно интерпретации должно быть смещено как минимум в диапазон до 180 суток, а в ряде случаев – до конца первого года после операции (табл. 22).

Таблица 22 – Практические календарные ориентиры возврата к норме по шести термографическим параметрам при неосложненном и осложненном течении послеоперационного периода

Параметр	К 90-м суткам, % неосложненное / осложненное течение	К 180-м суткам, % неосложненное / осложненное течение	К 365-м суткам, % неосложненное / осложненное течение	Медиана первого возврата, сутки неосложненное / осложненное течение
Средняя температура интактной стороны	83,5 / 58,2	94,1 / 65,5	97,0 / 73,2	13 / 44
Средняя температура оперированной стороны	70,0 / 42,6	92,3 / 51,1	94,9 / 64,4	44 / 140
Межсторонняя разница средних температур	48,7 / 25,0	63,6 / 29,7	100,0 / 49,7	112 / >365
Средняя температура пателлярной области интактной стороны	83,8 / 55,1	93,9 / 62,4	97,0 / 73,6	10 / 60

Продолжение таблицы 22

Параметр	К 90-м суткам, % неосложненное / осложненное течение	К 180-м суткам, % неосложненное / осложненное течение	К 365-м суткам, % неосложненное / осложненное течение	Медиана первого возврата, сутки неосложненное / осложненное течение
Средняя температура пателлярной области оперированной стороны	79,8 / 53,9	94,9 / 64,5	97,5 / 75,2	27 / 73
Межсторонняя разница температур пателлярной области	61,1 / 31,7	76,4 / 36,0	100,0 / 49,1	35 / >365

К 365-м суткам при неосложненном течении кумулятивная частота как минимум однократного документированного возврата к норме достигает 94,9-100,0% по всем шести календарным параметрам. При осложненном течении соответствующие значения составляют лишь 49,1-75,2%. Наиболее чувствительными маркерами замедленного восстановления следует считать межстороннюю разницу средних температур и межстороннюю разницу температур пателлярной области.

Исходя из анализа, отсутствие нормализации таких параметров, как Средн., Patellar Средн., Patellar Inv. Средн., а также Inv. Средн. к 90 суткам после операции следует рассматривать какстораживающий термографический признак, так как у большинства пациентов с неосложненным течением указанные параметры обычно хотя бы раз возвращались в норму.

Для Delta Средн. и Delta Patellar средн. сроки нормализации дольше даже при неосложненном течении. Осложненное течение характеризуется резким

сокращением количества случаев возврата к норме к 180 суткам. Так, для Delta Средн. возврат к норме на этом сроке зафиксирован лишь у 29,7% пациентов, а для Delta Patellar средн. – только у 36,0%.

Использование визуализации по типу тепловых карт для сроков возвращения коленных суставов к нормотермии позволило по-новому использовать информацию и о совместных отклонениях параметров (рис. 11).

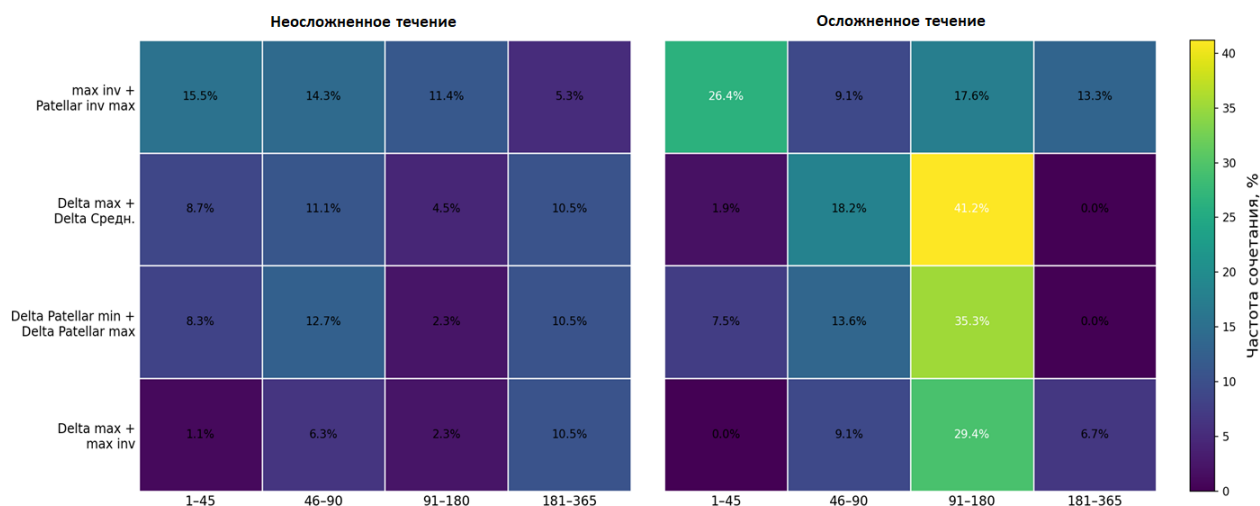


Рисунок 11 – Частота характерных сочетаний параметров в разные временные окна у пациентов с неосложненным и осложненным течением послеоперационного периода

Так, сочетание Max Inv + Patellar Inv Max чаще встречалось в сроки до 45 суток, и при неосложненном течении частота детекции такого сочетания снижалась в 3 раза (с 15,5% наблюдений в диапазоне 1-45 суток до 5,3% наблюдений в интервале 181-365 суток). В случаях осложненного течения, данное сочетание либо не уменьшалось по частоте, либо его частота вновь росла после 90 суток (17,6% случаев в окне 91-180 суток и 13,3% – в интервале 181-365 суток).

У пациентов с неосложненным течением сочетания межсторонних параметров Delta max + Delta Средн. и Delta Patellar Min + Delta Patellar Max после 90 суток встречались очень редко (4,5% и 2,3% наблюдений соответственно). При осложненном течении, частота указанных сочетаний в интервале 91-180 суток возрастала до 41,2 и 35,3% соответственно. Таким образом, «накопление»

количества Delta-сочетаний следует рассматривать как один из наиболее характерных признаков осложненного течения послеоперационного периода. Комбинированное сочетание параметров Delta Max + Max Inv у пациентов с осложненным течением чаще встречалось в интервале 91-180 суток (29,4% послеоперационных визитов).

4.2.3 Термографическая оценка после 180 суток после реконструкции передней крестообразной связки

В сроки более 6 месяцев после операции логика термографической оценки строится, прежде всего, на анализе устойчивости отклонений и их направленности. Анализ случаев неосложненного течения после 180 суток показал, что в подавляющем большинстве поздних наблюдений ни один из шести термографических параметров не находился стабильно в пределах нормы. Таким образом, после 180 суток единичный выход параметра за нормативный диапазон не является доказательством осложненного течения, и, наряду с другими критериями, может быть лишь поводом для усиленного контроля в сопоставлении с клиническим состоянием.

Анализ базы данных также показал, что после 180 суток осложненное течение, прежде всего, характеризуется отсутствием уменьшения количества термографических отклонений по мере перехода от окна наблюдения 91-180 суток к окну 181-365 суток. Для этого периода особое значение имеет не факт единичного выхода параметра за пределы референсных значений, а отсутствие позитивной динамики, вторичное появление отклонений или нарастание их числа.

Для оценки состояния оперированного коленного сустава в сроки после 180 суток используется совокупность взаимодополняющих динамических признаков: подсчет числа базовых температурных параметров вне абсолютной нормы, среднее нормированное отклонение трех дельта-показателей от медианы перцентильного коридора, наибольшая одиночная компонента такого отклонения и подсчет числа дельта-показателей, сохраняющих смещение в верхнее перцентильное поле. Для этого:

1. Выбирают две точки наблюдения: t_1 – последнее доступное исследование в интервале 91-180 суток, t_2 – первое доступное исследование в интервале 181-365 суток. Сравнение следует выполнять при интервале между исследованиями не менее 30 суток (предпочтительно с интервалом 60-120 суток).

2. Для каждого из трех дельта-показателей: Delta max, Delta Средн. и Delta Patellar max вводят свой индекс j . Далее определяют фактическое значение параметра $x_j(t)$, медиану $P_{50j}(t)$, нижнюю границу $P_{10j}(t)$ и верхнюю границу $P_{90j}(t)$ перцентильного коридора на соответствующем сроке наблюдения.

3. Затем для каждого параметра рассчитывают абсолютное нормированное отклонение его значения от медианы по формуле (5):

$$d_j(t) = \frac{|x_j(t) - P_{50,j}(t)|}{P_{90,j}(t) - P_{10,j}(t)}, \quad (5)$$

где $x_j(t)$ – фактическое значение параметра; $P_{50j}(t)$ – медиана соответствующей перцентильной кривой; $P_{10j}(t)$ и $P_{90j}(t)$ – нижняя и верхняя границы рабочего перцентильного коридора. Деление на ширину коридора $P_{90}-P_{10}$ приводит все три параметра к единой безразмерной шкале.

4. Затем рассчитывают среднее нормированное отклонение трех дельта-показателей по формуле (6):

$$A(t) = \frac{d_1(t) + d_2(t) + d_3(t)}{3} \quad (6)$$

$A(t)$ характеризует обобщенную выраженность межсторонней температурной асимметрии в выбранной точке наблюдения. Чем больше $A(t)$, тем дальше совокупный дельта-профиль пациента удален от медианной траектории. Основным поздним динамическим показателем является индекс сужения асимметрии, рассчитываемый по формуле (7):

$$\text{Споздн.суж.асимм.} = A(t_1) - A(t_2) \quad (7)$$

Если $\text{Споздн.суж.асимм.} > 0$, средняя нормированная асимметрия уменьшилась, то есть позднее восстановительное сужение имеется. Если $\text{Споздн.суж.} \leq 0$, сужения асимметрии нет.

5. Чтобы усреднение не скрывало выраженное отклонение одного из дельта показателей, дополнительно рассчитывают наибольшую одиночную компоненту по формуле (8):

$$B(t) = \max(d_1(t), d_2(t), d_3(t)) \quad (8)$$

Если $B(t_2) < B(t_1)$, максимальная выраженность одиночного отклонения уменьшилась. Если $B(t_2) \geq B(t_1)$, то сохраняется или нарастает хотя бы одна ведущая компонента асимметрии, что является дополнительным подтверждающим признаком отсутствия полноценного восстановления, даже если среднее $A(t)$ снизилось.

6. Отдельно подсчитывают число дельта-показателей, находящихся выше верхней перцентильной границы, по формуле (9):

$$K_{90}(t) = \sum_{j=1}^3 I(x_j(t) > P_{90,j}(t)), \quad (9)$$

где индикатор $I(\text{условие})$ равен 1, если условие выполнено, и 0 – если условие не выполнено. Уменьшение $K_{90}(t)$ при переходе от t_1 к t_2 указывает на уменьшение распространенности асимметрии. Если $K_{90}(t_2) \geq K_{90}(t_1)$ при сохранении хотя бы одного отклоненного дельта-показателя или появлении нового превышения P_{90} , то это трактуется как отсутствие положительной динамики.

7. Параллельно выясняют, какое количество из шести базовых температурных параметров находится вне абсолютной нормы.

В итоге благоприятный клинико-термографический профиль восстановления на сроках более 180 суток предполагает положительное значение Споздн.суж.асимм. , снижение $B(t)$ и отсутствие увеличения $K_{90}(t)$. Настораживающий профиль подразумевает изолированное отсутствие улучшения одного из перечисленных выше показателей без клинического ухудшения. О неблагоприятном профиле восстановления можно говорить в том случае, когда $\text{Споздн.суж.асимм.} \leq 0$, а также сохраняется или нарастает $B(t)$ либо $K_{90}(t)$, а в клинической картине отмечается нарастание или отсутствие регресса боли, выпот,

ограничение объема движений, особенно в сочетании с патологическими данными МРТ.

Среди пациентов, которых имелась возможность наблюдать в оба временных окна, признак «отсутствие уменьшения базовых параметров вне нормы» встречался у 66,7% пациентов с осложненным течением и лишь у 14,3% пациентов с неосложненным течением послеоперационного периода. Отсутствие позднего «сужения асимметрии» было выявлено у 66,7% и 28,6% соответственно (рис. 12). Это наблюдение носит исключительно описательный характер, вследствие малого количества наблюдений и требует дальнейшего изучения и подтверждения.

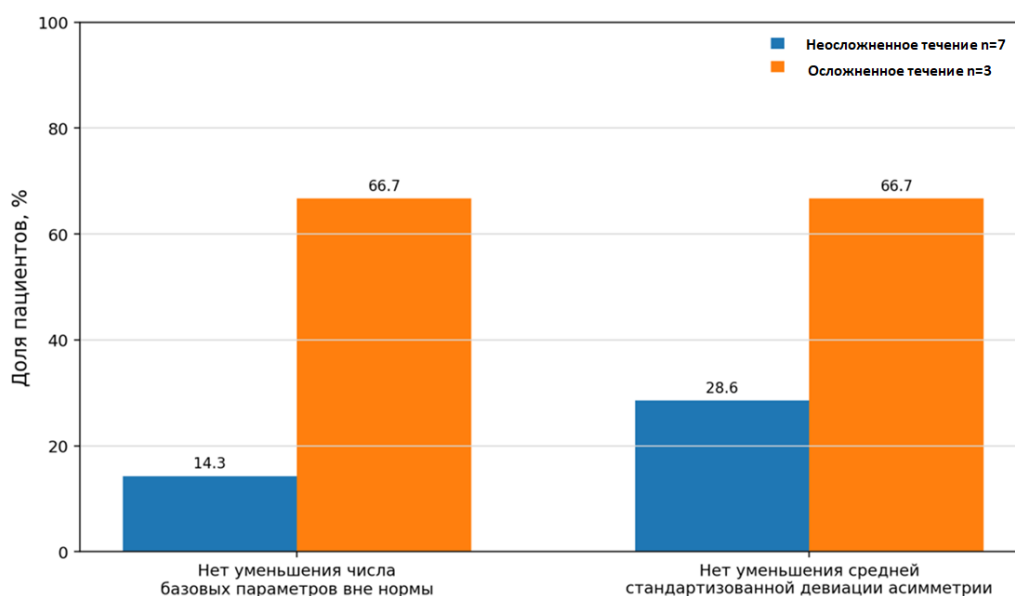


Рисунок 12 – Признаки отсутствия позднего восстановительного сужения асимметрии у пациентов с последовательными наблюдениями

Таким образом, осложненное течение послеоперационного периода в сроки позже 6 месяцев прежде всего можно охарактеризовать отсутствием дальнейшего уменьшения температурной асимметрии, а не единичным выпадением значений параметров за пределы перцентильных диапазонов.

Среди одиночных признаков наиболее специфичными оказались выход Delta max выше 97-го центиля после 180 суток и сочетание нахождения Max Inv и Patellar Inv Max вне 10-90-го перцентильного коридора. Специфичность

критериев составила 92,3% (95% ДИ 66,7-98,6%), чувствительность – 20,0% (95% ДИ 5,7-51,0%). С учетом широких доверительных интервалов данные признаки пригодны лишь в качестве подтверждающих признаков, указывающих на остаточную и/или хроническую термографическую асимметрию (табл. 23).

Таблица 23 – Диагностические свойства поздних термографических критериев

Критерий	Чувствительность, % (n/N; 95% ДИ)	Специфичность, % (n/N; 95% ДИ)	Основание расчета
≥ 1 из 6 базовых параметров вне абсолютной нормы на любом визите 181-365 суток	100,0 (10/10; 72,2-100,0)	23,1 (3/13; 8,2-50,3)	23 пациента с ≥ 1 поздним визитом: 10 с осложненным и 13 с неосложненным течением
Delta max выше 97-го центиля на любом визите 181-365 суток	20,0 (2/10; 5,7-51,0)	92,3 (12/13; 66,7-98,6)	23 пациента с ≥ 1 поздним визитом
Max Inv и Patellar Inv Max одновременно вне 10-90-го центильного коридора на любом визите 181-365 суток	20,0 (2/10; 5,7-51,0)	92,3 (12/13; 66,7-98,6)	23 пациента с ≥ 1 поздним визитом
≥ 3 из 8 отобранных параметров вне 10-90-го центильного коридора на любом визите 181-365 суток	50,0 (5/10; 23,7-76,3)	53,8 (7/13; 29,1-76,8)	23 пациента с ≥ 1 поздним визитом
Отсутствие уменьшения числа базовых параметров вне нормы при переходе от 91-180 к 181-365 суткам	66,7 (2/3; 20,8-93,9)	85,7 (6/7; 48,7-97,4)	10 пациентов с данными в обоих временных окнах: 3 с осложненным и 7 с неосложненным течением

Продолжение таблицы 23

Критерий	Чувствительность, % (n/N; 95% ДИ)	Специфичность, % (n/N; 95% ДИ)	Основание расчета
Отсутствие сужения асимметрии по среднему нормированному отклонению Delta max, Delta Средн. и Delta Patellar max при переходе от 91-180 к 181-365 суткам	66,7 (2/3; 20,8-93,9)	71,4 (5/7; 35,9-91,8)	10 пациентов с двумя временными окнами
На всех поздних визитах ≥ 3 из 8 отобранных параметров остаются вне 10-90-го центильного коридора	20,0 (1/5; 3,6-62,4)	100,0 (5/5; 56,6-100,0)	10 пациентов с ≥ 2 поздними визитами. 5 с осложненным и 5 с неосложненным течением

Примечание: Динамические признаки рассчитывались только у пациентов, имевших данные как в окне 91-180 суток, так и в окне 181-365 суток. Признак устойчивого позднего отклонения на всех поздних визитах оценивался у пациентов, имевших не менее двух поздних наблюдений. Чувствительность рассчитывали как долю пациентов с положительным результатом критерия в группе осложненного течения, специфичность – как долю пациентов с отрицательным результатом в группе пациентов с неосложненным течением. 95% доверительные интервалы для чувствительности и специфичности рассчитывались методом Уилсона.

Для оценки критериев позднего блока из таблицы 23 необходимо регламентировать временной шаг между наблюдениями. В поздней подвыборке интервал между последним исследованием окна 91-180 суток и первым исследованием окна 181-365 суток составил 114,5 [87,8; 133,8] суток (10 сравнений). Между соседними поздними визитами внутри окна 181-365 суток медиана составила 26 [13,5; 35,5] суток (11 интервалов) (табл. 24)

Таблица 24 – Практические временные требования к поздним критериям

Критерий	Статистическое основание	Практическая рекомендация
Одновизитные поздние признаки (хотя бы один из шести базовых параметров вне нормы; Delta max выше 97-го центиля; max inv и Patellar inv max одновременно вне P10–P90; ≥ 3 из 8 отобранных параметров вне P10-P90 на любом позднем визите)	Основаны на одном любом обследовании в окне 181-365 суток.	Специальный межвизитный интервал не требуется. Критерий может оцениваться по одиночному позднему визиту, но сам по себе не является доказательством осложненного течения.
Нет уменьшения числа базовых параметров вне нормы при переходе от 91-180 к 181-365 суткам	Интервал между последним визитом окна 91-180 и первым визитом окна 181-365: Me 114,5 [87,8; 133,8] суток, n=10. Порог ≥ 30 суток сохраняет 90,0% эмпирических сравнений.	Сравнивать исследования с разрывом менее 30 суток не следует. Предпочтительный интервал между окнами – 60-120 суток; поздний визит желательно выполнять не сразу после 180 суток, а по возможности начиная примерно с 210 суток.
Нет сужения асимметрии по среднему нормированному отклонению; дополнительно учитываются B(t), K90(t)	Использует ту же межоконную пару наблюдений, что и предыдущее правило: Me 114,5 [87,8; 133,8] суток, n=10.	Минимально допустимый разрыв между сравниваемыми исследованиями – 30 суток; предпочтительный – 60-120 суток. Сравнение точек, примыкающих к рубежу 180 суток, методически нецелесообразно. В заключении следует указать, какой показатель сформировал отклонение: A(t), B(t), K90(t), или их сочетание.
На всех поздних визитах ≥ 3 из 8 отобранных параметров остаются вне P10-P90	Интервалы между соседними поздними визитами: Me 26 [13,5; 35,5] суток, n=11. Порог ≥ 14 суток сохраняет 72,7% эмпирических интервалов.	Для этого правила необходимы как минимум два поздних визита. Минимально допустимый интервал между ними – 14 суток; предпочтительный – 21-35 суток. Для более уверенного вывода желательно, чтобы поздняя серия охватывала не менее 30 суток.

Итак, для критериев, которые подразумевают оценку динамики между временными окнами в сроки более 180 суток после операции, эмпирический интервал, соответствующий распределению наблюдений в исследуемой выборке, составляет не менее 30 суток. Для правила оценки серии поздних наблюдений минимальным является перерыв около двух недель, предпочтительным – от трех до пяти недель.

4.2.4 Концепция термографического аналитического инструмента для индивидуализации программ реабилитации

Логика использования всех описанных термографических данных на протяжении предоперационного и послеоперационного периодов для практического применения может быть представлена в виде концепции «термографического аналитического инструмента» (приложение 8).

Максимальная эффективность термографического аналитического инструмента достигается посредством поэтапного использования разных термографических правил в те сроки, где они обладают наибольшей практической значимостью и в сочетании с клиническими данными. Сводное разграничение отборочных и подтверждающих критериев, входящих в инструмент, по временным периодам представлено в приложении 9.

При использовании термографии целесообразно различать три клинко-термографических профиля восстановления: благоприятный, настораживающий и неблагоприятный. При этом врачебные решения неизменно должны основываться на данных клинического осмотра и медицинской визуализации. Применение термографии, исходя из целей данного исследования, призвано лишь способствовать принятию решений за счет объективизации функционального состояния коленного сустава. Таким образом, благоприятный клинко-термографический профиль восстановления подразумевает, что в наблюдаемом временном периоде отсутствуют как отборочные, так и подтверждающие термографические критерии, а клиническое течение остается неосложненным. Настораживающий профиль характеризуется появлением одного или нескольких отборочных термографических критериев при отсутствии клинического

ухудшения. При единичном подтверждающем признаке без боли, выпота, ограничения движений и ухудшения функции профиль также не должен автоматически расцениваться как неблагоприятный, но требует более строгого контроля за нагрузкой, более частых наблюдений в динамике, и вероятно повторной оценки клинических тестов. Неблагоприятный профиль восстановления фиксируют тогда, когда отборочные термографические признаки сочетаются с подтверждающими и одновременно присутствуют клинические признаки неблагоприятных клинических событий и/или отсутствует положительная клиническая динамика.

Таким образом, изолированное отклонение по данным термографии без повышения уровня боли, увеличения выпота, нарушения объема движений, ухудшения функции или иных клинически значимых признаков, а также без подтверждения по данным дополнительных методов обследования может служить основанием лишь для усиленного наблюдения и временной стабилизации нагрузки с целью повторной более внимательной оценки клинических симптомов или данных медицинской визуализации в динамике.

Любые сочетания клинической картины с данными термографии, которые не соответствуют описанным ниже, предлагаем относить к неопределенным профилям. Такие ситуации требуют динамического наблюдения, в ходе которого профиль будет установлен.

Если термографическим аналитическим инструментом на предоперационном этапе зафиксировано значение f ниже порогового, то при устраненном выпоте, восстановлении полного разгибания, максимально возможном восстановлении силы четырехглавой мышцы бедра и отсутствии других признаков избыточной воспалительной реакции можно безопасно планировать хирургическое лечение. В данном случае речь идет о благоприятном предоперационном клинико-термографическом профиле. Если на фоне клинического благополучия значение расчетного индекса $f \geq 0,169$, то это само по себе также не является противопоказанием к операции. На текущий момент отсутствуют данные о влиянии характеристик предоперационной реабилитации, которые бы достоверно влияли на снижение индекса f . Однако с учетом

вероятного возрастания риска осложненного течения при отсутствии клинических противопоказаний логично как минимум увеличить продолжительность предоперационной подготовки и повторить термографическое исследование через 2-3 недели. При отсутствии возможности продлить предоперационную реабилитацию, после операции следует уделить особое внимание динамическому наблюдению за данным пациентом. Такой вариант клинической картины и данных термографии считается настораживающим. Сочетание $f \geq 0,169$ с клиническими признаками сохраняющейся выраженной боли, выпота, дефицита полного разгибания или ингибиции четырехглавой мышцы соответствует неблагоприятному предоперационному клинико-термографическому профилю. Хирургическое лечение в такой ситуации целесообразно отложить.

На раннем послеоперационном этапе основными задачами являются защита трансплантата, уменьшение боли и отека, восстановление полного разгибания в суставе, профилактика ингибиции четырехглавой мышцы бедра и обучение пациента безопасной двигательной активности. Термография на данном этапе используется, прежде всего, как индикатор выраженности локальной микроциркуляторной реакции на операцию и переносимости первой доступной нагрузки.

К ранним отборочным термографическим признакам осложненного течения относят положительный результат чувствительной триады в виде наличия хотя бы одного из трех отклонений: $\Delta \max > P90$, $\text{Patellar Inv Min} > P90$ или $\Delta \text{Patellar Min} > P90$; снижение $\Delta \max \text{ Inv} < P10$ в первые 35 суток; одновременное нахождение $\Delta \max \text{ Inv}$ и Patellar Inv Max вне коридора $P10-P90$; отклонение по универсальным перцентильным критериям. Благоприятный ранний профиль следует констатировать при отсутствии как отборочных, так и подтверждающих признаков на фоне клинически неосложненного течения. Появление отборочных признаков без картины клинически неблагоприятного события или клинического ухудшения соответствует настораживающему профилю восстановления. Неблагоприятный профиль характеризуется сочетанием отборочных и подтверждающих признаков с нарастанием боли, выпота, ограничением

движений или иными признаками развития неблагоприятных клинических событий (табл. 25).

По данным термографии к 90 суткам ожидается нормализация преимущественно четырех средних температур: средней температуры интактной стороны (Средн.), средней температуры оперированной стороны (Inv. Средн.), средней температуры интактной пателлярной области (Patellar Средн.) и средней температуры пателлярной области оперированной стороны (Patellar Inv. Средн.).

Если к концу этого периода хотя бы одна из четырех средних температур остается вне нормы и одновременно имеются отклонения по перцентильным критериям, темп увеличения нагрузок следует замедлить. В практическом смысле это не прекращение реабилитации, а переход к режиму стабилизации: уменьшение работы с сопротивлением, акцент на контроле техники выполнения упражнений, уменьшение доли занятий в нестабильных условиях и исключение преждевременного перехода к беговым нагрузкам (табл. 26).

Период 91-180 суток по данным термографии в норме должен характеризоваться прежде всего прогрессивным уменьшением температурной асимметрии. В стандартной программе на этом этапе возрастает удельный вес силовой подготовки, тренировок равновесия, циклических нагрузок, подготовки к бегу и собственно беговых нагрузок. Отсутствие нормализации дельта-показателей на данном этапе может указывать на непереносимость предъявляемой нагрузки, но требует сопоставления с болью, выпотом, объемом движений, функцией и данными дополнительных методов.

К отборочным признакам периода 91-180 суток относятся Delta max >P90 после 60 суток, Delta Средн. >P90 после 60 суток, Delta Patellar max >P90 после 60 суток и один признак по объединенной визуальной шкале. К подтверждающим признакам относятся Delta max >P97, сочетание Delta max + Delta Средн. >P90, сочетание Delta Patellar min + Delta Patellar max >P90, повторное превышение P90 одним и тем же параметром, два и более признака по объединенной визуальной шкале, а также отсутствие нормализации Delta Средн. и Delta Patellar средн. к 180 суткам (табл. 27).

Таблица 25 – Модификация ранних фаз реабилитации при обнаружении термографических отклонений в сроки 1-45 суток. Тактика, сформулированная на основании термографических закономерностей и общепринятых принципов медицинской реабилитации. Требуется последующей проспективной проверки

Термографическая картина и клиника	Профиль восстановления	Лечебная физкультура	Физиотерапия и режим
Отборочные и подтверждающие критерии раннего периода отсутствуют: ранняя чувствительная триада отрицательна; Max Inv не ниже P10 в первые 35 суток; Max Inv и Patellar Inv Max находятся в пределах P10-P90; нет правила ≥ 2 из 8 параметров $>P90$; нет отклонения 8 параметров за пределы P3-P97; отсутствуют повторное превышение P90 и волнообразная траектория. Отек и боль минимальны, объем движений соответствует ожидаемому сроку после операции, клинические тесты без признаков неблагоприятного течения; данные магнитно-резонансной томографии, если метод использован, не выявляют патологических изменений	Благоприятный	Стандартная ранняя программа: дыхательные упражнения, движения в голеностопном суставе, изометрическое напряжение мышц бедра, подъем выпрямленной ноги только без дефицита разгибания, активное ассистированное сгибание в допустимом диапазоне. Далее – плановый отказ от костылей и занятия в рамках следующей фазы реабилитации при выполнении клинических критериев	Криоконпресссионное воздействие для нивелирования болей и отека; электростимуляция четырехглавой мышцы при дефиците произвольного сокращения; контроль состояния кожи и переносимости нагрузок

Продолжение таблицы 25

Термографическая картина и клиника	Профиль восстановления	Лечебная физкультура	Физиотерапия и режим
Появились отборочные критерии без клинических проявлений неблагоприятного течения и без устойчивого подтверждения: хотя бы один признак ранней чувствительной триады – Delta max >P90, Patellar Inv Min >P90 или Delta Patellar Min >P90; Max Inv <P10 в первые 35 суток; Max Inv + Patellar Inv Max вне P10-P90; ≥ 2 из 8 отобранных параметров >P90; любое отклонение хотя бы одного из 8 отобранных параметров за пределы P3-P97. Подтверждающие критерии отсутствуют либо еще не могут быть оценены. Если единственный подтверждающий признак выявлен без клинического ухудшения, профиль остается нарастающим, но требует более выраженной стабилизации нагрузки. Объединенная визуальная шкала в полном объеме в этом раннем окне еще не используется	Настораживающий	На начальных этапах сохранить текущий уровень нагрузки, не увеличивать сопротивления и объем ходьбы 7-14 суток; приоритет занятий – разгибание, мягкая мобилизация надколенника, изометрические упражнения. На более позднем этапе добиться регресса выпота и периартикулярного отека (допускается наличие минимального внутрисуставного выпота) Нивелирование анталгической походки	Усилить противоотечную терапию: криокомпрессия, возвышенное положение конечности, дозированные упражнения для запуска «мышечной помпы»; повторить термографию через 7-14 суток, при подтверждающих признаках – через 14-35 суток

Продолжение таблицы 25

Термографическая картина и клиника	Профиль восстановления	Лечебная физкультура	Физиотерапия и режим
Отборочные признаки сочетаются с подтверждающими критериями – повторным превышением Р90 одним и тем же параметром, волнообразной траекторией при достаточном временном размахе или сохранением отклонений при повторной проверке – и одновременно имеются клинические признаки неблагоприятного течения: нарастание боли, выпота или отека, дефицит разгибания, ухудшение функции, лихорадка, локальная гиперемия либо подозрение на гемартроз, тромбоз или инфекционный процесс	Неблагоприятный	Временно исключить упражнения, вызывающие реактивную боль или отек; снизить суммарный объем занятий на 20-40%; оставить ключевые упражнения для контроля четырехглавой мышцы и тщательно контролировать объем движений. Полное прекращение реабилитации чаще не требуется, однако целесообразно как минимум временное значительное снижение нагрузок и темпов прогресса.	Отменить тепловые воздействия; усилить криокомпрессию и дренажные методики при отсутствии; противопоказаний; клинически исключить инфекцию, тромбоз и гемосиновит

Таблица 26 – Модификация реабилитации при обнаружении термографических отклонений в сроки 46-90 суток.
Тактика, сформулированная на основании термографических закономерностей и общепринятых принципов медицинской реабилитации. Требуется последующей проспективной проверки

Термографическая картина и клиника	Профиль восстановления	Лечебная физкультура	Физические методы и режим
Отборочные и подтверждающие критерии периода 46-90 суток отсутствуют: четыре средние температуры (Средн., Inv Средн., Patellar Средн., Patellar Inv Средн.) нормализуются к 90 суткам; после 60 суток нет Delta max >P90, Delta Средн. >P90 или Delta Patellar max >P90; отсутствуют повторные и сочетанные перцентильные отклонения. Клиническое течение неосложненное	Благоприятный	Переходить по стандартным критериям: ходьба без патологического стереотипа, подъем на платформу высотой 20 см без боли, упражнения в закрытой кинематической цепи, велоэргометр, упражнения на равновесие	Стандартная частота процедур; криотерапия по показаниям; электростимуляция при сохраняющемся дефиците активации мышц
Имеются отборочные критерии, но без стойкого повторения в динамике и без клинических признаков ухудшения: одна или несколько из четырех средних температур к 90 суткам остаются вне нормы при наличии перцентильного нарастающего признака; после 60 суток появляется Delta max >P90, Delta Средн. >P90 или Delta Patellar max >P90; возможны отдельные универсальные перцентильные отклонения. Подтверждающие признаки отсутствуют либо представлены единично без клинического ухудшения	Настораживающий	Не усложнять упражнения с нестабильными платформами и не увеличивать сопротивление; сохранить упражнения на контроль оси конечности, тазобедренного сустава и надколенника; не переходить преждевременно к беговым нагрузкам	Добавить или продлить противоотечные процедуры при признаках задержки восстановления; избегать сауны и локальных тепловых процедур; повторить термографию в динамике

Продолжение таблицы 26

Термографическая картина и клиника	Профиль восстановления	Лечебная физкультура	Физические методы и режим
Отборочные признаки сочетаются с подтверждающими критериями: повторным сохранением отклонений в динамике, сочетанными дельта-показателями >P90, отсутствием положительной календарной нормализации на фоне перцентильных отклонений. Одновременно имеются клинические признаки ухудшения или отсутствия положительной функциональной динамики	Неблагоприятный	Задержать переход к интенсивным силовым занятиям и беговым элементам; уменьшить объем одноопорных упражнений; исключить резкие приседания, выпады с большой амплитудой и быстрые изменения направления	Усилить криокомпрессию и лимфодренажные методики; пересмотреть изменения в локальном статусе: наличие избыточного выпота, синовита и перегрузки пателло-фemorального сочленения. МРТ контроль по показаниям

Таблица 27 – Модификация восстановительного лечения в сроки 91-180 суток. Тактика, сформулированная на основании термографических закономерностей и общепринятых принципов медицинской реабилитации. Требуется последующей проспективной проверки

Термографическая картина	Профиль восстановления	Клиническое толкование	Практическая рекомендация
Отборочные и подтверждающие критерии периода 91-180 суток отсутствуют: Delta max, Delta Средн. и Delta Patellar max не превышают P90 после 60 суток; Delta max не превышает P97; отсутствуют сочетания Delta max + Delta Средн. >P90 и Delta Patellar min + Delta Patellar max >P90; Delta Средн. и Delta Patellar средн. демонстрируют нормализацию или отчетливое движение к норме. Клиническое течение неосложненное	Благоприятный	Неосложненное течение послеоперационного периода; температурная асимметрия уменьшается, отборочные и подтверждающие критерии не выявляются	Возможен допуск к беговым нагрузкам, прыжкам, многоплоскостным заданиям и силовой нагрузке; перейти к упражнениям в открытой цепи в соответствии с фазой реабилитационной программы
Наличие отборочных признаков при клинически неосложненном течении соответствует настораживающему профилю. Подтверждающие признаки без клинического ухудшения не являются самостоятельным доказательством осложненного течения послеоперационного периода, но требуют временной стабилизации или ограничения прогрессии нагрузки. Неблагоприятный профиль диагностируется при сочетании отборочных и подтверждающих признаков с клиническим ухудшением, отсутствием положительной функциональной динамики или неблагоприятными данными дополнительных методов исследования			

Продолжение таблицы 27

Термографическая картина	Профиль восстановления	Клиническое толкование	Практическая рекомендация
Delta max >P90 после 60 суток, Delta Средн. >P90 после 60 суток или Delta Patellar max >P90 после 60 суток	Настораживающий при клинически спокойном течении; неблагоприятный только при сочетании с клиническим ухудшением	Ранняя поздняя межсторонняя асимметрия; требует проверки переносимости нагрузки.	Не форсировать беговые, прыжковые и многоплоскостные задания; повторить термографию через 14-35 суток и сопоставить с болью, выпотом и объемом движений.
Delta max >P97 или Delta max + Delta Средн. >P90	Настораживающий при клинически спокойном течении; неблагоприятный только при сочетании с клиническим ухудшением	Выраженная остаточная или вторичная температурная асимметрия всей передней области коленного сустава	Временно снизить суммарную недельную нагрузку; ограничить бег, прыжки, глубокие приседания, выпады и частые подходы; усилить контроль походки, разгибания и нагрузки на пателлофemorальное сочленение
Delta Patellar min + Delta Patellar max >P90	Настораживающий при клинически спокойном течении; неблагоприятный только при сочетании с клиническим ухудшением	Пателлярная межсторонняя асимметрия и риск перегрузки пателлофemorальной области	Снизить объем упражнений с подъемом на платформу, приседаний с большим сгибанием, спуска по лестнице и упражнений, вызывающих переднюю боль; использовать щадящие диапазоны движения

Продолжение таблицы 27

Термографическая картина	Профиль восстановления	Клиническое толкование	Практическая рекомендация
≥2 балла по объединенной визуальной шкале	Настораживающий при клинически спокойном течении; неблагоприятный только при сочетании с клиническим ухудшением	Сочетанное отклонение нескольких временных признаков; высокая вероятность патологической траектории	Не допускать пациента к беговой и прыжковой подготовке; выполнить повторную термографию через 14-35 суток и клинически уточнить причину отклонения, при необходимости по данным МРТ
Отсутствие нормализации Delta Средн. и Delta Patellar средн. к 180 суткам		При наличии других признаков говорит в пользу высокой вероятности формирования неблагоприятного варианта восстановления	Не допускать увеличения нагрузок, выполнить повторную термографию через 14-35 суток и клинически уточнить причину отклонения, при необходимости по данным МРТ
Отборочные и подтверждающие термографические признаки положительные и сочетаются с клиническими признаками неблагоприятного течения: болью, выпотом, ограничением движений, ухудшением функции, нарастанием местной воспалительной реакции или неблагоприятными данными дополнительных методов	Неблагоприятный	Требуется уточнение клинической ситуации	Приостановить прогрессию нагрузок, временно снизить ее объем или интенсивность. Выполнить уточняющие исследования, включая магнитно-резонансную томографию коленного сустава по показаниям

После 180 суток спортсмен может демонстрировать удовлетворительные результаты силовых и координационных тестов и отсутствие динамики уменьшения дельта-показателей, что указывает на незавершенность предыдущих фаз восстановления и повышенную вероятность реактивного обострения при переходе к более высоким нагрузкам. Поэтому поздний блок должен оценивать не только факт выхода за норму, но и направленность изменений по сравнению с окном 91-180 суток.

Если при сравнении периодов 91-180 и 181-365 суток число базовых параметров вне календарной нормы не уменьшается или не уменьшается нормированное отклонение от медианы трех дельта-показателей, то пациента не следует допускать к увеличению спортивных нагрузок, даже если подошел формальный календарный срок. Следует пересмотреть клинический статус, оценить качество выполнения упражнений и, если признаков неблагоприятного клинического события не выявлено, временно вернуться к целенаправленному восстановлению силы, равновесия, контроля оси конечности и циклической нагрузки.

Термография отражает кожную температурную реакцию, связанную с локальным воспалением, микроциркуляторной реакцией и ответом тканей на нагрузку. Однако, как показано в данной работе, она не является прямым методом оценки состояния трансплантата, окружающей кости или иных внутрисуставных структур. Поэтому при выраженных отклонениях температурных показателей, особенно в сочетании с болью, увеличением выпота, лихорадкой, ограничением движений, покраснением или ухудшением общего состояния, прежде всего требуется углубленное клиническое обследование и, по показаниям, лабораторная диагностика, ультразвуковое исследование или магнитно-резонансная томография.

Термографические данные должны интерпретироваться только при соблюдении стандартизированных условий исследования: одинаковое время суток, отсутствие предшествующей тренировочной нагрузки, массажа, душа, местных средств и тепловых воздействий, температурная адаптация, контроль

температуры и влажности помещения. Нарушение этих условий может привести к ложной интерпретации и необоснованной коррекции программы. Повторные исследования через 14-35 суток призваны уменьшить влияние возможных технических и режимных факторов. Принципиальным моментом в выявлении осложненного течения послеоперационного периода является стойкость термографических отклонений.

Любое ограничение нагрузок на основании данных термографии должно рассматриваться как временная реабилитационная мера, направленная на предупреждение перехода функциональной перегрузки в клинически значимое неблагоприятное событие. В большинстве случаев речь должна идти не о полной остановке реабилитации, а о временном отказе от увеличения нагрузки, уменьшении ее объема или интенсивности и повторной оценке состояния. Ожидаемым результатом такой тактики является уменьшение реактивного ответа тканей сустава, нормализация температурной асимметрии, сохранение или увеличение объема движений и восстановление нормальной переносимости нагрузок.

Таким образом, использование термографического аналитического инструмента на всех этапах реабилитации после реконструкции передней крестообразной связки позволяет реализовать принцип обоснованного осторожного увеличения нагрузок. Благоприятный клинико-термографический профиль допускает движение по стандартной программе при выполнении функциональных критериев; настораживающий – требует стабилизации нагрузки и обследований в динамике. Неблагоприятный клинико-термографический профиль послеоперационного периода требует временного снижения или прекращения нагрузки, уточнения клинического статуса и поиска причины отклонений.

Такой подход соответствует современным представлениям о критериально-ориентированной реабилитации и позволяет использовать термографию в качестве объективного инструмента для оценки переносимости нагрузок.

4.3 Оценка результатов анкетирования

Субъективную функцию коленного сустава после операции оценивали с помощью опросников IKDC (International Knee Documentation Committee Subjective Knee Form), Cincinnati и Lysholm. Всего анкетирование на первом этапе выполнили у 101 уникального пациента. На втором этапе анкеты получили от 92 уникальных пациентов. Для первого этапа анкетирования медиана срока после операции составила 503 суток (Me [Q1; Q3]: 503 [424; 649] суток), для второго – 1495 суток (Me [Q1; Q3]: 1495 [1281; 1836] суток).

4.3.1 Результаты анкетирования пациентов с осложненным и неосложненным течением послеоперационного периода

Перед статистической обработкой базу анкетирования и клиническую базу сопоставляли по обезличенным идентификаторам пациента, стороне операции и дате хирургического вмешательства. Трое респондентов не были включены в расчеты вследствие неполноты сведений. Дополнительно было исключено одно технически ошибочное значение шкалы Lysholm, и еще одно наблюдение с противоречивыми сведениями о дате операции было исключено только из анализа сроков. Полный набор верифицированных данных о варианте послеоперационного течения и типе трансплантата имелся у 100 пациентов для первого этапа анкетирования и у 90 пациентов для второго этапа. Пропущенные значения не восстанавливали.

С учетом верхнего предела шкал в 100 баллов и связанного с этим «эффекта потолка», а также малой численности группы пациентов с осложненным течением результаты представляли преимущественно как медиану и межквартильный размах – Me [Q1; Q3]. Независимые группы на каждом этапе сравнивали критерием Манна-Уитни. Одновременные сопоставления трех опросников в пределах каждого этапа корректировали последовательным методом Холма. Дополнительно проверяли сопоставимость сроков после операции к моменту анкетирования.

На первом этапе сроки анкетирования в группах осложненного и неосложненного течения значимо не различались: 503,0 [425,0; 662,0] суток при неосложненном течении (n=89) и 489,0 [292,5; 622,0] суток при осложненном (n=11; p=0,409). По всем трем опросникам медианные значения баллов в группе осложненного течения были численно ниже, однако статистически значимых различий выявлено не было.

Наиболее выраженная тенденция к снижению показателей в группе осложненного течения отмечалась по шкале IKDC (неосложненное течение: 94,2 [79,3; 100,0] балла; осложненное течение: 85,0 [74,2; 93,7] балла; p=0,125), однако как уже было сказано, статистически значимыми эти различия не были (табл. 28).

Таблица 28 – Сравнение результатов анкетирования на первом и втором этапах у пациентов с неосложненным и осложненным течением послеоперационного периода

Опросник	Неосложненное течение, n	Неосложненное течение, Me [Q1; Q3]	Осложненное течение, n	Осложненное течение, Me [Q1; Q3]	p
Первый этап анкетирования					
Cincinnati, баллы	89	96,0 [88,0; 100,0]	11	90,0 [81,5; 98,0]	0,190
IKDC, баллы	89	94,2 [79,3; 100,0]	11	85,0 [74,2; 93,7]	0,125
Lysholm, баллы	89	95,0 [89,0; 100,0]	11	90,0 [79,5; 97,5]	0,258
Второй этап анкетирования					
Cincinnati, баллы	81	100,0 [94,0; 100,0]	9	96,0 [86,0; 100,0]	0,210
IKDC, баллы	81	95,0 [90,8; 100,0]	9	94,2 [81,6; 95,4]	0,355
Lysholm, баллы	80	95,0 [91,0; 100,0]	9	95,0 [80,0; 95,0]	0,196

Примечание: Значения p в таблице приведены до поправки Холма. После коррекции статистически значимых межгрупповых различий не выявлено: минимальное скорректированное p на первом этапе – 0,375, на втором этапе – 0,587.

С учетом сопоставления результатов трех опросников для каждого этапа одновременно, значения уровня статистической значимости корректировали последовательным методом Холма. После коррекции ни одно межгрупповое различие не достигло уровня статистической значимости.

На втором этапе анкетирования, сроки после операции между группой осложненного и неосложненного течения также статистически не различались: 1493,0 [1321,2; 1832,2] суток при неосложненном течении ($n=81$ для Cincinnati и IKDC и $n=80$ для Lysholm) и 1418,0 [1191,0; 1560,0] суток при осложненном течении ($n=9$; $p=0,554$).

Как и на первом этапе, группа с осложненным течением характеризовалась более низкими медианными значениями по всем трем шкалам, однако статистически значимых различий вновь выявлено не было (табл. 28). При этом важно отметить, что в обеих группах медианные значения опросников оставались высокими, что свидетельствует о хорошей субъективной функции сустава в отдаленном периоде после операции.

4.3.2 Результаты анкетирования пациентов в зависимости от возраста, пола и сроков от травмы до реконструкции

Далее была проверена гипотеза о зависимости результатов анкетирования от возраста и пола пациентов.

В этот анализ включили все доступные результаты анкетирования: для 101 пациента на первом и для 92 пациентов на втором этапе.

Кроме того, было отобрано 63 пациента, которым анкетирование выполнялось последовательно на обоих этапах после операции (для Lysholm $n=62$ из-за одного пропуска первичных данных).

На обоих этапах анкетирования мужчины были статистически значимо старше женщин ($p=0,035$ и $p=0,021$), однако различий по шкалам Cincinnati, IKDC и Lysholm в зависимости от пола не выявлено. Различия динамики баллов в зависимости от пола между этапами также отсутствовали (табл. 29).

Таблица 29 – Проверка зависимости результатов анкетирования от пола спортсменов. На первом и втором этапах анкетирования, а также в динамике

Показатель	Женщины n	Женщины Me [Q1;Q3]	Мужчины n	Мужчины Me [Q1;Q3]	p
Первый этап анкетирования					
Возраст, лет	46	21,0 [19,0; 26,8]	55	25,0 [20,0; 29,5]	0,035
Срок после операции, дни	46	525,0 [446,2; 665,0]	55	503,0 [317,5; 630,5]	0,278
Cincinnati, баллы	46	96,0 [88,0; 100,0]	55	94,0 [83,5; 100,0]	0,397
IKDC, баллы	46	94,2 [79,6; 100,0]	55	90,8 [75,8; 100,0]	0,396
Lysholm, баллы	46	95,0 [86,8; 100,0]	55	94,0 [87,0; 100,0]	0,452
Второй этап анкетирования					
Возраст, лет	50	21,0 [19,0; 25,0]	42	25,5 [20,0; 29,0]	0,021
Срок после операции, дни*	49	1418,0 [1191,0; 1618,0]	42	1573,0 [1401,0; 1879,5]	0,062
Cincinnati, баллы	50	99,0 [94,0; 100,0]	42	97,5 [90,5; 100,0]	0,570
IKDC, баллы	50	95,4 [91,5; 100,0]	42	94,3 [88,9; 97,7]	0,510
Lysholm, баллы	50	95,0 [91,2; 100,0]	41	95,0 [90,0; 100,0]	0,270
Динамика баллов по опросникам между вторым и первым этапами					
Δ Cincinnati (Э2–Э1), баллы	31	0,0 [0,0; 4,5]	32	0,0 [-2,0; 6,2]	0,894
Δ IKDC (Э2–Э1), баллы	31	1,2 [-4,2; 5,8]	32	0,0 [-1,5; 5,8]	0,836
Δ Lysholm (Э2–Э1), баллы	31	0,0 [-3,0; 5,0]	31	0,0 [-4,0; 4,5]	0,886
Интервал между этапами, дни	31	932,0 [827,0; 932,0]	32	932,0 [932,0; 1471,8]	0,375

Примечание: Точные данные для срока после операции на втором этапе имелись у 91 пациента; для шкалы Lysholm – у 91 пациента. Значения $p < 0,05$ выявлены только для возрастных различий между мужчинами и женщинами.

Корреляционный анализ Спирмена не выявил статистически значимых связей результатов опросников с возрастом пациента и продолжительностью периода от травмы до выполненной реконструкции ПКС ($p > 0,05$). Таким образом, в исследуемой выборке в отдаленном периоде, оценка субъективной функции коленного сустава статистически значимо не зависела от пола, возраста и срока от травмы до реконструкции.

4.3.3 Влияние типа аутотрансплантата на результаты анкетирования

Анализ зависимости результатов анкетирования от типа аутотрансплантата выполняли в тех же выборках с верифицированными данными об особенностях операции, использованном трансплантате и клиническом течении: 100 пациентов на первом и 90 пациентов на втором этапе.

Относительно редкие случаи использования аутотрансплантатов из четырехглавой мышцы бедра и связки надколенника в целях повышения устойчивости статистических оценок объединили в группу «другие» (quad+ВТВ). quad ($n=1$) и ВТВ ($n=8$ на этапе 1; $n=6$ на этапе 2). Таким образом, в анализ включались три группы трансплантата: pl (сухожилие длинной малоберцовой мышцы), st/g (сухожилия полусухожильной и тонкой мышц) и «другие».

С учетом ограниченности возможных значений для шкал (0-100) и наличия выраженного «потолочного эффекта», применялись непараметрические методы. Описательная статистика представлена в виде медианы и межквартильного размаха – Me [Q1; Q3]. Сравнение между типами трансплантата выполняли при помощи критерия Краскела-Уоллиса. Для трех исследуемых одновременно шкал применяли поправку Холма (табл. 30).

Распределение пациентов по типу трансплантата и варианту послеоперационного течения на этапах анкетирования представлено в таблице 31.

Таблица 30 – Баллы опросников в зависимости от типа трансплантата
(Me [Q1; Q3])

Шкала	pl	st/g	Другие	p
Первый этап анкетирования				
Cincinnati	98,5 [87,5; 100,0] (n=68)	90,0 [80,5; 100,0] (n=23)	90,0 [88,0; 98,0] (n=9)	0,104
IKDC	95,4 [83,9; 100,0] (n=68)	86,2 [70,7; 97,1] (n=23)	88,5 [80,4; 94,2] (n=9)	0,047
Lysholm	95,0 [89,0; 100,0] (n=68)	94,0 [87,5; 96,0] (n=23)	91,0 [86,0; 94,0] (n=9)	0,175
Второй этап анкетирования				
Cincinnati	100,0 [92,2; 100,0] (n=62)	98,0 [90,0; 100,0] (n=21)	96,0 [95,5; 100,0] (n=7)	0,863
IKDC	94,8 [90,2; 100,0] (n=62)	94,3 [88,5; 97,0] (n=21)	95,0 [93,1; 96,0] (n=7)	0,862
Lysholm	95,0 [90,0; 100,0] (n=61)	95,0 [86,0; 100,0] (n=21)	95,0 [93,0; 100,0] (n=7)	0,789

Примечание: pl – трансплантат из сухожилия длинной малоберцовой мышцы;
st/g – трансплантат из сухожилий полусухожильной и тонкой мышц.

Таблица 31 – Распределение пациентов по типу трансплантата и варианту
послеоперационного течения

Группа по трансплантату	Этап 1: неосложненное течение	Этап 1: осложненное течение	Этап 2: неосложненное течение	Этап 2: осложненное течение
pl	61	7	57	5
st/g	19	4	17	4
Другие	9	0	7	0

Примечание: pl – трансплантат из сухожилия длинной малоберцовой мышцы;
st/g – трансплантат из сухожилий полусухожильной и тонкой мышц.

После последовательной поправки Холма на одновременное исследование трех шкал скорректированное значение для IKDC составило $p=0,140$. Для второго этапа, после коррекции, значения p для всех трех опросников составляли 1,000.

Резюмируя данный этап исследования, можно сказать, что статистически значимого влияния типа трансплантата на результаты анкетирования не установлено. А эффект типа трансплантата, выявленный на первом этапе для шкалы IKDC, следует рассматривать лишь как тенденцию, так как после поправки на множественные сравнения, статистическая значимость не подтвердилась.

В подтверждение данных анкетирования, которые не выявили влияния типа трансплантата на результат опросников, было решено провести дополнительную проверку гипотезы о связи осложненного течения с тем или иным трансплантатом для всей когорты пациентов, которым проводилось анкетирование и у которых имелись данные о типе трансплантата. При этом вследствие малочисленности группы пациентов с трансплантатом четырехглавой мышцы бедра и связки надколенника, проверку на наличие связи выполняли только в группах пациентов с трансплантатом из сухожилий полусухожильной и тонкой мышц (st/g) и сухожилия длинной малоберцовой мышцы (pl).

Так как анализировалась связь двух категориальных признаков типа трансплантата (pl или st/g) и наличия либо отсутствия осложненного течения (0/1), основным методом выбрали точный критерий Фишера. Размер эффекта оценивали по отношению шансов (ОШ) с 95% доверительным интервалом. Оценка когорты из 163 пациентов с верифицированными сведениями о типе трансплантата также не выявила статистически значимой связи (табл. 32) между его типом и вариантом послеоперационного течения ($p=0,176$; ОШ=1,92; 95% ДИ 0,84-4,41).

Во всех вариантах анализа отмечалась только численная тенденция к большей частоте осложненного течения в группе st/g, однако статистической значимости она не достигала. Поэтому подтвердить влияние типа трансплантата на риск осложненного течения по имеющимся данным нельзя.

Таблица 32 – результаты анализа связи осложненного течения с типом трансплантата

Выборка	n	Доля случаев осложненного течения, pl	Доля случаев осложненного течения, st/g	p (Фишер)
1 этап анкетирования	91	10,3%	17,4%	0,460
2 этап анкетирования	83	8,1%	19,0%	0,221
Вся когорта	163	14,8%	25,0%	0,176

Примечание: pl – трансплантат из сухожилия длинной малоберцовой мышцы;
st/g – трансплантат из сухожилий полусухожильной и тонкой мышц.

В целом результаты анкетирования не выявили статистически значимого влияния варианта послеоперационного течения, пола, типа аутооттрансплантата и сроков от травмы до операции на субъективную функцию коленного сустава в отдаленном периоде. Однако отсутствие статистической значимости автоматически не доказывает отсутствие эффекта как такового. В настоящей выборке широкие доверительные интервалы отношения шансов указывают на ограниченность числа наблюдений и случаев осложненного течения. Для окончательной оценки влияния типа трансплантата на результаты анкетирования необходимы дальнейшие исследования с большей численностью пациентов и более равномерным распределением по видам аутооттрансплантатов.

4.4 Связь результатов МРТ-диагностики и термографических параметров у пациентов с осложненным и неосложненным течением послеоперационного периода

В анализ включили данные о 41 пациенте, из которых 21 был отнесен к группе осложненного течения, а 20 – к группе неосложненного течения. Необходимо отметить, что все случаи осложненного течения подразумевали неинфекционные неблагоприятные клинические события. Оценивали четыре МРТ-показателя (SNQ, rSD, угол ЗКС и величину подвывиха голени) и 18

термографических параметров, описанных в разделах, посвященных методике термографического обследования.

Дополнительно рассчитывали интервалы от первичной операции до термографии, от операции до контрольной МРТ и абсолютный промежуток между термографическим и МРТ-исследованием. У пациентов с осложненным течением отдельно учитывали срок до ревизионного вмешательства. При контроле качества три наблюдения с некорректными временными интервалами исключили только из анализа сроков.

Сроки выполнения исследований в группе с осложненным и неосложненным течением были сопоставимы. Определялась тенденция к большему промежутку между датами термографии и МРТ в группе пациентов с осложненным течением (Me 14,00 [4,00; 66,00] для суток в группе пациентов с осложненным течением, против 5,00 [1,00; 11,75] суток для пациентов с неосложненным; $p=0,069$). В группе пациентов с осложненным течением медиана срока от первичной операции до ревизионной составила 191,00 [111,00; 260,00] день, и 20 из 21 ревизионного вмешательства (95,2%) были выполнены в течение первого года после первичной реконструкции ПКС.

4.4.1 Межгрупповые различия по МРТ-параметрам

При сравнении МРТ-показателей статистически значимых различий между группами неосложненного и осложненного течения не выявлено. Результаты межгруппового сравнения представлены в таблице 33 и на рисунке 13.

Таблица 33 – Сравнение МРТ-параметров в группах с осложненным и неосложненным течением

Параметр	Случаи осложненного течения, Me [Q1;Q3]	Случаи неосложненного течения, Me [Q1;Q3]	p
SNQ	5,75 [0,69; 25,68]	2,35 [-8,48; 7,98]	0,124
rSD	2,42 [0,83; 6,30]	1,12 [0,48; 2,65]	0,185
Угол ЗКС	0,33 [0,27; 0,37]	0,30 [0,27; 0,35]	0,304
Подвывих голени	1,20 [0,19; 5,27]	1,52 [0,13; 2,77]	0,489

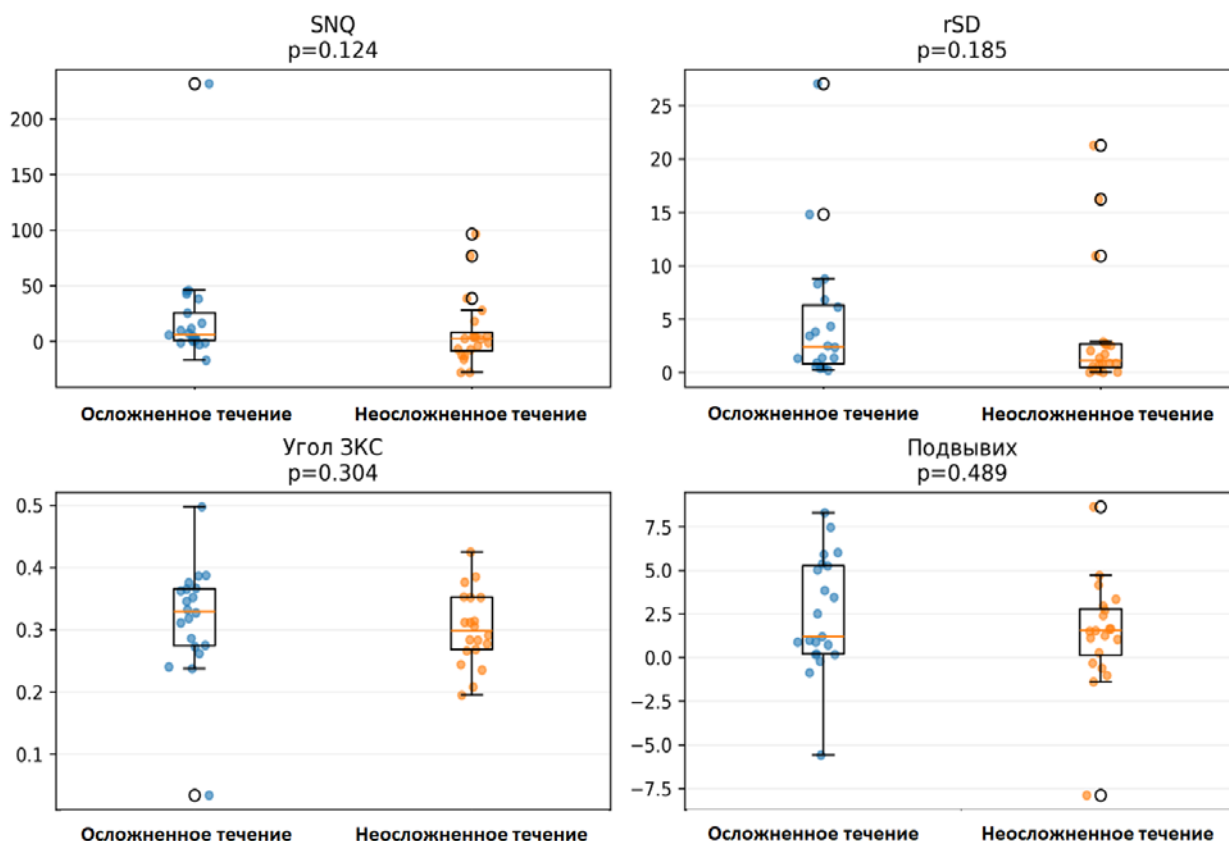


Рисунок 13 – Межгрупповое сравнение MPT-параметров

На уровне тенденции можно говорить о том, что группа с осложненным течением характеризовалась более высокими медианными значениями SNQ и rSD, что может в теории соответствовать более выраженным изменениям трансплантата. Однако данные различия статистической значимости не достигли.

4.4.2 Корреляции между MPT-параметрами и термографическими показателями внутри групп пациентов с осложненным и неосложненным течением

Статистически значимых различий между группами пациентов с осложненным и неосложненным течением по термографическим показателям выявлено не было. Ни один показатель не достиг уровня $p < 0,05$.

При внутригрупповом анализе оценивались 72 корреляционные связи в каждой группе (4 MPT-показателя и 18 термографических параметров). Данный анализ носил исключительно поисковый характер, поэтому в таблицах

представлены номинальные значения p без поправки на множественные сравнения. Выявленные связи интерпретировали в качестве оснований для исследовательских гипотез. У пациентов с осложненным течением отмечались отдельные умеренные отрицательные корреляции между SNQ и рядом термографических показателей, прежде всего абсолютными температурами (табл. 34). Этот факт акцентирует внимание на наличии возможной связи между нарастанием индекса SNQ и снижением некоторых локальных температурных параметров. Однако, как уже сказано выше, указанное наблюдение может использоваться лишь в контексте разработки гипотез.

Таблица 34 – Корреляции в группе пациентов с осложненным течением послеоперационного периода с номинальным уровнем $p < 0,05$

МРТ-параметр	Термография	n	rho	p	Сила связи
SNQ	min	21	-0,568	0,007	умеренная
SNQ	Patellar inv max	21	-0,544	0,011	умеренная
SNQ	max inv	21	-0,539	0,012	умеренная

У пациентов с неосложненным течением послеоперационного периода также обнаруживались отдельные умеренные корреляции, в первую очередь отрицательные связи SNQ и rSD с термографическими дельта-параметрами, а также положительная связь угла ЗКС с максимальной температурой передней поверхности (табл. 35).

Отсутствие устойчивых прямых корреляций между МРТ и термографическими параметрами при наличии отдельных значимых связей привело к необходимости дополнительной оценки роли фактора времени, прошедшего от операции до обследования. При этом выяснилось, что именно этот фактор оказался наиболее информативным в группе пациентов с осложненным течением.

Так, в группе пациентов с осложненным течением, увеличение срока от операции до МРТ сопровождалось ростом индекса SNQ ($\rho = 0,661$; $p = 0,001$), а

увеличение срока от операции до термографии ассоциировалось со снижением ряда термографических параметров (например, для Delta средн. $\rho=-0,803$; $p<0,001$). Иными словами, по мере увеличения времени после первичной реконструкции ПКС структурные признаки «неблагополучия» трансплантата по данным МРТ усиливались, тогда как температурная асимметрия, напротив, уменьшалась (рис. 14). Это подтверждает фазо-зависимость процесса перестройки трансплантата и позволяет рассматривать срок после операции как важный смешивающий фактор в анализе связи МРТ и термографии.

Таблица 35 – Корреляции в группе пациентов с неосложненным течением послеоперационного периода с номинальным уровнем $p<0,05$

МРТ-параметр	Термография	n	rho	p	Сила связи
SNQ	Delta max	20	-0,611	0,004	умеренная
SNQ	Delta min	20	-0,602	0,005	умеренная
SNQ	Delta средн.	20	-0,540	0,014	умеренная
Угол ЗКС	max	20	0,508	0,022	умеренная
rSD	Delta max	20	-0,507	0,023	умеренная

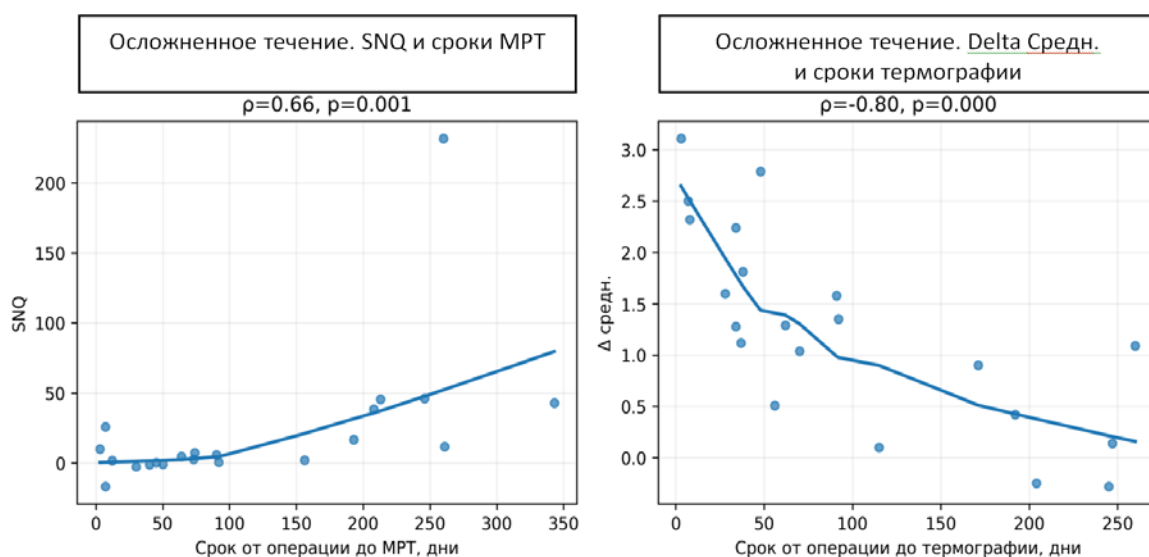


Рисунок 14 – Примеры выраженной связи МРТ и термографических показателей со сроком после операции в группе пациентов с осложненным течением

В группе пациентов с неосложненным течением аналогичные тенденции носили более слабый характер и не сохраняли статистической значимости при соответствующей проверке.

Таким образом, временной фактор имеет большее значение в случае осложненного течения. Этим, отчасти, можно объяснить ранее выявленное отсутствие устойчивых одномоментных корреляций между данными МРТ и термографическими показателями.

Таким образом, проведенный анализ не подтвердил статистически значимую устойчивую связь между МРТ-характеристиками трансплантата и термографическими показателями коленного сустава ни у пациентов с осложненным течением, ни в группе неосложненного течения. В группе пациентов с осложненным течением была зафиксирована лишь тенденция к более высоким SNQ и rSD, а также к большим значениям температурной асимметрии по ряду показателей. Кроме того, высокая внутригрупповая вариабельность части МРТ-показателей (прежде всего индекса SNQ) дополнительно снижает чувствительность проведенного статистического анализа.

В группе осложненного течения именно временной фактор продемонстрировал наиболее сильные и статистически устойчивые ассоциации. По мере увеличения времени, прошедшего с момента операции, индекс SNQ возрастал, а термографические, в основном дельта-параметры, уменьшались.

Следовательно, интерпретируя отсутствие значимых прямых корреляций между МРТ и термографией, необходимо учитывать не только небольшую численность выборки, но и фазо-зависимость патологического процесса в коленном суставе. Полученные данные скорее говорят не об отсутствии какой-либо связи в принципе, а о том, что в представленном массиве данных связь существенно модифицируется сроком после операции.

Дополнительным наблюдением является то, что у пациентов с осложненным течением ревизионное вмешательство в подавляющем числе случаев выполнялось в течение первого года после первичной реконструкции ПКС, с медианой около 6 месяцев. Это согласуется с представлением о том, что клинически значимые неблагоприятные события, требующие повторного хирургического вмешательства, чаще проявляют себя именно в эти сроки.

ГЛАВА 5. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДА

5.1 Сопоставление с данными литературы

Разработанное в данной диссертации решающее правило позволяет до выполнения операции с удовлетворительной чувствительностью и специфичностью выявить группу пациентов, у которых наиболее вероятно осложненное течение в послеоперационном периоде. Другими словами, мы получили достаточно простой и эффективный инструмент, позволяющий выявить группу риска и принять превентивные меры. К таким мерам относится, прежде всего, выбор оптимального срока выполнения реконструкции ПКС. Значение f , получаемое на основании приведенного в работе решающего правила в сочетании с клиническими признаками, позволяет отнести пациента к одному из трех возможных клинико-термографических профилей: благоприятному, настораживающему и неблагоприятному. При благоприятном профиле хирургическое лечение может быть проведено. Возможность целенаправленного изменения f посредством предоперационной реабилитации требует отдельного изучения. Однако при $f \geq 0,169$ пациент должен быть отнесен к группе повышенного внимания, а решение о сроке операции принимают на основании совокупности клинических, функциональных и инструментальных данных.

Следует отметить, что попытки создать прогностическую систему, основанную на нескольких простых параметрах и способную предсказать риск, связанный с операцией, предпринимались и ранее. Например, норвежскими авторами [193] было установлено, что применение методов машинного обучения позволяет с умеренной точностью прогнозировать риск повторной реконструкции ПКС коленного сустава после первичной операции. Анализируя данные Норвежского регистра операций на связках коленного сустава (Norwegian Knee Ligament Register, NKLRL), авторам на большой выборке ($>25\,000$ пациентов) удалось выявить пять наиболее значимых факторов, определяющих вероятность ревизионной реконструкции ПКС: возраст пациента на момент операции, тип использованного трансплантата, способ фиксации трансплантата на бедре,

качество жизни по шкале KOOS на момент операции, а также время между травмой и операцией [193]. Модель позволяет предсказывать риск ревизионной операции и выражает его в процентах от 0 до 20%. Использование в описанном исследовании модели Кокса-Лассо показало высокую клиническую ценность благодаря ограниченному набору предикторов, что, по мнению авторов, облегчает ее практическое применение в условиях амбулаторного приема. Полученные с помощью модели результаты соответствуют литературным данным, подтверждающим значимость выбранных переменных. Однако некоторые известные факторы риска, такие как пол пациента и индекс массы тела (ИМТ), не вошли в финальную модель, вероятно, по причине их менее значимой роли в прогнозировании ревизии операции или взаимосвязи с другими включенными переменными [202, 234, 286]. Разработанный этими же авторами онлайн-калькулятор риска ревизии ПКС позволяет индивидуализировать подход к лечению, что существенно улучшает процесс принятия совместных решений врачом и пациентом относительно тактики хирургического вмешательства и последующей реабилитации [45, 193]. Следует отметить, что умеренная точность модели (значения конкорданса от 0,67 до 0,69) может быть связана с ограничениями используемого набора данных, включая отсутствие ряда потенциально важных факторов, таких как нюансы хирургической техники, параметры реабилитации и морфологические особенности коленного сустава (угол наклона плато большеберцовой кости и др.) [168, 223]. Исследование продемонстрировало перспективность применения методов машинного обучения в прогнозировании исходов реконструкции ПКС. Разработанная модель и калькулятор риска имеют практическое значение, однако требуют дальнейшего усовершенствования и валидации на более широкой выборке пациентов. В этом смысле наша разработка идет в тренде общемировых тенденций и, используя на предоперационном этапе всего 3 термографических параметра, позволяет выявить группу риска с чувствительностью 77,8% и специфичностью 70,4%.

Помимо прогнозирования исхода вмешательства на дооперационном этапе, отдельное значение имеет продолжительный контроль за состоянием оперированного коленного сустава после вмешательства.

Как было указано ранее в литературном обзоре, оптимальные критерии для перехода от одного этапа реабилитации к другому и критерии допуска к спорту до сих пор не определены. И подчас в целом благоприятное с точки зрения реабилитологов послеоперационное течение в итоге заканчивается ревизионной реконструкцией ПКС.

Так, результаты проведенного недавно исследования подчеркивают неоднозначность послеоперационных функциональных оценок. Одним из наиболее значимых и неожиданных результатов является установление связи между симметрией силы четырехглавой мышцы бедра через 6 месяцев после операции и риском повторной травмы. Выявлено, что пациенты, продемонстрировавшие высокую симметрию силы (более 90%), были подвержены большему риску повторной травмы, особенно при раннем возвращении к физической активности менее чем через 8 месяцев после операции. Подобные данные противоречат устоявшемуся клиническому реабилитационному подходу, направленному на достижение максимальной симметрии силы как критерия безопасного возвращения в спорт [49, 68, 194]. В работе также отмечается, что риск повторной травмы значительно снижается при задержке возвращения к полноценной физической активности более чем на 8 месяцев после операции [194, 233].

Также интересно отметить, что хотя субъективная оценка функции коленного сустава (шкалы KOOS и IKDC) коррелировала с вероятностью возвращения в спорт, высокие баллы коррелировали и с увеличением вероятности повторной травмы ПКС. Это может быть объяснено повышенными физическими нагрузками, которые практиковали пациенты, субъективно ощущавшие себя готовыми к активному возобновлению занятий спортом [194, 196].

Таким образом, принципиальное значение имеет мониторинг функционального состояния коленного сустава с контролем увеличения физической нагрузки даже при наличии высокой симметрии силы и субъективного благополучия пациента [61, 194].

В современных работах важное значение уделяется влиянию на риск повторных травм ПКС таких факторов, как техника выполнения реабилитационных упражнений, качество движений, а также индивидуальные

психологические особенности пациентов [190, 196, 209, 283]. Авторы отмечают, что основным ограничением всех перечисленных работ являлась субъективная оценка пациентами своего статуса. Одним из выявленных в диссертации недостатков использованных стандартных опросников был выраженный «эффект потолка». Этот эффект существенно снижал диагностическую ценность метода анкетирования на поздних сроках после операции. Исследования должны учитывать более детальное документирование физической активности и захватывать более длительный период наблюдения для выявления отдаленных последствий реконструкции ПКС. Описанный в данной диссертационной работе термографический аналитический инструмент позволяет в полной мере реализовать эту потребность в динамической неинвазивной диагностике и отчасти нивелирует недостатки опросников.

Важно подчеркнуть, что в настоящей диссертации выполнено изучение самой сложной с точки зрения реабилитации группы пациентов – молодых профессиональных спортсменов [223, 286]. Так, результаты одного систематического обзора и метаанализа свидетельствуют о том, что основными факторами, повышающими вероятность повторного разрыва трансплантата ПКС, являются высокий уровень физической активности по шкале Tegner (≥ 7 баллов), молодой возраст пациентов (менее 20 лет), низкий уровень психологической готовности к возвращению к спортивной деятельности, увеличенный угол наклона плато большеберцовой кости, ранняя хирургическая реконструкция (менее 12 месяцев после травмы), возвращение к прежнему уровню физической активности, а также наличие семейного анамнеза повреждений ПКС [78, 171]. Наибольший риск повторного повреждения, по данным авторов [78], отмечался именно у пациентов с высоким уровнем спортивной активности (Tegner ≥ 7). Вероятность новой травмы у них была почти в четыре раза выше, чем у менее активных пациентов.

Раннее возвращение к спортивной активности является самостоятельным фактором риска повторного разрыва трансплантата. Это связано с недостаточной зрелостью и прочностью трансплантата в ранние сроки после операции, а также с возможным недостаточным восстановлением нейромышечного контроля [233, 285].

В этом смысле представляют интерес наши данные о выявленных корреляционных связях МРТ-параметров и термографических данных, а также о характерной зависимости и тех и других от времени с момента операции у пациентов с осложненным течением. Несмотря на то, что термография не является методом непосредственной оценки состояния трансплантата, наличие сходных закономерностей в послеоперационной динамике критериев МРТ и температурных показателей свидетельствует о перспективности междисциплинарного подхода к оценке готовности трансплантата к нагрузкам.

В контексте всего перечисленного предлагаемый в настоящей диссертации метод термографического контроля с использованием перцентильных кривых и календарных сроков возврата к локальной нормотермии позволяет осуществлять контроль за ходом восстановления на всех этапах послеоперационного периода и объективно принимать решения об интенсивности реабилитации и сроках допуска к спорту.

Необходимо отметить, что идет постоянное совершенствование хирургических методов лечения разрывов ПКС. Многие исследования свидетельствуют о том, что дополнение стандартной реконструкции ПКС процедурой латерального экстраартикулярного тенодеза и учет наклона плато большеберцовой кости существенно улучшают исход лечения у спортсменов [13, 73, 112, 115, 120, 135, 157, 163, 166, 168, 192]. Вероятно, это потребует разработки новых термографических норм и перцентильных кривых, которые бы соответствовали новому профилю восстановления с другими биомеханическими вводными.

В исследовании De Marziani и коллег (2024) [154] была оценена динамика температурных изменений у пациентов после реконструкции ПКС. Было выявлено устойчивое повышение температуры кожи оперированного колена по сравнению с контралатеральным суставом на $0,3^{\circ}\text{C}$ спустя 2-5 лет после операции, что указывает на хронические воспалительные изменения или нарушения микроциркуляции в травмированном суставе [154].

Lohchab с соавт. [264] представили результаты мониторинга температурных изменений после тотального эндопротезирования коленного сустава. Авторы отметили значительное повышение температуры ($>2,15^{\circ}\text{C}$) в первые дни после

операции и ее постепенную нормализацию к 90-му дню послеоперационного периода. Также была подтверждена корреляция между изменениями кожной температуры и уровнями маркеров воспаления (С-реактивного белка и СОЭ) [264].

В обзоре Watts с соавт. [281] показана возможность использования инфракрасной термографии для раннего выявления перипротезных инфекций после операций на коленном суставе. Авторы указали на необходимость стандартизации условий измерения и определения пороговых значений для диагностики осложнений.

С определенной оговоркой можно принять к сведению и другие данные об изучении температуры коленного сустава после эндопротезирования. Несмотря на то, что их нельзя прямо экстраполировать на реконструкцию ПКС, результаты свидетельствуют о длительном сохранении температурных аномалий после данной операции [175].

В целом, полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности инфракрасной термографии к выявлению воспалительных изменений после операций на коленном суставе. Устойчивое повышение температуры после реконструкции ПКС и ее нормализация после тотального эндопротезирования отражают разные варианты воспалительной реакции и указывают на потенциальные возможности термографии в качестве средства мониторинга послеоперационного течения [154, 264].

Значительная корреляция между термографическими показателями и лабораторными маркерами воспаления подтверждает целесообразность использования инфракрасной термографии в качестве неинвазивного метода мониторинга воспалительной реакции [264].

5.2 Ограничения исследования

Основными ограничениями настоящего исследования являются одноцентровый дизайн, относительно небольшое количество неблагоприятных клинических событий, отнесение в группу осложненного течения клинически неоднородных событий, неодинаковая кратность контрольных термографических

исследований, которая могла увеличивать вероятность регистрации отклонений у пациентов с неблагоприятной динамикой.

При построении перцентильных кривых использовали все доступные исследования в динамике. Неодинаковое число наблюдений у отдельных пациентов могло приводить к неравному вкладу в формирование кривых. Поэтому представленные в работе перцентильные кривые следует рассматривать как внутренние референсы, требующие проверки в независимой выборке в условиях стандартизированной кратности обследования.

Прогностические правила и критерии прошли внутреннюю проверку, но не имеют внешней валидации и требуют подтверждения в независимой проспективной выборке.

Анкетирование и термография выполнялись несинхронно, в связи с этим выявление прямых корреляционных связей между ними было невозможно.

5.3 Перспективы дальнейших исследований

Перспективными направлениями развития клинической инфракрасной термографии являются:

- разработка стандартов и рекомендаций для использования инфракрасной термографии в послеоперационном мониторинге различных ортопедических заболеваний и травм;
- автоматизация обработки данных на основе алгоритмов искусственного интеллекта;
- использование инфракрасной термографии для раннего выявления инфекционных и иных осложнений;
- оценка влияния конкретных реабилитационных мероприятий на динамику термографических изменений;
- разработка коммерчески доступных систем термографического контроля за патологическими состояниями опорно-двигательного аппарата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На уровне общей популяции для стран с высокой спортивной активностью и хорошей доступностью медицинской помощи частота травм ПКС составляет порядка 70-80 на 100 000 человеко-лет. В спортивных когортах риск существенно выше и зависит от вида спорта, пола и спортивного контекста [31, 139, 259, 288].

Более того, современные тренды, основанные на анализе частоты хирургических реконструкций ПКС, косвенно свидетельствуют о значительном увеличении подобного рода травм и связанного с ними экономического бремени [97, 136].

Так, в Англии частота реконструкций ПКС выросла в 12 раз – с 2,0 до 24,2 на 100 000 населения в период 1997-2017 гг., с существенной региональной вариабельностью [31].

В Австралии в период 2000-2015 гг. общенациональная частота первичных реконструкций ПКС увеличилась на 43% (с 54,0 до 77,4 на 100 000), особенно среди молодежи. Пиковые показатели по частоте встречаемости травмы отмечены у мужчин 20-24 лет (283/100 000) и у девушек 15-19 лет (164/100 000) [126, 288].

Современные литературные источники указывают на то, что ИТ за последние два десятилетия заняла свое место в арсенале неинвазивных методов клинической визуализации в спортивной медицине. Изменения кожной температуры отражают локальные вариации кровотока. Поэтому они чувствительны к перегрузке, микротравматизации и восстановительным процессам в опорно-двигательном аппарате, а также косвенно несут информацию о степени воспалительной активности [218]. Все это позволяет использовать ИТ в спортивной медицине для повседневного мониторинга теплового ответа на нагрузку [167, 232, 268]. При реабилитации после реконструкции ПКС этот метод рассматривают как часть многоканальной системы принятия решений об увеличении нагрузки и допуску к занятиям спортом в дополнение к функциональным тестам и опросникам [154, 167, 210].

Однако, несмотря на достаточную теоретическую и эмпирическую базу, не решен ряд вопросов. В частности, отсутствуют валидированные пороги температурной асимметрии и абсолютной температуры оперированного коленного сустава для принятия решений о возможности безопасного прогресса реабилитации или допуска к спорту после определенного вида вмешательств, например, восстановления внутрисуставных структур коленного сустава [167, 210, 232, 269].

С учетом изложенных предпосылок цель настоящей работы состояла в повышении эффективности комплексной реабилитации и медицинского контроля спортсменов высокой квалификации после реконструкции передней крестообразной связки путем разработки, статистического обоснования и внедрения термографического аналитического инструмента, способствующего объективной оценке состояния коленного сустава и поддерживающего принятие клинических решений об осложненном или неосложненном вариантах течения послеоперационного периода.

Работа выполнена на базе Центра комбинированных поражений ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

В наблюдательное когортное исследование с ретроспективным и проспективным компонентами были включены 183 спортсмена высокой квалификации: 92 мужчины и 91 женщина с медианой возраста 22 [19, 28] года. Осложненное течение послеоперационного периода зарегистрировано у 37 спортсменов. При этом в 9 случаях неблагоприятные клинические события имели инфекционно-воспалительную природу, а в 28 случаях были представлены несостоятельностью или травматическим повреждением трансплантата ПКС. Анализ проводили в подвыборках с полным набором необходимых данных: 116 предоперационных наблюдений использовали для построения прогностического решающего правила, 177 хирургических эпизодов – для оценки послеоперационной термографической динамики на протяжении первого года.

Установлено, что разрыв ПКС и последующая реконструкция сопровождаются статистически значимой межсторонней температурной

асимметрией, выявляемой по большинству исследованных термографических показателей и временных периодов наблюдения. На основании трех предоперационных параметров разработано решающее правило с пороговым значением прогностического индекса $f=0,169$. Площадь под характеристической кривой составила 0,78, чувствительность – 77,8%, специфичность – 70,4%. При внутренней проверке методом исключения по одному наблюдению — соответственно 72% и 68%. В исследуемой выборке осложненное течение послеоперационного периода было зарегистрировано у 32,6% пациентов с положительным результатом правила и у 5,5% пациентов с отрицательным результатом. Осложненное течение у спортсменов сопровождалось статистически значимым замедлением возвращения к нормативному диапазону шести проанализированных температурных показателей. Наиболее выраженное замедление восстановления нормотермии отмечено для межсторонней разницы средней температуры области надколенника и средней температуры передней поверхности коленного сустава.

Построенные перцентильные кривые позволили визуально в доступной форме представить ожидаемую динамику термографических параметров в течение первого года после реконструкции ПКС. Сочетание клинической картины и данных термографии позволило выделить благоприятный, настораживающий и неблагоприятный клинико-термографические профили восстановления. Статистически значимых различий показателя f между изолированными и сочетанными повреждениями ПКС выявлено не было, что позволяет рассматривать его, прежде всего, как комплексную функциональную температурную характеристику предоперационного состояния коленного сустава, а не прямое отражение морфологического объема травмы. Результаты анкетирования через 503 и 1495 суток после операции свидетельствуют о сохранении высоких медианных показателей функции коленного сустава как при неосложненном, так и при осложненном течении. Статистически значимых различий между группами осложненного и неосложненного течения по шкалам Cincinnati, IKDC и Lysholm не получено. Межгрупповые различия по

количественным МРТ-параметрам также не достигли статистической значимости, а отдельные корреляции между данными МРТ и термографии носят лишь поисковый характер и зависят от сроков после операции.

Полученные в результате исследования данные свидетельствуют о том, что инфракрасная термография отражает фазозависимую местную реакцию тканей коленного сустава, но установить причину выявленных отклонений при самостоятельном применении не позволяет. Поэтому прогностический индекс f и перцентильные критерии, входящие в термографический аналитический инструмент, следует рассматривать в качестве дополнительного средства стратификации риска и не применять их непосредственно для диагностики осложненного течения или определения показаний к хирургическому вмешательству. Клиническая ценность предложенного метода заключается именно в серийной оценке индивидуальной траектории восстановления и своевременном выявлении ее отклонения от ожидаемого диапазона.

Практическое значение работы состоит в разработке термографического аналитического инструмента, объединяющего предоперационный прогностический индекс и перцентильное представление послеоперационной динамики термографических параметров. Значение $f \geq 0,169$ на предоперационном этапе может служить основанием для отнесения спортсмена к группе повышенного внимания, проведения дополнительной клинико-инструментальной оценки и более тщательного послеоперационного отслеживания. Сопоставление серий из нескольких термографических исследований с опорными перцентильными кривыми позволяет выявлять нетипичную температурную динамику и обоснованно рекомендовать дополнительное обследование или коррекцию реабилитационной нагрузки. Применение инструмента целесообразно только в составе комплексной оценки, включающей клиническое обследование, функциональные тесты, лабораторные показатели и медицинскую визуализацию. Для подтверждения диагностической и прогностической ценности описанных в работе критериев в будущем необходима их проверка в независимом проспективном исследовании.

ВЫВОДЫ

1. У спортсменов высокой квалификации до и после реконструкции передней крестообразной связки установлено статистически значимое различие термографических показателей области оперированного коленного сустава по сравнению с контралатеральной конечностью как для случаев осложненного, так и неосложненного течения по большинству показателей и в большинстве временных блоков наблюдения с уровнем значимости $p < 0,05$ по критерию Вилкоксона, а осложненное течение характеризуется более стойким сохранением межсторонней температурной асимметрии и замедленным возвращением температурных параметров к нормотермии, что обосновывает использование инфракрасной термографии в качестве информативного метода объективного контроля локальной микроциркуляторной реакции и способствует дифференциации осложненного и неосложненного течения послеоперационного периода.

2. На основании термографических показателей, анализа данных специализированных опросников и магнитно-резонансной томографии разработан и статистически обоснован термографический аналитический инструмент, включающий предоперационное прогностическое правило в форме расчетного прогностического индекса f с пороговым значением 0,169, определенным по результатам оценки диагностических характеристик модели с площадью под кривой зависимости чувствительности от единицы минус специфичность 0,78, референсные перцентильные кривые распределения температур по 3-му, 10-му, 25-му, 50-му, 75-му, 90-му и 97-му перцентилям для временных интервалов с первого дня до года после операции, а также карты возвращения локальных температур к нормотермии, продемонстрировавший умеренную разделяющую способность и позволяющий проводить предварительную стратификацию риска осложненного течения в исследуемой выборке с выделением благоприятного, настораживающего и неблагоприятного

клинико-термографических профилей восстановления до хирургического вмешательства и после него на различных этапах медицинской реабилитации.

3. Показано, что осложненное течение послеоперационного периода характеризуется выходом значений восьми отобранных термографических параметров за пределы коридора, ограниченного чаще 10-м и 90-м перцентилями, реже 3-м и 97-м перцентилями, стойкостью выявленных отклонений, волнообразностью нахождения значений «внутри коридора–вне коридора–вновь внутри» и замедлением сроков возврата к локальной нормотермии, на основании чего сформулированы критерии индивидуализации медицинской реабилитации спортсменов после реконструкции передней крестообразной связки, предусматривающие преимущественно регулируемое замедление или временную остановку реабилитационной программы при неблагоприятном профиле, а детальное описание термографических паттернов, зафиксированное в разработанном термографическом аналитическом инструменте, показало возможность применения в исследуемой серии наблюдений и требует дальнейшей проспективной проверки с потенциальным расширением возможностей персонифицированной реабилитации спортсменов высокой квалификации.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Рекомендуется включать инфракрасную термографию в комплекс предоперационного обследования спортсменов высокой квалификации с разрывом передней крестообразной связки и использовать рассчитанное по результатам данной работы значение прогностического индекса f с порогом 0,169 для стратификации риска осложненного послеоперационного течения, и в сочетании с клинической картиной и данными дополнительных методов обследования корректировать наполнение и длительность предоперационной подготовки.

2. После хирургической реконструкции передней крестообразной связки рекомендуется проводить регулярные термографические исследования коленных суставов с оценкой восьми отобранных термографических параметров в сопоставлении их с перцентильными кривыми распределения температур, оценивать сроки возвращения к локальной нормотермии и, при выявлении неблагоприятного профиля восстановления, включающего данные термографии в сочетании с клиническим ухудшением и неблагоприятной динамикой по данным магнитно-резонансной томографии, временно замедлять или приостанавливать реабилитационную программу, снижать объем и интенсивность физических нагрузок, специфических для вида спорта, удлинять восстановительные интервалы и проводить дополнительное обследование для уточнения причин выявленных отклонений.

3. На этапе подготовки к возвращению к тренировочной и соревновательной деятельности рекомендуется использовать разработанный термографический аналитический инструмент совместно с функциональными тестами, данными методов медицинской визуализации для поддержки принятия клинических решений и обоснования допуска спортсменов к увеличению объема тренировок, включению высокоинтенсивных и нагрузок, специфических для вида спорта, и возвращению к соревновательной деятельности. При этом переход от одной фазы реабилитации к другой считать возможным при отсутствии

отборочных и строгих подтверждающих термографических критериев при анализе по перцентильным кривым, стойкой нормотермии и благоприятной клинико-инструментальной и субъективной динамике, что потенциально может способствовать снижению риска повторных травм связочного аппарата коленного сустава и повышению эффективности комплексной реабилитации.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ДИ – доверительный интервал

ЗКС – задняя крестообразная связка

ИМТ – индекс массы тела

ИТ – инфракрасная термография

ЛФК – лечебная физкультура

МРТ – магнитно-резонансная томография

ОА – остеоартрит

ОР – относительный риск

ОШ – отношение шансов

ПКС – передняя крестообразная связка

ПЦОР – прогностическая ценность отрицательного результата

ПЦПР – прогностическая ценность положительного результата

ПЭМ – просвечивающая электронная микроскопия

РА – ревматоидный артрит

РБК – роботизированный биомеханический комплекс

РПЛ – Российская премьер-лига

РФ – Российская Федерация

СОЭ – скорость оседания эритроцитов

США – Соединенные Штаты Америки

УЗИ – ультразвуковое исследование

ФЭС – функциональная электростимуляция

ЦСМиР – Центр спортивной медицины и реабилитации

ЭНМС – электронейромышечная стимуляция

ВКА – код передней области коленного сустава по Гламорганскому протоколу

ВТВ – bone-tendon-bone – аутотрансплантат из средней трети связки

надколенника с костными блоками на концах

GAMLSS – Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape –

обобщенные аддитивные модели параметров положения, масштаба и формы распределения

IKDC – International Knee Documentation Committee – Международный комитет по

документации состояния коленного сустава; в работе – субъективная форма оценки коленного сустава

KOOS – The Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score – шкала оценки исходов

лечения травм и остеоартрита коленного сустава

LMS – Lambda-Mu-Sigma method – метод, основанный на моделировании

параметров асимметрии распределения, медианы и коэффициента вариации

MOON – Multicenter Orthopaedic Outcomes Network – Многоцентровая сеть

исходов ортопедических вмешательств.

pl – peroneus longus – трансплантат из сухожилия длинной малоберцовой мышцы

quad – quadriceps – аутооттрансплантат из сухожилия четырехглавой мышцы бедра

ROC-кривая – Receiver Operating Characteristic – характеристическая кривая

зависимости чувствительности от доли ложноположительных результатов, равной единице минус специфичность

rSD – относительный показатель неоднородности магнитно-резонансного сигнала

(рассчитывается как отношение дисперсии сигнала трансплантата ПКС к дисперсии сигнала ЗКС).

SD – стандартное отклонение интенсивности магнитно-резонансного сигнала

SNQ – signal to noise quotient – МРТ-параметр: соотношение сигнал/шум

st/g – semitendinosus/gracilis – трансплантат из сухожилий полусухожильной и тонкой мышц

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возможности медицинского тепловидения в организации первичной медико-санитарной помощи / И.М. Долгов, М.Г. Воловик, И.С. Железняк [и др.] // Медицинский алфавит. – 2023. – № 7. – С. 42-50.
2. Воловик, М.Г. Современные возможности и перспективы развития медицинского тепловидения / М.Г. Воловик, И.М. Долгов // Медицинский алфавит. – 2018. – Т. 3, № 25 (362). – С. 45-51.
3. Воловик, М.Г. Функциональные пробы в медицинском тепловидении / М.Г. Воловик, И.М. Долгов, Д.Н. Хрипковский. – Москва : Дигносис, 2023. – 128 с.
4. Клинические рекомендации по реабилитации высококвалифицированных спортсменов после оперативного лечения травм и заболеваний нижних конечностей / А.М. Белякова, Р.А. Бойченко, М.Н. Величко [и др.]. – Москва : ФМБА России, 2018. – 192 с.
5. Клинические рекомендации. Повреждение связок коленного сустава : электронный ресурс : одобрены Минздравом России. – Текст : электронный // КонсультантПлюс : официальный сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_494210/ (дата обращения: 09.01.2026).
6. Коротаев, В.В. Основы тепловидения : учебное пособие / В.В. Коротаев, Г.С. Мельников, С.В. Михеев [и др.]. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2012. – 122 с.
7. Медицинская термография: возможности и перспективы / А.М. Морозов, Е.М. Мохов, В.А. Кадыков, А.В. Панова // Казанский медицинский журнал. – 2018. – Т. 99, № 2. – С. 264-270.
8. Медицинское тепловидение: учебное пособие / Е.Е. Ачкасов, М.Г. Воловик, И.М. Долгов, С.Н. Колесов. – Москва : ИНФРА-М, 2019. – 218 с. – (Серия «Высшее образование: Специалитет»).
9. Перевод, валидация и культурная адаптация ортопедического опросника IKDC 2000 subjective knee form для оценки состояния коленного сустава / Н.Е. Магнитская, М.С. Рязанцев, М.Н. Майсигов [и др.] // Гений ортопедии. – 2019. – Т. 25, № 3. – С. 348-354.

10. Ревизионная реконструкция передней крестообразной связки: современные подходы к предоперационному планированию: систематический обзор литературы / А.С. Гофер, А.А. Алекперов, М.Б. Гуражев [и др.] // Травматология и ортопедия России. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 136-148.
11. Фоменко, С.М. Артроскопическое лечение сочетанных разрывов передней крестообразной связки (ПКС) коленного сустава (КС): клинико-экспериментальное исследование : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук : 14.00.22 / Фоменко Сергей Михайлович. – Новосибирск : ФГУ Новосибирский НИИТО, 2005. – 21 с.
12. Хан, А. В. Реабилитация спортсменов после травм и операций на коленном суставе с применением роботизированных биомеханических комплексов : специальность 3.1.33. «Восстановительная медицина, спортивная медицина, лечебная физкультура, курортология и физиотерапия, медико-социальная реабилитация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Хан Алексей Викторович. – Москва : ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2025. – 172 с.
13. 20-Year Outcomes of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With Hamstring Tendon Autograft: The Catastrophic Effect of Age and Posterior Tibial Slope / L. J. Salmon, E. Heath, H. Akrawi [et al.] // American Journal of Sports Medicine. – 2018. – Vol. 46, № 3. – P. 531-543.
14. A 10-year comparison of anterior cruciate ligament reconstructions with hamstring tendon and patellar tendon autograft: a controlled, prospective trial / L. A. Pinczewski, J. Lyman, L. J. Salmon [et al.] // American Journal of Sports Medicine. – 2007. – Vol. 35, № 4. – P. 564-574.
15. A conceptual framework for a sports knee injury performance profile (SKIPP) and return to activity criteria (RTAC) / D. Logerstedt, A. Arundale, A. Lynch, L. Snyder-Mackler // Brazilian Journal of Physical Therapy. – 2015. – Vol. 19. – P. 340-359.
16. A meta-analysis of patellar tendon autograft versus patellar tendon allograft in anterior cruciate ligament reconstruction / A. J. Krych, J. D. Jackson, T. L. Hoskin, D. L. Dahm // Arthroscopy. – 2008. – Vol. 24, № 3. – P. 292-298.

17. A progressive 5-week exercise therapy program leads to significant improvement in knee function early after anterior cruciate ligament injury / I. Eitzen, H. Moksnes, L. Snyder-Mackler, M.A. Risberg // *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*. – 2010. – Vol. 40, № 11. – P. 705-721.
18. A systematic review of anterior cruciate ligament reconstruction with autograft compared with allograft / J.L. Carey, W.R. Dunn, D.L. Dahm [et al.] // *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*. – 2009. – Vol. 91, № 9. – P. 2242-2250.
19. A systematic review of failed anterior cruciate ligament reconstruction with autograft compared with allograft in young patients / D. Wasserstein, U. Sheth, A. Cabrera, K. P. Spindler // *Sports Health*. – 2015. – Vol. 7, № 3. – P. 207-216.
20. Age, graft size, and Tegner activity level as predictors of failure in anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring autograft / P. M. Kamien, J. M. Hydrick, W. H. Replogle [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2013. – Vol. 41, № 8. – P. 1808-1812.
21. Agel, J. Anterior cruciate ligament injury in national collegiate athletic association basketball and soccer: a 13-year review / J. Agel, E.A. Arendt, B. Bershadsky // *American Journal of Sports Medicine*. – 2005. – Vol. 33, № 4. – P. 524-530.
22. Ahn, J.H. Comparison of revision surgery with primary anterior cruciate ligament reconstruction and outcome of revision surgery between different graft materials / J.H. Ahn, Y.S. Lee, H.C. Ha // *American Journal of Sports Medicine*. – 2008. – Vol. 36, № 10. – P. 1889-1895.
23. Aids to the examination of the peripheral nervous system : Memorandum № 45 / Medical Research Council. – London : Her Majesty's Stationery Office, 1976. – 70 p.
24. Albert, S.M. Thermography in orthopedics / S.M. Albert, M. Glickman, M. Kallish // *Annals of the New York Academy of Sciences*. – 1964. – Vol. 121. – P. 157-170.

25. Allograft anterior cruciate ligament reconstruction in the young, active patient: Tegner activity level and failure rate / G. R. Barrett, K. Lubner, W. H. Replogle, J. L. Manley // *Arthroscopy*. – 2010. – Vol. 26, № 12. – P. 1593-1601.
26. Allograft versus autograft anterior cruciate ligament reconstruction: predictors of failure from a MOON prospective longitudinal cohort / C. C. Kaeding, B. Aros, A. Pedroza [et al.] // *Sports Health*. – 2011. – Vol. 3, № 1. – P. 73-81.
27. Ammer, K. The Glamorgan Protocol for recording and evaluation of thermal images of the human body / K. Ammer // *Thermology International*. – 2008. – Vol. 18. – P. 125-129.
28. Ammer, K. The thermal human body: a practical guide to thermal imaging / K. Ammer, F. Ring. – [S. l.] : Jenny Stanford Publishing, 2019. – 272 p.
29. An integrated approach to change the outcome part II: targeted neuromuscular training techniques to reduce identified ACL injury risk factors / G. D. Myer, K. R. Ford, J. L. Brent, T. E. Hewett // *Journal of Strength and Conditioning Research*. – 2012. – Vol. 26. – P. 2272-2292.
30. Analysis of return to competition and repeat rupture for 298 anterior cruciate ligament reconstructions with patellar or hamstring tendon autograft in sportspeople / E. Laboute, L. Savalli, P. L. Puig [et al.] // *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. – 2010. – Vol. 53, № 10. – P. 598-614.
31. Anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction and meniscal repair rates have both increased in the past 20 years in England: hospital statistics from 1997 to 2017 / S. G. F. Abram, A. J. Price, A. Judge, D. J. Beard // *British Journal of Sports Medicine*. – 2020. – Vol. 54, № 5. – P. 286-291.
32. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes: risk factors and strategies for prevention / F. Mancino, B. Kayani, A. Gabr [et al.] // *Bone & Joint Open*. – 2024. – Vol. 5, № 2. – P. 94-100.
33. Anterior cruciate ligament injury risk in sport: a systematic review and meta-analysis of injury incidence by sex and sport classification / A. M. Montalvo, D. K. Schneider, K. E. Webster [et al.] // *Journal of Athletic Training*. – 2019. – Vol. 54, № 5. – P. 472-482.

34. Anterior cruciate ligament injury, return to play, and reinjury in the elite collegiate athlete: analysis of an NCAA Division I cohort / G. V. Kamath, T. Murphy, R. A. Creighton [et al.] // American Journal of Sports Medicine. – 2014. – Vol. 42, № 7. – P. 1638-1643.
35. Anterior cruciate ligament repair with internal brace augmentation: a systematic review / W. T. Wilson, G. P. Hopper, M. S. Banger [et al.] // The Knee. – 2022. – Vol. 35. – P. 192-200.
36. Anterior cruciate ligament revision reconstruction: two-year results from the MOON cohort / R. W. Wright, W. R. Dunn, A. Amendola [et al.]; MOON Cohort // Journal of Knee Surgery. – 2007. – Vol. 20, № 4. – P. 308-311.
37. Anterior cruciate ligament ruptures in Russian Premier League soccer players during the 2010 to 2021/2022 competitive seasons: the epidemiology and details of return to sports / E. Bezuglov, G. Malyakin, A. Emanov [et al.] // Orthopaedic Journal of Sports Medicine. – 2024. – Vol. 12, № 8. – Article: 23259671241261957.
38. Aplicaciones de la termografía infrarroja en el deporte. Una revisión / Applications of Infrared Thermography in Sports. A Review / J. C. B. Marins, I. Fernández-Cuevas, J. Arnaiz-Lastras [et al.] // Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte. – 2015. – Vol. 15, № 60. – P. 805-824.
39. Application of infrared thermography in sports science / ed. by J. I. Priego Quesada. – Cham : Springer International Publishing, 2017. – 327 p. – (Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering).
40. Arfaoui, A. Application of infrared thermography as a diagnostic tool of knee osteoarthritis / A. Arfaoui, A.M. Bouzid, H. Pron // Journal of Thermal Science and Technology. – 2012. – Vol. 7, № 1. – P. 227-235.
41. Arnoczky, S.P. Anterior cruciate ligament replacement using patellar tendon. An evaluation of graft revascularization in the dog / S.P. Arnoczky, G.B. Tarvin, J.L. Marshall // Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume. – 1982. – Vol. 64, № 2. – P. 217-224.

42. Assessing medial collateral ligament knee lesions in general practice / M. Kastelein, H. P. Wagemakers, P. A. Luijsterburg [et al.] // *American Journal of Medicine*. – 2008. – Vol. 121. – P. 982-988.e2.
43. Assessment of inflammation in the rheumatoid knee joint: correlation between clinical, radioisotopic, and thermographic methods / M. De Silva, V. Kyle, B. Hazleman [et al.] // *Annals of the Rheumatic Diseases*. – 1986. – Vol. 45. – P. 277-280.
44. Assessment of rheumatoid inflammation in the knee joint: a reappraisal / J. Paterson, W. S. Watson, E. Teasdale [et al.] // *Annals of the Rheumatic Diseases*. – 1978. – Vol. 37. – P. 48-52.
45. Associations between inadequate knee function detected by KOOS and prospective graft failure in an anterior cruciate ligament-reconstructed knee / L. P. Granan, V. Baste, L. Engebretsen, M. C. S. Inacio // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2015. – Vol. 23, № 4. – P. 1135-1140.
46. Astarita, T. Infrared thermography for thermo-fluid-dynamics / T. Astarita, G.M. Carlomagno. – Berlin : Springer, 2012. – XXII, 226 p.
47. Augustsson, J. Ability of a new hop test to determine functional deficits after anterior cruciate ligament reconstruction / J. Augustsson, R. Thomee, J. Karlsson // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2004. – Vol. 12. – P. 350-356.
48. Automated hand thermal image segmentation and feature extraction in the evaluation of rheumatoid arthritis / U. Snekhalatha, M. Anburajan, V. Sowmiya [et al.] // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. – 2015. – Vol. 229, № 4. – P. 319-331.
49. Barber-Westin, S. One in 5 athletes sustain reinjury upon return to high-risk sports after ACL reconstruction: a systematic review in 1239 athletes younger than 20 years / S. Barber-Westin, F.R. Noyes // *Sports Health*. – 2020. – Vol. 12, № 6. – P. 587-597.
50. Barber-Westin, S.D. Factors used to determine return to unrestricted sports activities after anterior cruciate ligament reconstruction / S.D. Barber-Westin, F.R. Noyes // *Arthroscopy*. – 2011. – Vol. 27. – P. 1697-1705.

51. Barber-Westin, S.D. Rigorous statistical reliability, validity, and responsiveness testing of the Cincinnati knee rating system in 350 subjects with uninjured, injured, or anterior cruciate ligament-reconstructed knees / S.D. Barber-Westin, F.R. Noyes, J.W. McCloskey // *American Journal of Sports Medicine*. – 1999. – Vol. 27, № 4. – P. 402-416.
52. Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport / M. V. Paterno, L. C. Schmitt, K. R. Ford [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2010. – Vol. 38, № 10. – P. 1968-1978.
53. Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study / T.E. Hewett, G.D. Myer, K.R. Ford [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2005. – Vol. 33, № 4. – P. 492-501.
54. Biomechanical properties and vascularity of an anterior cruciate ligament graft can be predicted by contrast-enhanced magnetic resonance imaging: a two-year study in sheep / A. Weiler, G. Peters, J. Maurer [et al.] // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2001. – Vol. 29, № 6. – P. 751-761.
55. Blanch, P. Has the athlete trained enough to return to play safely? The acute: chronic workload ratio permits clinicians to quantify a player's risk of subsequent injury / P. Blanch, T.J. Gabbett // *British Journal of Sports Medicine*. – 2016. – Vol. 50, № 8. – P. 471-475.
56. Blanchard, S. A theoretical model to describe progressions and regressions for exercise rehabilitation / S. Blanchard, P. Glasgow // *Physical Therapy in Sport*. – 2014. – Vol. 15, № 3. – P. 131-135.
57. Bohannon, R. W. Manual muscle testing: does it meet the standards of an adequate screening test? / R. W. Bohannon // *Clinical Rehabilitation*. – 2005. – Vol. 19. – P. 662-667.
58. Bombardier, C. The impact of arthritis in Canada: today and over the next 30 years / C. Bombardier, G. Hawker, D. Mosher. – [S. l.] : Arthritis Alliance of Canada, 2011. – 51 p.

59. Brisoschi, M.C. Valor da imagem infravermelha na avaliação da dor / M. C. Brisoschi, S. Abramavicus, C. F. Correa // Revista Dor. – 2005. – Vol. 6, № 1. – P. 514-524.
60. Brophy, R.H. American Academy of Orthopaedic Surgeons Clinical Practice Guideline Summary: Management of Anterior Cruciate Ligament Injuries / R.H. Brophy, K.J. Lowry // Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons. – 2023. – Vol. 31, № 11. – P. 531-537.
61. Buckthorpe, M. Optimising the late-stage rehabilitation and return-to-sport training and testing process after ACL reconstruction / M. Buckthorpe // Sports Medicine. – 2019. – Vol. 49, № 7. – P. 1043-1058.
62. Cano, S.P. Use of infrared thermography as a tool to monitor skin temperature along the recovery process of an anterior cruciate ligament surgery : International Doctorate thesis / Sergio Piñonosa Cano. – Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2016. – [XXIII], 97.
63. Castellani, J.W. Human physiological responses to cold exposure: acute responses and acclimatization to prolonged exposure / J. W. Castellani, A. J. Young // Autonomic Neuroscience. – 2016. – Vol. 196. – P. 63-74.
64. Causes for failure of ACL reconstruction and influence of meniscectomies after revision / C. Trojani, P. Beaufils, G. Burdin [et al.] // Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. – 2011. – Vol. 19, № 2. – P. 196-201.
65. Charkoudian, N. Human thermoregulation from the autonomic perspective / N. Charkoudian // Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical. – 2016. – Vol. 196. – P. 1-2.
66. Choi, E. Interexaminer reliability of infrared thermography for the diagnosis of complex regional pain syndrome / E. Choi, P.B. Lee, F.S. Nahm // Skin Research and Technology. – 2013. – Vol. 19. – P. 189-193.
67. Clinical assessment of arthritic knee pain by infrared thermography / D. Fokam, C. Lehmann // Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology. – 2018. – Vol. 30, № 3. – doi: 10.1515/jbcpp-2017-0218.
68. Clinical factors that predict a second ACL injury after ACL reconstruction and return to sport: preliminary development of a clinical decision algorithm /

- M. V. Paterno, B. Huang, S. Thomas [et al.] // *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. – 2017. – Vol. 5, № 12. – Article: 2325967117745279.
69. Clinical results and risk factors for reinjury 15 years after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective study of hamstring and patellar tendon grafts / T. Leys, L. J. Salmon, A. Waller [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2012. – Vol. 40, № 3. – P. 595-605.
 70. Cole, T.J. Smoothing reference centile curves: the LMS method and penalized likelihood / T.J. Cole, P.J. Green // *Statistics in Medicine*. – 1992. – Vol. 11, № 10. – P. 1305-1319.
 71. Collins, A.J. Measurement of inflammation in man and animals by radiometry / A.J. Collins, E.F.J. Ring // *British Journal of Pharmacology*. – 1972. – Vol. 44. – P. 145-152.
 72. Collins, A.J. Temperature and biochemical studies of joint inflammation. A preliminary investigation / A. J. Collins, J. A. Cosh // *Annals of the Rheumatic Diseases*. – 1970. – Vol. 29. – P. 386-392.
 73. Combined anterior cruciate ligament reconstruction and lateral extra-articular tenodesis does not result in an increased rate of osteoarthritis: a systematic review and best evidence synthesis / B. M. Devitt, C. R. Bell, M. B. Larkin [et al.] // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2017. – Vol. 25, № 4. – P. 1149-1160.
 74. Comparison of tendon-bone healing between autografts and allografts after anterior cruciate ligament reconstruction using magnetic resonance imaging / Y. Ge, H. Li, H. Tao [et al.] // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2015. – Vol. 23, № 4. – P. 954-960.
 75. Consensus criteria for defining «successful outcome» after ACL injury and reconstruction: a Delaware-Oslo ACL cohort investigation / A. D. Lynch, D. S. Logerstedt, H. Grindem [et al.] // *British Journal of Sports Medicine*. – 2015. – Vol. 49, № 5. – P. 335-342.
 76. Controversies in the technical aspects of ACL reconstruction: an evidence-based medicine approach / ed. by N. Nakamura, S. Zaffagnini, R. G. Marx, V. Musahl. – Berlin : Springer, 2017. – P. 513-524.

77. Cramer, M.N. Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress / M.N. Cramer, O. Jay // *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*. – 2016. – Vol. 196. – P. 3-13.
78. Cronström, A. Return to sports: a risky business? A systematic review with meta-analysis of risk factors for graft rupture following ACL reconstruction / A. Cronström, E. Tengman, C.K. Häger // *Sports Medicine*. – 2023. – Vol. 53. – P. 91-110.
79. Cuddy, J.S. A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat / J.S. Cuddy, W.S. Hailes, B.C. Ruby // *Journal of Thermal Biology*. – 2014. – Vol. 43. – P. 7-12.
80. Current concepts for anterior cruciate ligament reconstruction: a criterion-based rehabilitation progression / D. Adams, D.S. Logerstedt, A. Hunter-Giordano [et al.] // *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*. – 2012. – Vol. 42, № 7. – P. 601-614.
81. Descriptive epidemiology of the Multicenter ACL Revision Study (MARS) cohort / R. W. Wright, L. J. Huston, K. P. Spindler [et al.] ; MARS Group // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2010. – Vol. 38, № 10. – P. 1979-1986.
82. Development of a national cruciate ligament surgery registry: the Norwegian National Knee Ligament Registry / L.P. Granan, R. Bahr, K. Steindal [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2008. – Vol. 36, № 2. – P. 308-315.
83. Development of a strength test battery for evaluating leg muscle power after anterior cruciate ligament injury and reconstruction / C. Neeter, A. Gustavsson, P. Thomee [et al.] // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2006. – Vol. 14. – P. 571-580.
84. Di Stasi, S. Neuromuscular training to target deficits associated with second anterior cruciate ligament injury / S. Di Stasi, G.D. Myer, T.E. Hewett // *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*. – 2013. – Vol. 43. – P. 777-792.
85. Diagnostic accuracy of a new clinical test (the Thessaly test) for early detection of meniscal tears / T. Karachalios, M. Hantes, A.H. Zibis [et al.] // *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*. – 2005. – Vol. 87. – P. 955-962.

86. Diamantopoulos, A.P. Anterior cruciate ligament revision reconstruction: results in 107 patients / A.P. Diamantopoulos, O. Lorbach, H.H. Paessler // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2008. – Vol. 36, № 5. – P. 851-860.
87. Dieppe, P. Pathogenesis and management of pain in osteoarthritis / P. Dieppe, S. Lohmander // *The Lancet*. – 2005. – Vol. 365. – P. 965-973.
88. Difference in graft maturity of the reconstructed anterior cruciate ligament 2 years postoperatively: a comparison between autografts and allografts in young men using clinical and 3.0-T magnetic resonance imaging evaluation / H. Li, H. Tao, S. Cho [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2012. – Vol. 40, № 7. – P. 1519-1526.
89. Disease activity indexes in rheumatoid arthritis: a prospective, comparative study with thermography / M.D. Devereaux, G.R. Parr, D.P. Thomas, B.L. Hazleman // *Annals of the Rheumatic Diseases*. – 1985. – Vol. 44. – P. 434-437.
90. Does extended preoperative rehabilitation influence outcomes 2 years after ACL reconstruction? A comparative effectiveness study between the MOON and Delaware-Oslo ACL cohorts / M. J. Failla, D. S. Logerstedt, H. Grindem [et al.] // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2016. – Vol. 44, № 10. – P. 2608-2614.
91. Does sex affect second ACL injury risk? A systematic review with meta-analysis / A. D. Patel, G. S. Bullock, J. Wrigley [et al.] // *British Journal of Sports Medicine*. – 2021. – Vol. 55, № 15. – P. 873-882.
92. Does the graft source really matter in the outcome of patients undergoing anterior cruciate ligament reconstruction? An evaluation of autograft versus allograft reconstruction results: a systematic review / T. E. Foster, B. L. Wolfe, S. Ryan [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2010. – Vol. 38, № 1. – P. 189-199.
93. Dosage effects of neuromuscular training intervention to reduce anterior cruciate ligament injuries in female athletes: meta- and sub-group analyses / D. Sugimoto, G. D. Myer, K. D. Foss, T. E. Hewett // *Sports Medicine*. – 2014. – Vol. 44, № 4. – P. 551-562.

94. Double-bundle versus single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: randomized clinical and magnetic resonance imaging study with 2-year follow-up / P. Suomalainen, A. S. Moisala, A. Paakkala [et al.] // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2011. – Vol. 39, № 8. – P. 1615-1622.
95. Dynamic correlation between chest temperature entropy and physiological load indicators, and excess post-exercise oxygen consumption during incremental cycling exercise / S. Cui, N. Du, Z. Liu, C. Hu // *Frontiers in Physiology*. – 2025. – Vol. 16. – Article 1631729. - doi: 10.3389/fphys.2025.1631729.
96. Early surgical reconstruction versus rehabilitation with elective delayed reconstruction for patients with anterior cruciate ligament rupture: COMPARE randomised controlled trial / M. Reijman, V. Eggerding, E. van Es [et al.] // *BMJ*. – 2021. – Vol. 372. – Article: n375.
97. Economic and performance impact of anterior cruciate ligament injury in National Basketball Association players / N. J. Vaudreuil, C. F. van Eck, S. J. Lombardo, F. D. Kharrazi // *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. – 2021. – Vol. 9, № 9. – Article: 23259671211026617.
98. Economic costs estimation of soccer injuries in first and second Spanish division professional teams / I. Fernández-Cuevas, P.M. Gómez-Carmona, M. Sillero-Quintana [et al.] // 15th Annual Congress of the European College of Sport Sciences ECSS. - Antalya, Turkey, 2010.
99. Effect of chondroprotectors in the treatment and prophylaxis of the knee joint osteoarthritis / I. M. Zazirnyĭ, O. M. Mahomedov, O. V. Drobotun, V. H. Ievseienko // *Likars'ka Sprava*. – 2000. – № 7-8. – P. 50-52.
100. Effect of prehabilitation on the outcome of anterior cruciate ligament reconstruction / S. R. Shaarani, C. O'Hare, A. Quinn [et al.] // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2013. – Vol. 41, № 9. – P. 2117-2127.
101. Effectiveness of a neuromuscular and proprioceptive training program in preventing anterior cruciate ligament injuries in female athletes: 2-year follow-up / B. R. Mandelbaum, H. J. Silvers, D. S. Watanabe [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2005. – Vol. 33. – P. 1003-1010.

102. Effects of increasing tibial slope on the biomechanics of the knee / J.R. Giffin, T.M. Vogrin, T. Zantop [et al.] // American Journal of Sports Medicine. – 2004. – Vol. 32, № 2. – P. 376-382.
103. Epidemiology of anterior cruciate ligament reconstruction: trends, readmissions, and subsequent knee surgery / S. Lyman, P. Koulouvaris, S. Sherman [et al.] // Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume. – 2009. – Vol. 91, № 10. – P. 2321-2328.
104. Evaluation and treatment of recurrent instability after anterior cruciate ligament reconstruction / C.D. Harner, J.R. Giffin, R.C. Duntzman [et al.] // Instructional Course Lectures. – 2001. – Vol. 50. – P. 463-474.
105. Evidence-based clinical practice update: practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus / N. Van Melick, R. E. H. Van Cingel, F. Brooijmans [et al.] // British Journal of Sports Medicine. – 2016. – Vol. 50, № 24. – P. 1506-1515.
106. Factors predicting hamstring tendon autograft diameters and resulting failure rates after anterior cruciate ligament reconstruction / S. Y. Park, H. Oh, S. Park [et al.] // Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. – 2013. – Vol. 21, № 5. – P. 1111-1118.
107. Feldman, F. Normal thermographic standards for the cervical spine and upper extremities / F. Feldman, E.L. Nickoloff // Skeletal Radiology. – 1984. – Vol. 12, № 4. – P. 235-249.
108. Femoral tunnel malposition in ACL revision reconstruction / J. A. Morgan, D. L. Dahm, B. A. Levy, M. J. Stuart // Journal of Knee Surgery. – 2012. – Vol. 25, № 5. – P. 361-368.
109. Fernández Cuevas, I. Effect of endurance, speed and strength training on skin temperature measured by infrared thermography : European doctoral thesis / Ismael Fernández Cuevas. – Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2012. – [XXXIV], 225 p.
110. Fifteen-year outcome of endoscopic anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon autograft for “isolated” anterior cruciate ligament tear /

- C. Hui, L. J. Salmon, A. Kok [et al.] // American Journal of Sports Medicine. – 2011. – Vol. 39, № 1. – P. 89-98.
111. Fifty-five per cent return to competitive sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: an updated systematic review and meta-analysis including aspects of physical functioning and contextual factors / C.L. Ardern, N.F. Taylor, J.A. Feller, K.E. Webster // British Journal of Sports Medicine. – 2014. – Vol. 48, № 21. – P. 1543-1552.
 112. Firth, A.D. Predictors of graft failure in young active patients undergoing hamstring autograft ACL reconstruction with or without a lateral extra-articular tenodesis: the STABILITY experience / A. D. Firth, D. M. Bryant, A. M. J. Getgood // American Journal of Sports Medicine. – 2022. – Vol. 50, № 2. – P. 384-394.
 113. Garagiola, U. Use of telethermography in the management of sports injuries / U. Garagiola, E. Giani // Sports Medicine. – 1990. – Vol. 10, № 4. – P. 267-272.
 114. Garofalo, R. Revision anterior cruciate ligament reconstruction with quadriceps tendon-patellar bone autograft / R. Garofalo, A. Djahangiri, O. Siegrist // Arthroscopy. – 2006. – Vol. 22, № 2. – P. 205-214.
 115. Genome engineering for personalized arthritis therapeutics / S. S. Adkar, J. M. Brunger, V. P. Willard [et al.] // Trends in Molecular Medicine. – 2017. – Vol. 23, № 10. – P. 917-931.
 116. George, M.S. Current concepts review: revision anterior cruciate ligament reconstruction / M.S. George, W.R. Dunn, K.P. Spindler // American Journal of Sports Medicine. – 2006. – Vol. 34, № 12. – P. 2026-2037.
 117. Gohil, S. Anterior cruciate ligament reconstruction using autologous double hamstrings: a comparison of standard versus minimal debridement techniques using MRI to assess revascularisation. A randomised prospective study with a one-year follow-up / S. Gohil, P.O. Annear, W. Breidahl // Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume. – 2007. – Vol. 89, № 9. – P. 1165-1171.
 118. Gómez Carmona, P.M. Influencia de la información termográfica infrarroja en el protocolo de prevención de lesiones de un equipo de fútbol profesional español :

- tesis doctoral / Pedro María Gómez Carmona. – Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2012. – [XXXIV], 281 p.
119. González-Alonso, J. Human thermoregulation and the cardiovascular system / J. González-Alonso // *Experimental Physiology*. – 2012. – Vol. 97. – P. 340-346.
 120. Graft size and patient age are predictors of early revision after anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring autograft / R. A. Magnussen, J. T. Lawrence, R. L. West [et al.] // *Arthroscopy*. – 2012. – Vol. 28, № 4. – P. 526-531.
 121. Grant, J.A. Two- to 4-year follow-up to a comparison of home versus physical therapy-supervised rehabilitation programs after anterior cruciate ligament reconstruction / J.A. Grant, N.G. Mohtadi // *American Journal of Sports Medicine*. – 2010. – Vol. 38, № 7. – P. 1389-1394.
 122. Gribble, P.A. Using the star excursion balance test to assess dynamic postural-control deficits and outcomes in lower extremity injury: a literature and systematic review / P.A. Gribble, J. Hertel, P. Plisky // *Journal of Athletic Training*. – 2012. – Vol. 47. – P. 339-351.
 123. Hardy, J.D. The radiation of heat from the human body: III. The human skin as a black-body radiator / J.D. Hardy // *Journal of Clinical Investigation*. – 1934. – Vol. 13. – P. 615-620.
 124. Heat distribution over normal and abnormal joints: thermal pattern and quantification / R. S. Salisbury, G. Parr, M. de Silva [et al.] // *Annals of the Rheumatic Diseases*. – 1983. – Vol. 42. – P. 494-499.
 125. Hewett, T.E. Current concepts for injury prevention in athletes after anterior cruciate ligament reconstruction / T.E. Hewett, S.L. Di Stasi, G.D. Myer // *American Journal of Sports Medicine*. – 2013. – Vol. 41, № 1. – P. 216-224.
 126. High incidence and costs for anterior cruciate ligament reconstructions performed in Australia from 2003-2004 to 2007-2008: time for an anterior cruciate ligament register by Scandinavian model? / K. W. Janssen, J. W. Orchard, T. R. Driscoll, W. van Mechelen // *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*. – 2012. – Vol. 22, № 4. – P. 495-501.

127. Hildebrandt, C. An overview of recent application of medical infrared thermography in sports medicine in Austria / C. Hildebrandt, C. Raschner, K. Ammer // *Sensors*. – 2010. – Vol. 10. – P. 4700-4715.
128. Horvath, S.M. Intra-articular temperature as a measure of joint reaction / S. M. Horvath, J. L. Hollander // *Journal of Clinical Investigation*. – 1949. – Vol. 28, № 3. – P. 469-473.
129. How does a combined preoperative and postoperative rehabilitation programme influence the outcome of ACL reconstruction 2 years after surgery? A comparison between patients in the Delaware-Oslo ACL Cohort and the Norwegian National Knee Ligament Registry / H. Grindem, L. P. Granan, M. A. Risberg [et al.] // *British Journal of Sports Medicine*. – 2015. – Vol. 49, № 6. – P. 385-389.
130. Howell, S.M. Serial magnetic resonance study assessing the effects of impingement on the MR image of the patellar tendon graft / S.M. Howell, J. A. Clark, T. E. Farley // *Arthroscopy*. – 1992. – Vol. 8, № 3. – P. 350-358.
131. Ilowite, N.T. Assessment of pain in patients with juvenile rheumatoid arthritis: relation between pain intensity and degree of joint inflammation / N.T. Ilowite, G.A. Walco, R. Pochaczewsky // *Annals of the Rheumatic Diseases*. – 1992. – Vol. 51. – P. 343-346.
132. Impact of Anterior Cruciate Ligament Injury on European Professional Soccer Players / D. Mazza, E. Viglietta, E. Monaco [et al.] // *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. – 2022. – Vol. 10, № 2. – Article: 23259671221076865.
133. In vivo evidence for tibial plateau slope as a risk factor for anterior cruciate ligament injury: a systematic review and meta-analysis / S. C. Wordeman, C. E. Quatman, C. C. Kaeding, T. E. Hewett // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2012. – Vol. 40, № 7. – P. 1673-1681.
134. Incidence and risk factors for graft rupture and contralateral rupture after anterior cruciate ligament reconstruction / L. J. Salmon, V. J. Russell, K. Refshauge [et al.] // *Arthroscopy*. – 2005. – Vol. 21, № 8. – P. 948-957.
135. Incidence and Risk Factors for Residual High-Grade Pivot Shift After ACL Reconstruction With or Without a Lateral Extra-articular Tenodesis / C. Jacquet,

- C. Pioger, R. Seil [et al.] // *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. – 2021. – Vol. 9, № 5. – Article: 23259671211003590.
136. Incidence and trends of anterior cruciate ligament reconstruction in the United States / N. A. Mall, P. N. Chalmers, M. Moric [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2014. – Vol. 42, № 10. – P. 2363-2370.
 137. Incidence of anterior cruciate ligament injury among active duty US military servicemen and servicewomen / B. D. Owens, S. B. Mountcastle, W. R. Dunn [et al.] // *Military Medicine*. – 2007. – Vol. 172, № 1. – P. 90-91.
 138. Incidence of anterior cruciate ligament injury and other knee ligament injuries: a national population-based study / S.M. Gianotti, S.W. Marshall, P.A. Hume, L. Bunt // *Journal of Science and Medicine in Sport*. – 2009. – Vol. 12, № 6. – P. 622-627.
 139. Incidence of anterior cruciate ligament tears and reconstruction: a 21-year population-based study / T. L. Sanders, H. Maradit Kremers, A. J. Bryan [et al.] // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2016. – Vol. 44, № 6. – P. 1502-1507.
 140. Incidence of contralateral and ipsilateral anterior cruciate ligament (ACL) injury after primary ACL reconstruction and return to sport / M. V. Paterno, M. J. Rauh, L. C. Schmitt [et al.] // *Clinical Journal of Sport Medicine*. – 2012. – Vol. 22, № 2. – P. 116-121.
 141. Increased risk of revision after anteromedial compared with transtibial drilling of the femoral tunnel during primary anterior cruciate ligament reconstruction: results from the Danish Knee Ligament Reconstruction Register / L. Rahr-Wagner, T. M. Thillemann, A. B. Pedersen, M. Lind // *Arthroscopy*. – 2013. – Vol. 29, № 1. – P. 98-105.
 142. Increased risk of revision with hamstring tendon grafts compared with patellar tendon grafts after anterior cruciate ligament reconstruction: a study of 12,643 patients from the Norwegian Cruciate Ligament Registry, 2004-2012 / A. Persson, K. Fjeldsgaard, J. E. Gjertsen [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2014. – Vol. 42, № 2. – P. 285-291.

143. Influence of mechanical hippotherapy on skin temperature responses in lower limbs in children with cerebral palsy / G. Zurek, K. Dudek, I. Pirogowicz [et al.] // *Journal of Physiology and Pharmacology*. – 2008. – Vol. 59, Suppl. 6. – P. 819-824.
144. Infrared camera assessment of skin surface temperature: effect of emissivity / V. Bernard, E. Staffa, V. Mornstein, A. Bourek // *Physica Medica*. – 2013. – Vol. 29. – P. 583-591.
145. Infrared thermography in symptomatic knee osteoarthritis: joint temperature differs based on patient and pain characteristics / L. De Marziani, A. Boffa, L. Angelelli [et al.] // *Journal of Clinical Medicine*. – 2023. – Vol. 12, № 6. – Article: 2319.
146. Injury burden in professional European football (soccer): systematic review, meta-analysis, and economic considerations / L. Pulici, D. Certa, M. Zago [et al.] // *Clinical Journal of Sport Medicine*. – 2023. – Vol. 33, № 4. – P. 450-457.
147. Interrater reliability of a clinical scale to assess knee joint effusion / L. P. Sturgill, L. Snyder-Mackler, T. J. Manal, M. J. Axe // *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*. – 2009. – Vol. 39, № 12. – P. 845-849.
148. Ipsilateral graft and contralateral ACL rupture at five years or more following ACL reconstruction: a systematic review / R. W. Wright, R. A. Magnussen, W. R. Dunn, K. P. Spindler // *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*. – 2011. – Vol. 93, № 12. – P. 1159-1165.
149. Joint functional impairment and thermal alterations in patients with psoriatic arthritis: a thermal imaging study / A. Capo, E. Ismail, D. Cardone [et al.] // *Microvascular Research*. – 2015. – Vol. 102. – P. 86-91.
150. Kastberger, G. Infrared imaging technology and biological applications / G. Kastberger, R. Stachl // *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*. – 2003. – Vol. 35. – P. 429-439.
151. Kenny, G. P. Human thermoregulation: separating thermal and nonthermal effects on heat loss / G. P. Kenny, W. S. Journeay // *Frontiers in Bioscience. Landmark Edition*. – 2010. – Vol. 15. – P. 259-290.

152. Kim, K. M. Effects of neuromuscular electrical stimulation after anterior cruciate ligament reconstruction on quadriceps strength, function, and patient-oriented outcomes: a systematic review / K. M. Kim, T. Croy, J. Hertel, S. Saliba // *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*. – 2010. – Vol. 40, № 7. – P. 383-391.
153. Knee biomechanics during a jump-cut maneuver: effects of sex and ACL surgery / D. L. Miranda, J. T. Machan, J. Romanowski [et al.] // *Medicine and Science in Sports and Exercise*. – 2013. – Vol. 45, № 5. – P. 942-951.
154. Knee temperature remains abnormal in patients successfully treated with anterior cruciate ligament reconstruction: an infrared thermography analysis / L. De Marziani, S. Orazi, A. Boffa [et al.] // *Journal of Experimental Orthopaedics*. – 2024. – Vol. 11, № 3. – Article: e70012.
155. Kraeutler, M. J. Bone-patellar tendon-bone autograft versus allograft in outcomes of anterior cruciate ligament reconstruction: a meta-analysis of 5182 patients / M. J. Kraeutler, J. T. Bravman, E. C. McCarty // *American Journal of Sports Medicine*. – 2013. – Vol. 41, № 10. – P. 2439-2448.
156. Lasanen, R. Infrared thermography in the evaluation of skin temperature: applications in musculoskeletal conditions : Doctoral thesis / R. Lasanen. – Kuopio : University of Eastern Finland, 2015.
157. Lateral extra-articular tenodesis reduces failure of hamstring tendon autograft anterior cruciate ligament reconstruction: 2-year outcomes from the STABILITY Study randomized clinical trial / A.M.J. Getgood, D.M. Bryant, R. Litchfield [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2020. – Vol. 48, № 2. – P. 285-297.
158. Ligamentization of tendon grafts treated with an endogenous preparation rich in growth factors: gross morphology and histology / M. Sanchez, E. Anitua, J. Azofra [et al.] // *Arthroscopy*. – 2010. – Vol. 26, № 4. – P. 470-480.
159. Lim, C. L. Human thermoregulation and measurement of body temperature in exercise and clinical settings / C. L. Lim, C. Byrne, J. K. Lee // *Annals of the Academy of Medicine, Singapore*. – 2008. – Vol. 37. – P. 347-353.

160. Limb asymmetries in landing and jumping 2 years following anterior cruciate ligament reconstruction / M. V. Paterno, K. R. Ford, G. D. Myer [et al.] // *Clinical Journal of Sport Medicine*. – 2007. – Vol. 17, № 4. – P. 258-262.
161. Lind, M. Incidence and outcome after revision anterior cruciate ligament reconstruction: results from the Danish Registry for Knee Ligament Reconstructions / M. Lind, F. Menhert, A. B. Pedersen // *American Journal of Sports Medicine*. – 2012. – Vol. 40, № 7. – P. 1551-1557.
162. Lind, M. The first results from the Danish ACL reconstruction registry: epidemiologic and 2 year follow-up results from 5,818 knee ligament reconstructions / M. Lind, F. Menhert, A. B. Pedersen // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2009. – Vol. 17, № 2. – P. 117-124.
163. Long-term follow-up of 24.5 years after intra-articular anterior cruciate ligament reconstruction with lateral extra-articular augmentation / J. Pernin, P. Verdonk, T. A. Si Selmi [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2010. – Vol. 38, № 6. – P. 1094-1102.
164. Magnussen, R. A. The Effect of High-Grade Pre-operative Knee Laxity on 6-Year ACL Reconstruction Outcomes / R. A. Magnussen, E. K. Reinke, L. J. Huston [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2018. – Vol. 46, № 12. – P. 2865-2872.
165. Maletis, G. B. Analysis of 16,192 anterior cruciate ligament reconstructions from a community-based registry / G. B. Maletis, M. C. Inacio, T. T. Funahashi // *American Journal of Sports Medicine*. – 2013. – Vol. 41, № 9. – P. 2090-2098.
166. Marom, N. Lateral extra-articular tenodesis reduces anterior cruciate ligament graft force and anterior tibial translation in response to applied pivoting and anterior drawer loads / N. Marom, H. Ouanezar, H. Jahandar [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2020. – Vol. 48, № 13. – P. 3183-3193.
167. Masur, L. Response of infrared thermography related parameters to (non-)sport specific exercise and relationship with internal load parameters in individual and team sport athletes – a systematic review / L. Masur, F. Brand, P. Dürking // *Frontiers in Sports and Active Living*. – 2024. – Vol. 6. – Article: 1479608.

168. Mechanisms, prediction, and prevention of ACL injuries: cut risk with three sharpened and validated tools / T.E. Hewett, G.D. Myer, K.R. Ford [et al.] // *Journal of Orthopaedic Research*. – 2016. – Vol. 34, № 11. – P. 1843-1855.
169. Meola, C. Recent advances in the use of infrared thermography / C. Meola, G. M. Carlomagno // *Measurement Science and Technology*. – 2004. – Vol. 15. – P. R27-R58.
170. Mihata, L. C. Comparing the incidence of anterior cruciate ligament injury in collegiate lacrosse, soccer, and basketball players: implications for anterior cruciate ligament mechanism and prevention / L. C. Mihata, A. I. Beutler, B. P. Boden // *American Journal of Sports Medicine*. – 2006. – Vol. 34, № 6. – P. 899-904.
171. Minimizing the risk of graft failure after ACL reconstruction in athletes / G. G. Costa, S. Perelli, A. Grassi [et al.] // *Journal of Experimental Orthopaedics*. – 2022. – Vol. 9, № 1. – Article: 26.
172. Mulligan, E. P. Reliability and diagnostic accuracy of the Lachman test performed in prone position / E. P. Mulligan, J. L. Harwell, W. J. Robertson // *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*. – 2011. – Vol. 41, № 10. – P. 749-757.
173. Muscle strength and hop performance criteria prior to return to sports after ACL reconstruction / R. Thomee, Y. Kaplan, J. Kvist [et al.] // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2011. – Vol. 19, № 11. – P. 1798-1805.
174. Nagelli, C. V. Should return to sport be delayed until two years after anterior cruciate ligament reconstruction? Biological and functional considerations / C. V. Nagelli, T. E. Hewett // *Sports Medicine*. – 2017. – Vol. 47, № 2. – P. 221-232.
175. Natural history of changes in knee skin temperature following total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis / L. Gavish, L. Kandel, G. Rivkin [et al.] // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – Article: 6810.
176. Neeraj, S. International epidemiology of anterior cruciate ligament injuries / S. Neeraj // *Orthopaedic Research Online Journal*. – 2018. – Vol. 1, № 5. – Article: OPROJ.000525.

177. Neoligamentization process of BTPB used for ACL graft: histological evaluation from 6 months to 10 years / S. Zaffagnini, V. De Pasquale, L. Marchesini Reggiani [et al.] // *The Knee*. – 2007. – Vol. 14, № 2. – P. 87-93.
178. Neuromuscular training versus strength training during first 6 months after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized clinical trial / M. A. Risberg, I. Holm, G. Myklebust, L. Engebretsen // *Physical Therapy*. – 2007. – Vol. 87. – P. 737-750.
179. Nonoperative treatment as an option for isolated anterior cruciate ligament injury: a systematic review and meta-analysis / R. De Jonge, M. Máté, N. Kovács [et al.] // *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. – 2024. – Vol. 12, № 4. – Article: 23259671241239665.
180. Norkin, C. C. Measurement of joint motion: a guide to goniometry / C. C. Norkin, D. J. White. – 5th ed. – Philadelphia : F. A. Davis Company, 2016. – [XVIII], 571 p.
181. Noyes, F. R. Use of allografts after failed treatment of rupture of the anterior cruciate ligament / F. R. Noyes, S. D. Barber-Westin // *Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*. – 1994. – Vol. 76, № 7. – P. 1019-1031.
182. Outcome of anterior cruciate ligament reconstruction with emphasis on sex-related differences / M. Ahldén, N. Sernert, J. Karlsson, J. Kartus // *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. – 2012. – Vol. 22, № 5. – P. 618-626.
183. Outcome of revision anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review / R. W. Wright, R. A. Magnussen, W. R. Dunn, K. P. Spindler // *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*. – 2012. – Vol. 94, № 6. – P. 531-536.
184. Outcomes and Revision Rate After Bone-Patellar Tendon-Bone Allograft Versus Autograft Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Patients Aged 18 Years or Younger With Closed Physes / H.B. Ellis, L.M. Matheny, K.K. Briggs [et al.] // *Arthroscopy*. – 2012. – Vol. 28, № 12. – P. 1819-1825.
185. Pain related inflammation analysis using infrared images / M.K. Bhowmik, S. Bardhan, K. Das [et al.] // *Proceedings of SPIE*. – 2016. – Vol. 9861. – Article: 986116.

186. Parsons, K. Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance / K. Parsons. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2002. – 552 p.
187. Patellar skin surface temperature by thermography reflects knee osteoarthritis severity / A.E. Denoble, N. Hall, C.F. Pieper, V.B. Kraus // *Clinical Medicine Insights: Arthritis and Musculoskeletal Disorders*. – 2010. – Vol. 3. – P. 69-75.
188. Patient predictors of early revision surgery after anterior cruciate ligament reconstruction: a cohort study of 16,930 patients with 2-year follow-up / D. Andernord, N. Desai, H. Björnsson [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2015. – Vol. 43, № 1. – P. 121-127.
189. Pauzenberger, L. “Ligamentization” in hamstring tendon grafts after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review of the literature and a glimpse into the future / L. Pauzenberger, S. Syre, M. Schurz // *Arthroscopy*. – 2013. – Vol. 29, № 10. – P. 1712-1721.
190. Perceptions of rehabilitation and return to sport among high school athletes with anterior cruciate ligament reconstruction: a qualitative research study / J. Di Santi, C. Lisee, K. Erickson [et al.] // *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*. – 2018. – Vol. 48, № 12. – P. 951-959.
191. Pichot, C. Aplicación de la termografía en el dolor lumbar crónico / C. Pichot // *Revista de la Sociedad Española del Dolor*. – 2001. – Vol. 8, № 2. – P. 43-47.
192. Posterior tibial slope and further anterior cruciate ligament injuries in the anterior cruciate ligament-reconstructed patient / J. M. Webb, L. J. Salmon, E. Leclerc [et al.] // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2013. – Vol. 41, № 12. – P. 2800-2804.
193. Predicting anterior cruciate ligament reconstruction revision: a machine learning analysis utilizing the Norwegian Knee Ligament Register / R. K. Martin, S. Wastvedt, A. Pareek [et al.] // *Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*. – 2022. – Vol. 104. – P. 145-153.
194. Predicting anterior cruciate ligament reinjury from return-to-activity assessments at 6 months postsurgery: a prospective cohort study / S.G. Bodkin, J. Hertel,

- D. R. Diduch [et al.] // *Journal of Athletic Training*. – 2022. – Vol. 57, № 4. – P. 325-333.
195. Predictors for additional anterior cruciate ligament reconstruction: data from the Swedish national ACL register / A. Fältström, M. Häggglund, H. Magnusson [et al.] // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2016. – Vol. 24, № 3. – P. 885-894.
 196. Psychological readiness to return to sport is associated with second anterior cruciate ligament injuries / A. L. McPherson, J. A. Feller, T. E. Hewett [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2019. – Vol. 47, № 4. – P. 857-862.
 197. Quantitation of thermography in arthritis using multi-isothermal analysis. I. The thermographic index / A.J. Collins, E.F.J. Ring, J.A. Cosh, P.A. Bacon // *Annals of the Rheumatic Diseases*. – 1974. – Vol. 33. – P. 113-115.
 198. Rabuck, S. J. Anterior cruciate ligament healing and advances in imaging / S. J. Rabuck, M. G. Baraga, F. H. Fu // *Clinics in Sports Medicine*. – 2013. – Vol. 32, № 1. – P. 13-20.
 199. Reconstructed anterior cruciate ligaments using patellar tendon ligament grafts: diagnostic value of contrast-enhanced MRI in a 2-year follow-up regimen / T. J. Vogl, J. Schmitt, J. Lubrich [et al.] // *European Radiology*. – 2001. – Vol. 11, № 8. – P. 1450-1456.
 200. Reconstruction of the anterior cruciate ligament: association of graft choice with increased risk of early revision / G. B. Maletis, M. C. S. Inacio, J. L. Desmond, T. T. Funahashi // *Bone & Joint Journal*. – 2013. – Vol. 95-B, № 5. – P. 623-628.
 201. Reframing ankle sprain management: the role of thermography in ligament injury monitoring / V.-L. Escamilla-Galindo, D. Fernández-Muñoz, J. Fernández-Carmona [et al.] // *Journal of Clinical Medicine*. – 2026. – Vol. 15, № 1. – Article: 134.
 202. Registry data highlight increased revision rates for Endobutton/Biosure HA in ACL reconstruction with hamstring tendon autograft: a nationwide cohort study / A. Persson, A. B. Kjellsen, K. Fjeldsgaard [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2015. – Vol. 43, № 9. – P. 2182-2188.

203. Reinikainen, L. M. Significance of humidity and temperature on skin and upper airway symptoms / L. M. Reinikainen, J. J. Jaakkola // *Indoor Air*. – 2003. – Vol. 13, № 4. – P. 344-352.
204. Reliability of early postoperative radiographic assessment of tunnel placement after anterior cruciate ligament reconstruction / B. A. Warne, A. J. Ramme, M. C. Willey [et al.] // *Arthroscopy*. – 2012. – Vol. 28, № 7. – P. 942-951.
205. Reliability of measures of impairments associated with patellofemoral pain syndrome / S. R. Piva, K. Fitzgerald, J. J. Irrgang [et al.] // *BMC Musculoskeletal Disorders*. – 2006. – Vol. 7. – Article: 33.
206. Reruptures, reinjuries, and revisions at a minimum 2-year follow-up: a randomized clinical trial comparing 3 graft types for ACL reconstruction / N. G. Mohtadi, D. Chan, R. Barber, E. Oddone Paolucci // *Clinical Journal of Sport Medicine*. – 2016. – Vol. 26, № 2. – P. 96-107.
207. Results from the Swedish national anterior cruciate ligament register / J. Kvist, J. Kartus, J. Karlsson, M. Forssblad // *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic and Related Surgery*. – 2014. – Vol. 30, № 7. – P. 803-810.
208. Return to Play and Performance After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Soccer Players: A Systematic Review of Recent Evidence / M. Manojlovic, S. Ninkovic, R. Matic [et al.] // *Sports Medicine*. – 2024. – Vol. 54, № 8. – P. 2097-2108.
209. Return to sport matters: longer-term quality of life after ACL reconstruction / S. R. Filbay, I. N. Ackerman, T. G. Russell, K. M. Crossley // *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*. – 2017. – Vol. 27, № 5. – P. 514-524.
210. Return-to-play criteria based on infrared thermography during anterior cruciate ligament rehabilitation in football players / V.L. Escamilla-Galindo, J.L. Felipe, A. Alonso-Callejo [et al.] // *Biology of Sport*. – 2025. – Vol. 42, № 2. – P. 161-167.
211. Revision anterior cruciate ligament reconstruction / G. V. Kamath, J. C. Redfern, P. E. Greis, R. T. Burks // *American Journal of Sports Medicine*. – 2011. – Vol. 39, № 1. – P. 199-217.

212. Revision anterior cruciate ligament reconstruction using a 2-stage technique with bone grafting of the tibial tunnel / N.P. Thomas, R. Kankate, F. Wandless, H. Pandit // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2005. – Vol. 33, № 11. – P. 1701-1709.
213. Revision anterior cruciate ligament reconstruction with doubled semitendinosus and gracilis tendons and lateral extra-articular reconstruction / A. Ferretti, F. Conteduca, E. Monaco, A. De Carli // *Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*. – 2006. – Vol. 88, № 11. – P. 2373-2379.
214. Revision anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring tendon autograft: 5- to 9-year follow-up / L.J. Salmon, L.A. Pinczewski, V.J. Russell, K.M. Refshauge // *American Journal of Sports Medicine*. – 2006. – Vol. 34, № 10. – P. 1604-1614.
215. Revision anterior cruciate ligament reconstruction: causes of failure, surgical technique, and clinical results / M. Denti, D. Lo Vetere, C. Bait [et al.] // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2008. – Vol. 36, № 10. – P. 1896-1902.
216. Revision anterior cruciate ligament reconstruction: three- to nine-year follow-up / M.G. Grossman, N. S. ElAttrache, C.L. Shields, R.E. Glousman // *Arthroscopy*. – 2005. – Vol. 21, № 4. – P. 418-423.
217. Revision of anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon allograft and autograft: 2- and 5-year results / H.O. Mayr, D. Willkomm, A. Stoehr [et al.] // *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. – 2012. – Vol. 132, № 6. – P. 867-874.
218. Ring, E. F. J. Infrared thermal imaging in medicine / E. F. J. Ring, K. Ammer // *Physiological Measurement*. – 2012. – Vol. 33, № 3. – P. R33-R46.
219. Ring, E. F. J. Quantitative thermography / E. F. J. Ring, A. J. Collins // *Rheumatology and Physical Medicine*. – 1970. – Vol. 10. – P. 337-341.
220. Ring, E. F. J. Skin temperature measurement by radiometry / E. F. J. Ring, J. A. Cosh // *British Medical Journal*. – 1968. – Vol. 4. – P. 448.
221. Risberg, M. A. A systematic review of evidence for anterior cruciate ligament rehabilitation: how much and what type? / M. A. Risberg, M. Lewek, L. Snyder-Mackler // *Physical Therapy in Sport*. – 2004. – Vol. 5, № 3. – P. 125-145.

222. Risberg, M. A. The long-term effect of 2 postoperative rehabilitation programs after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled clinical trial with 2 years of follow-up / M. A. Risberg, I. Holm // American Journal of Sports Medicine. – 2009. – Vol. 37, № 10. – P. 1958-1966.
223. Risk factors and predictors of subsequent ACL injury in either knee after ACL reconstruction: prospective analysis of 2488 primary ACL reconstructions from the MOON cohort / C. C. Kaeding, A. D. Pedroza, E. K. Reinke [et al.] // American Journal of Sports Medicine. – 2015. – Vol. 43, № 7. – P. 1583-1590.
224. Risk factors associated with noncontact injury of the anterior cruciate ligament: a prospective four-year evaluation of 859 West Point cadets / J. M. Uhorchak, C. R. Scoville, G. N. Williams [et al.] // The American Journal of Sports Medicine. – 2003. – Vol. 31, № 6. – P. 831-842.
225. Risk factors associated with revision and contralateral anterior cruciate ligament reconstructions in the Kaiser Permanente ACLR Registry / G. B. Maletis, M.C.S. Inacio, T. T. Funahashi // American Journal of Sports Medicine. – 2015. – Vol. 43, № 3. – P. 641-647.
226. Salter, D. C. The effect of obliquity in clinical thermograms / D. C. Salter // Physics in Medicine and Biology. – 1976. – Vol. 21. – P. 980.
227. Sanchez-Marin, F. J. Novel approach to assess the emissivity of the human skin / F. J. Sanchez-Marin, S. Calixto-Carrera, C. Villaseñor-Mora // Journal of Biomedical Optics. – 2009. – Vol. 14. – Article: 024006.
228. Scheffler, S. U. Graft remodeling and ligamentization after cruciate ligament reconstruction / S. U. Scheffler, F. N. Unterhauser, A. Weiler // Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. – 2008. – Vol. 16, № 9. – P. 834-842.
229. Schmitt, L. C. The impact of quadriceps femoris strength asymmetry on functional performance at return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction / L. C. Schmitt, M. V. Paterno, T. E. Hewett // Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy. – 2012. – Vol. 42, № 9. – P. 750-759.
230. Shelbourne, K. D. Incidence of subsequent injury to either knee within 5 years after anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon autograft /

- K. D. Shelbourne, T. Gray, M. Haro // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2009. – Vol. 37, № 2. – P. 246-251.
231. Shelbourne, K. D. The relationship between intercondylar notch width of the femur and the incidence of anterior cruciate ligament tears / K. D. Shelbourne, T. J. Davis, T. E. Klootwyk // *The American Journal of Sports Medicine*. – 1998. – Vol. 26, № 3. – P. 402-408.
 232. Short-term skin temperature responses to endurance exercise: a systematic review of methods and future challenges in the use of infrared thermography / D. Rojas-Valverde, P. Tomás-Carús, R. Timón [et al.] // *Life*. – 2021. – Vol. 11, № 12. – Article: 1286.
 233. Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study / H. Grindem, L. Snyder-Mackler, H. Moksnes [et al.] // *British Journal of Sports Medicine*. – 2016. – Vol. 50, № 13. – P. 804-808.
 234. Snaebjörnsson, T. Young age and high BMI are predictors of early revision surgery after primary ACL reconstruction / T. Snaebjörnsson, E. Svantesson, D. Sundemo [et al.] // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2019. – Vol. 27, № 11. – P. 3583-3591.
 235. Star excursion balance test as a predictor of lower extremity injury in high school basketball players / P. J. Plisky, M. J. Rauh, T. W. Kaminski, F. B. Underwood // *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*. – 2006. – Vol. 36. – P. 911-919.
 236. Stasinopoulos, D. M. GAMLSS: a distributional regression approach / D. M. Stasinopoulos, R. A. Rigby, F. De Bastiani // *Statistical Modelling*. – 2018. – Vol. 18, № 3-4. – P. 248-273.
 237. Stearns, K. M. Abnormal frontal plane knee mechanics during sidestep cutting in female soccer athletes after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport / K. M. Stearns, C. D. Pollard // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2013. – Vol. 41, № 4. – P. 918-923.
 238. Steketee, J. Spectral emissivity of skin and pericardium / J. Steketee // *Physics in Medicine and Biology*. – 1973. – Vol. 18, № 5. – P. 686-694.

239. Strength asymmetry and landing mechanics at return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction / L. C. Schmitt, M. V. Paterno, K. R. Ford [et al.] // *Medicine and Science in Sports and Exercise*. – 2015. – Vol. 47, № 7. – P. 1426-1434.
240. Surgical predictors of early revision surgery after anterior cruciate ligament reconstruction: results from the Swedish National Knee Ligament Register on 13,102 patients / D. Andernord, H. Björnsson, M. Petzold [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2014. – Vol. 42, № 7. – P. 1574-1582.
241. Survival of the anterior cruciate ligament graft and the contralateral ACL at a minimum of 15 years / H.E. Bourke, L. J. Salmon, A. Waller [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2012. – Vol. 40, № 9. – P. 1985-1992.
242. Swiderski, W. Military applications of infrared thermography nondestructive testing in Poland / W. Swiderski // *Proceedings of the 16th World Conference on Nondestructive Testing, WCNDT 2004, 30.08-03.09.2004, Montreal (Canada)*. – Zielonka : Military Institute of Armament Technology, 2015.
243. The “ligamentization” process in anterior cruciate ligament reconstruction: what happens to the human graft? A systematic review of the literature / S. Claes, P. Verdonk, R. Forsyth, J. Bellemans // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2011. – Vol. 39, № 11. – P. 2476-2483.
244. The analgesic efficacy of bee venom acupuncture for knee osteoarthritis: a comparative study with needle acupuncture / Y. Kwon, J. Kim, J. Yoon [et al.] // *American Journal of Chinese Medicine*. – 2001. – Vol. 29. – P. 1-10.
245. The application of medical infrared thermography in sports medicine / C. Hildebrandt, K. Zeilberger, E.F.J. Ring, C. Raschner // *An International Perspective on Topics in Sports Medicine and Sports Injury* / ed. by K.R. Zaslav. – [S. l.] : InTech, 2012. – P. 257-274.
246. The association between posterior-inferior tibial slope and anterior cruciate ligament insufficiency / M. L. Brandon, P. T. Haynes, J. R. Bonamo [et al.] // *Arthroscopy*. – 2006. – Vol. 22, № 8. – P. 894-899.
247. The comparisons between thermography and ultrasonography with physical examination for wrist joint assessment in juvenile idiopathic arthritis /

- B. Lerkvaleekul, S. Jaovisidha, W. Sungkarat [et al.] // *Physiological Measurement*. – 2017. – Vol. 38. – P. 691-700.
248. The effect of low-level laser in knee osteoarthritis: a double-blind, randomized, placebo-controlled trial / B. Hegedűs, L. Viharos, M. Gervain, M. Galfi // *Photomedicine and Laser Surgery*. – 2009. – Vol. 27. – P. 577-584.
 249. The effects of fixture congestion on injury in professional male soccer: a systematic review / R. M. Page, A. Field, B. Langley [et al.] // *Sports Medicine*. – 2023. – Vol. 53, № 3. – P. 667-685.
 250. The effects of high-intensity versus low-intensity resistance training on leg extensor power and recovery of knee function after ACL-reconstruction / T. Bieler, N.A. Sobol, L.L. Andersen [et al.] // *BioMed Research International*. – 2014. – Vol. 2014. – Article: 278512.
 251. The evolution of physical and technical performance parameters in the English Premier League / C. Barnes, D.T. Archer, B. Hogg [et al.] // *International Journal of Sports Medicine*. – 2014. – Vol. 35, № 13. – P. 1095-1100.
 252. The Incidence of Sport-Related Anterior Cruciate Ligament Injuries: An Overview of Systematic Reviews Including 51 Meta-Analyses / J. Martinez-Calderon, M. Infante-Cano, J. Matias-Soto [et al.] // *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*. – 2025. – Vol. 10, № 2. – Article: 174.
 253. The influence of sex, race, and age on pain assessment and treatment decisions using virtual human technology: a cross-national comparison / C. A. Torres, E. J. Bartley, L. D. Wandner [et al.] // *Journal of Pain Research*. – 2013. – Vol. 6. – P. 577-588.
 254. The influence of static and dynamic warm-up on knee temperature: infrared thermography insights before and after a change of direction exercise / B. Trovato, M. Sortino, L. Petrigna [et al.] // *Frontiers in Physiology*. – 2024. – Vol. 15. – Article: 1393804.
 255. The outcome at 15 years of endoscopic anterior cruciate ligament reconstruction using hamstring tendon autograft for “isolated” anterior cruciate ligament rupture / H.E. Bourke, D.J. Gordon, L.J. Salmon [et al.] // *Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*. – 2012. – Vol. 94, № 5. – P. 630-637.

256. The phenomenon of “ligamentization”: anterior cruciate ligament reconstruction with autogenous patellar tendon / D. Amiel, J.B. Kleiner, R.D. Roux [et al.] // *Journal of Orthopaedic Research*. – 1986. – Vol. 4, № 2. – P. 162-172.
257. The reliability, validity, and responsiveness of the Lysholm score and Tegner activity scale for anterior cruciate ligament injuries of the knee: 25 years later / K.K. Briggs, J. Lysholm, Y. Tegner [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2009. – Vol. 37, № 5. – P. 890-897.
258. The Scandinavian ACL registries 2004-2007: baseline epidemiology / L. P. Granan, M. Forssblad, M. Lind, L. Engebretsen // *Acta Orthopaedica*. – 2009. – Vol. 80, № 5. – P. 563-567.
259. The Swedish Knee Ligament Registry // *Annual Report 2020*. – Stockholm: SKLR, 2020. – 60 p.
260. The Swedish National Anterior Cruciate Ligament Register: a report on baseline variables and outcomes of surgery for almost 18,000 patients / M. Ahldén, K. Samuelsson, N. Sernert [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2012. – Vol. 40, № 10. – P. 2230-2235.
261. The use of thermal imaging for monitoring the training progress of professional male sweep rowers / A. Straburzyńska-Lupa, P. Korman, E. Śliwicka, J. Kryściak // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – Article: 16507.
262. The use of thermal infra-red imaging to detect delayed onset muscle soreness / H.H. Al-Nakhli, J.S. Petrofsky, M.S. Laymon, L.S. Berk // *Journal of Visualized Experiments*. – 2012. – № 59. – Article: 3551.
263. The value of thermal imaging for knee arthritis: a single-center observational study / S.M. Ahn, J.H. Chun, S. Hong [et al.] // *Yonsei Medical Journal*. – 2022. – Vol. 63, № 2. – P. 141-147.
264. Thermal imaging in total knee replacement and its relation with inflammation markers / V. Lohchab, J. Singh, P. Mahapatra [et al.] // *Mathematical Biosciences and Engineering*. – 2021. – Vol. 18, № 6. – P. 7759-7773.
265. Thermal profile classification of the back of sportive and sedentary healthy individuals / B. Trovato, F. Roggio, M. Sortino [et al.] // *Journal of Thermal Biology*. – 2023. – Vol. 118. – Article: 103751.

266. Thermal symmetry of skin temperature: normative data of normal subjects in Taiwan / H. H. Niu, P. W. Lui, J. S. Hu [et al.] // *Zhonghua Yi Xue Za Zhi.* – 2001. – Vol. 64, № 8. – P. 459-468.
267. Thermal threshold for knee osteoarthritis people evaluated with infrared thermography: a scoping review / L. Petrigna, A. Amato, F. Roggio [et al.] // *Journal of Thermal Biology.* – 2024. – Vol. 123. – Article: 103932.
268. Thermographic imaging in sports and exercise medicine: a Delphi study and consensus statement on the measurement of human skin temperature / D. G. Moreira, J. T. Costello, C. J. Brito [et al.] // *Journal of Thermal Biology.* – 2017. – Vol. 69. – P. 155-162.
269. Thermovision as a tool for athletes to verify the symmetry of work of individual muscle segments / A. Szurko, T. Kasprzyk-Kucewicz, A. Cholewka [et al.] // *International Journal of Environmental Research and Public Health.* – 2022. – Vol. 19, № 14. – Article: 8490.
270. Togawa, T. Non-contact skin emissivity: measurement from reflectance using step change in ambient radiation temperature / T. Togawa // *Clinical Physics and Physiological Measurement.* – 1989. – Vol. 10, № 1. – P. 39-48.
271. Treatment after ACL injury: Panther Symposium ACL Treatment Consensus Group / T.A. Diermeier, B.B. Rothrauff, L. Engebretsen [et al.] // *British Journal of Sports Medicine.* – 2021. – Vol. 55, № 1. – P. 14-22.
272. Treatment for acute anterior cruciate ligament tear: five year outcome of randomised trial / R.B. Frobell, H.P. Roos, E.M. Roos [et al.] // *BMJ.* – 2013. – Vol. 346. – Article: f232.
273. UEFA Women's Elite Club Injury Study: a prospective study on 1527 injuries over four consecutive seasons 2018/2019 to 2021/2022 reveals thigh muscle injuries to be most common and ACL injuries most burdensome / A. Hallén, R. Tomás, J. Ekstrand [et al.] // *British Journal of Sports Medicine.* – 2024. – Vol. 58, № 3. – P. 128-135.
274. Uematsu, S. Symmetry of skin temperature comparing one side of the body to the other / S. Uematsu // *Thermology.* – 1985. – Vol. 1. – P. 4-7.

275. Understanding and preventing noncontact anterior cruciate ligament injuries: a review of the Hunt Valley II meeting, January 2005 / L. Y. Guffin, M. J. Albohm, E. A. Arendt [et al.] // American Journal of Sports Medicine. – 2006. – Vol. 34, № 9. – P. 1512-1532.
276. Upper extremity weight-training modifications for the injured athlete: a clinical perspective / M. Fees, T. Decker, L. Snyder-Mackler, M.J. Axe // The American Journal of Sports Medicine. – 1998. – Vol. 26, № 5. – P. 732-742.
277. Vardasca, R. Current issues in medical thermography / R. Vardasca, R. Simoes // Topics in Medical Image Processing and Computational Vision. – Berlin : Springer, 2013. – P. 223-237.
278. Vardasca, R. Symmetry of temperature distribution in the upper and the lower extremities / R. Vardasca // Thermology International. – 2008. – Vol. 18, № 4. – P. 154.
279. Vollmer, M. Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications / M. Vollmer, K.-P. Möllmann. – Weinheim: Wiley, 2010. – 613 p.
280. Watmough, D. J. The thermal scanning of a curved isothermal surface: implications for clinical thermography / D. J. Watmough, P. W. Fowler, R. Oliver // Physics in Medicine and Biology. – 1970. – Vol. 15, № 1. – P. 1-8.
281. Watts, A. T. Current use of infrared thermography in orthopaedic and bone or joint trauma patients – can we identify postoperative infection? A narrative systematic review / A. T. Watts, A. M. P. Boyle, V. Kutuzov [et al.] // Strategies in Trauma and Limb Reconstruction. – 2024. – Vol. 19, № 3. – P. 141-148.
282. Webster, K. E. Tibial rotation in anterior cruciate ligament reconstructed knees during single limb hop and drop landings / K. E. Webster, J. A. Feller // Clinical Biomechanics. – 2012. – Vol. 27, № 5. – P. 475-479.
283. Webster, K. E. What is the evidence for and validity of return-to-sport testing after anterior cruciate ligament reconstruction surgery? A systematic review and meta-analysis / K. E. Webster, T. E. Hewett // Sports Medicine. – 2019. – Vol. 49, № 6. – P. 917-929.
284. Wiggins, A. J. Risk of secondary injury in younger athletes after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis / A. J. Wiggins,

- R. K. Grandhi, D. K. Schneider [et al.] // The American Journal of Sports Medicine. – 2016. – Vol. 44, № 7. – P. 1861-1876.
285. Young Athletes Who Return to Sport Before 9 Months After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Have a Rate of New Injury 7 Times That of Those Who Delay Return / S. Beischer, L. Gustavsson, E.H. Senorski [et al.] // Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy. – 2020. – Vol. 50, № 2. – P. 83-90.
286. Younger patients are at increased risk for graft rupture and contralateral injury after anterior cruciate ligament reconstruction / K. E. Webster, J. A. Feller, W. B. Leigh, A. K. Richmond // The American Journal of Sports Medicine. – 2014. – Vol. 42, № 3. – P. 641-647.
287. Zaproudina, N. Reproducibility of infrared thermography measurements in healthy individuals / N. Zaproudina, V. Varmavuo, O. Airaksinen, M. Narhi // Physiological Measurement. – 2008. – Vol. 29, № 4. – P. 515-524.
288. Zbrojkiewicz, D. Increasing rates of anterior cruciate ligament reconstruction in young Australians, 2000-2015 / D. Zbrojkiewicz, C. Vertullo, J. E. Grayson // Medical Journal of Australia. – 2018. – Vol. 208, № 8. – P. 354-358.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Рекомендации по реабилитации при разрыве ПКС, основанные на принципах доказательной медицины

Реабилитационная фаза	Основные цели	Описание
Предоперационная фаза	Отсутствие выпота коленного сустава, полный объем активных и пассивных движений 90% симметрии силы четырехглавой мышцы бедра.	Для пациентов, которые планируют пластику ПКС, с целью улучшения результата лечения рекомендована предоперационная реабилитация [76, 107]. Реабилитация должна начинаться как можно раньше после травмы. В целом предоперационная реабилитация по перечню упражнений соответствует острой и промежуточной фазам реабилитации с крайне важным акцентом на достижении полного разгибания коленного сустава и восстановления силы квадрицепса. Дефицит разгибания коленного сустава и слабость четырехглавой мышцы коррелируют с увеличением количества ревизий после пластики ПКС [189]. У пациентов с восстановленным объемом движений, отсутствием выпота и способностью выполнить тест с прыжком на одной ноге можно довольно безопасно выполнять интенсивные силовые и плиометрические тренировки. Частота осложнений 3,9% [78]. Предоперационная и послеоперационная реабилитация приводит к лучшим функциональными результатам через два года после реконструкции ПКС [90, 129].
Ранняя фаза (период острого воспаления)	Отсутствует выпот в коленном суставе, полный активный и пассивный объем	В первый день после травмы или пластики ПКС, лечение должно быть направлено на полное пассивное разгибание коленного сустава, восстановление функции четырехглавой мышцы бедра. Программа состоит из разработки объема движений, тренировки мышц бедра (например,

	движений, возможность поднять выпрямленную ногу.	изометрические напряжения четырехглавой мышцы бедра, активные подъемы выпрямленной ноги и переразгибания в коленном суставе посредством вывешивания голени с края кушетки, скольжения пяткой по кушетке), контроля выпота посредством регулирования объема нагрузки [189]. Критериями может использоваться, для уменьшения боли, но не эффективна для уменьшения отека [189]. В дополнение к выпеперечисленному для восстановления силы четырехглавой мышцы бедра может применяться высокоинтенсивная ЭНМС [122]. В послеоперационном периоде рекомендованы упражнения как в открытой, так и закрытой кинематической цепи [189].
Промежуточная фаза	Возможность контроля разгибания коленного сустава в положении под нагрузкой, 80% симметрии силы четырехглавой мышцы бедра, 80% симметрии при выполнении теста с прыжком при адекватном качестве выполнения движения.	Эта фаза преследует целью объединение нейромышечных и силовых тренировок [189]. Нейромышечные тренировки преследуют целью улучшение динамической стабильности коленного сустава, посредством достижения более выгодных стратегий проприоцептивного и мышечного контроля. Нейромышечная тренировка является общим термином, который включает пертурбационные тренировки, тренировку баланса, тренировку ловкости и плиометрические нагрузки. Обычно в реабилитации применяется мультимодальный подход, и доказать, что один вид тренировки превосходит другой не представляется возможным. Бланшар и Глазго [285] описали теоретическую модель, которая может быть использована для определения стадийности процесса при нейромышечных тренировках. Изучение упражнения начинается с освоения составляющих его основу движений. Далее путем изменения таких составляющих как продолжительность, скорость выполнения, пройденное расстояние увеличивают сложность. Далее добавляют, так называемые «внешние факторы», такие как выведение из равновесия, препятствия или тренировки на

		нестабильных платформах. Чтобы подготовить атлета к выходу в спорт рекомендуется постепенно вводить упражнения с учетом специфики спорта [189]. Целью программы укрепления мышц является восстановление мышечной силы и достаточной мощности мышц для возвращения в спорт. Эти силовые упражнения начинаются с установочного периода, в котором подразумеваются более легкие нагрузки с большим количеством повторений, с постепенным переходом к тяжелым нагрузкам с меньшим количеством повторений. Программа силовых тренировок, которая включает в себя серии упражнений с вовлечением как одной так и обеих конечностей с постепенным переходом на принципы силовой тренировки для не травмированных пациентов лучше себя зарекомендовала чем тренировки с большим количеством повторений [251]. Если после выполнения упражнений пациент способен выполнить дополнительно два повторения к целевому количеству, в следующей тренировочной сессии количество повторений можно увеличивать [78].
Поздняя фаза	90% симметрии силы четырехглавой мышцы, 90% симметрии при выполнении теста с прыжком при адекватном качестве выполнения	Поздняя фаза реабилитации должна быть индивидуализирована под конкретные цели пациента и спортивные требования. Вид спорта и варианты физической активности могут значительно различаться. Понимание и контроль индивидуальных требований является ключом к успешной реабилитации. Как правило, эта фаза включает интенсивные силовые тренировки с учетом характера травмы, тренировки на ловкость, и специфические для вида спорта тренировки. После соответствия критериям возвращения в спорт по результатам батарей соответствующих

	упражнения, профилактика или лечение кинезиофобии, Нарботка специфических для вида спорта навыков сначала с акцентом на качестве движения и далее на количестве повторений.	тестов, спортсмен может постепенно возобновить неограниченные занятия спортом. Это достигается этапным его допуском сначала к модифицированному спортивному участию (например, участие в бесконтактных тренировках), далее к участию в контакте, с ограничением количества игрового времени, и далее без ограничения активности.
Фаза профилактики повторной травмы оперированного коленного сустава.	Поддержание силы мышц и динамической стабильности, способность переносить нагрузку.	Программа профилактики травматизма должна выполняться как минимум два раза в неделю на этапе вхождения в спортивную нагрузку, и далее после возвращения в спорт. Эффективные программы профилактики травм были разработаны для различных видов спорта, сопровождающихся изменением направления движения [249], и включают в себя силовые тренировки, а также отработку навыков безопасных двигательных стратегий. Риск спортивной травмы увеличивается с возрастанием интенсивности и частоты участия в соревнованиях. Соответствующее управление нагрузкой также может быть использовано для снижения риска повторной травмы оперированной конечности [25].

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Опросники, использованные в работе

Вопрос	1. Болит ли у вас коленный сустав?	2. Требуется ли вам дополнительные средства опоры?	3. Сколько раз за последний месяц болел коленный сустав?	4. Интенсивность боли по шкале от 1 до 10	5. Отвечает ли у вас коленный сустав?	6. Насколько сильно отекает коленный сустав?	7. Бывают ли щелчки или чувство заклинивания в суставе?	8. Бывает ли у вас чувство нестабильности?	9. Общий уровень активности?	10. Испытываете ли вы трудности при ходьбе?
Cincinnati	Нет (20) При занятии интенсивным спортом (16) При занятии любительским спортом (12) Длительность повседневной жизни(8) Много ограничений(4) Тяжелые проблемы(0)	 Нет (5) Костыль или трость (2) Нагрузка на коленность (0)			Нет (10) При занятии интенсивным спортом (8) При занятии любительским спортом(6) Длительность повседневной жизни, не часто(4) Возникает при легкой работе, уменьшается при отдыхе (2) Отек постоянно, при небольшой работе(0)	Нет (4) Незначительно (3). Умеренно (2). Значительно (1). Очень сильно (0). сейчас отекает	Нет (15) Щелчки, без заклинивания (10) Иногда заклинивает (6) Часто заклинивает (2) Блокада в настоящее время (0)	Нет (20) Редко при спорте (16). Часто при спорте (12). Иногда при повседневной жизни (8). Часто при повседневной жизни (4). Тяжелые проблемы, не может поворачиваться (0).	Без ограничений(20). Интенсивная активность с осторожностью (16). Легкая активность, симптомы редки (12). Незначительная легкая активность, симптомы редки при ходьбе, легкая работа (8). Невозможна легкая активность, и повседневная активность (4). Симптомы часто при ходьбе и повседневной активности (0).	Без ограничений (20). Незначительные ограничения (8). Умеренные ограничения (без симптомов - тем по гладкой поверхности) (6). Значительные ограничения (без симптомов - 50см по гладкой поверхности) (4). Выраженные ограничения (требуются для средства опоры) (2).
Количество баллов Cincinnati										
IKDS	при Очень интенсивные нагрузки - спорт с ускорениями и поворотами (футбол, баскетбол) (4). Тяжелая физическая нагрузка или теннис, лыжи (3). Умеренная нагрузка или без трюсов (2). Легкая нагрузка по типу ходьбы, уборки по дому или работы в саду (1). Периодические виды нагрузок невозможны из-за боли (0).	 Нет (5) Костыль или трость (2) Нагрузка на коленность (0)	0 - 10 баллов 1 - 9 баллов 2 - 8 баллов 3 - 7 баллов 4 - 6 баллов 5 - 5 баллов 6 - 4 балла 7 - 3 балла 8 - 2 балла 9 - 1 балл 10 - 0 баллов	0 - 10 баллов 1 - 9 баллов 2 - 8 баллов 3 - 7 баллов 4 - 6 баллов 5 - 5 баллов 6 - 4 балла 7 - 3 балла 8 - 2 балла 9 - 1 балл 10 - 0 баллов	При занятии очень интенсивным спортом (футбол, баскетбол) (4). При занятии интенсивным спортом (теннис) (3). При занятии любительским спортом (2). При повседневной активности (1). Отек постоянно, при небольшой работе (0).	Нет (4). Незначительно (3). Умеренно (2). Значительно (1). Очень сильно (0). сейчас отекает	Да - 0, Нет - 1	При занятии очень интенсивным спортом (футбол, баскетбол) (4). При занятии интенсивным спортом (теннис) (3). При занятии любительским спортом(2). При повседневной активности (1). Постоянно(0).	Очень интенсивный спорт (футбол, баскетбол) (4) Интенсивный спорт (теннис, лыжи) (3). Любительский спорт (2). Повседневная активность (1). Активность невозможна (0)	
Количество баллов IKDS										
Lysholm	Нет (25) Непостоянная и легкая во время сильных нагрузок (20) Выраженная во время сильных нагрузок (15) Выраженная во время или после ходьбы более 2 км (10) Выраженная во время или после ходьбы менее 2 км (5) Постоянная (0)	 Нет (5) Костыль или трость (2) Нагрузка на коленность (0)			Нет (10) При сильных нагрузках(6). При обычных нагрузках(2). Постоянно(0).		Нет (15) Щелчки, без заклинивания (10) Иногда заклинивает (6) Часто заклинивает (2) Блокада в настоящее время (0)	Не бывает (25). Редко во время занятий спортом или при сильной нагрузке (20). Часто при занятии спортом или невозможность занятий спортом (6). Иногда при повседневной жизни (10) Часто при повседневной жизни (5) При каждом шаге (0)	Хромаете - Нет (5). Иногда (3). Постоянно (0).	
Количество баллов Lysholm										

[illegible]

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Описательная статистика всех измерений термографических параметров пациентов с осложненным и неосложненным течением послеоперационного периода и их сравнение для всех этапов исследования (до и после операции)

Параметр	Пациенты с неосложненным течением								Пациенты с осложненным течением						p2
	n	pl	m	σ	Q1	Me	Q2	n	pl	m	σ	Q1	Me	Q2	
Min Inv	491	p<0,001	30,0	2,4	28,9	30,4	31,5	134	p<0,001	30,0	2,1	28,8	30,4	31,4	0,847
Max Inv	491	0,001	33,5	1,7	32,5	33,7	34,8	134	0,200	33,4	1,6	32,4	33,6	34,6	0,436
Средняя Inv	491	0,186	31,9	1,8	30,8	32,1	33,2	134	0,200	31,9	1,6	30,8	32,1	33,1	0,744
Min	491	p<0,001	28,9	2,4	27,8	29,3	30,5	134	p<0,001	28,9	2,2	27,7	29,4	30,6	0,627
Max	491	0,156	32,2	1,5	31,2	32,3	33,3	134	0,029	32,2	1,4	31,3	32,4	33,3	0,835
Средняя	491	0,002	30,6	1,7	29,5	30,8	31,8	134	0,001	30,6	1,6	29,5	30,8	31,7	0,764
Delta Min	491	p<0,001	1,1	1,4	0,2	0,9	1,9	134	0,001	1,0	1,3	0,3	0,8	1,7	0,819
Delta Max	491	p<0,001	1,3	1,2	0,5	1,2	2,1	134	0,200	1,3	1,0	0,5	1,4	2,0	0,715
Delta Средн.	491	p<0,001	1,3	1,2	0,5	1,1	2,1	134	0,200	1,3	0,9	0,6	1,3	2,0	0,784
Patellar Inv Min	489	0,088	31,0	1,9	29,8	31,1	32,4	132	0,200	31,2	1,8	30,1	31,3	32,5	0,340

Параметр	Пациенты с неосложненным течением							Пациенты с осложненным течением							p2
	n	pl	m	σ	Q1	Me	Q2	n	pl	m	σ	Q1	Me	Q2	
Patellar Inv Max	489	0,200	32,5	1,9	31,4	32,6	33,8	132	0,200	32,5	1,7	31,1	32,5	33,7	0,721
Patellar Inv Средн	489	0,200	31,7	1,9	30,5	31,8	33,1	132	0,200	31,8	1,8	30,7	31,9	33,0	0,899
Patellar Min	489	0,005	29,6	1,9	28,3	29,8	31,0	132	p<0,001	29,7	1,8	28,7	30,0	31,0	0,276
Patellar Max	489	p<0,001	31,0	1,8	29,9	31,2	32,2	132	0,001	31,0	1,7	30,0	31,1	32,2	0,984
Patellar Средн	489	0,004	30,3	1,9	29,1	30,5	31,5	132	p<0,001	30,3	1,8	29,3	30,6	31,6	0,489
Delta Patellar Min	489	p<0,001	1,4	1,4	0,4	1,1	2,3	132	0,026	1,5	1,2	0,5	1,3	2,3	0,432
Delta Patellar Max	489	p<0,001	1,5	1,5	0,4	1,2	2,5	132	0,019	1,5	1,3	0,6	1,3	2,5	0,381
Delta Patellar Средн.	489	p<0,001	1,5	1,5	0,4	1,2	2,4	132	0,032	1,5	1,3	0,6	1,2	2,4	0,526
Lat Inv Min	92	0,127	28,0	2,3	26,4	28,4	29,5	33	0,173	28,2	2,5	27,0	28,7	30,1	0,493
Lat Inv Max	92	0,200	32,4	1,6	31,5	32,6	33,3	33	0,200	32,7	1,4	32,1	32,6	33,7	0,396
Lat Inv Средн	92	0,200	30,8	1,6	29,7	30,9	31,6	33	0,200	31,0	1,3	30,3	30,9	32,1	0,473
Lat Min	92	0,008	27,7	2,1	26,4	28,2	29,1	33	0,200	27,8	2,3	26,2	28,1	29,6	0,720
Lat Max	92	0,200	31,9	1,5	31,0	31,9	32,8	33	0,200	32,1	1,4	31,2	32,3	33,0	0,608
Lat Средн	92	0,200	30,2	1,5	29,2	30,3	31,2	33	0,200	30,4	1,4	29,0	30,3	31,2	0,604

Параметр	Пациенты с неосложненным течением							Пациенты с осложненным течением							p2
	n	pl	m	σ	Q1	Me	Q2	n	pl	m	σ	Q1	Me	Q2	
Delta Lat Min	92	0,200	0,3	2,2	-0,9	0,5	2,0	33	0,144	0,4	2,5	-0,7	0,4	1,5	0,935
Delta Lat Max	92	0,200	0,5	1,1	-0,3	0,5	1,2	33	0,200	0,6	0,8	0,1	0,6	1,0	0,521
Delta Lat Средн	92	0,171	0,6	1,0	0,0	0,4	1,3	33	0,200	0,6	0,7	0,0	0,6	1,2	0,626
Med Inv Min	92	0,054	28,2	2,5	26,7	28,5	30,1	33	0,200	28,7	1,9	27,4	28,5	30,4	0,438
Med Inv Max	92	0,177	32,4	1,7	31,2	32,5	33,6	33	0,023	32,5	1,7	30,8	32,3	34,2	0,991
Med Inv Средн	92	0,090	30,8	1,7	29,7	31,0	31,9	33	0,033	30,9	1,6	29,5	30,7	32,3	0,788
Med Min	92	0,200	28,0	1,9	26,7	28,1	29,2	33	0,200	27,6	2,2	26,1	27,7	29,0	0,467
Med Max	92	0,200	31,7	1,7	30,5	31,8	32,9	33	0,200	31,6	1,8	30,3	31,3	32,8	0,566
Med Средн	92	0,200	30,2	1,6	29,2	30,2	31,5	33	0,200	30,1	1,6	28,9	30,0	31,0	0,610
Delta Med Min	93	0,001	0,2	2,2	-0,6	0,4	1,2	33	0,170	1,0	1,9	-0,1	1,0	2,2	0,041
Delta Med Max	93	0,164	0,7	1,2	-0,2	0,6	1,4	33	0,200	0,9	0,9	0,1	0,8	1,6	0,193
Delta Med Средн	93	0,134	0,6	0,9	-0,2	0,5	1,1	33	0,200	0,8	0,8	0,2	0,7	1,6	0,088
Posterior Inv Min	89	0,016	27,0	4,0	24,8	27,6	29,6	33	0,090	26,6	3,2	23,5	25,8	29,8	0,320
Posterior Inv Max	89	p<0,001	32,1	3,7	31,5	32,5	33,3	33	0,200	32,6	1,3	31,5	32,4	33,5	0,798

	Пациенты с неосложненным течением								Пациенты с осложненным течением						p2
Параметр	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2	
Posterior Inv Средн	89	p<0,001	30,4	3,5	29,7	30,7	31,8	33	0,200	30,8	1,3	29,8	30,7	31,8	0,578
Posterior Min	89	0,005	27,2	3,9	25,2	27,6	29,8	33	0,200	27,1	2,9	24,4	26,4	29,5	0,484
Posterior Max	89	p<0,001	32,2	3,7	31,8	32,6	33,5	33	0,200	32,6	1,4	31,5	32,6	33,7	0,952
Posterior Средн	89	p<0,001	30,6	3,5	30,0	30,8	31,8	33	0,200	31,0	1,4	29,8	30,9	31,9	0,940
Delta Posterior Min	89	0,056	-0,1	1,9	-1,1	0,0	1,1	33	0,200	-0,5	1,5	-1,3	-0,3	0,3	0,215
Delta Posterior Max	89	0,200	-0,1	0,7	-0,6	-0,1	0,3	33	0,200	-0,1	0,5	-0,4	-0,1	0,3	0,543
Delta Posterior Средн	89	0,200	-0,2	0,5	-0,5	-0,2	0,1	33	0,176	-0,1	0,4	-0,3	-0,2	0,1	0,440

Примечание: N – численность группы; m – среднее значение; σ – стандартное отклонение; Me – медиана; Q1 и Q3 – нижний и верхний

квартили; p1 – уровень значимости по критерию Колмогорова-Смирнова; p2 – уровень значимости по критерию Манна-

Уитни

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Описательная статистика параметров пациентов с неосложненным и осложненным течением на входе в исследование

Параметр	Пациенты с неосложненным течением								Пациенты с осложненным течением						p2
	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2	
Min Inv	146	p<0,001	29,5	2,6	27,8	30,1	31,4	36	0,105	30,0	2,0	28,4	30,3	31,7	0,378
Max Inv	146	0,200	32,8	1,7	31,6	33,0	34,2	36	0,200	33,2	1,4	32,3	33,5	34,4	0,230
Средняя Inv	146	0,024	31,3	1,9	30,1	31,5	32,8	36	0,200	31,8	1,5	30,4	32,1	33,2	0,225
Min	146	p<0,001	29,0	2,6	27,8	29,7	30,7	36	0,029	29,2	2,4	27,5	29,9	30,9	0,572
Max	146	0,200	32,2	1,6	31,1	32,4	33,4	36	0,095	32,4	1,6	31,2	32,9	33,5	0,561
Средняя	146	0,037	30,7	1,8	29,5	31,0	32,0	36	0,188	30,9	1,8	29,4	31,2	32,1	0,518
Delta Min	146	p<0,001	0,5	1,2	-0,1	0,3	0,8	36	0,041	0,8	1,3	0,2	0,7	1,2	0,062
Delta Max	146	0,001	0,6	0,9	0,0	0,4	1,1	36	0,169	0,8	1,0	0,1	0,7	1,8	0,228
Delta Средн.	146	0,002	0,6	0,9	0,0	0,5	1,1	36	0,200	0,9	1,0	0,2	0,8	1,7	0,111
Patellar Inv Min	144	0,200	30,5	2,0	29,4	30,7	31,9	36	0,074	30,9	2,0	29,5	31,4	32,4	0,239
Patellar Inv Max	144	0,068	31,8	1,8	30,9	31,9	33,2	36	0,200	32,2	1,7	30,9	32,4	33,5	0,413

Параметр	Пациенты с неосложненным течением							Пациенты с осложненным течением							p2
	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2	
Patellar Inv Средн	144	0,078	31,1	1,9	30,2	31,3	32,6	36	0,089	31,5	1,9	29,8	31,8	32,9	0,316
Patellar Min	144	0,001	29,8	2,0	28,4	30,3	31,2	36	0,046	29,9	2,2	28,4	30,3	31,4	0,654
Patellar Max	144	0,076	31,2	1,9	29,9	31,5	32,5	36	0,200	31,2	2,0	29,9	31,6	32,6	0,871
Patellar Средн	144	0,011	30,5	2,0	29,1	30,8	31,9	36	0,200	30,5	2,1	28,9	30,9	32,1	0,713
Delta Patellar Min	144	0,001	0,6	1,0	-0,1	0,6	1,1	36	0,148	1,0	1,2	0,1	0,7	1,7	0,147
Delta Patellar Max	144	p<0,001	0,7	1,2	-0,1	0,4	1,2	36	0,200	1,0	1,3	0,2	0,8	1,9	0,097
Delta Patellar Средн.	144	p<0,001	0,6	1,1	-0,1	0,4	1,2	36	0,075	1,0	1,3	0,1	0,8	1,6	0,119
Lat Inv Min	35	0,153	27,6	2,1	25,5	27,8	29,0	12	0,200	29,2	1,7	27,3	29,5	30,3	0,035
Lat Inv Max	35	0,200	32,3	1,4	31,1	32,6	33,4	12	0,200	32,7	1,6	31,4	32,7	33,8	0,457
Lat Inv Средн	35	0,200	30,6	1,5	29,4	30,9	31,5	12	0,200	31,1	1,6	29,6	31,0	32,4	0,502
Lat Min	35	0,004	27,9	2,0	27,0	28,3	29,2	12	0,200	27,8	2,6	26,2	27,7	29,3	0,893
Lat Max	35	0,200	31,9	1,6	31,0	31,9	32,8	12	0,200	32,2	1,7	31,1	31,9	33,1	0,836
Lat Средн	35	0,200	30,3	1,6	29,5	30,3	31,2	12	0,200	30,3	1,7	28,9	30,4	31,1	0,951
Delta Lat Min	35	0,200	-0,4	1,8	-1,6	-0,1	0,8	12	0,084	1,4	2,0	-0,1	0,8	2,7	0,017

Параметр	Пациенты с неосложненным течением							Пациенты с осложненным течением							p2
	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2	
Delta Lat Max	35	0,200	0,4	0,9	-0,3	0,5	1,0	12	0,200	0,5	1,0	-0,3	0,4	1,4	0,733
Delta Lat Средн	35	0,108	0,3	0,9	-0,5	0,3	1,2	12	0,200	0,7	0,9	-0,1	0,7	1,7	0,137
Med Inv Min	35	0,200	28,1	2,5	26,5	28,4	30,1	12	0,114	29,0	1,9	27,5	28,8	30,4	0,335
Med Inv Max	35	0,200	32,3	1,7	31,5	32,5	33,4	12	0,200	33,0	1,9	31,0	33,1	34,4	0,205
Med Inv Средн	35	0,200	30,7	1,8	29,7	30,9	31,9	12	0,200	31,3	1,7	29,5	31,4	32,5	0,341
Med Min	35	0,200	28,1	1,7	26,9	27,8	29,7	12	0,200	27,9	2,4	26,8	28,2	29,6	0,922
Med Max	35	0,200	31,8	1,6	30,7	32,1	33,1	12	0,200	31,7	2,3	29,8	31,6	33,1	0,687
Med Средн	35	0,200	30,3	1,6	29,2	30,2	31,6	12	0,200	30,1	2,2	28,6	30,1	31,6	0,643
Delta Med Min	35	0,200	0,0	2,2	-1,4	0,0	1,0	12	0,200	1,0	1,9	-0,2	1,1	2,6	0,118
Delta Med Max	35	0,025	0,5	1,2	-0,2	0,2	1,3	12	0,133	1,4	1,0	0,6	1,7	2,1	0,017
Delta Med Средн	35	0,100	0,4	1,0	-0,4	0,1	0,9	12	0,017	1,1	1,0	0,4	1,6	1,9	0,028
Posterior Inv Min	34	0,163	27,0	2,7	24,6	27,5	29,6	12	0,200	27,4	3,4	23,9	27,6	30,7	0,643
Posterior Inv Max	34	0,200	32,2	1,3	31,2	32,4	33,1	12	0,200	32,7	1,5	31,3	32,6	34,0	0,423
Posterior Inv Средн	34	0,200	30,5	1,5	29,7	30,6	31,8	12	0,200	31,0	1,7	29,2	30,9	32,4	0,499

Параметр	Пациенты с неосложненным течением								Пациенты с осложненным течением						p2
	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2	
Posterior Min	34	0,200	26,9	2,8	23,9	27,2	29,3	12	0,200	27,7	2,9	25,6	27,8	29,7	0,445
Posterior Max	34	0,200	32,6	1,2	31,8	32,4	33,7	12	0,200	32,8	1,7	31,5	32,7	33,9	0,910
Posterior Средн	34	0,200	30,9	1,4	30,0	30,6	31,9	12	0,200	31,2	1,7	29,7	31,0	32,3	0,980
Delta Posterior Min	33	0,065	0,2	2,1	-0,9	0,3	1,4	12	0,200	-0,3	1,5	-1,0	-0,1	1,0	0,383
Delta Posterior Max	33	0,200	-0,4	0,6	-0,8	-0,5	0,0	12	0,200	-0,1	0,6	-0,5	-0,1	0,4	0,208
Delta Posterior Средн	33	0,200	-0,3	0,4	-0,7	-0,3	0,0	12	0,200	-0,2	0,5	-0,6	-0,2	0,0	0,513

Примечание: N – численность группы; m – среднее значение; σ – стандартное отклонение; Me – медиана; Q1 и Q3 – нижний и верхний квартили; p1 – уровень значимости по критерию Колмогорова-Смирнова; p2 – уровень значимости по критерию Манна-Уитни

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Описательная сравнительная статистика параметров пациентов с инфекционно-воспалительными и другими неблагоприятными клиническими событиями

Параметр	Инфекционно-воспалительные неблагоприятные клинические события								Другие неблагоприятные клинические события							
	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2		n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2	p2
Min Inv	8	0,200	29,3	2,6	27,3	29,6	31,5		28	0,056	30,2	1,8	28,9	30,6	31,8	0,413
Max Inv	8	0,161	33,3	1,0	32,4	33,2	34,3		28	0,200	33,2	1,5	31,9	33,5	34,4	0,834
Средняя Inv	8	0,200	31,8	1,2	30,7	32,0	32,9		28	0,200	31,8	1,6	30,3	32,1	33,3	0,864
Min	8	0,062	28,4	3,6	26,1	29,9	30,9		28	0,059	29,4	2,1	27,9	29,9	31,0	0,621
Max	8	0,200	32,1	1,4	30,9	32,2	33,5		28	0,010	32,5	1,7	31,3	33,0	33,5	0,493
Средняя	8	0,200	30,7	1,8	29,1	31,0	32,4		28	0,192	30,9	1,9	29,6	31,4	32,1	0,732
Delta Min	8	0,200	0,9	2,3	-0,7	0,4	1,9		28	0,183	0,8	1,0	0,2	0,7	1,2	0,819
Delta Max	8	0,200	1,2	1,2	0,2	1,0	2,4		28	0,200	0,7	0,9	0,01	0,7	1,6	0,322
Delta Средн.	8	0,200	1,1	1,2	0,1	0,6	2,4		28	0,200	0,9	0,9	0,2	0,8	1,6	0,954
Patellar Inv Min	8	0,200	30,8	2,1	29,5	31,0	32,4		28	0,033	30,9	2,0	29,5	31,6	32,4	0,849

Параметр	Инфекционно-воспалительные неблагоприятные клинические события								Другие неблагоприятные клинические события							
	n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2		n	p1	m	σ	Q1	Me	Q2	p2
Patellar Inv Max	8	0,200	32,2	1,4	30,9	32,1	33,5		28	0,200	32,2	1,8	30,8	32,5	33,5	0,985
Patellar Inv Средн	8	0,200	31,5	1,7	29,9	31,5	32,9		28	0,070	31,5	1,9	29,8	32,1	32,9	0,985
Patellar Min	8	0,200	29,9	2,4	27,6	30,2	31,8		28	0,079	29,9	2,1	28,8	30,4	31,4	0,938
Patellar Max	8	0,200	30,9	2,3	29,0	31,1	33,0		28	0,130	31,2	1,9	30,0	31,8	32,6	0,568
Patellar Средн	8	0,200	30,3	2,4	28,2	30,6	32,3		28	0,140	30,5	2,1	29,4	31,1	32,1	0,676
Delta Patellar Min	8	0,041	,9	1,4	-0,3	0,3	2,5		28	0,200	1,0	1,2	0,2	0,8	1,6	0,594
Delta Patellar Max	8	0,088	1,4	1,5	-0,1	1,1	3,0		28	0,122	0,9	1,3	0,2	0,8	1,4	0,648
Delta Patellar Cp едн.	8	0,140	1,1	1,4	0,0	0,6	2,8		28	0,200	0,9	1,3	0,1	0,8	1,6	0,849

Примечание: N – численность группы; m – среднее значение; σ – стандартное отклонение; Me – медиана; Q1 и Q3 – нижний и верхний квартили; p1 – уровень значимости по критерию Колмогорова-Смирнова; p2 – уровень значимости по критерию Манна-Уитни. Для совокупности 18 термографических параметров применена поправка Беньямини-Хохберга; после коррекции статистически значимых различий не выявлено.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Анализ достоверности различий показателей между временными блоками в группе пациентов с неосложненным течением послеоперационного периода

Параметр/временной блок			2	3	4	5	6	7	8
		N	53	44	53	41	120	61	19
Min Inv	1	98	0,005*	0,050*	0,497	0,183	0,129	0,120	0,548
	2	53		0,491	0,066	0,417	0,134	p<0,001*	0,024
	3	44			0,242	0,712	0,425	0,006*	0,071
	4	53				0,514	0,525	0,072	0,319
	5	41					0,849	0,026*	0,142
	6	120						0,006*	0,106
	7	61							0,764
Max Inv	1	98	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,937	0,910
	2	53		0,024*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	3	44			0,027*	0,007*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	4	53				0,478	0,133	p<0,001*	p<0,001*
	5	41					0,574	p<0,001*	0,008*
	6	120						p<0,001*	0,005*
	7	61							0,747

Параметр/временной блок			2	3	4	5	6	7	8
Средняя Inv	1	98	p<0,001*	p<0,001*	0,001*	0,003*	0,001*	0,477	0,809
	2	53		0,107	p<0,001*	0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	3	44			0,050	0,082	0,005*	p<0,001*	p<0,001*
	4	53				0,912	0,619	p<0,001*	0,011
	5	41					0,574	0,002*	0,014*
	6	120						p<0,001*	0,012*
	7	61							0,752
Min	1	98	0,630	0,001*	p<0,001*	0,326	0,056	0,003*	0,079
	2	53		0,001*	p<0,001*	0,224	0,039*	0,006*	0,071
	3	44			0,171	0,069	0,062	0,471	0,323
	4	53				0,009*	0,001*	0,047*	0,055
	5	41					0,805	0,189	0,378
	6	120						0,207	0,573
	7	61							0,782

Параметр/временной блок			2	3	4	5	6	7	8
Max	1	98	0,013*	0,099	0,001*	0,439	0,509	0,029*	0,570
	2	53		0,001*	p<0,001*	0,006*	0,002*	p<0,001*	0,022*
	3	44			0,101	0,518	0,223	0,760	0,330
	4	53				0,026*	0,001*	0,110	0,016*
	5	41					0,762	0,266	0,975
	6	120						0,110	0,971
	7	61							0,229
	1	98	0,199	0,005*	p<0,001*	0,299	0,322	0,014*	0,267
	2	53		0,001*	p<0,001*	0,069	0,045*	0,004*	0,125
	3	44			0,132	0,136	0,028*	0,463	0,217
Средняя	4	53				0,005*	p<0,001*	0,019*	0,011*
	5	41					0,784	0,275	0,679
	6	120						0,115	0,672
	7	61							0,494

Параметр/временной блок			2	3	4	5	6	7	8
Delta Min	1	98	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,010*
	2	53		0,002*	0,001*	0,825	0,975	0,194	0,242
	3	44			0,688	0,003*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	4	53				0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	5	41					0,801	0,078	0,098
	6	120						0,037*	0,110
	7	61							0,804
Delta Max	1	98	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,292
	2	53		0,030*	0,023*	0,004*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	3	44			0,931	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	4	53				p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	5	41					0,079	p<0,001*	p<0,001*
	6	120						p<0,001*	p<0,001*
	7	61							0,010*

Параметр/временной блок			2	3	4	5	6	7	8
Delta Средн.	1	98	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,077
	2	53		0,002*	0,004*	0,033*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	3	44			0,911	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	4	53				p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	5	41					0,008*	p<0,001*	p<0,001*
	6	120						p<0,001*	p<0,001*
	7	61							0,086
Patellar Inv Min	1	98	p<0,001*	p<0,001*	0,042*	0,009*	0,001*	0,611	0,965
	2	53		0,147	p<0,001*	0,007*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	3	44			0,061	0,227	0,067	p<0,001*	0,006*
	4	53				0,575	0,572	0,027*	0,179
	5	41					0,704	0,008*	0,070
	6	120						0,001*	0,039*
	7	61							0,688

Параметр/временной блок			2	3	4	5	6	7	8
Patellar Inv Max		N	53	44	53	41	120	61	19
	1	98	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,856	0,985
	2	53		0,018*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	3	44			0,057	0,021*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	4	53				0,591	0,173	p<0,001*	0,001*
	5	41					0,570	0,003*	0,019*
	6	120						p<0,001*	0,006*
Patellar Inv Средн	7	61							0,832
	1	98	p<0,001*	p<0,001*	0,001	0,004	p<0,001*	0,778	0,985
	2	53		0,058	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	3	44			0,057	0,049*	0,006*	p<0,001*	p<0,001*
	4	53				0,917	0,545	0,001*	0,011*
	5	41					0,759	0,010*	0,060
	6	120						p<0,001*	0,016*
	7	61							0,722

Параметр/временной блок			2	3	4	5	6	7	8
Patellar Min		N	53	44	53	41	120	61	19
	1	98	0,661	p<0,001*	p<0,001*	0,484	0,280	0,023*	0,462
	2	53		0,001*	p<0,001*	0,288	0,203	0,046*	0,527
	3	44			0,261	0,026*	0,002*	0,053	0,012*
	4	53				0,003*	p<0,001*	0,004*	0,003*
	5	41					0,998	0,333	0,943
	6	120						0,203	0,912
Patellar Max	7	61							0,305
	1	98	0,203	p<0,001*	p<0,001*	0,344	0,291	0,029*	0,349
	2	53		p<0,001*	p<0,001*	0,054	0,044*	0,004*	0,078
	3	44			0,330	0,030*	0,002*	0,061	0,041*
	4	53				0,004*	p<0,001*	0,004*	0,006*
	5	41					0,795	0,336	0,769
	6	120						0,207	0,724
Patellar Max	7	61							0,491

Параметр/временной блок			2	3	4	5	6	7	8
Patellar Средн	1	98	0,467	p<0,001*	p<0,001*	0,305	0,268	0,017*	0,478
	2	53		p<0,001*	p<0,001*	0,138	0,128	0,017*	0,335
	3	44			0,268	0,025*	0,001*	0,040*	0,007*
	4	53				0,002*	p<0,001*	0,002*	0,001*
	5	41					0,887	0,369	0,975
	6	120						0,165	0,936
	7	61							0,266
Delta Patellar Min	1	98	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,231
	2	53		0,004*	0,085	0,034*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	3	44			0,270	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	4	53				p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	5	41					0,065	p<0,001*	p<0,001*
	6	120						0,002*	0,001*
	7	61							0,076

Параметр/временной блок		2	3	4	5	6	7	8
Delta Patellar Max	N	53	44	53	41	120	61	19
	1	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,085
	2		0,001*	0,067	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	3			0,302	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	4				p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	5					0,043*	p<0,001*	p<0,001*
	6						0,007*	p<0,001*
Delta Patellar Средн.	7							0,028*
	1	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,153
	2		0,002*	0,048*	0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	3			0,386	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	4				p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	5					0,060	p<0,001*	p<0,001*
	6						0,007*	p<0,001*
	7							0,055

Примечание: p – уровень значимости (критерий Вилкоксона), * при p<0,05 имеется статистически значимое различие между оперированной конечностью и контралатеральной конечностью.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Анализ достоверности различий показателей между временными блоками в группе пациентов с осложненным течением послеоперационного периода

Параметр/временной блок		N	2	3	4	5	6	7	8
			8	4	14	11	30	26	23
Min Inv	1	18	0,470	0,932	0,254	0,138	0,180	0,014*	0,005*
	2	8		0,610	1,000	0,934	0,943	0,700	0,542
	3	4			0,671	0,514	0,521	0,502	0,413
	4	14				0,870	0,743	0,395	0,188
	5	11					0,670	0,539	0,593
	6	30						0,151	0,104
	7	26							0,703
Max Inv	1	18	0,085	0,148	0,254	0,787	0,823	0,403	0,047*
	2	8		0,734	0,260	0,083	0,053	0,035*	0,014*
	3	4			0,288	0,117	0,109	0,051	0,034*
	4	14				0,477	0,290	0,140	0,010*
	5	11					0,953	0,561	0,136
	6	30						0,336	0,028*
	7	26							0,161

Параметр/временной блок		N	2	3	4	5	6	7	8
Средняя Inv	1	18	0,266	0,268	0,790	1,000	0,594	0,083	0,005*
	2	8		0,610	0,375	0,215	0,142	0,044*	0,013*
	3	4			0,396	0,433	0,240	0,088	0,060
	4	14				0,827	0,562	0,133	0,018
	5	11					0,895	0,343	0,063
	6	30						0,181	0,011*
	7	26							0,241
Min	1	18	0,255	0,106	p<0,001*	0,010*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*
	2	8		0,865	0,495	0,457	0,775	0,745	0,857
	3	4			0,750	0,896	0,957	0,903	1,000
	4	14				0,622	0,480	0,561	0,552
	5	11					0,860	0,842	0,927
	6	30						0,718	0,936
	7	26							0,818

Параметр/временной блок		N	2	3	4	5	6	7	8
Max	1	18	0,802	0,349	0,007*	0,025*	0,003*	0,001*	0,009*
	2	8		0,497	0,070	0,117	0,115	0,047	0,190
	3	4			0,288	0,514	0,504	0,360	0,495
	4	14				0,784	0,420	0,671	0,491
	5	11					0,757	0,973	0,927
	6	30						0,640	0,740
	7	26							0,849
Средняя	1	18	0,291	0,125	0,001*	0,010*	0,001*	p<0,001*	0,001*
	2	8		0,734	0,339	0,457	0,567	0,417	0,684
	3	4			0,671	0,896	0,852	0,562	0,733
	4	14				0,956	0,605	0,955	0,573
	5	11					0,837	0,790	0,912
	6	30						0,593	0,851
	7	26							0,554

Параметр/временной блок		N	2	3	4	5	6	7	8
Delta Min	1	18	0,956	0,005*	p<0,001*	0,011*	0,003*	0,032*	0,546
	2	8		0,042*	0,014*	0,137	0,124	0,273	0,752
	3	4			0,339	0,240	0,103	0,077	0,004*
	4	14				0,547	0,222	0,079	p<0,001*
	5	11					0,860	0,425	0,034*
	6	30						0,495	0,015*
	7	26							0,107*
Delta Max	1	18	0,001*	0,003*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,001*	0,733
	2	8		0,042*	0,152	0,563	0,082	0,208	0,001*
	3	4			0,288	0,026*	0,005*	0,009*	0,002*
	4	14				0,023*	0,001*	0,007*	p<0,001*
	5	11					0,228	0,485	0,001*
	6	30						0,941	p<0,001*
	7	26							0,002*

Параметр/временной блок		N	2	3	4	5	6	7	8
Delta Средн.	1	18	p<0,001*	0,002*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,813
	2	8		0,126	0,633	0,934	0,267	0,074	p<0,001*
	3	4			0,167	0,037*	0,009*	0,010*	0,002*
	4	14				0,262	0,033*	0,008*	p<0,001*
	5	11					0,190	0,093	p<0,001*
	6	30						0,297	p<0,001*
	7	26							0,001*
Patellar Inv Min	1	18	0,222	0,202	0,909	0,621	0,558	0,050*	0,009*
	2	8		0,799	0,306	0,248	0,152	0,038*	0,019*
	3	4			0,288	0,192	0,149	0,067	0,054
	4	14				0,681	0,724	0,129	0,024*
	5	11					0,918	0,425	0,153
	6	30						0,189	0,031
	7	26							0,374

Параметр/временной блок		N	2	3	4	5	6	7	8
			8	4	14	11	30	26	23
Patellar Inv Max	1	18	0,075	0,125	0,595	0,753	0,949	0,277	0,049*
	2	8		0,610	0,232	0,083	0,032*	0,018*	0,008*
	3	4			0,243	0,090	0,097	0,067	0,054
	4	14				0,913	0,597	0,178	0,027*
	5	11					0,702	0,319	0,096
	6	30						0,240	0,012*
	7	26							0,171
Patellar Inv Средн	1	18	0,165	0,136	0,704	0,964	0,686	0,105	0,022*
	2	8		0,610	0,246	0,137	0,079	0,031*	0,015*
	3	4			0,339	0,117	0,092	0,067	0,054
	4	14				0,743	0,504	0,133	0,027*
	5	11					0,837	0,335	0,137
	6	30						0,267	0,018*
	7	26							0,161

Параметр/временной блок		N	2	3	4	5	6	7	8
Patellar Min	1	18	0,255	0,061	0,001*	0,009*	0,002*	p<0,001*	0,004*
	2	8		0,610	0,453	0,409	0,802	0,655	0,884
	3	4			0,832	0,695	0,688	1,000	0,415
	4	14				0,870	0,320	0,580	0,207
	5	11					0,556	0,842	0,416
	6	30						0,605	0,444
	7	26							0,158
Patellar Max	1	18	0,541	0,061	0,001*	0,016*	0,004*	p<0,001*	0,030*
	2	8		0,497	0,207	0,215	0,519	0,394	0,981
	3	4			0,750	0,695	0,708	0,903	0,604
	4	14				0,784	0,162	0,342	0,030*
	5	11					0,702	0,829	0,513
	6	30						0,379	0,438
	7	26							0,055

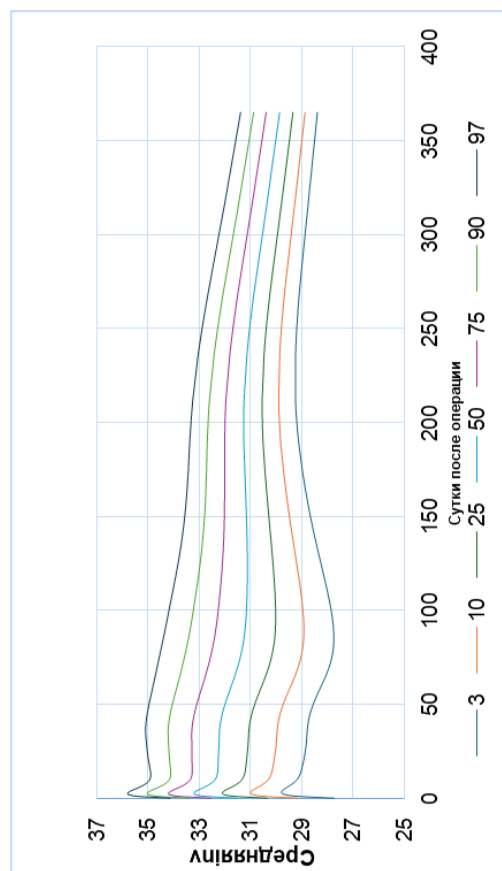
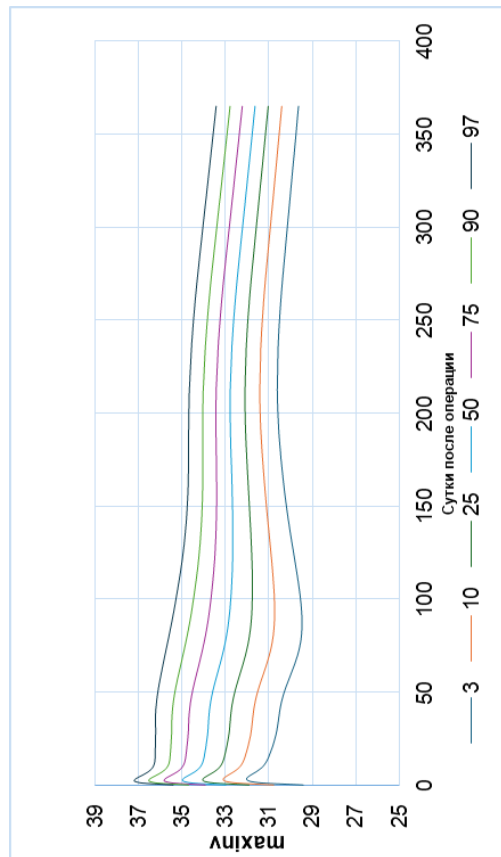
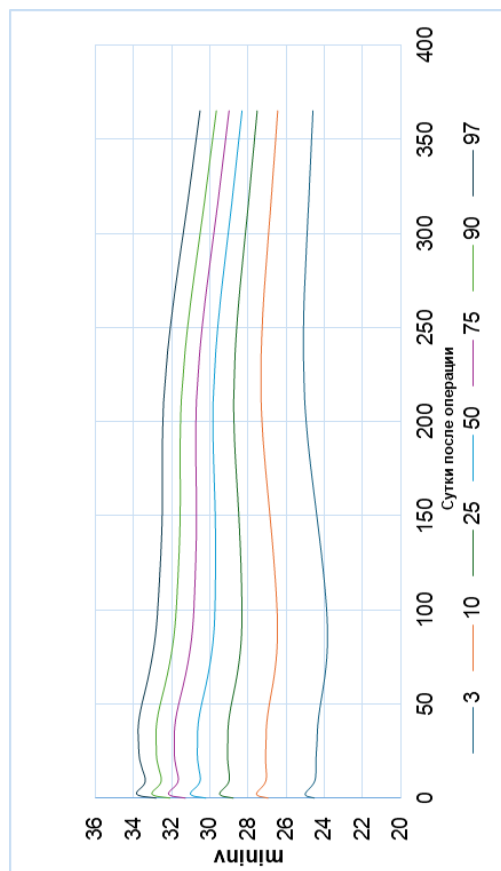
Параметр/временной блок		N	2	3	4	5	6	7	8
Рателлар Средн	1	18	0,291	0,050	0,001*	0,007*	0,002*	p<0,001*	0,013*
	2	8		0,610	0,246	0,322	0,667	0,490	0,884
	3	4			1,000	0,896	0,630	0,951	0,317
	4	14				0,913	0,246	0,600	0,106
	5	11					0,576	0,973	0,341
	6	30						0,349	0,405
	7	26							0,091
Delta Patellar Min	1	18	0,003*	0,002*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,004*	0,725
	2	8		0,396	0,891	0,364	0,063	0,042*	0,002*
	3	4			0,089	0,090	0,004*	0,004*	0,002*
	4	14				0,139	0,006*	0,002*	p<0,001*
	5	11					0,659	0,081	p<0,001*
	6	30						0,316	p<0,001*
	7	26							p<0,001*

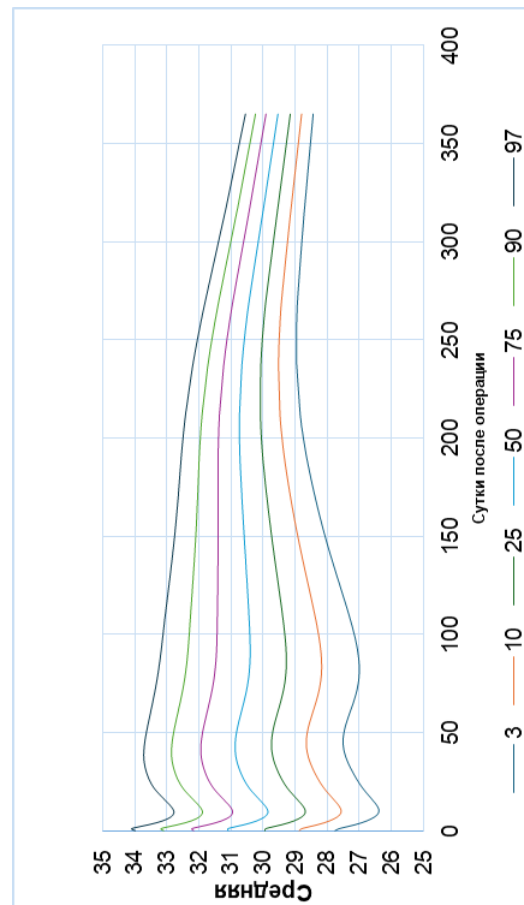
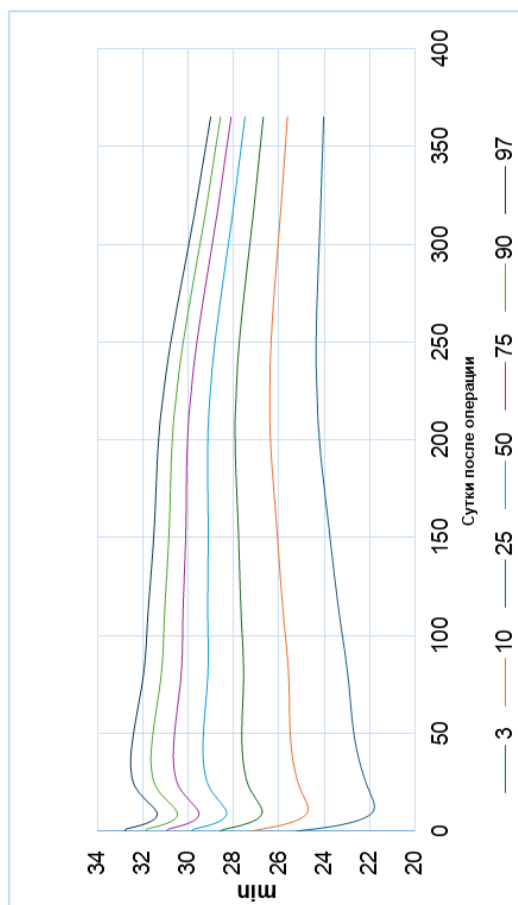
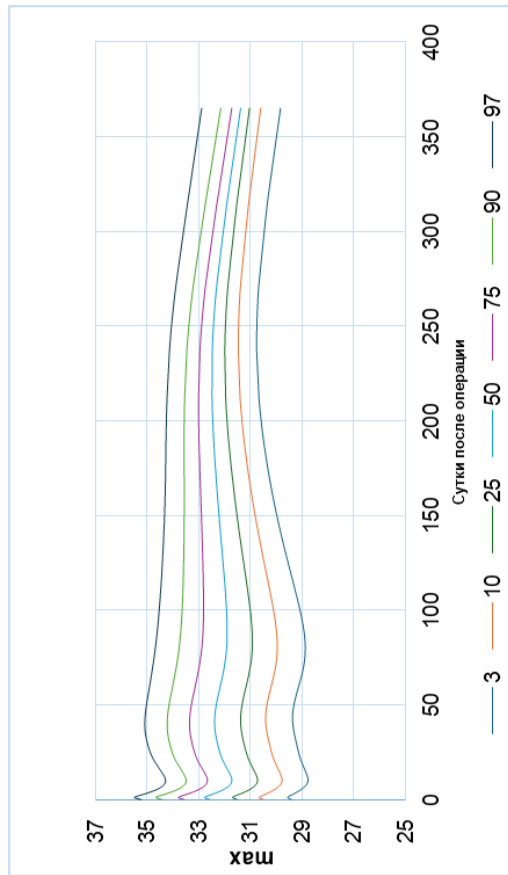
Параметр/временной блок		N	2	3	4	5	6	7	8
Delta Patellar Max	1	18	p<0,001*	0,002*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,583
	2	8		0,106	0,733	0,186	0,023*	0,011*	p<0,001*
	3	4			0,089	0,019*	0,004*	0,002*	0,002*
	4	14				0,084	0,002*	0,001*	p<0,001*
	5	11					0,206	0,065	p<0,001*
	6	30						0,501	p<0,001*
	7	26							p<0,001*
Delta Patellar Средн.	1	18	p<0,001*	0,002*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	p<0,001*	0,545
	2	8		0,089	0,633	0,563	0,053	0,026*	p<0,001*
	3	4			0,056	0,050	0,003*	0,004*	0,002*
	4	14				0,112	0,002*	0,001*	p<0,001*
	5	11					0,339	0,068	p<0,001*
	6	30						0,416	p<0,001*
	7	26							p<0,001*

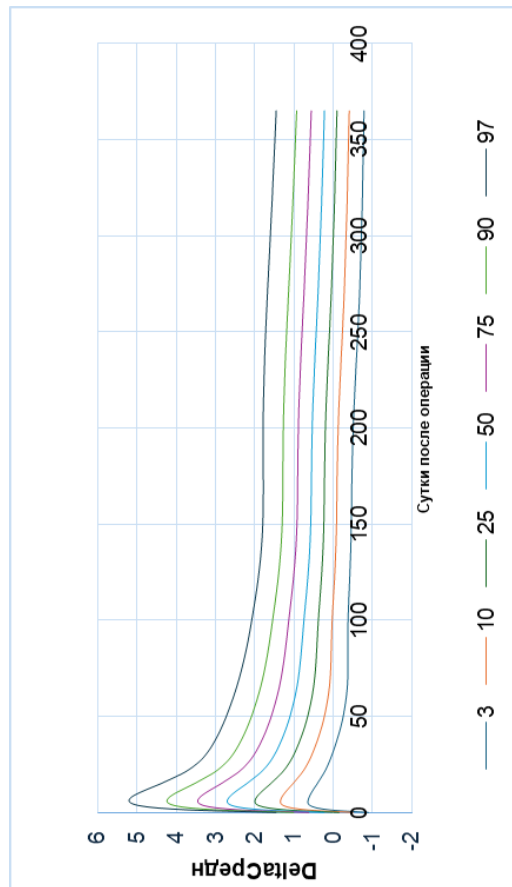
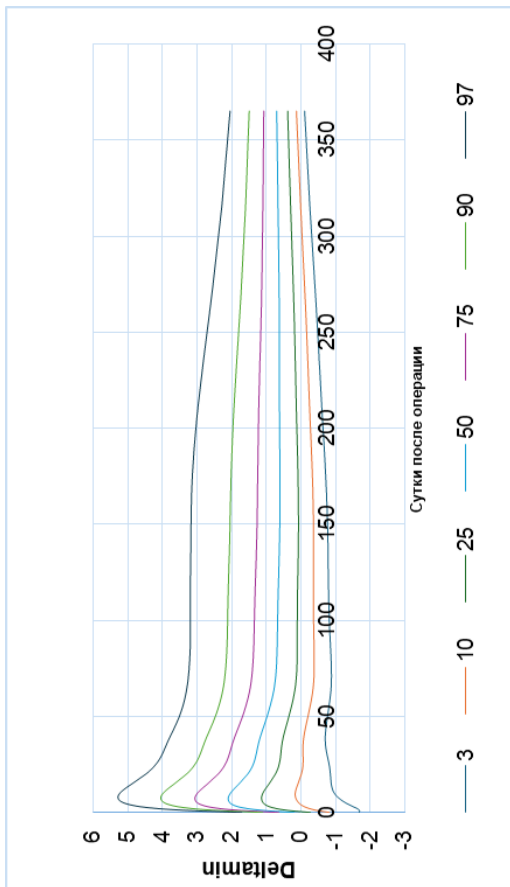
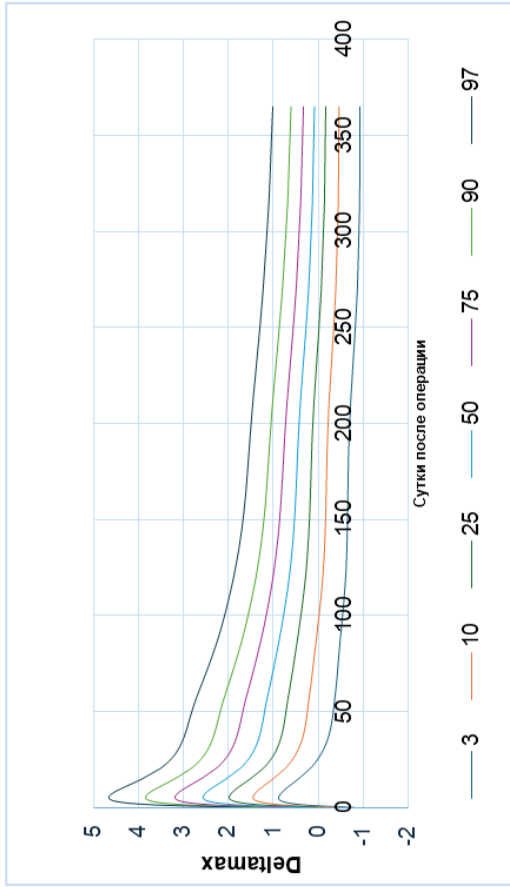
Примечание: p – уровень значимости (критерий Вилкоксона), * при $p < 0,05$ имеется статистически значимое различие между оперированной конечностью и контралатеральной конечностью.

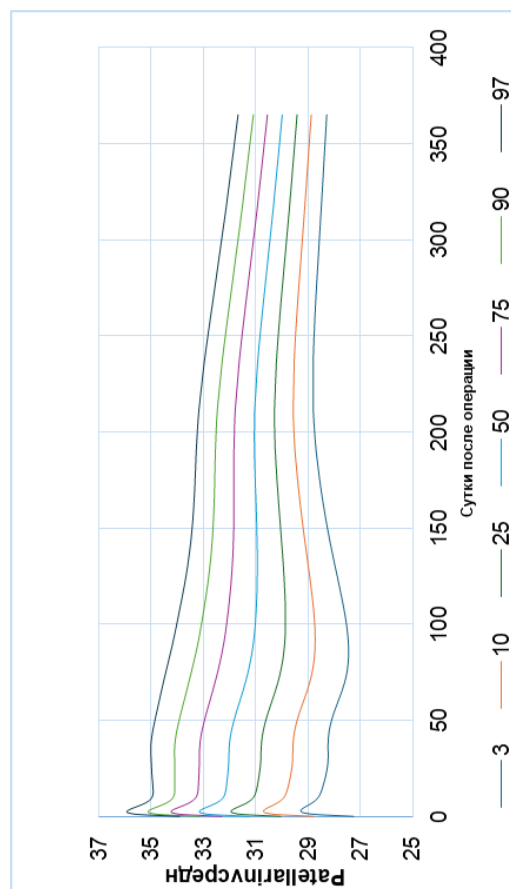
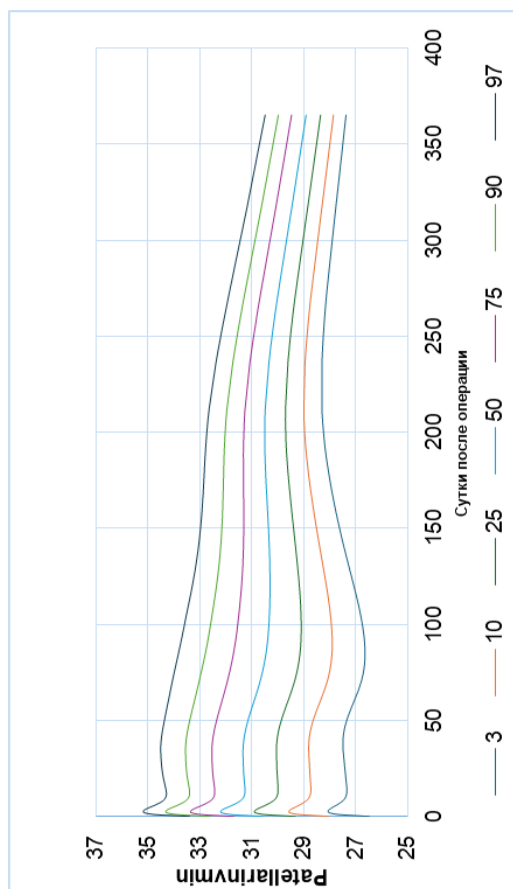
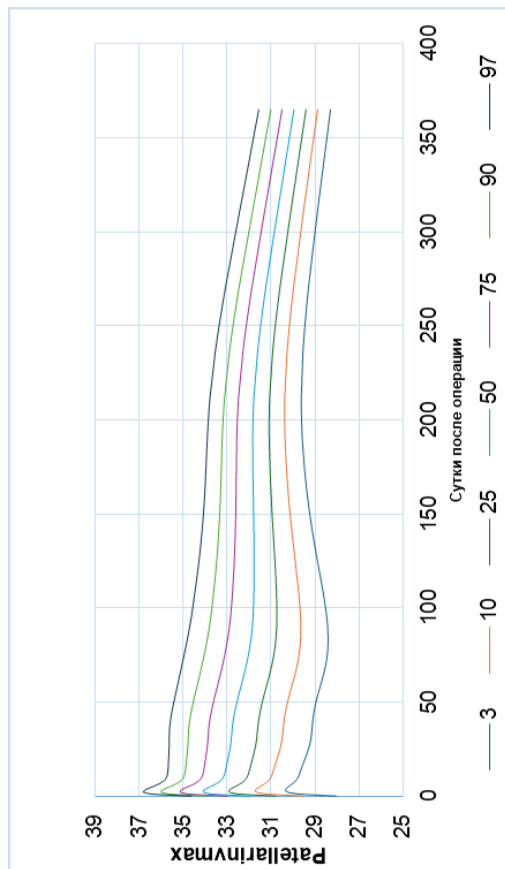
ПРИЛОЖЕНИЕ 8

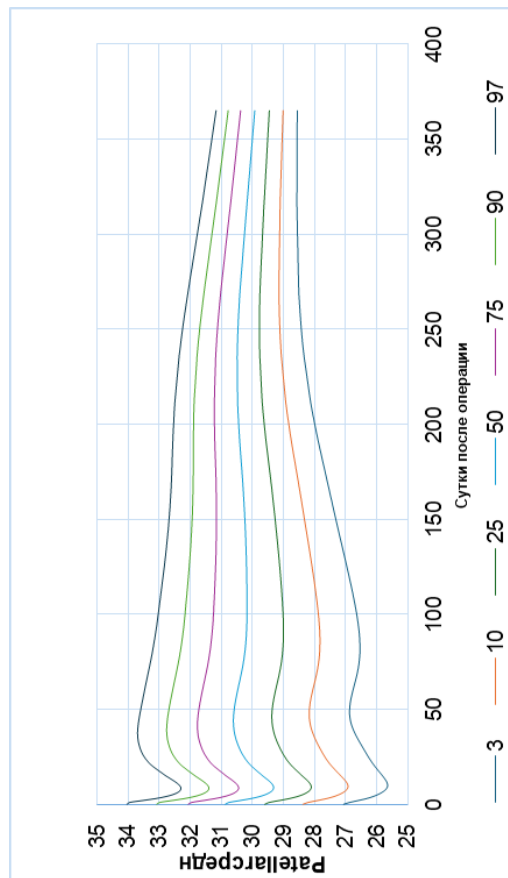
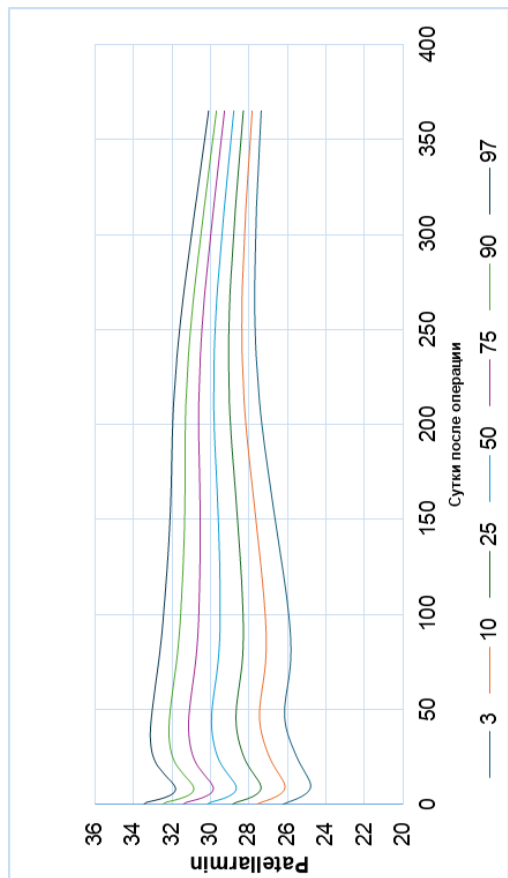
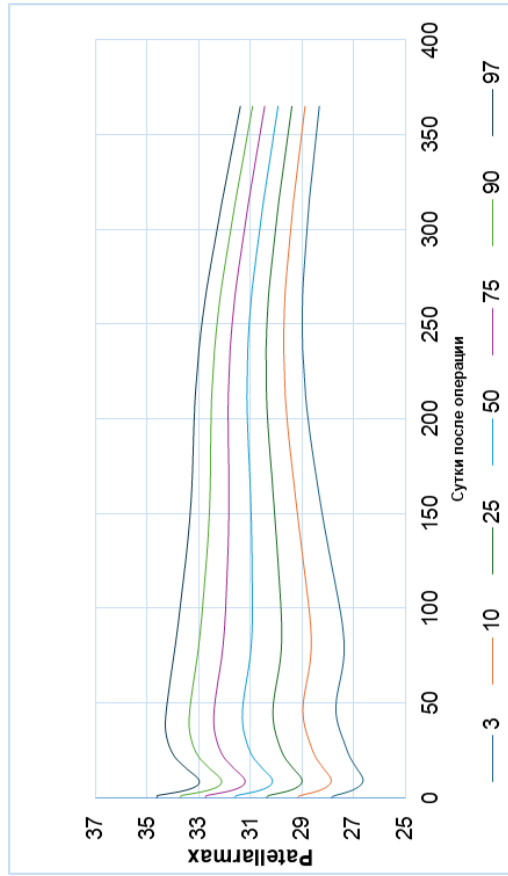
Перцентильные кривые, отражающие температурные диапазоны в течение года после реконструкции ПКС у пациентов с неосложненным течением послеоперационного периода

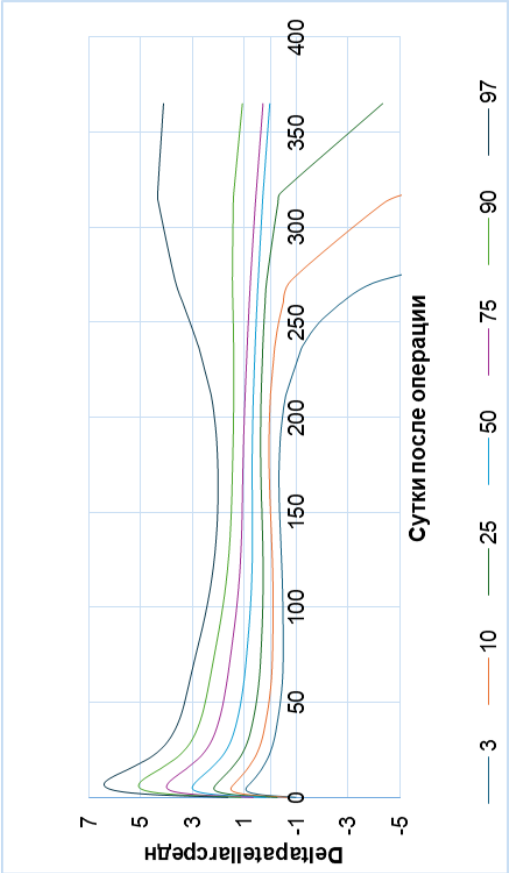
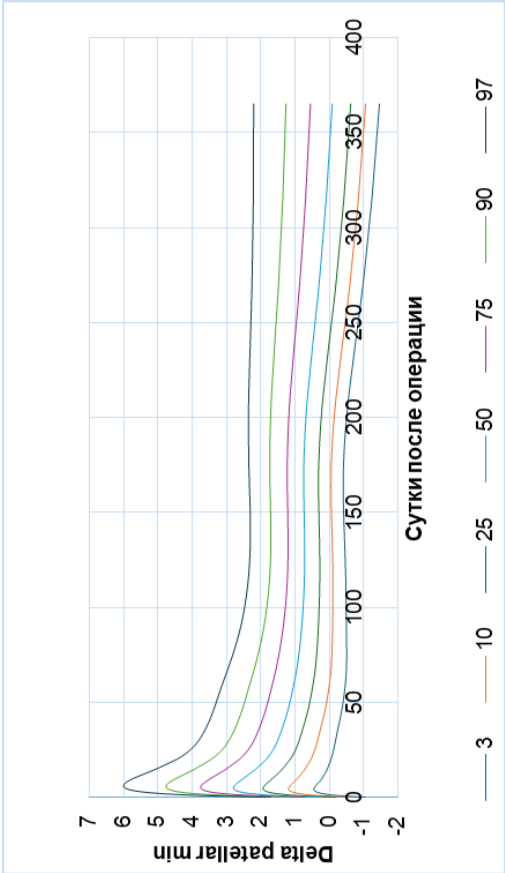
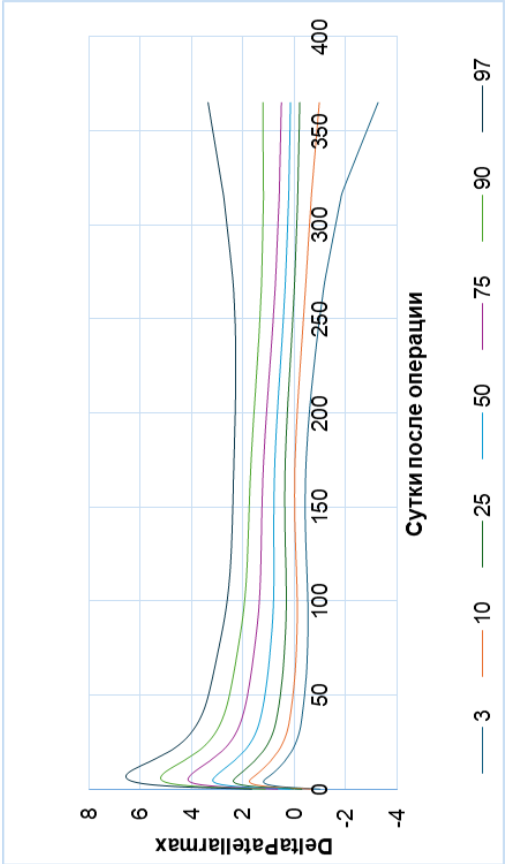












ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Алгоритм практического использования термографических данных – «термографический аналитический инструмент»

Шаг	Что в основном оценивается	Термографические критерии осложненного течения	Клиническое действие
0. До операции	Delta Patellar min, Patellar min, Patellar max; расчет z и f (решающее правило)	$f \geq 0,169$	При $f \geq 0,169$ на фоне клинического благополучия - усилить послеоперационный контроль за пациентом; При $f \geq 0,169$ в сочетании с выпотом, болью или дефицитом разгибания – рассмотреть вопрос об отсрочке операции.
1. 1-45-е сутки	Delta max, Patellar Inv Min, Delta Patellar Min; Max Inv; Max Inv + Patellar Inv Max; 8 Patellar Inv Max; 8 отобранных параметров	Отборочные: хотя бы один признак ранней чувствительной триады $>P90$; Max Inv $<P10$ в первые 35 суток; Max Inv + Patellar Inv Max вне $P10-P90$; ≥ 2 из 8 параметров $>P90$; любое отклонение 8 параметров за $P3-P97$. Подтверждающие: тот же параметр $>P90$ в двух наблюдениях; волнообразность при достаточном временном размахе. Критические: перечисленные признаки в сочетании с клиническим ухудшением	На фоне клинического благополучия: стабилизировать нагрузку и повторить исследование. При усилении боли, выпота, ограничения движений – снизить или прекратить реабилитационную нагрузку и уточнить клиническое состояние.

2. Любой срок после операции	8 отобранных параметров на перцентильных кривых (перцентильный контур)	Отборочные: ≥ 2 из 8 отобранных параметров $>P90$; любое отклонение хотя бы одного из 8 параметров за пределы P3–P97. Подтверждающие: тот же параметр $>P90$ в двух наблюдениях при интервале не менее 7 суток, предпочтительно 14–35 суток; волнообразность при общем размахе последовательности не менее 28 суток	При наличии только отборочных критериев на фоне клинически неосложненного течения – термографическое наблюдение в динамике без изменения программы реабилитации. При наличии подтверждающих признаков – пересмотр реабилитационной программы. При клинических признаках осложненного течения – приостановка программы до результатов углубленного клинико-инструментального обследования.
3. 46-90-е сутки	4 средние температуры и календарная карта возврата к нормотермии (календарный контур)	К 90 суткам хотя бы одна из четырех средних температур остается вне нормы при наличии перцентильного настораживающего признака	Без клинического ухудшения – стабилизация нагрузки; при наличии боли, выпота, ограничения движений или отсутствии положительной функциональной динамики – целесообразно углубленное клинико-инструментальное обследование для исключения осложненного варианта течения.
4. 91-180-е сутки	поздняя межсторонняя асимметрия и календарная задержка восстановления	Отборочные: Delta max $>P90$, Delta Средн. $>P90$ или Delta Patellar max $>P90$ после 60 суток; 1 балл по объединенной визуальной шкале. Подтверждающие: Delta max $>P97$; Delta max + Delta Средн. $>P90$; Delta Patellar min + Delta Patellar max $>P90$; отсутствие нормализации	Без клинического ухудшения – приостановить прогрессию нагрузки и повторить термографию через 14-35 суток; при клиническом неблагополучии – снизить нагрузку и уточнить причину отклонений посредством клинико-инструментального

	нормотермии	Delta Средн. и Delta Patellar средн.; ≥ 2 балла по объединенной визуальной шкале	обследования
5. 181-365-е сутки	поздний динамический контур	Отборочные: одиночные поздние отклонения, включая ≥ 3 из 8 отобранных параметров вне P10-P90. Подтверждающие: нет сужения асимметрии по Spоздн.суж.асимм; сохраняется или нарастает B(t) либо K90(t); Delta max $> P97$; Max Inv + Patellar Inv Max вне P10-P90	Не следует делать заключение об осложненном течении по одиночному отклонению на этом этапе (!) При нарастающем термографическом профиле – пересмотреть объем нагрузки и повторить исследование; при неблагоприятном – временно снизить нагрузку и выполнить клинико-инструментальное дообследование
6. Эпизод в целом	суммарная визуальная шкала из 4 признаков	Оценивать только при наличии данных соответствующих временных окон; отсутствующее обследование не считать «нулевым» признаком. ≥ 1 признак – отборочный уровень; ≥ 2 – подтверждающий уровень; ≥ 3 – высокая вероятность патологической траектории	Интегральная оценка всей траектории; Использовать для выбора частоты контроля и темпа прогрессии нагрузки

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Классификация отборочных и подтверждающих термографических критериев по периодам наблюдения

Период наблюдения	Отборочные критерии	Подтверждающие критерии
До операции	$f \geq 0,169$ при отсутствии выраженного клинического неблагополучия	Повторное сохранение термографической настороженности при повторном исследовании; сочетание с сохраняющимся выпотом, болью или дефицитом разгибания
Любой послеоперационный срок	≥ 2 из 8 отобранных параметров $>P90$; любое отклонение хотя бы одного из 8 отобранных параметров за пределы P3-P97; Delta max $>P90$ как одиночный настораживающий признак	Один и тот же отобранный параметр $>P90$ в двух последовательных наблюдениях; волнообразная траектория внутри–вне–внутри перцентильного коридора при достаточном временном размахе; Delta max $>P97$
1-45 суток	Хотя бы один признак ранней чувствительной триады: Delta max $>P90$, Patellar Inv Min $>P90$ или Delta Patellar Min $>P90$; Max Inv $<P10$ в первые 35 суток; Max Inv + Patellar Inv Max вне P10-P90	Повторное превышение P90 одним и тем же параметром; волнообразность при достаточном временном размахе; сохранение ранних отклонений при повторной проверке после стабилизации режима
46-90 суток, включая контроль после 60 суток	K 90 суткам хотя бы одна из четырех средних температур остается вне нормы при наличии перцентильного отклонения; после 60 суток появляются Delta max $>P90$, Delta Средн. $>P90$ или Delta Patellar max $>P90$	Повторное сохранение отклонения в динамике; сочетание дельта-показателей $>P90$; отсутствие положительной календарной нормализации на фоне перцентильных отклонений

91-180 суток	Delta max >P90, Delta Средн. >P90 или Delta Patellar max >P90 после 60 суток; 1 признак по объединенной визуальной шкале; задержка нормализации дельта-показателей	Delta max >P97; Delta max + Delta Средн. >P90; Delta Patellar min + Delta Patellar max >P90; ≥ 2 признака по объединенной визуальной шкале; отсутствие нормализации Delta Средн. и Delta Patellar средн. к 180 суткам
181-365 суток	Одиночные поздние отклонения, включая ≥ 1 из 6 базовых параметров вне абсолютной нормы или ≥ 3 из 8 отображенных параметров вне P10–P90 на одном позднем визите	нет сужения асимметрии по Споздн.суж.асимм; не уменьшается B(t) или K90(t); Delta max >P97; Max Inv + Patellar Inv Max вне P10–P90; стойкое позднее отклонение на серии визитов
Эпизод наблюдения в целом	≥ 1 признак по объединенной визуальной шкале при наличии данных соответствующих временных окон	≥ 2 признаков по объединенной визуальной шкале; ≥ 3 признака указывают на высокую вероятность патологической траектории при достаточной длительности наблюдения

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Краткие анамнестические данные пациентов с осложненным течением послеоперационного периода

№	Варианты неблагоприятного клинического события	Краткий анамнез
1	Инфекционно-воспалительное	01.10.2021 получена травма правого коленного сустава на соревнованиях, диагностирован разрыв ПКС. 27.10.2021 выполнена реконструкция ПКС аутооттрансплантатом из сухожилия длинной малоберцовой мышцы. В послеоперационном периоде сохранялся выраженный отек; 10.12.2021 проведены ревизионная артроскопия и хирургическая обработка тканей (дебридмент). Посевы от 06.12.2021 и 10.12.2021 роста микрофлоры не дали. На фоне санлирующей операции и эмпирической антибиотикотерапии - выздоровление.
2	Неинфекционное	08.08.2018 выполнена реконструкция ПКС левого коленного сустава аутооттрансплантатом из сухожилия полусухожильной мышцы.. 07.07.2019 во время соревнований произошла повторная травма при минимальной нагрузке с легким ощущением хруста после которой развились явления передней нестабильности
3	Инфекционно-воспалительное	После повторных травм правого коленного сустава 15.11.2021 выполнены реконструкция ПКС и шов обоих менисков. После выписки возникли лихорадка до 38,2°C, появился выпот в оперированном суставе. В пункте выявлен <i>Staphylococcus epidermidis</i> ; C-реактивный белок – 108 мг/л. Успешное антибактериальное лечение с выздоровлением.

4	Инфекционно-воспалительное	После травмы 18.12.2019, 16.01.2020 выполнены реконструкция ПКС правого коленного сустава и резекция поврежденных отделов обоих менисков. В феврале 2020 г. С-реактивный 100 мг/л. Посев синовиальной жидкости, полученной при ревизионной операции 25.02.2020, роста микрофлоры не дал. Положительная динамика на фоне эмпирической антибактериальной терапии с выздоровлением.
5	Неинфекционное	В декабре 2021 г. получена травма правого коленного сустава с болью и периодической нестабильностью; позднее имел место повторный травматический эпизод на фоне незначительных нагрузок с клиникой передней нестабильности коленного сустава.
6	Инфекционно-воспалительное	01.03.2021 получена травма правого коленного сустава. 08.05.2021 выполнена реконструкция ПКС. В связи с сохранявшимися отеком сустава и повышением температуры тела до 39С пациент повторно госпитализирован. Посевы роста не дали. На фоне эмпирической антибиотикотерапии - выздоровление.
7	Неинфекционное	После первичной реконструкции ПКС от 09.11.2020 и армирования малоберцовой коллатеральной связки сохранялась передняя нестабильность. После повторной незначительной травмы 03.09.2021 с ухудшением явлений нестабильности 02.11.2021 выполнена ревизионная реконструкция ПКС трансплантатом из связки надколенника.
8	Неинфекционное	28.08.2018 выполнены реконструкция ПКС и армирование медиальной коллатеральной связки правого коленного сустава. 05.03.2019 произошла незначительная бытовая травма с эпизодом нестабильности в суставе, после чего сохранялась нестабильность;
9	Неинфекционное	21.09.2022 выполнена реконструкция ПКС левого коленного сустава. В апреле и 20.05.2023 произошли повторные травматические эпизоды с валгузным отклонением голени и отеком; после первого эпизода уже сообщалось о частичном повреждении трансплантата.

10	Неинфекционное	11.11.2020 выполнены реконструкция ПКС и парциальная резекция латерального мениска левого коленного сустава. 09.02.2023 при прыжке на фоне реабилитации возникли хруст и последующий отек сустава. При клиническом тестировании – передняя нестабильность.
11	Инфекционно-воспалительное	29.10.2020 выполнена реконструкция ПКС правого коленного сустава. После снятия швов появились болезненность и повышение температуры тела до 38,5 °С. Посевы роста не дали. На фоне эмпирической антибиотикотерапии - выздоровление.
12	Неинфекционное	11.01.2022 выполнена реконструкция ПКС левого коленного сустава аутооттрансплантатом из сухожилий полусухожильной и тонкой мышц. 06.12.2022 во время игры в баскетбол произошла повторная, со слов, незначительная травма. С тех пор беспокоит передняя нестабильность.
13	Неинфекционное	12.04.2023 выполнена реконструкция ПКС правого коленного сустава. 30.08.2023 после падения с самоката диагностирован разрыв трансплантата; 02.09.2023 при пункции эвакуировано около 100 мл крови.
14	Инфекционно-воспалительное	После травмы в декабре 2017г., 23.08.2018 выполнены реконструкция ПКС правого коленного сустава аутооттрансплантатом из сухожилия длинной малоберцовой мышцы и парциальная резекция медиального мениска. Через 3 недели после операции – стойкое повышение температуры тела. Посевы роста не дали. На фоне эмпирической антибиотикотерапии - улучшение.
15	Инфекционно-воспалительное	13.04.2018 выполнена реконструкция ПКС правого коленного сустава аутооттрансплантатом из сухожилий полусухожильной и тонкой мышц. Во время реабилитации в мае 2018 г. появились субфебрилитет, нарастание отека и локальная гипертермия сустава. Посев роста не дал. На фоне эмпирической антибиотикотерапии - выздоровление.

16	Неинфекционное	В 2017 г. выполнены реконструкция ПКС трансплантатом из связки надколенника и дополнительная переднелатеральная стабилизация. Постепенное нарастание явлений передней нестабильности.
17	Неинфекционное	29.08.2020 во время матча получена травма левого коленного сустава с разрывом ПКС и обоих менисков. 17.09.2020 выполнены реконструкция ПКС, шов медиального мениска и микрофрактурирование хрящевого дефекта. Постепенно стал отмечать нарастание явлений передней нестабильности оперированного коленного сустава.
18	Инфекционно-воспалительное	21.06.2018 получена травма правого коленного сустава. 02.07.2018 выполнены реконструкция ПКС и шов латерального мениска. В течение последующей недели сохранялись отек, боль и повышение температуры тела до 38 °С. Посев синовиальной жидкости роста не дал. На фоне эмпирической антибиотикотерапии – выздоровление.
19	Неинфекционное	В октябре 2019 г. выполнены реконструкция ПКС левого коленного сустава, шов медиального и парциальная резекция латерального мениска. На фоне реабилитации сохранились ограничение объема движений и легкий синовит. По данным МРТ и клинически признаки повреждения трансплантата ПКС.
20	Неинфекционное	После травмы 16.05.2018 05.07.2018 выполнены реконструкция ПКС правого коленного сустава и вмешательства на обоих менисках. В августе 2018 г. произошли повторные травматические эпизоды с отеком, болью и последующими блокадами сустава. 01.11.2018 выполнена повторная артроскопия с резекцией медиального мениска, после которой боль регрессировала.
21	Неинфекционное	В июне 2020 г. выполнена реконструкция ПКС правого коленного сустава. 16.12.2022 после неудачного приземления возникли боль и жалобы на нестабильность

22	Неинфекционное	06.09.2019 выполнены реконструкция ПКС, микрофрактурирование хрящевого дефекта и парциальная резекция обоих менисков. В дальнейшем сохранялась передняя нестабильность, препятствовавшая полноценным тренировкам.
23	Неинфекционное	В сентябре 2020 г. получена травма левого коленного сустава; 10.10.2020 выполнена реконструкция ПКС. С апреля 2021 г. появились жалобы, а по МРТ от 03.09.2021 был диагностирован разрыв трансплантата.
24	Неинфекционное	20.02.2023 выполнена реконструкция ПКС левого коленного сустава аутотрансплантатом из сухожилия длинной малоберцовой мышцы. В связи с сохранявшимися жалобами на нестабильность пациент консультирован травматологом-ортопедом; рекомендовано ревизионная реконструкция ПКС
25	Неинфекционное	В 2018 г. выполнена реконструкция ПКС левого коленного сустава. После повторной травмы в январе 2020 г. появились боль и передняя нестабильность.
26	Неинфекционное	28.11.2019 проведена реконструкция трансплантатом из связки надколенника. После повторной травмы в августе 2022 г. возникли хруст и кратковременный отек. После этого определяется передняя нестабильность.
27	Неинфекционное	28.04.2018 получена травма правого коленного сустава. 07.06.2018 выполнена первичная реконструкция ПКС; На фоне реабилитации сохранялись явления нестабильности. 09.11.2018 — ревизионная артроскопия, дебридмент и ревизионная реконструкция ПКС комбинированным аутотрансплантатом.
28	Неинфекционное	25.05.2019 получена травма левого коленного сустава. 10.07.2019 выполнена реконструкция ПКС и парциальная резекция медиального мениска. Сохраняется передняя нестабильность.

29	Неинфекционное	06.12.2020 выполнены реконструкция ПКС левого коленного сустава аутотрансплантатом из сухожилия длинной малоберцовой мышцы и парциальная резекция медиального мениска. 31.05.2021 на тренировке произошла повторная травма с ощущением выхода сустава и щелчком с развитием явлений передней нестабильности.
30	Неинфекционное	В конце марта 2021 г. получена травма правого коленного сустава; 02.04.2021 выполнена реконструкция ПКС. После этапной реабилитации 29.11.2021 произошел повторный травматический эпизод с ограничением сгибания и эпизодами передней нестабильности.
31	Неинфекционное	В июле 2018 г. получена травма правого коленного сустава. 01.08.2018 выполнены реконструкция ПКС и парциальная резекция обоих менисков. 19.02.2019 в верхней трети голени появилось объемное образование – синовиальная киста
32	Инфекционно-воспалительное	После серии спортивных травм 12.11.2021 выполнены реконструкция ПКС правого коленного сустава и шов менисков. Развился артрит; 08.12.2021 проведены санационная артроскопия, дебридмент и удаление трансплантата и лигатур с нормализацией анализов и температуры. Запланирована ревизионная реконструкция ПКС.
33	Неинфекционное	В июне 2020 г. получена травма правого коленного сустава. 23.11.2020 выполнены реконструкция ПКС, шов медиального мениска, парциальная резекция и шов латерального мениска. На контрольных осмотрах сохраняется передняя нестабильность.
34	Неинфекционное	После травмы 11.01.2023 30.01.2023 выполнены реконструкция ПКС левого коленного сустава и резекция поврежденных отделов обоих менисков. На фоне реабилитации появились жалобы на боли и явления легкой передней нестабильности оперированного коленного сустава; по данным МРТ от 01.09.2023 сообщалось о частичном повреждении трансплантата.

35	Неинфекционное	После травмы 13.01.2024, 12.02.2024 выполнены реконструкция ПКС левого коленного сустава, парциальная резекция обоих менисков и латеральный внесуставной тенodes. После четырех этапов реабилитации - сохраняется передняя нестабильность оперированного коленного сустава
36	Неинфекционное	15.01.2025 выполнены реконструкция ПКС левого коленного сустава трансплантатом из сухожилия длинной малоберцовой мышцы, обработка хрящевого дефекта с микрофрактурированием и латеральный внесуставной тенodes. В апреле и июне 2025 г. сохранялись выпот, кистозная перестройка большеберцового туннеля и признаки частичного разволокнения трансплантата с клиникой передней нестабильности
37	Неинфекционное	После травм в декабре 2023 г. и январе 2024 г. 13.06.2024 выполнена реконструкция ПКС левого коленного сустава, парциальная резекция обоих менисков и латеральный внесуставной тенodes. В связи с наличием признаков передней нестабильности 22.04.2025 выполнена ревизионная реконструкция ПКС трансплантатом из сухожилия четырехглавой мышцы.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

Внедрение результатов диссертационного исследования

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по учебной работе
ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова
Минздрава России (Пироговский Университет)
д.б.н., профессор, профессор РАН
Д.В. Ребриков
«30» июля 2016г.



АКТ О ВНЕДРЕНИИ

**результатов диссертации Величко Максима Николаевича в учебный процесс кафедры
реабилитации, спортивной медицины и физической культуры Института
профилактической медицины им. З.П. Соловьева ФГАОУ ВО РНИМУ
им. Н.И. Пирогова Минздрава России (Пироговский Университет)**

Настоящим подтверждаем, что основные научные положения, выводы и рекомендации кандидатской диссертации Величко Максима Николаевича на тему «Применение термографии в комплексной системе реабилитации спортсменов высокой квалификации после реконструкции передней крестообразной связки» внедрены в учебный процесс кафедры реабилитации, спортивной медицины и физической культуры Института профилактической медицины им. З.П. Соловьева при изучении дисциплин по научной специальности 3.1.33. Восстановительная медицина, спортивная медицина, лечебная физкультура, курортология и физиотерапия, медико-социальная реабилитация, читаемых студентам, ординаторам, аспирантам.

Заведующий кафедрой реабилитации,
спортивной медицины и физической
культуры Института профилактической
медицины им. З.П. Соловьева
доктор медицинских наук, профессор

Поляев Б.А.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
Ученый секретарь ФГАОУ ВО РНИМУ
им. Н.И. Пирогова Минздрава России
(Пироговский Университет)
«30» июля 2016г.






Общероссийская общественная организация
«Федерация гандбола России»

119270, Россия, Москва, Лужнецкая наб., 8 стр. 1, каб. 443

Тел.: +7 (495) 637 0921

E-mail: info@rshandball.ru

Сайт: www.rshandball.ru

Исх. № 479 от «01» июля 2026 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертации Величко Максима Николаевича в лечебный процесс восстановления спортсменов мужских и женских спортивных сборных команд Российской Федерации по гандболу.

Федерация гандбола России подтверждает, что основные научные положения, выводы и рекомендации кандидатской диссертации Величко Максима Николаевича на тему «Применение термографии в комплексной системе реабилитации спортсменов высокой квалификации после реконструкции передней крестообразной связки» внедрены в лечебный процесс спортсменов мужских и женских спортивных сборных команд по гандболу.

Директор по развитию
профессионального спорта



Э. Л. Акопян

Исп.: Гостев Евгений Сергеевич

+7(926)830-33-34

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2026621480

**Термографические показатели коленных суставов
спортсменов после реконструкции ПКС**

Правообладатель: **Величко Максим Николаевич (RU)**

Автор(ы): **Величко Максим Николаевич (RU)**



Заявка № **2026621199**

Дата поступления **30 марта 2026 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных **01 апреля 2026 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7add38d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов