

Величко Максим Николаевич

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГРАФИИ В КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЕ
РЕАБИЛИТАЦИИ СПОРТСМЕНОВ ВЫСОКОЙ КВАЛИФИКАЦИИ
ПОСЛЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЕРЕДНЕЙ КРЕСТООБРАЗНОЙ СВЯЗКИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна»

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

Бердюгин Кирилл Александрович, доктор медицинских наук, профессор РАН, заместитель директора по научной работе государственного автономного учреждения здравоохранения Свердловской области «Центр специализированных видов медицинской помощи «Уральский институт травматологии и ортопедии имени В.Д. Чаклина», г. Екатеринбург;

Епифанов Александр Витальевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской реабилитации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет медицины» Минздрава России, г. Москва.

Ведущая организация: Государственное автономное учреждение здравоохранения города Москвы «Московский научно-практический центр медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины имени С.И. Спасокукоцкого Департамента здравоохранения города Москвы», г. Москва.

Защита диссертации состоится « 15 » октября 2026 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 68.1.003.04 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна», по адресу: 123098, Москва, ул. Живописная, д. 46, строение 8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» в г. Москве (123098, Москва, ул. Живописная, д. 46) и на сайте <https://fmbafmbc.ru/scientific-activities/dissertation-council/>

Автореферат разослан « » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор медицинских наук

Голобородько Евгений Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности 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 (A. Hallen и др., 2024; M. 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 по частоте вышли на второе место после повреждений задней группы мышц бедра. А финансовая нагрузка на спортсмена при данном виде травм 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 частота данной травмы выше 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, мало отличается между странами.

Спорт высших достижений нередко является движущей силой развития высоких технологий в медицине. Одни технологии используются тренерами 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 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. Düking, 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).

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. Düking, 2024; Escamilla-Galindo и др., 2025). Описанные в литературе температурные критерии не позволяют прогнозировать повторные травмы оперированного сустава и регламентировать 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, настораживающего и неблагоприятного клинико-термографических 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 и практическая 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.

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.

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.

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

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. В работе использованы: клиническое обследование, сбор анамнеза, клинический осмотр, специализированные опросники, антропометрия, гониометрия, магнитно-резонансная томография коленного сустава и инфракрасная термография нижних конечностей. 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.

Основные 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, а также 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 спорт-специфических нагрузок при устойчивой нормотермии и благоприятной клинико-инструментальной и субъективной динамике, что потенциально способствует повышению эффективности комплексной реабилитации и медицинского контроля, а также снижению риска неблагоприятных исходов реконструкции передней крестообразной связки.

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Достоверность и объективность полученных результатов обусловлена наличием четких критериев включения и исключения субъектов исследования, достаточным количеством анализируемых данных, использованием современного научно-методического аппарата и валидных методик исследования. Положения, выносимые на защиту, выводы и практические рекомендации сформулированы на основании фактических данных, отраженных в таблицах и рисунках.

При статистической обработке числовые данные при распределении, близком к нормальному, представляли в виде среднего значения и стандартного отклонения; при асимметричном распределении – в виде медианы и межквартильного размаха $Me [Q1; Q3]$. Проверку на нормальность выполняли тестом Колмогорова-Смирнова. 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 соответствующие поправки.

Для анализа срока до первого документированного возвращения термографического показателя в нормативный диапазон применяли метод Каплана-Мейера. Для сравнения кривых групп с осложненным и неосложненным течением по предоперационным данным использовали логранговый критерий. Влияние варианта послеоперационного течения исследовали с помощью модели пропорциональных рисков Кокса с отношением мгновенных рисков и 95% доверительным интервалом.

Для визуального отображения изменения температуры коленного сустава во времени использовали перцентильное представление данных. При построении перцентильных кривых применяли LMS-метод, а построение производили с помощью программы, созданной в RStudio на языке R с обращением к процедурам пакета GAMLSS.

Для построения решающего правила, которое на предоперационном этапе позволяет оценить вероятность осложненного варианта течения, использовали метод логистической регрессии.

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

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.).

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.

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.

Материалы, методы и дизайн исследования

Исследование проводилось на базе Центра комбинированных поражений ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. В исследование на различных этапах 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 кг/м². 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. В сравнительных расчетах использовали параметры 36 пациентов с осложненным течением. 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.

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.

В 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.

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).

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. Категориальные показатели сопоставляли с помощью точного критерия Фишера, при достаточных ожидаемых частотах использовали критерий χ^2 Пирсона, а для чувствительности и специфичности поздних диагностических критериев 95% доверительные интервалы рассчитывали методом Уилсона.

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 Бенъямини-Хохберга. Статистически значимыми считали скорректированные значения $p \leq 0,05$. Корреляционный анализ параметров МРТ 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 по предоперационным данным использовали логранговый критерий. Влияние варианта послеоперационного течения исследовали с помощью модели пропорциональных рисков Кокса с отношением мгновенных рисков и 95% доверительным интервалом.

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

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 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 бинарной логистической регрессии выглядела следующим образом: $f(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$, где f – расчетная вероятность 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 вероятностей для пациентов было определено значение вероятности — 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%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из включенных в исследование 183 пациентов, 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. В результате анализа термографических данных подтвержден вывод о том, что статистически значимые различия большинства термографических параметров между травмированным и контралатеральным коленными суставами существуют в обеих группах пациентов практически на всех временных отрезках исследования после операции. Таким образом, разрыв ПКС и последующая ее хирургическая реконструкция сопровождаются устойчивой межсторонней температурной асимметрией, выраженность которой изменяется во времени.

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

Из общей когорты в анализ были включены данные о 116 пациентах, у которых имелись валидные предоперационные данные. Внутригрупповое сравнение термографических показателей у мужчин и женщин в группах осложненного и неосложненного течения не выявило статистически значимых различий. В связи с этим пол при разработке решающего правила не учитывали. В пошаговый отбор включали сначала параметры, имевшие значимые различия между группами. Затем дополняли их неотличающимися 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) (рис. 1).

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).

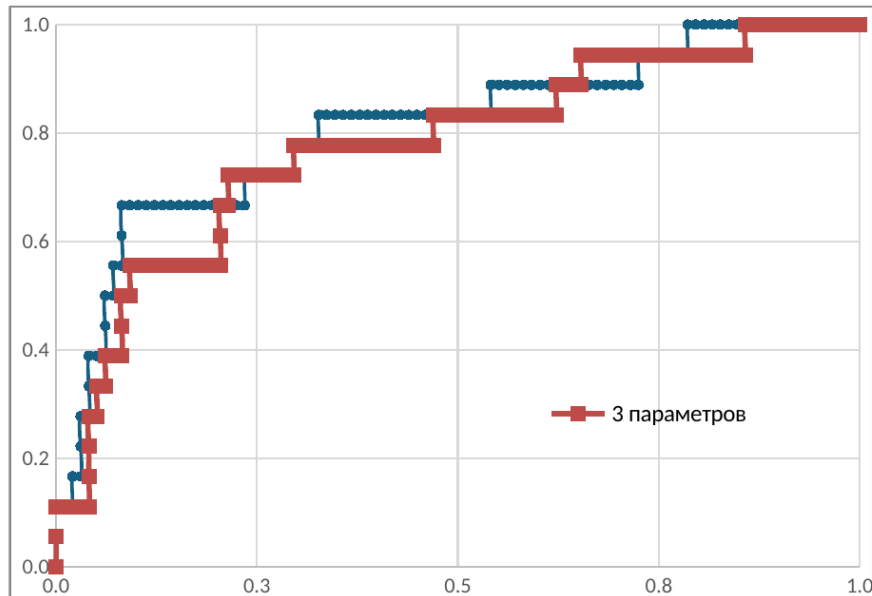


Рисунок 1 – ROC-кривые моделей 3 и 6 параметров

Чувствительность, специфичность и прогностическая ценность положительного (ПЦПР) и отрицательного результата (ПЦОР) обеих моделей с выбранными точками отсечения были оценены с помощью метода скользящего экзамена. Клинически приемлемые чувствительность и специфичность обоих правил на обучающей выборке были одинаковыми – 78 и 70% соответственно. Но при скользящем экзамене правило с тремя параметрами показало несколько лучшие результаты. Таким образом, для применения в составе комплексной клинико-инструментальной оценки и дальнейшей проспективной валидации было предложено следующее решающее правило. На предоперационном этапе после выполнения термографического исследования рассчитывается значение f по формуле (1):

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

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

Если значение $f < 0,169$, 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).

Для анализа влияния характера внутрисуставных повреждений на предоперационные термографические показатели и риск осложненного течения 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. В результате анализа было выяснено, что 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. Были исследованы подгруппы с изолированным разрывом ПКС ($n=95$), разрывом ПКС в сочетании с резекцией мениска ($n=53$) и разрывом ПКС в сочетании со швом менисков ($n=23$). Общий анализ таблицы сопряженности для этих трех категорий не выявил различий по частоте развития осложненного течения ($\chi^2=0,38$; $p=0,826$).

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 пациентов с неосложненным течением (P3, P10, P25, P50, P75, P90, P97), на которые затем наносили индивидуальные значения параметров конкретных пациентов с целью выявления возможных отклонений (рис. 2).

В группе пациентов с осложненным течением послеоперационного периода траектории значений термографических параметров значительно чаще выходили за пределы эталонного интервала P10-P90. Наибольшую диагностическую значимость для выявления осложненного течения на различных этапах реабилитации имели восемь термографических параметров: Delta max, Max Inv, Delta Средн., Patellar Inv Min, Patellar Inv Max, Patellar Inv Средн., Delta Patellar Min и Delta Patellar Max. Они были обозначены как «8 отобранных параметров». Различные отклонения значений этих термографических параметров на перцентильных графиках представляют собой диагностические признаки.

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.

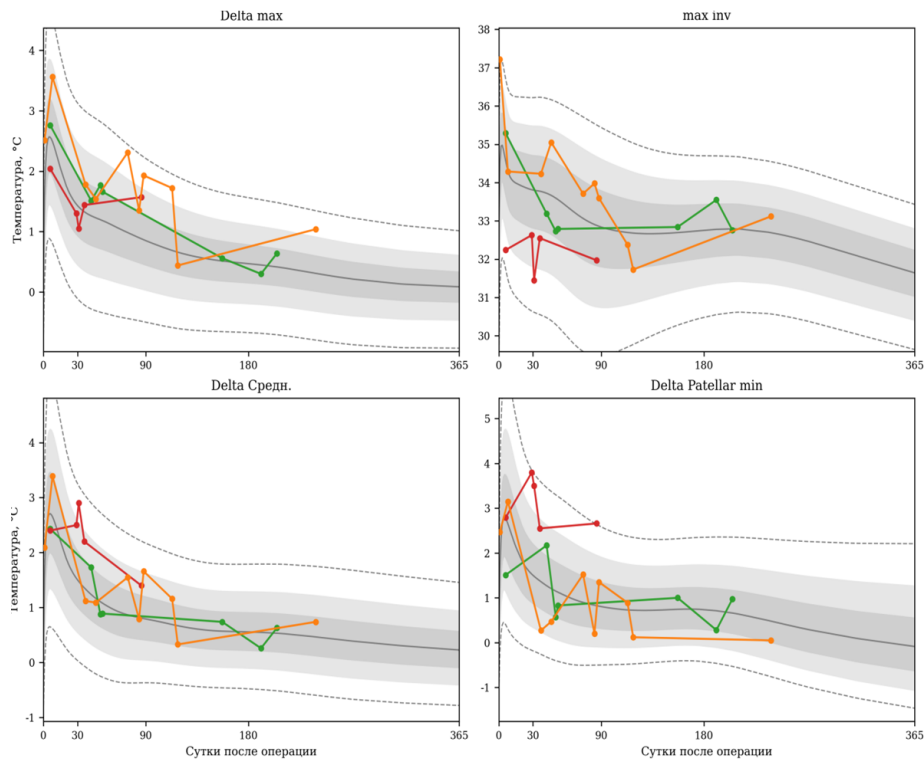


Рисунок 2 – Представление частотного распределения значений термографических параметров в виде перцентильных кривых на временных графиках. По оси Y – значение термографического параметра в градусах $^{\circ}\text{C}$, по оси X – время в сутках после операции. Точки представляют собой значения термографических 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

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.

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

Отклонение Patellar Inv Min ниже P3 является самостоятельным универсальным признаком атипичного хода траектории.

Осложненное течение послеоперационного периода оказывало статистически значимое влияние на сроки возвращения к норме для шести термографических 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).

Ранее автором настоящей диссертации был выполнен анализ нормальных значений термографических параметров у 160 спортсменов сборных команд. В качестве «нормы» для анализа послеоперационного периода был принят интервал от минимального значения 15-ого перцентиля до максимального из 85-ого для каждого термографического параметра. Было выяснено, что как минимум однократное попадание в нормальный диапазон в сроки до 12 месяцев после операции было зарегистрировано для всех шести анализируемых термографических параметров. Однако 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 шести рассматриваемых термографических параметров.



Рисунок 3 – Кумулятивная частота первого документированного возвращения к норме к заданному сроку после операции в группах пациентов с осложненным и неосложненным течением послеоперационного периода

Для визуального представления возврата термографических параметров к нормотермии была использована кумулятивная тепловая карта (рис. 3). 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 термографического 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.

К 365 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 как настораживающий термографический признак, так как у большинства пациентов с неосложненным течением указанные параметры обычно хотя бы раз возвращались в норму.

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 термографического 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.

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, указывающих на остаточную и/или хроническую термографическую асимметрию.

Логика использования всех описанных термографических данных на протяжении предоперационного и послеоперационного периодов для практического применения была представлена в виде концепции «термографического аналитического инструмента». Для этого все многообразие термографических аномалий, выявленных посредством решающего правила или перцентильных графиков и карт возвращения к нормотермии, было сведено к двум основным типам термографических признаков: отборочным и подтверждающим. Также было решено 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, в соответствии с концепцией термографического аналитического инструмента, 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.

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.

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

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).

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 аутотрансплантатов.

В анализ связи результатов МРТ-диагностики и термографических параметров включили данные о 41 пациенте, из которых 21 был отнесен к группе осложненного течения, 20 – к группе неосложненного течения. Необходимо отметить, что все случаи осложненного течения подразумевали неинфекционные неблагоприятные клинические события. Оценивали четыре МРТ-показателя (SNQ signal to noise quotient – соотношение сигнал/шум, rSD – относительный показатель неоднородности магнитно-резонансного сигнала, угол ЗКС и величину подвывиха голени) и 18 термографических параметров.

При сравнении МРТ-показателей статистически значимых различий между группами неосложненного и осложненного течения не выявлено.

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.

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

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. Это подтверждает фазо-зависимость процесса перестройки трансплантата и позволяет рассматривать срок после операции как важный смешивающий фактор в анализе связи МРТ и термографии.

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. 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.

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

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.

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 и спорт-специфических нагрузок, удлинять восстановительные интервалы и проводить дополнительное обследование для уточнения причин выявленных отклонений.

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 спорт-

специфических нагрузок 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Нормальные значения температуры коленного сустава у профессиональных спортсменов / М. Н. Величко, А. С. Самойлов, А. С. Умников [и др.] // Медицинский алфавит. – 2025. – № 4. – С. 52-58.
2. Использование инфракрасной термографии в реабилитации после пластики передней крестообразной связки / М. Н. Величко, А. В. Штурмин, А. Ю. Терсков [и др.] // Медицинский алфавит. – 2023. – № 32. – С. 50-53.
3. Сравнительные результаты субъективной оценки профессиональными спортсменами функционального состояния коленного сустава после пластики передней крестообразной связки аутрансплантатами из сухожилий полусухожильной и нежной мышц бедра и сухожилия длинной малоберцовой мышцы голени / М. Н. Величко, А. Ю. Терсков, А. М. Беякова [и др.] // Спортивная медицина: наука и практика. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 36-46.
4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026621480 Российская Федерация. Термографические показатели коленных суставов спортсменов после реконструкции ПКС : заявл. 30.03.2026 : опубл. 01.04.2026 / М. Н. Величко.