

## ИСТОРИЯ МЕДИЦИНЫ И ЮБИЛЕИ HISTORY OF MEDICINE AND ANNIVERSARIES

### ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЦЕНТРЕ ИЛИЗАРОВА (К 100-ЛЕТИЮ АКАДЕМИКА Г.А. ИЛИЗАРОВА)

#### РЕЗЮМЕ

Щурова Е.Н.,  
Долганова Т.И.,  
Долганов Д.В.,  
Менщикова Т.И.

ФГБУ «Национальный медицинский  
исследовательский центр травматологии  
и ортопедии имени академика  
Г.А. Илизарова» Минздрава России  
(640014, г. Курган, ул. М. Ульяновой, 6,  
Россия)

Автор, ответственный за переписку:  
Щурова Елена Николаевна,  
e-mail: elena.shurova@mail.ru

**Обоснование.** В истории становления и развития метода Илизарова, разработанного в середине прошлого века в Курганском НИИ экспериментальной травматологии и ортопедии, ныне – всемирно известном Центре, носящем имя своего создателя, значительное место занимают биомеханические исследования как самого аппарата, так и физиологической системы «аппарат – конечность». Интерес представляет анализ истории развития биомеханических исследований при становлении метода Илизарова.

**Цель.** Анализ истории развития биомеханических исследований для обоснования эффективности метода чрескостного остеосинтеза по Илизарову.

**Результаты.** Ввиду того, что в начале 1970-х годов соответствующего оборудования для проведения биомеханических исследований отечественная медицинская промышленность не выпускала, в состав лаборатории клинической физиологии и биомеханики Центра Илизарова (создана в 1971 г.) была введена группа инженеров, которая создавала аппаратуру для исследования процессов, происходящих в тканях конечностей и самой конструкции аппарата Илизарова при его тракционном и компрессионном воздействии на биологические структуры. Содружество врачей, научных сотрудников и инженеров позволило успешно преодолеть ряд трудностей и проблем. В научных публикациях и диссертациях сотрудники лаборатории уделяли большое внимание биомеханическим исследованиям в процессе выполнения чрескостного остеосинтеза аппаратом Илизарова. В настоящее время сотрудники Центра продолжают традиции, заложенные Г.А. Илизаровым. Впервые в нашей стране внедрён компьютерный 3D-видеоанализ кинематики и кинетики ходьбы у пациентов ортопедического профиля, который дополнен встроенным программным обеспечением для формирования клинического отчёта биомеханики ходьбы человека.

**Заключение.** Начальный этап развития биомеханических исследований в Центре Илизарова включал создание исследовательской аппаратуры. В последующем проводимые сотрудниками Центра в течение почти полувека биомеханические исследования показали прикладной, функциональный результат реализации общебиологических закономерностей открытия Г.А. Илизарова. В настоящее время биомеханические исследования осуществляются на более высоком уровне с использованием современного высокотехнологичного оборудования.

**Ключевые слова:** метод Илизарова, чрескостный остеосинтез, напряженные растяжения, эффект Илизарова, биомеханика

**Для цитирования:** Щурова Е.Н., Долганова Т.И., Долганов Д.В., Менщикова Т.И. История развития биомеханических исследований в Центре Илизарова (к 100-летию академика Г.А. Илизарова). *Acta biomedica scientifica*. 2023; 8(1): 247-259. doi: 10.29413/ABS.2023-8.1.25

Статья поступила: 14.07.2022

Статья принята: 23.01.2023

Статья опубликована: 02.03.2023

## HISTORY OF BIOMECHANICAL RESEARCH AT THE ILIZAROV CENTRE (TO THE 100TH ANNIVERSARY OF ACADEMICIAN G.A. ILIZAROV)

Shchurova E.N.,  
Dolganova T.I.,  
Dolganov D.V.,  
Menshchikova T.I.

National Ilizarov Medical Research Centre  
for Traumatology and Orthopaedics  
(Marii Ulyanovoy str. 6, Kurgan 640014,  
Russian Federation)

Corresponding author:  
**Elena N. Shchurova,**  
e-mail: elena.shurova@mail.ru

### ABSTRACT

**Background.** Biomechanical studies of both the Ilizarov apparatus itself and the physiological system “apparatus – limb” occupy a significant place in the history of the formation and elaboration of the Ilizarov method, developed in the middle of the last century at the Kurgan Research Institute of Experimental Traumatology and Orthopaedics (nowadays – the world-famous Centre named after its creator). The analysis of the history of biomechanical research in the formation of Ilizarov method is not without interest.

**The aim.** To analyze the history and stages of development of biomechanical research in order to substantiate the effectiveness of the Ilizarov method of transosseous osteosynthesis.

**Results.** The national medical industry did not produce the appropriate equipment for biomechanical research in the early 1970s. That is why a group of engineers was included into the Laboratory of Clinical Physiology and Biomechanics (established in 1971) of the Ilizarov Centre, which created equipment for studying the processes in the tissues of the limbs and in the structure of the Ilizarov apparatus itself during its traction and compression impact on biological structures. The community of physicians, scientists and engineers made it possible to overcome a number of difficulties and problems. In their scientific publications and dissertations, the laboratory staff paid great attention to biomechanical research during transosseous osteosynthesis with the Ilizarov apparatus. At present, the staff of the Ilizarov Centre continues the traditions established by G.A. Ilizarov. For the first time in our country, a computer 3D video analysis of the kinematics and kinetics of orthopedic patients gait was introduced; it was supplemented with embedded software for the preparation of a clinical report of human gait biomechanics.

**Conclusions.** The initial stage of the biomechanical research at the Ilizarov Centre included the creation of the research equipment. Subsequently, the biomechanical studies carried out by the staff of the Centre for almost half a century have shown an applied and functional result of the realization of general biological regularities of the Ilizarov’s discovery. At present, the biomechanical research continues at a higher level with the use of modern high-tech equipment.

**Key words:** Ilizarov method, transosseous osteosynthesis, tension stress, Ilizarov effect, biomechanics

Received: 14.07.2022  
Accepted: 23.01.2023  
Published: 02.03.2023

**For citation:** Shchurova E.N., Dolganova T.I., Dolganov D.V., Menshchikova T.I. History of biomechanical research at the Ilizarov Centre (to the 100th anniversary of Academician G.A. Ilizarov). *Acta biomechanica scientifica*. 2023; 8(1): 247-259. doi: 10.29413/ABS.2023-8.1.25

15 июня 2021 г. исполнилось 100 лет со дня рождения Гавриила Абрамовича Илизарова, выдающегося учёного, академика Российской академии наук.

Г.А. Илизаров был прекрасным организатором и вдохновителем идей, объединившим вокруг себя коллектив единомышленников и создавшим новый метод лечения травм и заболеваний опорно-двигательной системы – метод чрескостного остеосинтеза.

В истории становления, развития и обоснования метода Илизарова, разработанного в середине прошлого века в Курганском НИИ экспериментальной травматологии и ортопедии, ныне – всемирно известном Центре, носящем имя своего создателя, значительное место занимают биомеханические исследования как самого аппарата, так и физиологической системы «аппарат – конечность». В данной работе мы остановимся на анализе основных этапов развития биомеханических исследований, проведённых и проводимых в настоящее время для физиологического определения влияния прологированного компрессионно-дистракционного воздействия аппарата Илизарова на сегмент конечности.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Анализ истории развития биомеханических исследований для обоснования эффективности метода чрескостного остеосинтеза по Илизарову.

Проведя в данной работе исторический экскурс, оценив с биологических позиций биомеханические подходы к формированию «философии метода Илизарова», авторы предлагают читателю оценить роль клиниче-

ской биомеханики для совершенствования диагностических процедур и оперативных вмешательств в ортопедии и травматологии.

В 1951 г. Г.А. Илизаров разработал аппарат, который относится к устройствам внешней фиксации и включает серию соединённых резьбовыми стержнями кольцевых опор для фиксации в натянутом состоянии тонких перекрёстно проведённых через кость спиц [1]. Эта разработка отражала концепцию индукции локального костеобразования минимально инвазивным способом, который предусматривает точную репозицию и стабильную фиксацию костных фрагментов, исключение микроподвижности на их стыке, щадящее отношение к окружающей кость мягким тканям, сохранение источников остеогенеза. Теоретической основой метода дистракционного остеосинтеза является установленная на основе клинического опыта и проведённых фундаментальных исследований общебиологическая закономерность стимуляции процессов регенерации и роста тканей под влиянием возникающего в них напряжения растяжения, зарегистрированная как открытие [2]. После получения хороших результатов лечения травматолого-ортопедических больных [3, 4] с помощью созданного Г.А. Илизаровым аппарата [1] оставалось много неопределённостей относительно особенностей кровообращения и иннервации оперированного сегмента конечности, состояния костей, окружающих мягких тканей, функции мышц и суставов на различных этапах лечения и реабилитации.

Чтобы восполнить этот пробел, в 1971 г. была создана лаборатория клинической физиологии и биомеханики, которую возглавил д.б.н. О.В. Тарушкин (рис. 1а). В начале 1970-х годов соответствующего оборудования для прове-



**а**

**РИС. 1.**

Руководители лаборатории клинической физиологии и биомеханики: **а** – Тарушкин Олег Владимирович, д.б.н. (1971–1977 гг.); **б** – Щуров Владимир Алексеевич, д.м.н., профессор, врач высшей категории (1977–2008 гг.)



**б**

**FIG. 1.**

Heads of the Laboratory of Clinical Physiology and Biomechanics: **а** – Oleg V. Tarushkin, Dr. Sc. (Biol.) (1971–1977); **б** – Vladimir A. Shchurov, Dr. Sc. (Med.), Professor, High Level Certificate Physician (1977–2008)

дения биомеханических исследований отечественная медицинская промышленность не выпускала, поэтому в состав лаборатории была введена группа инженеров, которая создавала аппаратуру для исследования процессов, происходящих в тканях конечностей и самой конструкции аппарата Илизарова при его тракционном и компрессионном воздействии на биологические структуры. Содружество врачей, научных сотрудников и инженеров позволило успешно решить ряд поставленных задач.

На фотографии (рис. 2) представлена встреча коллектива Центра Илизарова с Вольфом Мессингом в декабре 1971 г., где мы можем увидеть Олега Владимировича Тарушкина и Владимира Алексеевича Щурова (указаны белыми стрелками), которые в разное время руководили лабораторией клинической физиологии и биомеханики.

Наиболее актуальными задачами, которые стояли перед коллективом Центра в начале 1970-х годов,

были разработка безопасного режима сверления спицей костной ткани и оценка механизма фиксации спиц при их проведении через кортикальную пластинку кости. По заданию Г.А. Илизарова в лаборатории физиологии и биомеханики была разработана методика измерения температуры при сверлении кости спицей на любой глубине, непосредственно в процессе её проведения [5] (рис. 3).

Тщательно исследовалось влияние сил натяжения спиц на жёсткость фиксации фрагментов кости в аппарате, анализировалась жёсткость спиц Киршнера в различных компоновках аппарата Илизарова (рис. 4, 5) [6].

Г.А. Илизаров также ставил перед сотрудниками лаборатории задачу оценить динамику деформационных свойств костного регенерата (вновь сформированного участка кости) в процессе лечения пациентов.



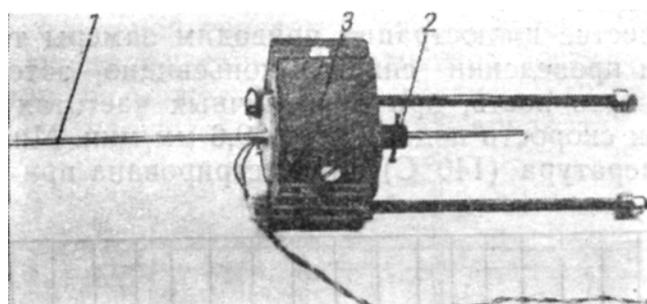
**РИС. 2.**  
Встреча коллектива Центра Илизарова с В.Г. Мессингом (20 декабря 1971 г.)

**FIG. 2.**  
Meeting of the staff of the Ilizarov Centre with Wolf Messing (December 20, 1971)



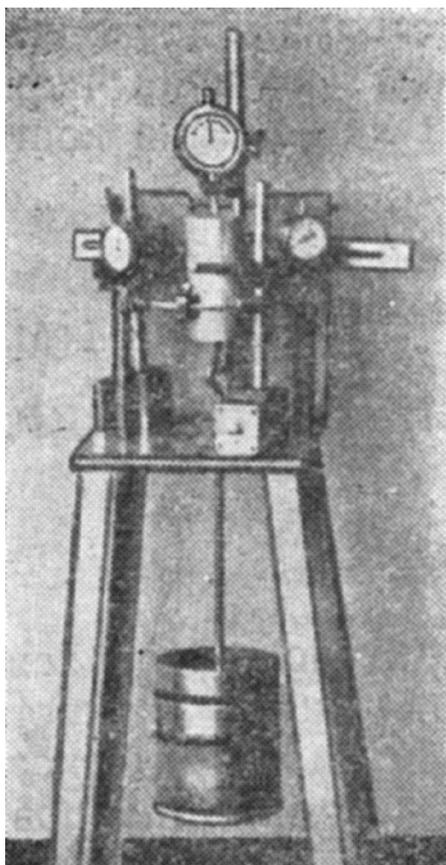
**а**

**РИС. 3.**  
**а** – инженер В.А. Немков за работой; **б** – спица-термопара для измерения температуры при сверлении кости (1 – спица; 2 – токосъёмник; 3 – корпус) [5]



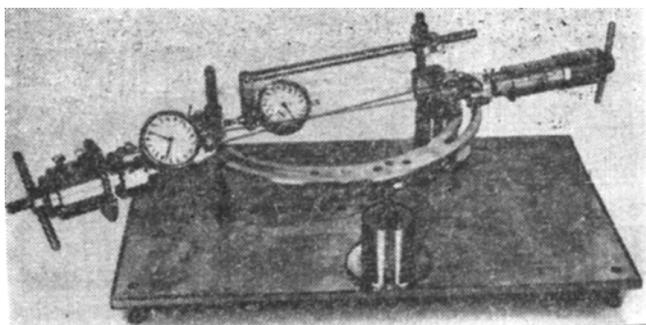
**б**

**FIG. 3.**  
**а** – engineer V.A. Nemkov at work, **б** – thermocouple wire for measuring the temperature during bone drilling (1 – wire; 2 – collector; 3 – case) [5]



**РИС. 4.**  
Стенд для измерения прогибов спиц [6]

**FIG. 4.**  
Stand for measuring wire deflections [6]



**РИС. 5.**  
Стенд для измерения деформации деталей аппарата Илизарова при различных нагрузках [6]

**FIG. 5.**  
Stand for measuring the deformation of the Ilizarov apparatus parts under different loads [6]

В лаборатории был разработан метод *in vivo* измерения осевой подвижности костных фрагментов в условиях компрессионного остеосинтеза аппаратом Илизарова. С помощью тензометрических датчиков проводили анализ изменения расстояния между спицами, выходящими из кости проксимально и дистально от места перелома в условиях осевого функционального нагружения различной силой. Данный метод позволил оценить

жёсткость системы «аппарат – конечность» и реологические свойства дистракционного регенерата [7, 8] (рис. 6).

Для исследований функций опорно-двигательного аппарата была сконструирована оригинальная биомеханическая дорожка «Подографометр». Это устройство позволяло в автоматическом режиме производить регистрацию и обработку временных параметров ходьбы [9, 10]. Производилась количественная оценка ходьбы. Полученные данные подвергались статистической разработке на ЭВМ «НАИРИ-2» по программе, разработанной сотрудником Центра Е.Б. Смирновым [11]. С помощью «Подографометра» осуществляли оценку функциональных результатов лечения и эффективности реабилитационных мероприятий у ортопедо-травматологических больных, пролеченных по методу Илизарова.

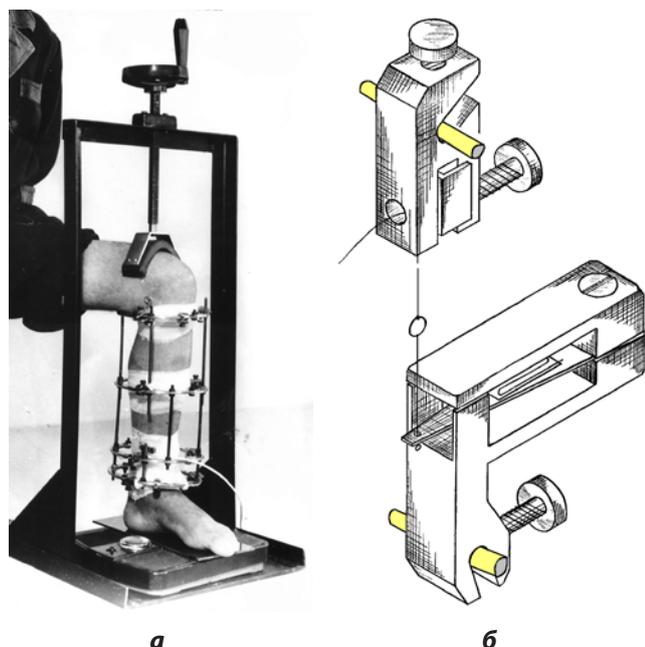
Был разработан электронно-механический шагомер для оценки двигательной активности пациентов с травмами и заболеваниями опорно-двигательного аппарата [12]. Предложена конструкция датчика-акселерометра (рис. 7) для определения качественных и количественных характеристик кинематики походки здорового и больного человека, оценки динамики локомоторного акта под влиянием проводимого лечения и функциональной реабилитации [13]. В этих конструкциях применялись подходы в определении биомеханики движения, которые используются в современных электронных гаджетах.

Оценка функциональной нагрузки на нижнюю конечность в процессе чрескостного остеосинтеза аппаратом Илизарова осуществлялась с помощью оригинальной методики (каргометрии) и устройства, разработанного в Центре. Клиническая апробация данной методики к.м.н. Борисом Ивановичем Кудриным позволила по интегральным величинам временно-силовых параметров взаимодействия конечностей с биомеханической дорожкой оценить опорные возможности конечности при ходьбе в процессе лечения аппаратом Илизарова [14–16] (рис. 8).

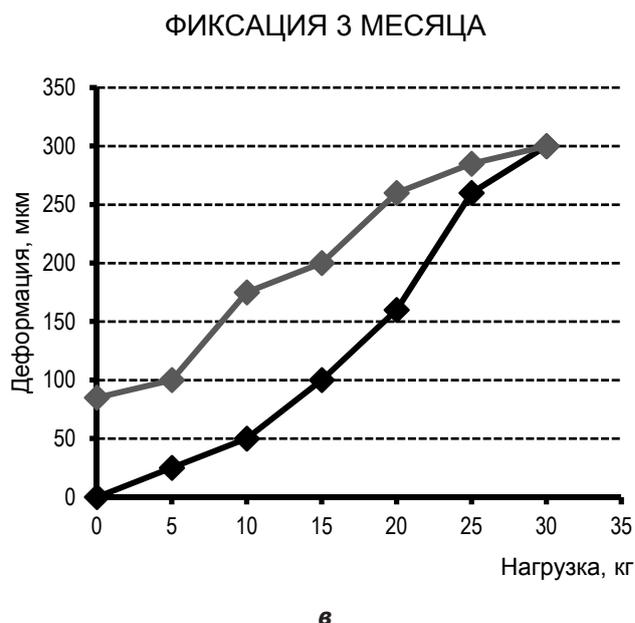
В конце 1970-х годов Г.А. Илизаровым была сформулирована концепция «о стимулирующем влиянии напряжения растяжения на процессы роста и регенерации тканей» [2]. Естественно, возникла необходимость тщательной разработки теоретического обоснования и количественного подтверждения положений данной концепции [17]. Сотрудниками лаборатории были разработаны оригинальные конструкции для исследования упругости кожных покровов – эластомер и тонуса мышц – тонометр (рис. 9) [18–20].

Исследования здоровых детей показали, что величины упругости кожных покровов и мышц увеличиваются по мере естественного продольного роста конечности. У пациентов с отставанием в росте сегментов конечностей после их оперативного удлинения было выявлено, что показатели упругости мышц, кожных покровов достигают значений, характерных для здоровых людей с такой же длиной соответствующей конечности [21–23].

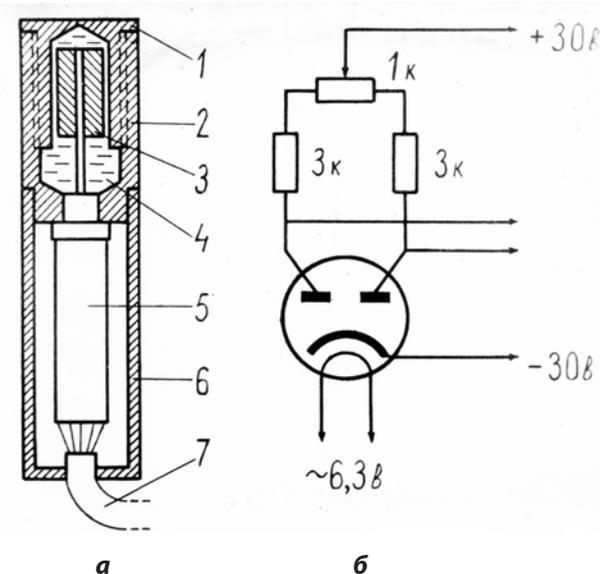
В процессе развития и постоянного совершенствования метода Илизарова возникала необходимость точной количественной оценки функции мышц (силы) оперированной конечности. Доктором медицинских наук, профессором В.А. Щуровым совместно с сотрудниками



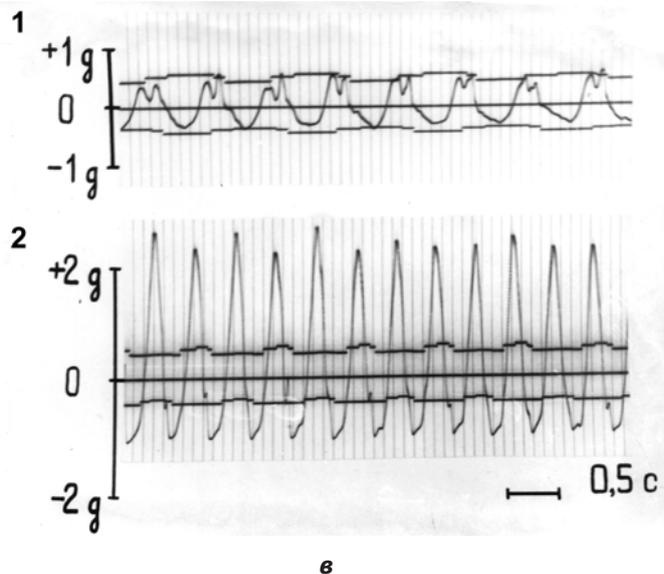
**РИС. 6.**  
 Определение микроподвижности костных отломков:  
**а** – установка для определения микроподвижности костных отломков; **б** – крепление тензометрического датчика; **в** – график определения реологических свойств дистракционного регенерата [7, 8]



**FIG. 6.**  
 Determination of the micromotion of bone fragments: **a** – the unit for determining the micromotion of bone fragments; **b** – tensor-metric sensor mounting; **v** – diagram for determining the rheological properties of distraction regenerated bone [7, 8]



**РИС. 7.**  
 Устройство акселерометра (а), схема включения его в измерительную цепь (б) и акселерограмма (в) при ходьбе (1) и беге (2) здорового испытуемого [13]



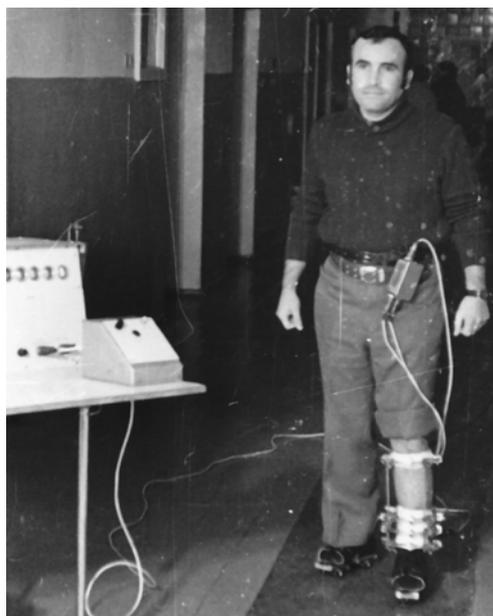
**FIG. 7.**  
 Accelerometer device (а), the scheme of its inclusion in the measuring circuit (б) and the accelerogram (в) during walking (1) and running (2) of a healthy subject [13]

лаборатории были созданы оригинальные динамометрические стенды [24, 25]. В дальнейшем эти методики были усовершенствованы [26, 27] и опубликованы [28, 29] (рис. 10).

На этапе внедрения в клиническую практику амбулаторного режима лечения пациентов ортопедо-травматологического профиля (в конце 1980-х и начале 1990-х гг.) потребовалась разработка функциональ-

ных критериев для перевода стационарных пациентов на этот режим лечения. Сотрудники лаборатории провели комплексную работу, включающую исследование суточной локомоторной активности, линейной скорости передвижения, асимметрии функциональной нагрузки на конечность, энергетической стоимости локомоций.

При решении вопроса о целесообразности и своевременности перевода стационарных пациентов на ам-



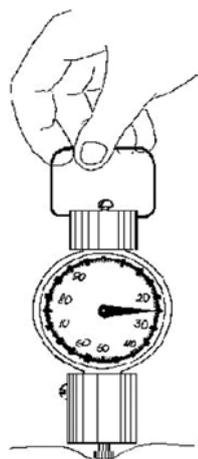
**а**

**РИС. 8.**  
**а** – внешний вид пациента во время обследования по оценке функциональной нагрузки на нижнюю конечность в процессе чрескостного остеосинтеза аппаратом Илизарова [16];  
**б** – к.м.н. Борис Иванович Кудрин

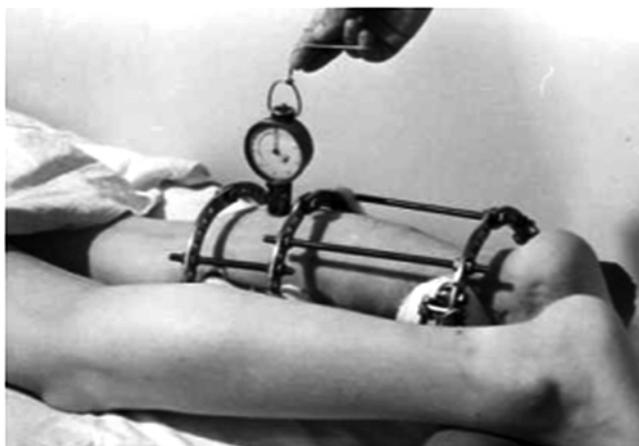


**б**

**FIG. 8.**  
**а** – the patient during the evaluation of the lower limb functional load during transosseous osteosynthesis with the Ilizarov apparatus [16]; **б** – Boris I. Kudrin, Cand. Sc. (Med.)

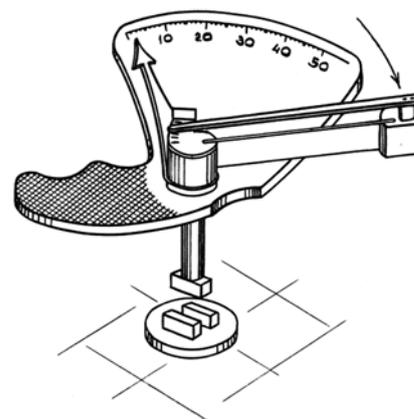


**а**



**б**

**РИС. 9.**  
Оригинальное устройство для исследования биомеханических свойств мышц – тонометр [18, 20]: **а** – внешний вид (схема); **б** – процесс измерения тонуса мышц. **в** – оригинальная конструкция (схема) для оценки упругости кожных покровов – эластометр [19]



**в**

**FIG. 9.**  
A tonometer, an original device for studying biomechanical properties of muscles [18, 20]: **а** – external view (scheme); **б** – the process of measuring the myogenic tonus. **в** – an elastometer, the original design (scheme) for the assessment of skin elasticity [19]

булаторный режим лечения, наряду с оценкой клинического состояния и анализом обеспеченности их социально-бытовыми условиями, предлагалось использовать следующие физиологические критерии: величина асимметрии нагружения нижних конечностей при стоянии без дополнительных средств опоры – не более 20%; скорость ходьбы – не менее 2 км/ч; суточная локомоторная активность – не менее 2000 м; частота пульса при ходьбе – не более 100–110 уд./мин [30].

В 1990–2000-е годы в лаборатории физиологии и биомеханики выполнены и успешно защищены ряд кандидатских и докторских диссертаций, в которых биомеханический компонент был одним из ведущих.

В докторской диссертации В.А. Щурова (1993) был обоснован физиологический механизм эффекта стимулирующего влияния напряжения растяжения тканей, возникающего в процессе естественного роста и при удлинении конечностей по Илизарову [31].

**а****РИС. 10.**

Динамометрические стенды: **а** – внешний вид динамометрического стенда для исследования силы мышц бедра; **б** – процесс измерения; **в** – исследование силы мышц голени в процессе лечения аппаратом Илизарова

**б****FIG. 10.**

Dynamometric stands: **a** – an external view of the dynamometric stand for studying femoral muscle strength; **b** – the process of measuring; **v** – studying the lower leg muscle strength during treatment with the Ilizarov apparatus

В кандидатской диссертации Т.И. Долгановой (1993) проведён анализ особенностей гемодинамики, биомеханических свойств тканей и функционального состояния пациентов с дефектами костей голени при лечении по методу Илизарова [32]. В работе Е.Н. Щуровой (1996) определена роль двигательной активности в сохранении резервов функциональной адаптации кровообращения у пациентов с облитерирующими поражениями артерий нижних конечностей при лечении по методу Г.А. Илизарова [33–35]. В диссертационной работе Т.И. Менщиковой (1997) дан физиологический анализ [36–38] влияния удлинения нижних конечностей на показатели локомоторной двигательной активности пациентов с ахондроплазией [39]. В работе Д.В. Долганова (1997) освещена роль тканевой гидратации в вегетативном обеспечении конечности при чрескостном остеосинтезе [40, 41]. В диссертационном исследовании Л.Ю. Горбачевой (2002) проанализировано влияние степени функциональной нагрузки повреждённой конечности на восстановление сократительной способности мышц и репаративную регенерацию кости при лечении травматологических больных по методу Г.А. Илизарова [42].

В докторских диссертациях продолжены направления разработки теоретического обоснования и количественного подтверждения общебиологических закономерностей открытия Г.А. Илизарова [2]. Физиологические исследования способствовали более углублённому пониманию механизмов «эффекта Г.А. Илизарова», его биомеханических и структурных составляющих, иллюстрировали прикладной функциональный результат реализации закономерностей открытия Г.А. Илизарова [43–45].

Результаты многолетних исследований и разработанные конструкции были обобщены, усовершенствованы и опубликованы во втором лондонском издании сборника «Биомеханика и биоматериалы в ортопедии» в 2016 г. (Springer) [46].

В настоящее время в Центре Илизарова продолжают и приумножаются биомеханические исследования, традиции которых заложены более полувека назад.

Одно из направлений исследований – это поиск диагностических критериев оценки нарушений вертикальной ориентации позвоночника. Сотрудники лаборатории стали использовать пролонгированное топографическое обследование для оценки стереотипа поструральной активности позвоночника и его кинематической лабильности. Внедрены функциональные пробы с коррекцией и гиперкоррекцией укорочения конечностей, что обеспечивало дифференцированную диагностику структуральных и функциональных сколиозов, определение необходимости и величины оптимальной коррекции разновысокости ног. Топографический анализ стереотипов поструральной активности и кинематической лабильности позвоночника позволил изучать патогенетические условия, при которых функциональные сколиозы трансформируются в структуральные [47–49].

В лаборатории анализа походки ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России (Ilizarov Gait Analysis Laboratory) на 7-метровой дорожке производится компьютерный анализ параметров ходьбы у пациентов ортопедического профиля с использованием современных систем видеоанализа кинетики и кинематики движений человека [50] (рис. 11).

Данные регистрировались 8 оптическими камерами Qualisys 7+ (Швеция) с технологией видеозахвата пассивных маркеров, синхронизированными с шестью динамометрическими платформами KISTLER (Швейцария) и дополненными 16 беспроводными датчиками EMG системы Noraxon (США). Анализ кинематики и кинетики проводится в программах Qualisys и Visual 3D (C-Motion) с автоматизированным расчётом значений. С использованием опции «виртуального подъёма платформы» определяют



**РИС. 11.**  
Компьютерный анализ параметров ходьбы с использованием современных систем видеоанализа: **а** – общий вид и обустройство лаборатории анализа походки; **б** – процесс обследования пациента сотрудниками лаборатории; **в** – внешний вид пациента перед обследованием со светоотражающими маркерами и электромиографическими датчиками

**FIG. 11.**  
Computer analysis of gait parameters using modern video analysis systems: **a** – general view and arrangement of the gait analysis laboratory; **b** – the process of examining the patient by the laboratory staff; **v** – external view of a patient before the examination with reflective markers and electromyographic sensors

ся биомеханические характеристики «лестничного движения». Результаты исследований отражены в современных публикациях [51–53]. В нашем Центре сформировано встроенное программное обеспечение для формирования отчёта по результатам обследования в виде дополняющих графики цифровых данных в таблицах [54].

## ВЫВОДЫ

Начальный этап развития биомеханических исследований в Центре Илизарова включал создание аппаратуры для исследования процессов, происходящих в тканях конечностей и самой конструкции аппарата Илизарова при его тракционном и компрессионном воздействии на биологические структуры.

Содружество врачей, научных сотрудников и инженеров лаборатории клинической физиологии и биомеханики (созданной в 1971 г.) позволило разработать устройства и методики для измерения температуры при сверлении кости спицей; оценки влияния сил натяжения спиц на жёсткость фиксации фрагментов кости в аппарате; исследования осевой микроподвижности костных фрагментов и реологических свойств костного регенерата; изучения функций опорно-двигательного аппарата (оригинальная биомеханическая дорожка, электронно-механический шагомер, акселерометр); исследования биомеханических свойств мышц (миотонометр, динамометрические стенды); анализа упруго-эластических свойств кожи (эластометр).

В последующие годы комплексные биомеханические исследования способствовали осуществлению теоретического обоснования и количественному подтверждению стимулирующего влияния напряжения растяжения на процессы роста и регенерации тканей – «эффекта Илизарова», показали прикладной, функциональный

результат реализации общебиологических закономерностей открытия Г.А. Илизарова.

В настоящее время в Центре Илизарова осуществлён переход на высокотехнологичные методы биомеханических исследований, разработано встроенное программное обеспечение формирования отчёта в виде дополняющих графики цифровых данных компьютерного 3D-видеоанализа походки.

## Конфликт интересов

Авторы данной статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Илизаров Г.А. Способ сращения костей при переломах и аппарат для осуществления этого способа: Авторское свидетельство № 98471. № 102/17-762/417962; заявл. 9.06.1952; опубл. 17.08.1954. Бюл. № 6.
- Илизаров Г.А. Общебиологическое свойство тканей отвечать на дозированное растяжение ростом и регенерацией – «Эффект Илизарова»: Открытие № 355 СССР. № 11271; заявл. 25.12.1985; опубл. 23.04.1989. Бюл. «Открытия. Изобретения» № 15.
- Илизаров Г.А. Десятилетний опыт применения аппарата автора при компрессионном остеосинтезе в травматологии и ортопедии. Межобластная научно-практическая конференция института (посвященная компрессионному остеосинтезу, суставной патологии и вопросам клинической травматологии) (Свердловск, 17–20 апреля 1961 г.). Свердловск, 1961: 10–12.
- Илизаров Г.А. Чрескостный компрессионный остеосинтез аппаратом автора (экспериментально-клиническое исследование): автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Пермь: Пермский государственный медицинский институт; 1968.
- Тарушкин О.В., Руц Ф.Я., Шевченко Г.И. Измерение температуры режущего конца спицы при сверлении кости.

Чрескостный компрессионный, дистракционный и компрессионно-дистракционный остеосинтез в травматологии и ортопедии: Сборник научных трудов. Челябинск; 1976; 2: 134-137.

6. Либерман С.Б., Семенова В.Д. Влияние сил натяжения спиц на жесткость фиксации фрагментов кости в аппаратах Илизарова. Чрескостный компрессионный, дистракционный и компрессионно-дистракционный остеосинтез в травматологии и ортопедии: Сборник научных трудов. Челябинск; 1976; 2: 143-148.

7. Щуров В.А., Кудрин Б.И., Шишкин А.В. Динамика изменения микроподвижности костных отломков при компрессионном остеосинтезе. Ортопедия, травматология и протезирование. 1979; (6): 44-45.

8. Щуров В.А., Кудрин Б.И., Шеин А.П. Метод измерения осевой микроподвижности костных фрагментов голени в условиях компрессионного остеосинтеза. Ортопедия, травматология и протезирование. 1981; (5): 52-53.

9. Котельников В.П., Тарушкин О.В., Руц Ф.Я., Кудрин Б.И. Устройство для автоматической регистрации и обработки временных параметров ходьбы – «подографометр». Теоретические и практические аспекты чрескостного компрессионного и дистракционного остеосинтеза: Тезисы докладов Всесоюзной научно-практической конференции (Курган, 22–23 июня 1976 г.). Курган; 1976: 30-31.

10. Кудрин Б.И., Мурашка В.И., Стерликова Н.Н. Влияние оперативного лечения и обучение ходьбе на временные показатели походки больных с анкилозом тазобедренного сустава в порочном положении. Чрескостный компрессионный, дистракционный и компрессионно-дистракционный остеосинтез в травматологии и ортопедии: Сборник научных трудов. Л.; 1978; 4: 103-105.

11. Кудрин Б.И., Стерликова Н.Н. Изменение временной структуры шага под влиянием обучения ходьбе больных с патологией тазобедренного сустава. Чрескостный компрессионный, дистракционный и компрессионно-дистракционный остеосинтез в травматологии и ортопедии: Сборник научных трудов. Челябинск; 1976; 2: 107-110.

12. Кудрин Б.И., Руц Ф.Я. Методика и устройство для измерения двигательной активности больных с травмами и заболеваниями опорно-двигательного аппарата. Лечение переломов и их последствий методом чрескостного остеосинтеза: Материалы Всесоюзной научно-практической конференции. Курган; 1979: 219-221.

13. Кудрин Б.И. Изучение с помощью механотронных акселерометров некоторых кинематических параметров походки больных с патологией тазобедренного сустава: отчет о НИР (заключительный). Курган; 1979.

14. Руц Ф.Я., Кудрин Б.И., Шевченко Г.И., Тарушкин О.В. Устройство для измерения функциональной нагрузки на нижние конечности при стоянии и ходьбе. Теоретические и практические аспекты чрескостного компрессионного и дистракционного остеосинтеза: Тезисы докладов Всесоюзной научно-практической конференции (Курган, 22–23 июня 1976 г.). Курган; 1976: 28-30.

15. Кудрин Б.И., Голиков В.Д. Опороспособность нижних конечностей в период фиксации переломов бедра аппаратом Илизарова. Теоретические и практические аспекты чрескостного компрессионного и дистракционного остеосинтеза: Тезисы докладов Всесоюзной научно-практической конференции (Курган, 22–23 июня 1976 г.). Курган; 1976: 31-32.

16. Кудрин Б.И., Шестаков В.А. Функциональная нагрузка на нижние конечности у больных с ложными суставами костей голени во время амбулаторного лечения по методу Илизарова. Чрескостный компрессионный, дистракционный и компрессионно-дистракционный остеосинтез в травматологии и ортопедии: Сборник научных трудов. Челябинск; 1976; 2: 100-103.

17. Утенькин А.А., Дьячкова Г.В. Об исходном сопротивлении мягких тканей при удлинении конечности. Ортопедия, травматология и протезирование. 1979; (6): 25-27.

18. Щуров В.А., Кудрин Б.И., Макушин В.Д., Шеин А.П. Исследования биомеханических свойств кожи и мышц при лечении больных с разгибательными контрактурами коленного сустава. Лечение переломов и их последствий методом чрескостного остеосинтеза: Материалы Всесоюзной научно-практической конференции. Курган; 1979: 221-223.

19. Кудрин Б.И. Методика прижизненного механического тестирования кожных покровов человека. Ортопедия, травматология и протезирование. 1980; (5): 63-65.

20. Щуров В.А., Кудрин Б.И., Шеин А.П. Взаимосвязь биомеханических и функциональных характеристик мягких тканей голени при ее удлинении по Илизарову. Ортопедия, травматология и протезирование. 1981; (10): 30-34.

21. Щуров В.А., Илизаров Г.А. Влияние напряжения растяжения на биомеханические свойства мышц, их кровоснабжение и рост голени. Физиология человека. 1988; 14(1): 26-32.

22. Щуров В.А., Долганова Т.И., Щурова Е.Н. Скорость распространения пульсовой волны при изменении длины конечности и регионарного артериального давления у обследуемых разного возраста. Физиология человека. 1993; 19(4): 64-69.

23. Щуров В.А., Гребенюк Л.А. Зависимость биомеханических свойств мышц голени от их длины у больных с патологией опорно-двигательного аппарата. Физиология человека. 1994; 20(3): 104-112.

24. Кудрин Б.И., Шеин А.П. Измерение силовых характеристик сгибателей и разгибателей голени. Ортопедия, травматология и протезирование. 1982; (3): 44-46.

25. Кудрин Б.И., Щуров В.А., Стегалин А.А. Стенд для измерения силовых характеристик мышц голени у ортопедо-травматологических больных. Ортопедия, травматология и протезирование. 1985; (8): 55-57.

26. Щуров В.А. Устройство для ангулодинамометрии: Пат. № 2029535 Рос. Федерация; МКИ6 А61 Н1/10. № 5042260/14; заявл. 15.05.1992; опубл. 27.02.1995. Бюл. № 6.

27. Щуров В.А., Долганов Д.В., Долганова Т.И., Атманский И.А. Устройство для определения силы мышц бедра: Пат. № 35703 Рос. Федерация; МКИ7 А61 В17/56. № 2003118782/20; заявл. 23.06.2003; опубл. 10.02.2004. Бюл. № 4.

28. Shchurov VA, Dolganova TI, Dolganov DV. Femoral muscle dynamometer. Biomedical Engineering. 2014; 48(1): 30-32. doi: 10.1007/s10527-014-9410-9

29. Shchurov VA, Dolganova TI, Dolganov DV. Device for measuring lower leg muscle strength. Biomedical Engineering. 2016; 50(2): 124-127. doi: 10.1007/s10527-016-9602-6

30. Шевцов В.И., Долганов Д.В., Щуров В.А., Швед С.И., Шестаков В.А., Лисина Т.И., и др. Некоторые физиологические критерии перевода стационарных ортопедо-травматологических больных на лечение. Актуальные проблемы чрескостного остеосинтеза по Илизарову: Сборник научных трудов. Курган; 1987; 12: 92-98.

31. Щуров В.А. Физиологические основы эффекта стимулирующего влияния растяжения на рост и развитие при уд-

линии конечности по Илизарову: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Пермь; 1993.

32. Долганова Т.И. *Кровообращение и биомеханические свойства конечностей у больных с дефектами костей голени при лечении по методу Илизарова*: автореф. дис. ... канд. мед. наук. Новосибирск; 1993.

33. Щурова Е.Н. *Возрастные резервы периферического кровообращения и их роль в компенсации недостаточности кровоснабжения нижних конечностей*: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Челябинск; 1996.

34. Шевцов В.И., Щурова Е.Н., Щуров В.А. Функциональные исходы лечения по методу Илизарова больных облитерирующим эндартериитом нижних конечностей. *Хирургия*. 1997; (6): 47-50.

35. Шевцов В.И., Щуров В.А., Щурова Е.Н., Шатохин В.Д., Гребенюк Л.А. Сравнительная оценка функциональной реабилитации больных с облитерирующим тромбангиитом после симпатэктомии, остеотрепанации и лечения по методу Илизарова. *Гений ортопедии*. 1996; (4): 40-42.

36. Меншикова Т.И. *Изменение функции опорно-двигательного аппарата при коррекции нарушенного естественного роста нижних конечностей у детей и подростков*: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Челябинск; 1997.

37. Меншикова Т.И., Щуров В.А. Влияние удлинение нижних конечностей на показатели локомоторной двигательной активности больных ахондроплазией. *Гений ортопедии*. 1997; (1): 19-23.

38. Щуров В.А., Меншикова Т.И. Особенности продольного роста голени у больных с ахондроплазией. *Физиология человека*. 1999; 25(2): 114-118.

39. Shevtsov VI, Menshchikova TI, Shchurov VA. Theoretical premises and practical results of lower limb length increase in patient with achondroplasia. *Russian Journal of Biomechanics*. 2000; 4(3): 74-79.

40. Долганов Д.В. *Роль тканевой гидратации в вегетативном обеспечении конечности при чрескостном остеосинтезе*: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Челябинск; 1997.

41. Долганов Д.В., Свешников А.А. Участие тканевой гидратации в регуляции костеобразовательной активности. *Гений ортопедии*. 1996; (4): 47-51.

42. Горбачева Л.Ю. *Влияние функциональной нагрузки поврежденной конечности на восстановление сократительной способности мышц и репаративную регенерацию кости*: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тюмень; 2002.

43. Щурова Е.Н. *Особенности возрастной динамики функционального состояния нижних конечностей в условиях недостаточности кровоснабжения и иннервации*: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Тюмень; 2005.

44. Долганова Т.И. *Физиологический анализ компенсаторно-приспособительных процессов в организме при лечении по Илизарову пациентов с дефектом длинных костей*: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Курган; 2006.

45. Меншикова Т.И. *Структурно-функциональные аспекты в обосновании оперативного удлинения нижних конечностей*: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Тюмень; 2007.

46. Shchurov VA. Effect of tension stress by surgical lengthening of limbs with growth retardation on biomechanical and functional properties of tissues. *Biomechanics and Biomaterials in Orthopedics*. 2016; 23: 283-298. doi: 10.1007/978-1-84882-664-9\_21

47. Долганов Д.В., Меншикова И.А., Ершов Э.В. Топографический контроль коррекции деформаций позвоночника

у пациентов с односторонним укорочением нижней конечности. *Хирургия позвоночника*. 2010; (3): 42-47.

48. Долганов Д.В., Колесников С.В., Долганова Т.И. Топографические проявления и критерии мобильных деформаций позвоночника. *Гений ортопедии*. 2017; 23(2): 195-200.

49. Долганов Д.В., Долганова Т.И., Самылов В.В. Оценка нарушений постуральной функции позвоночника в ортостатических стереотипах. *Гений ортопедии*. 2018; 24(3): 357-364.

50. Аксенов А.Ю., Хит Г.Х., Клишковская Т.А., Долганова Т.И. Методология видеоанализа в диагностике нарушений локомоторной функции у детей с церебральным параличом при использовании ограниченного числа светоотражающих камер (обзор литературы). *Гений ортопедии*. 2019; 25(1): 102-110. doi: 10.18019/1029-4427-2019-25-1-102-110

51. Popkov D, Dolganova T, Mingasov E, Dolganov D, Kobzyev A. Combined technique of titanium telescopic rods and external fixation in osteogenesis imperfecta patients: First 12 consecutive cases. *J Orthop*. 2020; (22): 316-325. doi: 10.1016/j.jor.2020.05.017

52. Гатамов О.И., Долганова Т.И., Долганов Д.В., Борзун Д.Ю., Чибиров Г.М., Попков Д.А. Изменения походки у взрослых и подростков с ДЦП после многоуровневых вмешательств при исходном типе ходьбы, классифицируемом как stiff knee gait. *Гений ортопедии*. 2020; 26(2): 185-190. doi: 10.18019/1028-4427-2020-26-2-185-190

53. Аксенов А.Ю., Хатчинс С., Клишковская Т.А. Использование видеоанализа походки для оптимизации локомоторного стереотипа у пациентов с перемежающейся хромотой. *Гений ортопедии*. 2019; 25(1): 79-85. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-1-79-8

54. Аксенов А.Ю., Клишковская Т.А. *Программа формирования отчета биомеханики ходьбы человека*: Свидетельство № 2020665238 Рос. Федерация; правообладатель «НМИЦ травматологии и ортопедии им. акад. Г.А. Илизарова» МЗ РФ; заявл. 24.11.2020; опублик. 24.11.2020.

## REFERENCES

1. Ilizarov GA. *The method of splicing bones in fractures and the apparatus for implementing this method*: Inventor's certificate No. 98471. 1954; (6). (In Russ.).

2. Ilizarov GA. *The general biological property of tissues to respond to dosed stretching with growth and regeneration – "The Ilizarov Effect"*: Discovery No. 355 of the USSR. 1989; (15). (In Russ.).

3. Ilizarov GA. Ten years of experience in the use of the author's apparatus for compression osteosynthesis in traumatology and orthopedics. *Mezhblastnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya instituta (posvyashchennaya kompressionnomu osteosintezu, sustavnoy patologii i voprosam klinicheskoy travmatologii) (Sverdlovsk, 17–20 aprelya 1961 g.)*. Sverdlovsk, 1961: 10-12. (In Russ.).

4. Ilizarov GA. *Transosseous compression osteosynthesis with the author's apparatus (experimental clinical study)*: Abstract of the Dissertation of Dr. Sc. (Med.). Perm; 1968. (In Russ.).

5. Tarushkin OV, Ruts FYa, Shevchenko GI. Measurement of the temperature of the cutting end of the wire when drilling the bone. *Chreskostnyy kompressionnyy, distraktsionnyy i kompressionno-distraktsionnyy osteosintez v travmatologii i ortopedii: Sbornik nauchnykh trudov*. Chelyabinsk; 1976; 2: 134-137. (In Russ.).

6. Lieberman SB, Semenova VD. Effect of the tension forces of the wires on the rigidity of the bone fragments fixation in the Ilizarov apparatus. *Chreskostnyy kompressionnyy, distraktsionnyy i kompressionno-distraktsionnyy osteosintez v travmatologii i ortopedii: Sbornik nauchnykh trudov*. Chelyabinsk; 1976; 2: 143-148. (In Russ.).
7. Shchurov VA, Kudrin BI, Shishikin AV. Dynamics of changes in the micromotion of bone fragments during compression osteosynthesis. *Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics*. 1979; (6): 44-45. (In Russ.).
8. Shchurov VA, Kudrin BI, Shein AP. A method for measuring the axial micromotion of the shin bone fragments under conditions of compression osteosynthesis. *Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics*. 1981; (5): 52-53. (In Russ.).
9. Kotelnikov VP, Tarushkin OV, Ruts FYa, Kudrin BI. A device for automatic recording and processing of walking time parameters – a “podographometer”. *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty chreskostnogo kompressionnogo i distraktsionnogo osteosinteza: Tezisy dokladov Vsesoyuznoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Kurgan, 22–23 iyunya 1976 g.)*. Kurgan; 1976: 30-31. (In Russ.).
10. Kudrin BI, Murashka VI, Sterlikova NN. Effect of surgical treatment and learning to walk on the temporal indicators of gait in patients with hip joint ankylosis in a vicious position. *Chreskostnyy kompressionnyy, distraktsionnyy i kompressionno-distraktsionnyy osteosintez v travmatologii i ortopedii: Sbornik nauchnykh trudov*. Leningrad; 1978; 4: 103-105. (In Russ.).
11. Kudrin BI, Sterlikova NN. Change in the temporal structure of the step under the influence of learning to walk in patients with hip joint pathology. *Chreskostnyy kompressionnyy, distraktsionnyy i kompressionno-distraktsionnyy osteosintez v travmatologii i ortopedii: Sbornik nauchnykh trudov*. Chelyabinsk; 1976; 2: 107-110. (In Russ.).
12. Kudrin BI, Ruts FYa. Method and device for measuring the motor activity of patients with injuries and diseases of the musculoskeletal system. *Lechenie perelomov i ikh posledstviy metodom chreskostnogo osteosinteza: Materialy Vsesoyuznoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Kurgan; 1979: 219-221. (In Russ.).
13. Kudrin BI. *The study of some kinematic parameters of the gait of patients with pathology of the hip joint using mechatronic accelerometers: Research record (final)*. Kurgan; 1979. (In Russ.).
14. Ruts FYa, Kudrin BI, Shevchenko GI, Tarushkin OV. A device for measuring the functional load on the lower limbs while standing and walking. *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty chreskostnogo kompressionnogo i distraktsionnogo osteosinteza: Tezisy dokladov Vsesoyuznoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Kurgan, 22–23 iyunya 1976 g.)*. Kurgan; 1976: 28-30. (In Russ.).
15. Kudrin BI, Golikov VD. Supporting ability of the lower extremities during the fixation of hip fractures with the Ilizarov apparatus. *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty chreskostnogo kompressionnogo i distraktsionnogo osteosinteza: Tezisy dokladov Vsesoyuznoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Kurgan, 22–23 iyunya 1976 g.)*. Kurgan; 1976: 31-32. (In Russ.).
16. Kudrin BI, Shestakov VA. Functional load on the lower limbs in patients with false joints of the leg bones during outpatient treatment according to the Ilizarov method. *Chreskostnyy kompressionnyy, distraktsionnyy i kompressionno-distraktsionnyy osteosintez v travmatologii i ortopedii: Sbornik nauchnykh trudov*. Chelyabinsk; 1976; 2: 100-103. (In Russ.).
17. Utenkin AA, Dyachkova GV. On the initial resistance of soft tissues during limb lengthening. *Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics*. 1979; (6): 25-27. (In Russ.).
18. Shchurov VA, Kudrin BI, Makushin VD, Shein AP. Studies of the biomechanical properties of the skin and muscles in the treatment of patients with extensor contractures of the knee joint. *Lechenie perelomov i ikh posledstviy metodom chreskostnogo osteosinteza: Materialy Vsesoyuznoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Kurgan; 1979: 221-223. (In Russ.).
19. Kudrin BI. The method of intravital mechanical testing of human skin. *Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics*. 1980; (5): 63-65. (In Russ.).
20. Shchurov VA, Kudrin BI, Shein AP. The relationship of biomechanical and functional characteristics of the soft tissues of the lower leg during its lengthening according to Ilizarov. *Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics*. 1981; (10): 30-34. (In Russ.).
21. Shchurov VA, Ilizarov GA. The effect of tensile stress on the biomechanical properties of muscles, their blood supply and leg growth. *Human Physiology*. 1988; 14(1): 26-32. (In Russ.).
22. Shchurov VA, Dolganova TI, Shchurova EN. Velocity of pulse wave propagation with changes in limb length and regional arterial pressure in subjects of different age. *Human Physiology*. 1993; 19(4): 64-69. (In Russ.).
23. Shchurov VA, Grebenyuk LA. Dependence of the biomechanical properties of the leg muscles on their length in patients with pathology of the musculoskeletal system. *Human Physiology*. 1994; 20(3): 104-112. (In Russ.).
24. Kudrin BI, Shein AP. Measurement of the power characteristics of the flexors and extensors of the lower leg. *Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics*. 1982; (3): 44-46. (In Russ.).
25. Kudrin BI, Shchurov VA, Stegalin AA. Stand for measuring the strength characteristics of the leg muscles in orthopedic and trauma patients. *Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics*. 1985; (8): 55-57. (In Russ.).
26. Shchurov VA. *Device for angulodynamometry*: Patent No. 2029535 of the Russian Federation. 1995; (6). (In Russ.).
27. Shchurov VA, Dolganov DV, Dolganova TI, Atmansky IA. *Device for determining the strength of the thigh muscles*: Patent No. 35703 of the Russian Federation. 2004; (4). (In Russ.).
28. Shchurov VA, Dolganova TI, Dolganov DV. Femoral muscle dynamometer. *Biomedical Engineering*. 2014; 48(1): 30-32. doi: 10.1007/s10527-014-9410-9
29. Shchurov VA, Dolganova TI, Dolganov DV. Device for measuring lower leg muscle strength. *Biomedical Engineering*. 2016; 50(2): 124-127. doi: 10.1007/s10527-016-9602-6
30. Shevtsov VI, Dolganov DV, Shchurov VA, Shved SI, Shestakov VA, Lisina TI, et al. Some physiological criteria for the transfer of inpatient orthopedic and trauma patients for treatment. *Aktual'nye problemy chreskostnogo osteosinteza po Ilizarovu: Sbornik nauchnykh trudov*. Kurgan; 1987; 12: 92-98. (In Russ.).
31. Shchurov VA. *Physiological basis of the effect of the stimulation of stretching on growth and development during limb lengthening according to Ilizarov*: Abstract of the Dissertation of Dr. Sc. (Med.). Perm; 1993. (In Russ.).
32. Dolganova TI. *Blood circulation and biomechanical properties of the limbs in patients with leg bone defects in the treatment according to the Ilizarov method*: Abstract of the Dissertation of Cand. Sc. (Med.). Novosibirsk; 1993. (In Russ.).
33. Shchurova EN. *Age-related reserves of peripheral circulation and their role in compensating for insufficient blood supply to the lower extremities*: Abstract of the Dissertation of Cand. Sc. (Biol.). Chelyabinsk; 1996. (In Russ.).

34. Shevtsov VI, Shchurova EN, Shchurov VA. Functional outcomes of treatment according to the Ilizarov method in patients with obliterating endarteritis of the lower extremities. *Pirogov Russian Journal of Surgery*. 1997; (6): 47-50. (In Russ.).
35. Shevtsov VI, Shchurov VA, Shchurova EN, Shatokhin VD, Grebenyuk LA. Comparative evaluation of the functional rehabilitation of patients with thromboangiitis obliterans after sympathectomy, osteotriphication and treatment by the Ilizarov method. *Genij ortopedii*. 1996; (4): 40-42. (In Russ.).
36. Menshchikova TI. *Changes in the function of the musculo-skeletal system during the correction of impaired natural growth of the lower extremities in children and adolescents*: Abstract of the Dissertation of Cand. Sc. (Biol.). Chelyabinsk; 1997. (In Russ.).
37. Menshchikova TI, Shchurov VA. Influence of lengthening of the lower extremities on the indices of locomotor activity in patients with achondroplasia. *Genij ortopedii*. 1997; (1): 19-23. (In Russ.).
38. Shchurov VA, Menshchikova TI. Features of the longitudinal growth of the lower leg in patients with achondroplasia. *Human Physiology*. 1999; 25(2): 114-118. (In Russ.).
39. Shevtsov VI, Menshchikova TI, Shchurov VA. Theoretical premises and practical results of lower limb length increase in patient with achondroplasia. *Russian Journal of Biomechanics*. 2000; 4(3): 74-79.
40. Dolganov DV. *The role of tissue hydration in the vegetative support of the limb during transosseous osteosynthesis*: Abstract of the Dissertation of Cand. Sc. (Biol.). Chelyabinsk; 1997. (In Russ.).
41. Dolganov DV, Sveshnikov AA. Tissue hydration in the regulation of bone formation activity. *Genij ortopedii*. 1996; (4): 47-51. (In Russ.).
42. Gorbacheva LYU. *Influence of the functional load of the injured limb on the restoration of muscle contractility and reparative bone regeneration*: Abstract of the Dissertation of Cand. Sc. (Biol.). Tyumen; 2002. (In Russ.).
43. Shchurova EN. *Features of the age dynamics of the functional state of the lower extremities in conditions of insufficiency of blood supply and innervation*: Abstract of the Dissertation of Dr. Sc. (Biol.). Tyumen; 2005. (In Russ.).
44. Dolganova TI. *Physiological analysis of compensatory-adaptive processes in the body during Ilizarov treatment of patients with long bone defects*: Abstract of the Dissertation of Dr. Sc. (Med.). Kurgan; 2006. (In Russ.).
45. Menshchikova TI. *Structural and functional aspects in the rationale for surgical lengthening of the lower extremities*: Abstract of the Dissertation of Dr. Sc. (Med.). Tyumen; 2007. (In Russ.).
46. Shchurov VA. Effect of tension stress by surgical lengthening of limbs with growth retardation on biomechanical and functional properties of tissues. *Biomechanics and Biomaterials in Orthopedics*. 2016; 23: 283-298. doi: 10.1007/978-1-84882-664-9\_21
47. Dolganov DV, Menshchikova IA, Yershov EV. Topographic control of spinal deformity correction in patients with unilateral shortening of the lower limb. *Spine Surgery*. 2010; (3): 42-47. (In Russ.).
48. Dolganov DV, Kolesnikov SV, Dolganova TI. Topographic manifestations and criteria of mobile spine deformities. *Genij ortopedii*. 2017; 23(2): 195-200. (In Russ.).
49. Dolganov DV, Dolganova TI, Samylov VV. Evaluation of postural function disorders of the spine in orthostatic stereotypes. *Genij ortopedii*. 2018; 24(3): 357-364. (In Russ.).
50. Aksenov AYU, Heath GH, Klishkovskaya TA, Dolganova TI. Optimising video-based data capture for pathological gait analysis in children with cerebral palsy using a limited number of retro-reflective cameras (literature review). *Genij ortopedii*. 2019; 25(1): 102-110. (In Russ.). doi: 10.18019/1029-4427-2019-25-1-102-110
51. Popkov D, Dolganova T, Mingasov E, Dolganov D, Kobzyev A. Combined technique of titanium telescopic rods and external fixation in osteogenesis imperfecta patients: First 12 consecutive cases. *J Orthop*. 2020; (22): 316-325. doi: 10.1016/j.jor.2020.05.017
52. Gatamov OI, Dolganova TI, Dolganov DV, Borzunov DYU, Chibirov GM, Popkov DA. Changes in gait patterns of adults and adolescents with cerebral palsy following single-event multilevel procedures in stiff knee gait at baseline. *Genij ortopedii*. 2020; 26(2): 185-190. (In Russ.). doi: 10.18019/1028-4427-2020-26-2-185-190
53. Aksenov AYU, Hutchins S, Klishkovskaya TA. Application of gait video-based analysis to improve walking distance in patients with intermittent claudication. *Genij ortopedii*. 2019; 25(1): 79-85. (In Russ.). doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-1-79-8
54. Aksenov AYU, Klishkovskaya TA. *The program for generating a report on the biomechanics of human gait*: Inventor's certificate No. 2020665238 of the Russian Federation. 2020. (In Russ.).

#### Сведения об авторах

**Щурова Елена Николаевна** – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России, e-mail: elena.shurova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0816-1004>

**Долганова Тамара Игоревна** – доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России, e-mail: dti025fd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>.

**Долганов Дмитрий Владимирович** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России, e-mail: paradigm-dv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8708-1303>

**Менщикова Татьяна Ивановна** – доктор биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России, e-mail: tat-mench@mail.ru

#### Information about authors

**Elena N. Shchurova** – Dr. Sc. (Biol.), Leading Research Officer, National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics, e-mail: elena.shurova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0816-1004>

**Tamara I. Dolganova** – Dr. Sc. (Med.), Leading Research Officer, National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics, e-mail: dti025fd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>.

**Dmitry V. Dolganov** – Cand. Sc. (Biol.), Senior Research Officer, National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics, e-mail: paradigm-dv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8708-1303>

**Tatiana I. Menshchikova** – Dr. Sc. (Biol.), Senior Research Officer, National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics, e-mail: tat-mench@mail.ru