

## Экспериментальное моделирование комбинированного и последовательного применения чрескостного и интрамедуллярного блокируемого остеосинтеза

Щепкина Е.А.<sup>1,2</sup>, Лебедев И.В.<sup>1</sup>, Нетылько Г.И.<sup>1</sup>, Соломин Л.Н.<sup>1,3</sup>, Трушников В.В.<sup>1</sup>, Вершинин Д.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава России (195427, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Байкова, 8, Россия); <sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова» Минздрава России (197022, г. Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, 6–8, Россия); <sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Россия)

Автор, ответственный за переписку: Щепкина Елена Андреевна, e-mail: shchepkina\_elena@mail.ru

### Резюме

**Обоснование.** Внедрение методик комбинированного и последовательного применения чрескостного и интрамедуллярного блокируемого остеосинтеза при удлинении конечностей требует экспериментального исследования особенностей дистракционного регенерата. Для мелких животных (в частности кроликов) необходимы специальные модели. Цель. Разработать экспериментальные модели последовательного и комбинированного применения чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза при удлинении конечностей и обосновать их эффективность.

**Методы.** Сравнительное исследование проведено на 30 кроликах породы Советская шиншилла. В основных группах исследовали экспериментальные модели последовательного (ЭМ-1) и комбинированного (ЭМ-2) применения чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза с сохранением аппарата в периоде фиксации для имитации блокирования. Для сравнения моделировали последовательное (модель сравнения 1 – МС-1) и комбинированное (модель сравнения 2 – МС-2) применение чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза с демонтажем аппарата по окончании дистракции. Контролем был регенерат, сформированный по классическому методу Илизарова. Рентгенограммы выполняли в динамике, КТ- и морфологические исследования – по окончании периода фиксации.

**Результаты.** Отмечено, что в группах ЭМ-1 и МС-1 формировались однотипные по структуре регенераты, как и в группах ЭМ-2 и МС-2. При последовательных методиках преобладала веретенообразная форма регенерата, отмечено формирование выраженного периостального компонента. Мощные кортикальные пластинки, по данным морфологических исследований, формируются из периостальной и интермедиарной зон. При комбинированных методиках кортикальные пластинки формируются более тонкими и преимущественно из периостального компонента, форма регенерата ближе к веретенообразной. В группах сравнения суммарное время оперативных вмешательств было на 25–50 % больше, в 50 % случаев отмечена потеря длины или деформация регенерата.

**Заключение.** Разработанные модели последовательного и комбинированного применения чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза при удлинении конечностей с сохранением фиксации аппаратом для имитации блокирования зарекомендовали себя как надёжные с точки зрения фиксации и простые в применении на мелких лабораторных животных.

**Ключевые слова:** экспериментальное моделирование, чрескостный остеосинтез, последовательное применение чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза, комбинированное применение чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза, удлинение поверх гвоздя

**Для цитирования:** Щепкина Е.А., Лебедев И.В., Нетылько Г.И., Соломин Л.Н., Трушников В.В., Вершинин Д.М. Экспериментальное моделирование комбинированного и последовательного применения чрескостного и интрамедуллярного блокируемого остеосинтеза. *Acta biomedica scientifica*. 2021; 6(2): 184-197. doi: 10.29413/ABS.2021-6.2.21.

## Experimental Modeling of Combined and Sequential Use of Transosseous and Intramedullary Blocking Osteosynthesis

Shchepkina E.A.<sup>1,2</sup>, Lebedkov I.V.<sup>1</sup>, Netylko G.I.<sup>1</sup>, Solomin L.N.<sup>1,3</sup>, Trushnikov V.V.<sup>1</sup>, Vershinin D.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vreden National Medical Center for Traumatology and Orthopedics (Academika Baykova str. 8, Saint Petersburg 195427, Russian Federation); <sup>2</sup> Academician I.P. Pavlov First St. Petersburg State Medical University (Lva Tolstogo str. 6–8, Saint Petersburg 197022, Russian Federation); <sup>3</sup> Saint Petersburg State University (Universitetskaya emb. 7/9, Saint Petersburg 199034, Russian Federation)

Corresponding author: Elena A. Shchepkina, e-mail: shchepkina\_elena@mail.ru

### Abstract

**Background.** The introduction of the combined and sequential application of transosseous and intramedullary blocked osteosynthesis in limb lengthening requires an experimental study of the features of distraction regenerate. For small animals (in particular rabbits), special models are required.

**Aims.** To develop experimental models of sequential and combined use of transosseous and intramedullary osteosynthesis in limb lengthening and substantiate their effectiveness.

**Materials and methods.** A comparative study was carried out on 30 rabbits of the Soviet Chinchilla breed. Experimental models of sequential (EM-1) and combined (EM-2) application of transosseous and intramedullary osteosynthesis with

preservation of the apparatus during the fixation period to simulate blockage were studied in the main groups. For comparison, sequential (comparison model 1 – CM-1) and combined (comparison model 2 – CM-2) use of transosseous and intramedullary osteosynthesis with dismantling of the apparatus at the end of distraction were modeled. The control was a regenerate formed according to the classical Ilizarov method. Radiographs were performed in dynamics, CT and morphological studies – at the end of the fixation period.

**Results.** It was noted that regenerates of the same type in structure were formed in the EM-1 and CM-1 groups, as in the EM-2 and CM-2 groups. With successive methods, the spindle-shaped form of the regenerate prevailed, the formation of a pronounced periosteal component was noted. Powerful cortical plates, according to morphological studies, are formed from the periosteal and intermediate zones. With combined techniques, the cortical plates are formed thinner and predominantly from the periosteal component, the shape of the regenerate is closer to fusiform. In the comparison groups, the total time of surgical interventions was 25–50 % longer, in 50 % of cases there was a loss of length or deformation of the regenerate.

**Conclusions.** The developed models of sequential and combined use of transosseous and intramedullary osteosynthesis for limb lengthening with preservation of fixation with an apparatus to simulate blocking have proven to be reliable in terms of fixation and easy to use on small laboratory animals..

**Key words:** experimental modeling, external fixation, sequential use of external fixation and nailing, lengthening over the nail

**For citation:** Shchepkina E.A., Lebedkov I.V., Netylko G.I., Solomin L.N., Trushnikov V.V., Vershinin D.M. Experimental Modeling of Combined and Sequential Use of Transosseous and Intramedullary Blocking Osteosynthesis. *Acta biomedica scientifica*. 2021; 6(2): 184-197. doi: 10.29413/ABS.2021-6.2.21.

### АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения дистракционного остеогенеза используются модели на различных лабораторных животных – как крупных, преимущественно собаках [1, 2], так и мелких – кроликах, крысах, мышах [3, 4, 5, 6]. Внедрение в хирургическую практику методик комбинированного и последовательного применения чрескостного и интрамедуллярного блокированного остеосинтеза при удлинении конечностей требует экспериментального исследования особенностей формирующегося при этом дистракционного регенерата и выбора соответствующих экспериментальных моделей. В большинстве работ на эту тему для исследования использованы крупные лабораторные животные: овцы, козы, собаки [1, 7, 8, 9, 10, 11]. Основное преимущество этого выбора – возможность использования интрамедуллярного стержня с блокируемыми винтами, что невозможно по техническим причинам на мелких лабораторных животных. Однако при использовании крыс и кроликов можно формировать более многочисленные экспериментальные группы и за счет использования линейных или инбредных животных увеличить достоверность исследований [3, 4, 5, 6]. Поэтому для исследования регенератов, формируемых при комбинированном и последовательном применении чрескостного и интрамедуллярного блокированного остеосинтеза, на более мелких животных (в частности кроликах) требуется разработка специальных моделей.

### ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработать экспериментальные модели для изучения на мелких лабораторных животных (кроликах) последовательного и комбинированного применения чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза при удлинении конечностей и обосновать их эффективность.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

#### Дизайн исследования

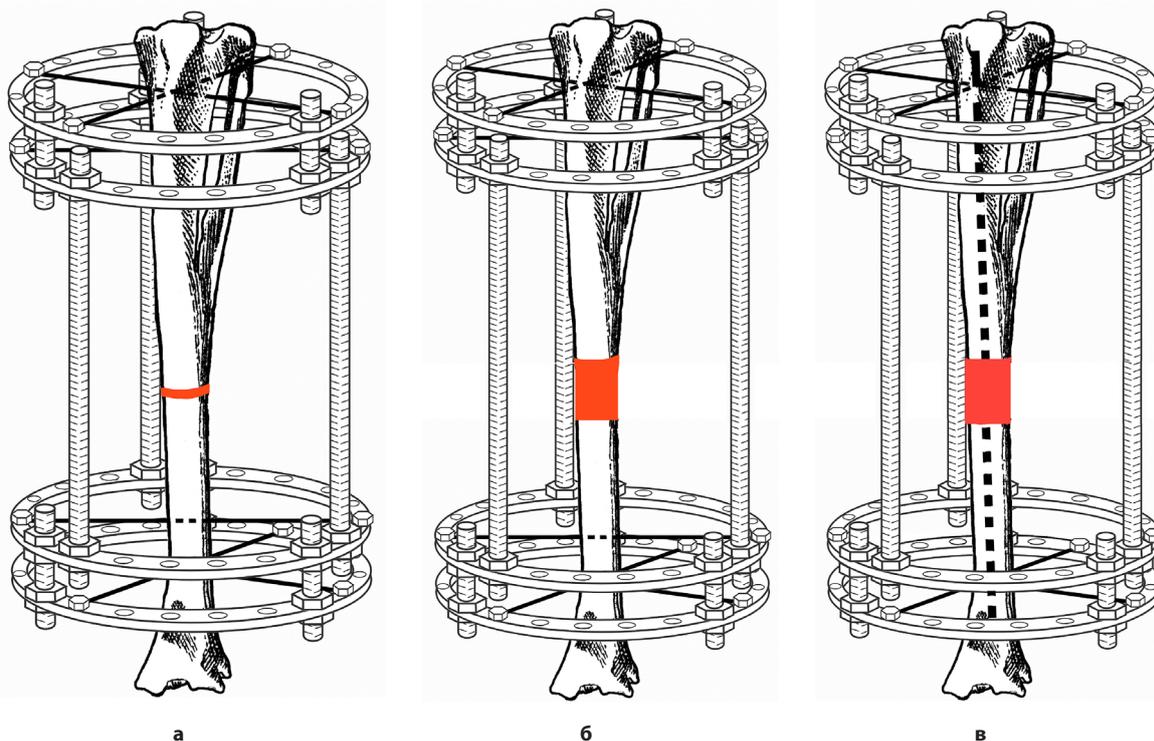
##### Экспериментальные модели

Для моделирования последовательного применения чрескостного и интрамедуллярного блокированного остеосинтеза при удлинении голени кролика разработана модель, при реализации которой осуществляется наложение мини-аппарата Илизарова, остеоклазия (рис. 1а)

с последующим удлинением сегмента на 10 мм в темпе 1 мм/сут. за 4 приема (рис. 1б). По окончании удлинения в костномозговую полость большеберцовой кости антеградно вводится спица диаметром 2 мм, что соответствует размеру наиболее узкой части костномозгового канала. Спицы из репозиционно-фиксационных опор удаляются. Спицы в базовых кольцах сохраняются на протяжении всего периода фиксации для имитации блокирования интрамедуллярного фиксатора (рис. 1в).

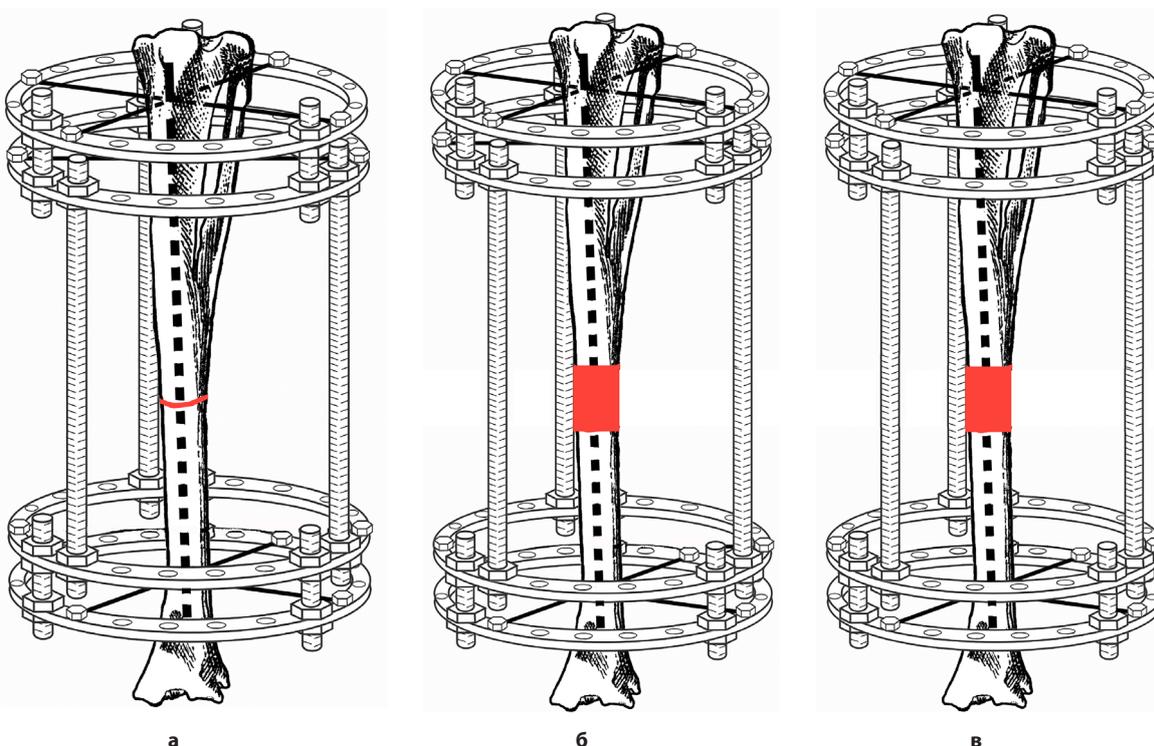
Для моделирования комбинированного применения чрескостного и интрамедуллярного блокированного остеосинтеза при удлинении голени кролика (моделирование методики «удлинение поверх гвоздя») также разработана модель с сохранением аппарата для имитации блокирования интрамедуллярного фиксатора. Способ осуществляется следующим образом. После наложения мини-аппарата Илизарова с проведением спиц только в базовых опорах и остеоклазии в костномозговой канал большеберцовой кости вводится спица диаметром 2 мм. После этого проводится дополнительная спица в проксимальной репозиционно-фиксационной опоре (рис. 2а). Удлинение сегмента на 10 мм производится в темпе 1 мм/сут. за 4 приема (рис. 2б). По окончании дистракции удаляется спица из репозиционно-фиксационной опоры. Аппарат с двумя спицами в проксимальной и двумя спицами в дистальной базовых опорах сохраняется весь период фиксации для имитации блокирования интрамедуллярного фиксатора (рис. 2в).

**Объекты исследования.** Исследования проведены на 30 половозрелых кроликах породы Советская шиншилла, весом 2500–2800 г. Работа выполнена в соответствии с правилами, принятыми Европейской конвенцией по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и иных целей [12], требованиями «Правил проведения работ с использованием экспериментальных животных» (Приказ МЗ СССР № 755 от 12.08.1977 «О мерах по дальнейшему совершенствованию форм работы с использованием “экспериментальных животных”»), ГОСТ ISO 10993-6-2011 «Межгосударственный стандарт. Изделия медицинские. Оценка биологического действия медицинских изделий. Часть 6. Исследования местного действия после имплантации» и ГОСТ 31879-2012 «Принципы надлежащей лабораторной практики». Все процедуры с животными были рассмотрены и утверж-



**Рис. 1.** Схема моделирования последовательного применения чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза при удлинении голени кролика: **а** – наложение аппарата и остеоклазия; **б** – удлинение на 10 мм; **в** – установка интрамедуллярного фиксатора, удаление спиц из репозиционно-фиксационных опор с сохранением спиц в базовых кольцах для имитации блокирования

**Fig. 1.** Scheme of modeling the sequential application of transosseous and intramedullary osteosynthesis in the lengthening of the rabbit tibia: **a** – the imposition of the apparatus and osteoclasia; **б** – lengthening by 10 mm; **в** – installation of an intramedullary fixator, removal of the wires from the repositioning-fixation supports while preserving the wires in the base rings to simulate blocking



**Рис. 2.** Схема моделирования комбинированного применения чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза при удлинении голени кролика (удлинение поверх гвоздя): **а** – наложение аппарата, остеоклазия и установка интрамедуллярного фиксатора; **б** – удлинение на 10 мм; **в** – удаление спиц из репозиционно-фиксационной опоры с сохранением спиц в базовых кольцах для имитации блокирования

**Fig. 2.** Simulation scheme for the combined use of transosseous and intramedullary osteosynthesis for rabbit tibia lengthening (lengthening over the nail): **a** – application of the apparatus, osteoclasia and installation of an intramedullary fixator; **б** – lengthening by 10 mm; **в** – removal of the wires from the repositioning-fixation support while preserving the wires in the base rings to simulate blocking

дены локальным этическим комитетом ФГБУ «НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена» Минздрава России по использованию животных на предмет соответствия этическим принципам. Условия содержания животных соответствовали стандартам, указанным в руководстве The Guide for Care and Use of Laboratory Animals [13]. Животные были получены из ФГУП «Питомник лабораторных животных «Рапполово», клинически были здоровы, имели ветеринарный сертификат качества и состояния здоровья, находились в идентичных условиях кормления и содержания. В экспериментальные группы были отобраны животные без признаков отклонений внешнего вида. На каждое животное заводили отдельную историю болезни. При подготовке к операции за сутки прекращали кормление, животные получали лишь воду. Операции проводились под внутривенным наркозом (Sol. Ketamini 3% 4 мл + Sol. Relanium 2 мл). После каждой операции животным проводили периоперационную профилактику инфекционных осложнений препаратом цефазолин в дозе 0,3 г внутримышечно 1 раз в день в течение 3 дней. Эвтаназия животных производилась путём введения тiopентала. Все манипуляции над животными проводили в соответствии с Хельсинкской декларацией о гуманном обращении с животными.

*Распределение животных по группам.* Животные были распределены на 5 экспериментальных групп по 6 особей так, чтобы индивидуальное значение массы не отклонялось от среднего значения в группе более чем на ± 10 %.

Группа 1: Контрольный регенерат (КР) – удлинение и фиксация в мини-аппарате Илизарова.

Группа 2: Экспериментальная модель 1 (ЭМ-1) – модель последовательного применения чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза при удлинении голени с сохранением аппарата на весь период фиксации для имитации блокирования.

Группа 3: Модель сравнения 1 (МС-1) – модель последовательного применения чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза при удлинении голени с демонтажем аппарата.

Группа 4: Экспериментальная модель 2 (ЭМ-2) – модель комбинированного применения чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза при удлинении голени (удлинение поверх гвоздя) с сохранением аппарата для имитации блокирования.

Группа 5: Модель сравнения 2 (МС-2) – модель комбинированного применения чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза при удлинении голени (удлинение поверх гвоздя) с демонтажем аппарата.

*Хирургическая техника*

В группах КР, ЭМ-1 и МС-1 на первом этапе всем животным накладывали на голень мини-аппарат Илизарова на основе четырёх колец (рис. 3а). После ослабления соединительных стержней между репозиционно-фиксационными опорами из двух доступов производили просверливание кости в 3–4 направлениях спицей диаметром 1,5 мм и после этого выполняли остеоклазию (рис. 3б). Аппарат стабилизировали, выполняли рентген-контроль состоятельности остеоклазии (рис. 3в). Дистракцию начинали с пятых суток послеоперационного периода в темпе 1 мм в сутки за четыре приёма и производили в течение 10 дней для формирования регенерата длиной 10 мм. Рентгенограммы в двух стандартных проекциях осуществляли в середине и конце

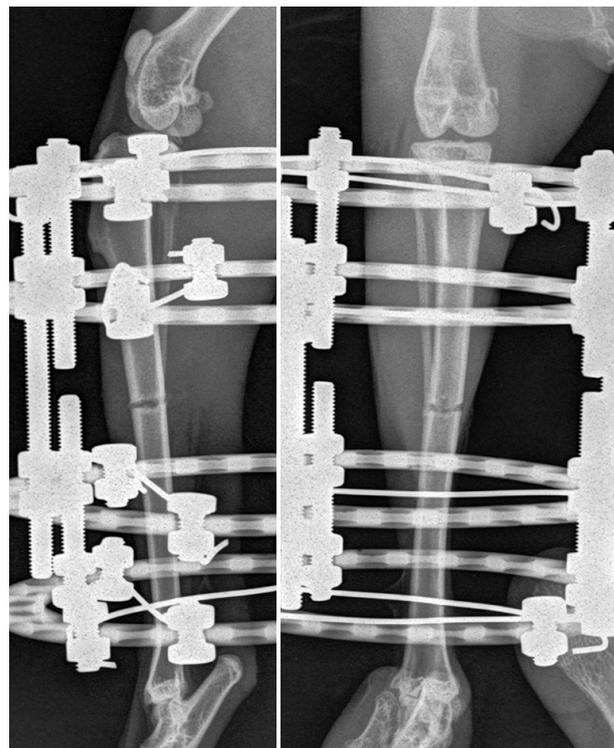
периода дистракции. Схема аппарата внешней фиксации представлена согласно «Методу унифицированного обозначения чрескостного остеосинтеза» [14]:

$$\frac{I,8-2;I,4-10}{70} \quad \frac{III,3-9}{70} \leftrightarrow \frac{VI,3-9}{70} \quad \frac{VIII,8-2;VIII,4-10}{70}$$



а

б



в

**Рис. 3.** Этапы первого хирургического вмешательства: а – монтаж аппарата; б – остеоклазия; в – рентген-контроль после операции

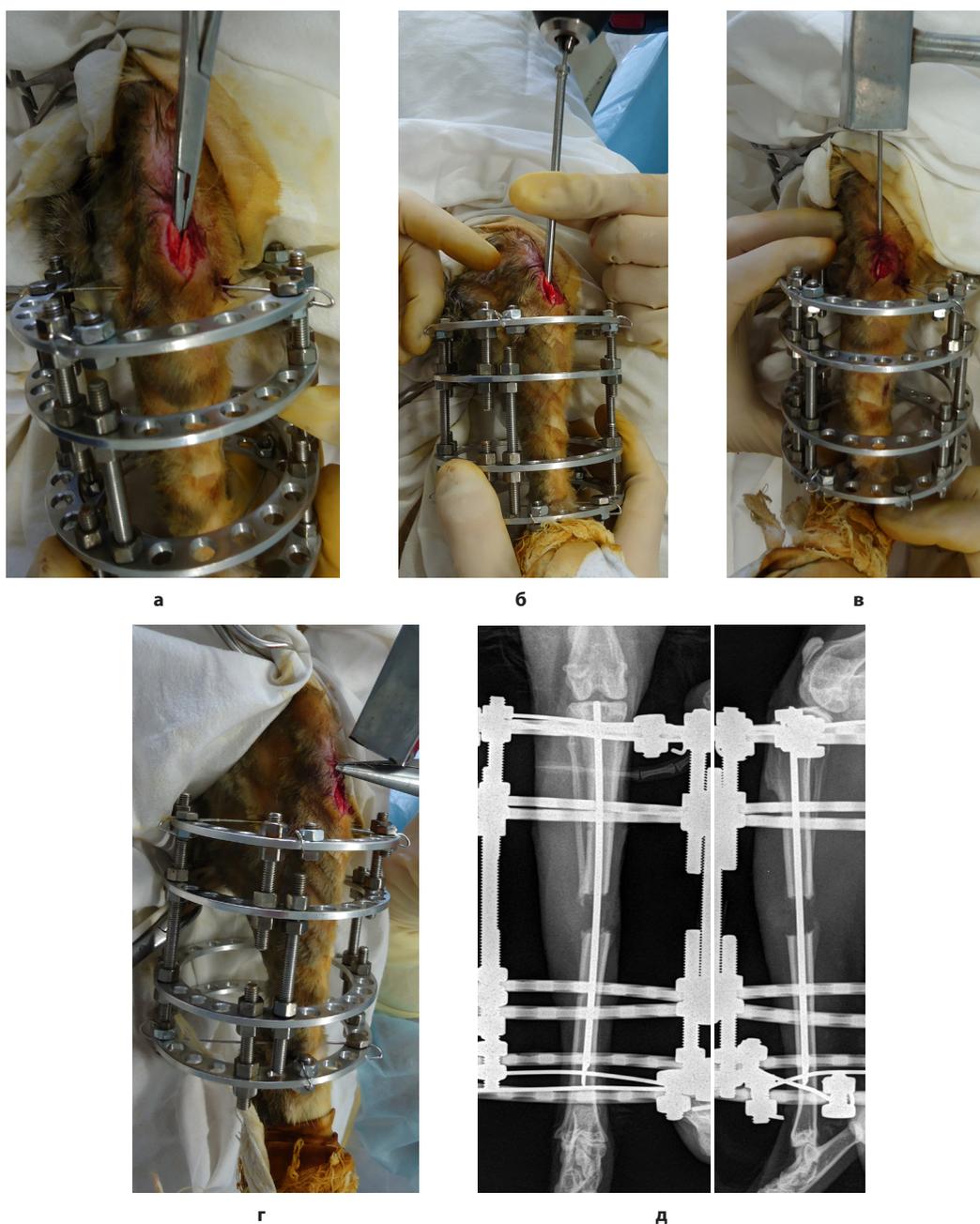
**Fig. 3.** Stages of the first surgical intervention: а – installation of the device; б – osteoclasis; в – X-ray control after surgery

В группе ЭМ-1 применяли разработанный способ моделирования последовательного применения чрескостного и интрамедуллярного блокированного остеосинтеза при удлинении голени, схема которого представлена на рисунке 1. По окончании дистракции из разреза 7–10 мм

по передней поверхности коленного сустава с отведением связки надколенника кнаружи (рис. 4а) интрамедуллярно вводили спицу диаметром 2 мм (рис. 4б), что соответствует размеру узкой части костномозгового канала большеберцовой кости кролика. Спицы проксимальной базовой опоры не препятствовали проведению интрамедуллярного фиксатора. По ходу проведения спицы через проксимальный и дистальный фрагменты последовательно удаляли спицы из проксимальной и дистальной репозиционно-фиксационных опор, чтобы избежать конфликта и отклонения интрамедуллярного фиксатора. При проведении спицы через регенерат просверливание канала прекращали, продолжали пробивание молотком (рис. 4в) при дополнительном мануальном контроле положения костных фрагментов.

Спицу проводили до перекреста спиц дистальной базовой опоры на уровне дистального метаэпифиза большеберцовой кости. Оставшуюся вне кости часть спицы, проведённой интрамедуллярно, укорачивали максимально и погружали в кость (рис. 4г), рану ушивали. Рентген-контроль осуществляли интраоперационно и по окончании операции (рис. 4д). Сохраняли фиксацию в аппарате, где оставшиеся четыре спицы в базовых опорах имитировали блокирование интрамедуллярного фиксатора.

В группе МС-1 по окончании дистракции для сравнения моделировали последовательное применение чрескостного и интрамедуллярного блокируемого остеосинтеза при удлинении голени, блокируя интрамедуллярные фиксаторы в кости с последующим демонтажем аппарата.

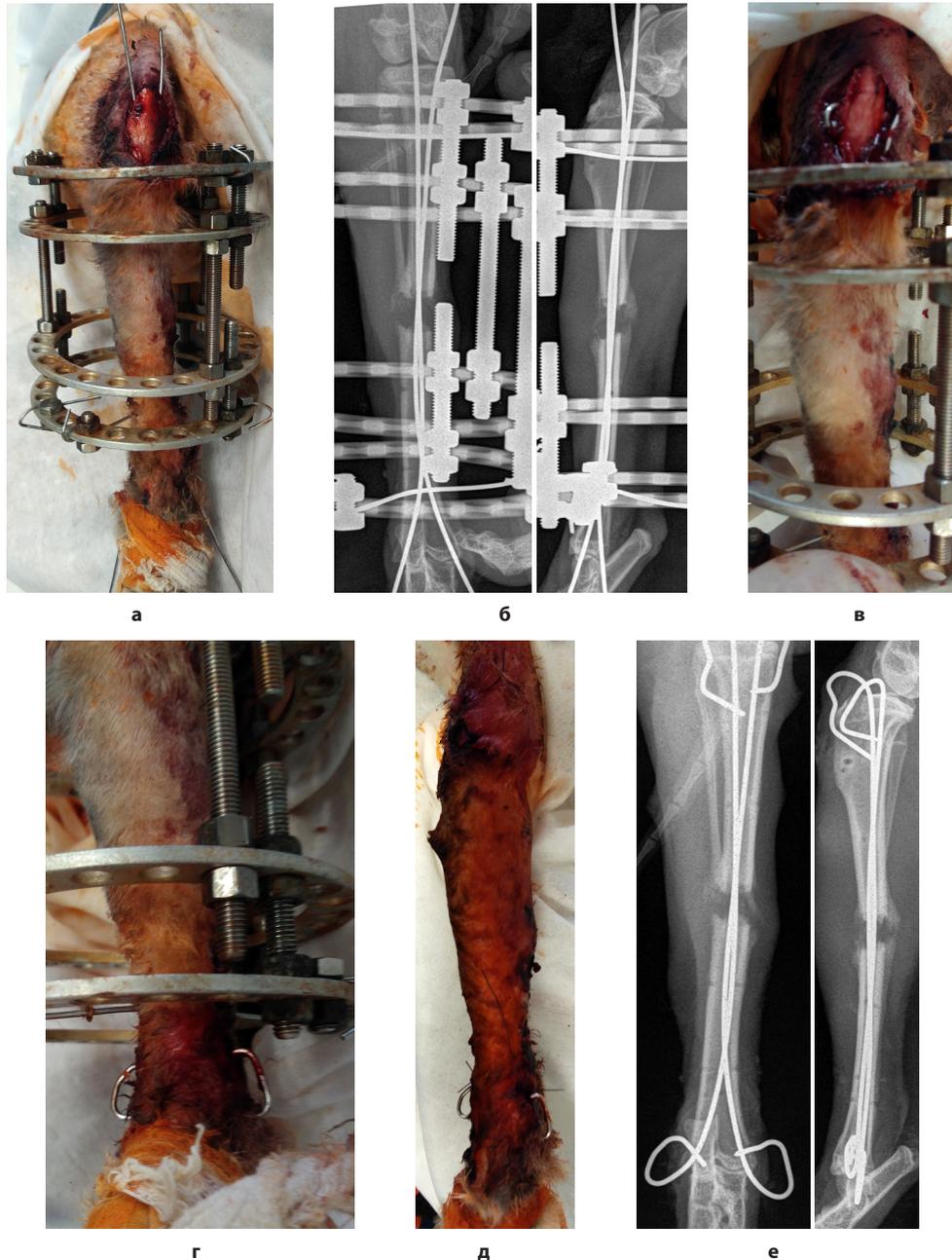


**Рис. 4.** Этапы второго хирургического вмешательства в группе ЭМ-1: **а** – доступ для введения интрамедуллярного фиксатора; **б, в** – введение интрамедуллярного фиксатора; **г** – погружение фиксатора в кость; **д** – рентген-контроль после операции

**Рис. 4.** Stages of the second surgical intervention in the EM-1 group: **a** – access for the introduction of an intramedullary fixator; **б, в** – introduction of an intramedullary fixator; **г** – immersion of the fixator into the bone; **д** – X-ray control after surgery

Для этого выполняли интрамедуллярный остеосинтез двумя спицами диаметром 1,2 мм, которые вводились из надлодыжечной области и имели выход в области мыщелков, их выводили через отдельный разрез по передней поверхности коленного сустава (рис. 5а,б). Спицы вводились аналогично методике интрамедуллярного армирования [15], но, в отличие от армирования двухмиллиметровыми спицами костномозгового пространства большеберцовой кости собаки, у кролика две спицы диаметром 1,2 мм полностью занимали самое узкое место костномозгового канала и являлись аналогом интрамедуллярного стержня для данной кости. По ходу введения интрамедуллярных

спиц удаляли спицы из репозиционно-фиксационных опор аппарата. Концы проведенных интрамедуллярно спиц изгибали и блокировали путем погружения (забивания) в метафиз проксимального (рис. 5в) и дистального отделов кости. В дистальном отделе с учетом дефицита мягких тканей спицы погружали в метафиз через отдельный прокол, и часть конструкции оставалась над кожей (рис. 5г). В проксимальном отделе конструкция без натяжения закрывалась мягкими тканями, после ушивания раны аппарат демонтировали (рис. 5д). Рентген-контроль выполняли интраоперационно для контроля за положением интрамедуллярных конструкций и в конце операции (рис. 5е).



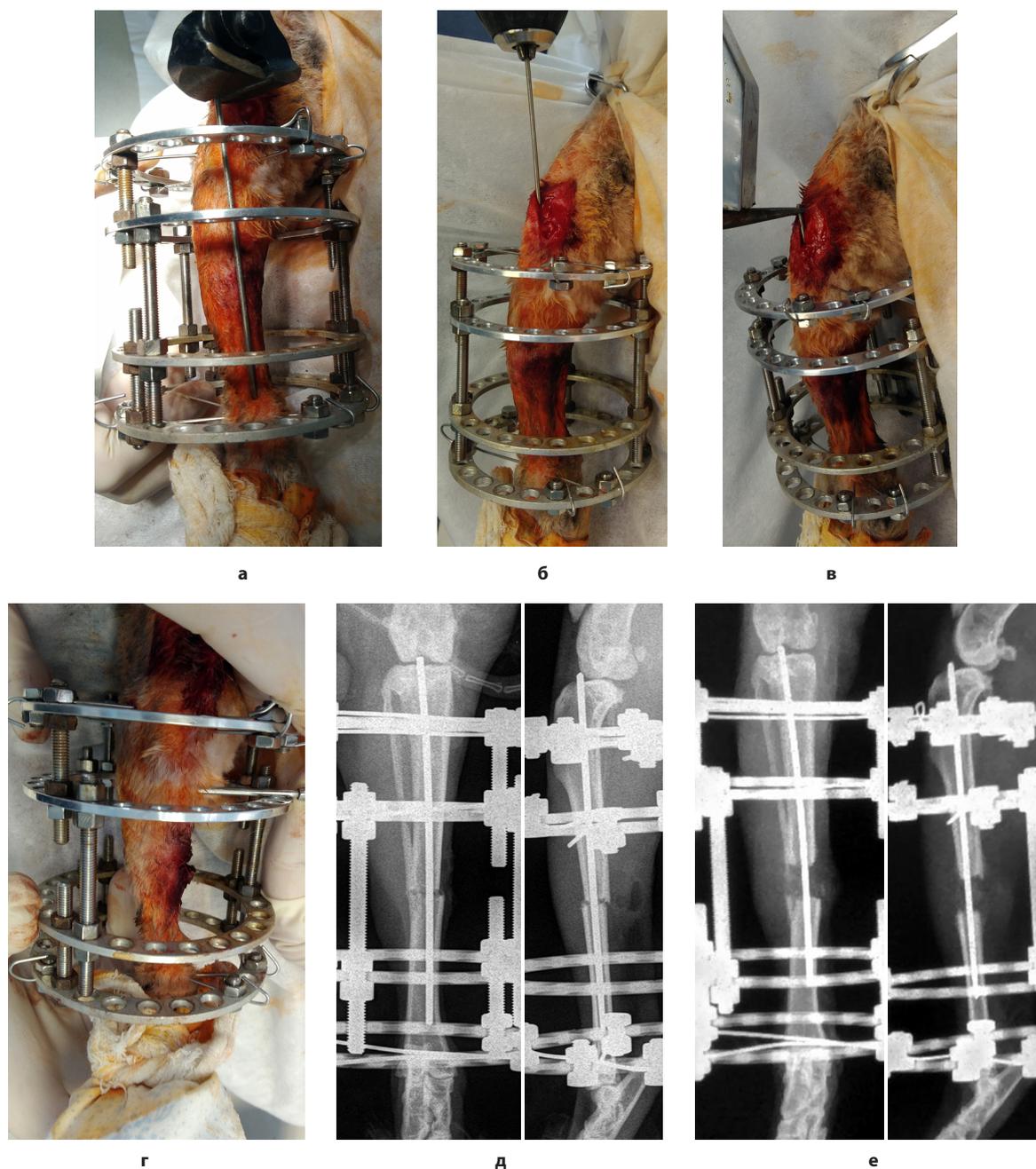
**Рис. 5.** Этапы второго хирургического вмешательства в группе МС-1: **а** – проведение интрамедуллярных спиц; **б** – интраоперационная рентгенограмма; **в** – блокирование спиц в проксимальном отделе; **г** – блокирование спиц в дистальном отделе; **д** – внешний вид сегмента после демонтажа аппарата; **е** – рентгенограммы после демонтажа аппарата

**Fig. 5.** Stages of the second surgical intervention in the CM-1 group: **a** – insertion of intramedullary wires; **b** – intraoperative X-ray control; **v** – blocking of the wires in the proximal section; **г** – blocking of the wires in the distal section; **д** – the appearance of the segment after dismantling the apparatus; **e** – X-ray control after dismantling the apparatus

В группе ЭМ-2 применяли разработанный способ моделирования комбинированного применения чрескостного и интрамедуллярного блокированного остеосинтеза при удлинении голени (моделирование методики «удлинение поверх гвоздя»), схема которого представлена на рисунке 2. После монтажа аппарата с проведением спиц только в базовых опорах и выполнения остеоклазии определяли необходимую длину интрамедуллярного фиксатора с учётом планируемого удлинения (рис. 6а). Из разреза по передней поверхности коленного сустава с отведением связки надколенника в костномозговой

канал вводили спицу диаметром 2 мм (рис. 6б). После погружения интрамедуллярного фиксатора в мягкие ткани и ушивания раны (рис. 6в) проводили дополнительную спицу в проксимальной репозиционно-фиксационной опоре, после чего аппарат стабилизировали (рис. 6г). Аппарат внешней фиксации, согласно «Методу унифицированного обозначения чрескостного остеосинтеза» [14], соответствовал следующей схеме:

$$\frac{I,8-2;I,4-10}{70} \quad \frac{III,3-9}{70} \leftrightarrow \frac{\quad}{70} \quad \frac{VIII,8-2;VIII,4-10}{70}$$



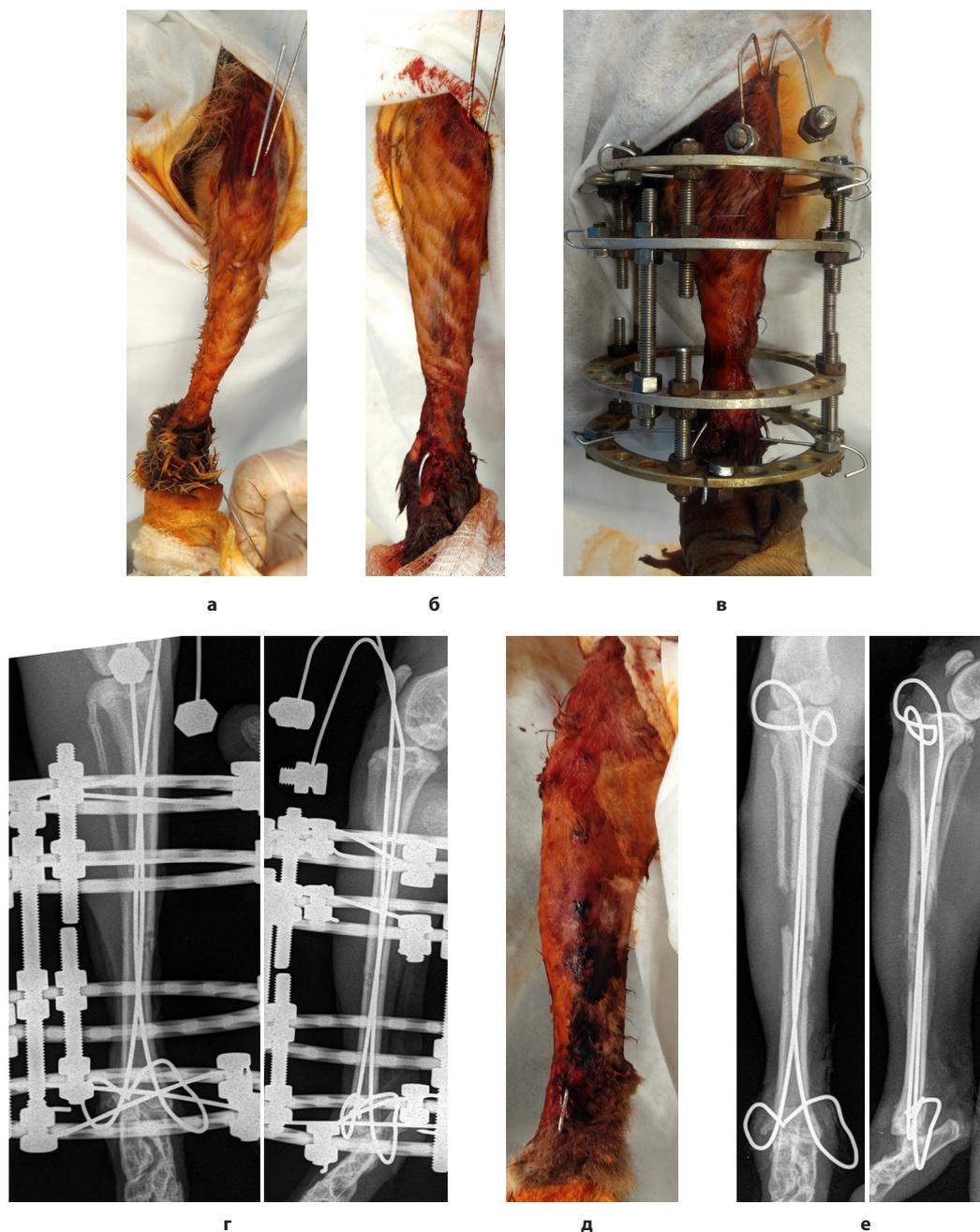
**Рис. 6.** Этапы хирургического вмешательства в группе ЭМ-2: **а** – определение необходимого размера интрамедуллярного фиксатора после монтажа аппарата и выполнения остеоклазии; **б** – введение интрамедуллярного фиксатора; **в** – погружение интрамедуллярного фиксатора в мягкие ткани; **г** – проведение дополнительной спицы; **д** – рентген-контроль после операции; **е** – рентгенограммы в конце distraction

**Fig. 6.** Stages of surgical intervention in the EM-2 group: **a** – determination of the required size of the intramedullary fixator after the installation of the device and osteoclasia; **b** – introduction of an intramedullary fixator; **v** – immersion of the intramedullary fixator into soft tissues; **r** – insertion of an additional wire; **d** – X-ray control after surgery; **e** – X-ray control at the end of distraction

Рентген-контроль выполняли интраоперационно и по окончании операции (рис. 6д). Дистракцию начинали с 5-х суток послеоперационного периода в темпе 1 мм/сут. за 4 приёма в течение 10 дней до формирования регенерата длиной 10 мм. По окончании дистракции удаляли спицу из репозиционно-фиксационной опоры, 4 спицы в базовых опорах оставляли как имитацию блокирования интрамедуллярного фиксатора (рис. 6е).

В группе МС-2 для сравнения моделировали комбинированное применение чрескостного и интрамедуллярного блокируемого остеосинтеза при удлинении

голеней, блокируя интрамедуллярные фиксаторы в кости по окончании дистракции с последующим демонтажем аппарата. Для этого на первом этапе выполняли интрамедуллярный остеосинтез двумя спицами диаметром 1,2 мм, которые вводились из надлодыжечной области и имели выход в области мыщелков. Их выводили через отдельный разрез по передней поверхности коленного сустава (рис. 7а). Спицы блокировали в дистальном отделе аналогично модели МС-1, погружая загнутые концы в метафиз (рис. 7б). После этого накладывали мини-аппарат Илизарова, аналогично схеме в группе



**Рис. 7.** Этапы хирургических вмешательств в группе МС-2: **а** – проведение интрамедуллярных спиц; **б** – блокирование интрамедуллярных спиц в дистальном отделе большеберцовой кости; **в** – наложение мини-аппарата Илизарова, остеоклазия; **г** – послеоперационный рентген-контроль до начала дистракции; **д** – внешний вид сегмента после блокирования спиц в проксимальном отделе по окончании удлинения и демонтажа аппарата; **е** – рентген-контроль после демонтажа аппарата

**Fig. 7.** Stages of surgical interventions in the CM-2 group: **а** – introduction of intramedullary wires; **б** – blocking of intramedullary wires in the distal tibia; **в** – the imposition of the Ilizarov mini-apparatus, osteoclasia; **г** – postoperative X-ray control before the start of distraction; **д** – the view of the segment after the locking of the wires in the proximal section at the end of the lengthening and dismantling of the apparatus; **е** – X-ray control after dismantling the device

ЭМ-2 и после предварительного просверливания, скручивающими движениями выполняли остеоклазию. Интрамедуллярные спицы в проксимальном отделе оставляли свободными, укрепляя на их концах спицефиксаторы для предотвращения травматизации мягких тканей (рис. 7в). Выполняли рентген-контроль (рис. 7г). Дистракцию начинали с 5-х суток послеоперационного периода в темпе 1 мм/сут. за 4 приёма в течение 10 дней. По окончании дистракции выполняли второй этап хирургического вмешательства. Для этого из разреза по передней поверхности коленного сустава выполняли блокирование интрамедуллярных спиц в проксимальном отделе большеберцовой кости, фиксируя загнутые концы спиц в метафизе по аналогии с МС-1. Аппарат демонтировали после ушивания раны (рис. 7д), выполняли рентген-контроль (рис. 7е).

Во всех группах фиксацию осуществляли до тридцати суток, что у кролика при удлинении на 1 см соответствует срокам формирования кортикального слоя на протяжении 3/4 или всей окружности регенерата. Эвтаназию трети животных из каждой группы для забора тканей на морфологическое исследование выполняли на середине периода фиксации, остальных – в конце периода фиксации. Рентгенографию в двух стандартных проекциях и компьютерную томографию (КТ) выполняли после эвтаназии до забора материала на морфологическое исследование.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ

Рентгенография выполнялась интраоперационно, по окончании операции, на середине и по окончании периода дистракции, а также на 15-е и 30-е сутки фиксации. Для этого использовали аппарат 10Л6-01 «Арман-6» (ОАО «Актюбрентген», Республика Казахстан). Для оцифровки изображения использовали комплекс для цифровой рентгенографии системы CR, дигитайзер Agfa (AGFA, Бельгия). Оценку рентгенограмм производили в программном обеспечении Agfa. Томографические исследования проводили после выведения животных из эксперимента на компьютерном томографе Toshiba Aquilion Prime 80 срезов – 160 виртуальных (Toshiba, Япония). Обработку срезов, полученных при рентгеновской компьютерной томографии, проводили в режиме мультипланарной реконструкции (MPR) в сагитальной и фронтальной плоскостях, используя программы врачебной станции Aquilion (Toshiba, Япония) и e-Film. Для морфологических исследований после эвтаназии животного сегмент конечности (голень) фиксировали в 10%-м растворе формалина в течение 48 ч. Аппарат внешней фиксации предварительно демонтировали. В дальнейшем материал вырезали с захватом 1 см кости в проксимальном и дистальном направлении от регенерата, проводили декальцинацию в насыщенном растворе трилона В и повторно фиксировали в 10%-м нейтральном формалине, обезвоживали в изопропанолу восходящей концентрации с использованием установки проводки гистологического материала Microm STP-120 (Micron Technology, США) и заливали в парафин, применяя заливающую установку Leica (Leica, Германия). Срезы толщиной 5 мкм получали с помощью санного микротомы Leica (Leica Microsystems, Германия) и окрашивали гематоксилином-эозином (Биовитрум, Россия) и по Маллори (Биовитрум, Россия) с использованием

установки окраски «Рафаэлло» (DIAPATH, S.p.A., Италия). Патоморфологический анализ гистологических препаратов и фотодокументирование проводили, используя микроскоп Nikon E-50i (Nikon, Япония), объективы 4, 10, 20 и 40 и окуляр 10 (Nikon, Япония).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

В группах КР, ЭМ-1 и МС-1 длительность операции по наложению аппарата и выполнению остеоклазии варьировала от 25 до 35 минут. Операции по установке интрамедуллярного фиксатора в группе ЭМ-1 занимали также 25–35 минут, длительность операций по установке интрамедуллярных фиксаторов и их блокированию с последующим демонтажем аппарата в группе МС-1 была больше и составляла от 45 минут до 1 часа. В группах ЭМ-2 и МС-2 первое вмешательство было большим по объёму, включая установку интрамедуллярных фиксаторов, наложение аппарата и остеоклазию: его длительность в группе ЭМ-2 составляла от 45 минут до 1 часа, в группе МС-2 – от 1 часа до 1 часа 15 минут, что было связано с необходимостью выполнения дистального блокирования интрамедуллярных спиц. По окончании дистракции в группе ЭМ-2 дополнительных хирургических вмешательств не требовалось, выполнялось только удаление одной спицы. В группе МС-2 выполнялось проксимальное блокирование интрамедуллярных спиц и демонтаж аппарата, что составляло по длительности 35–45 минут.

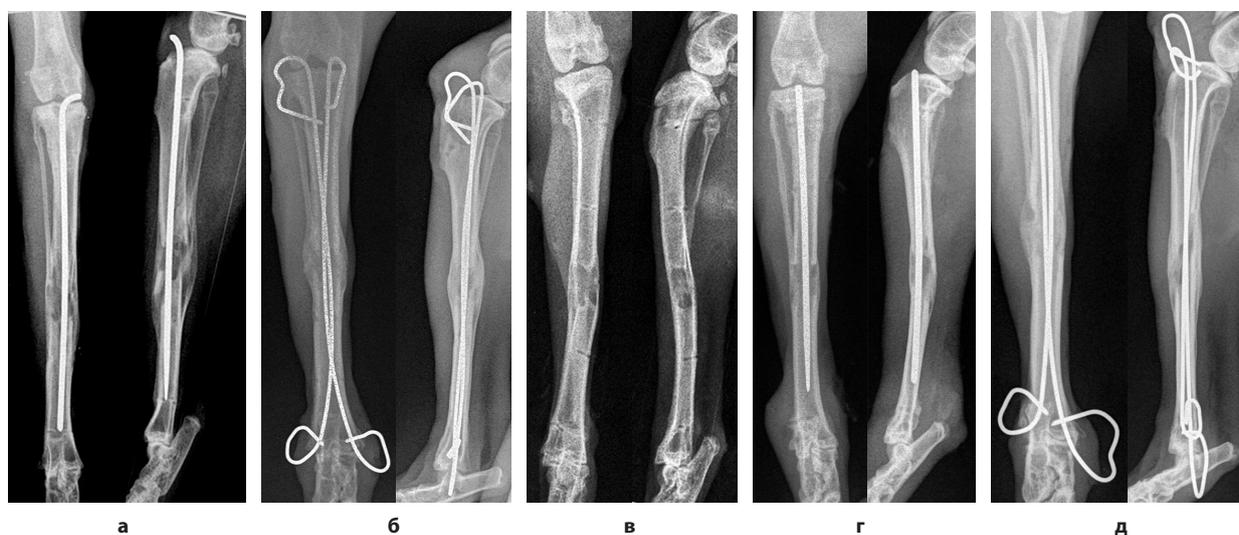
Как в периоде удлинения, так и в периоде фиксации при сохранении аппарата для имитации блокирования животные начинали опираться на оперированную конечность на 1-й день после операции, а на 2–3-и сутки передвигались с опорой на оперированную конечность. Движения в коленном суставе были незначительно ограничены проксимальным кольцом аппарата, что, однако, не мешало животному принимать привычную позу в покое и передвигаться (рис. 8а, б). В группах, где аппарат демонтировали, животные в большей степени щадили оперированную конечность и начинали опираться на неё к 3-м суткам после операции. Движения в коленном суставе также были незначительно ограничены, что было связано с элементами конструкции в местах блокирования.

В группах МС-1 и МС-2, где производился демонтаж аппарата, в половине случаев отмечена либо деформация, либо потеря длины регенерата до 20 %, что было связано с потерей жёсткости блокирования. Случаи с потерей длины регенерата в сравнительную оценку не включались. В группах ЭМ-1 и ЭМ-2 при сохранении аппарата с 4 спицами в базовых опорах ни в одном случае потери длины регенерата отмечено не было. Ни в одной экспериментальной группе нами не отмечено инфекционных осложнений.

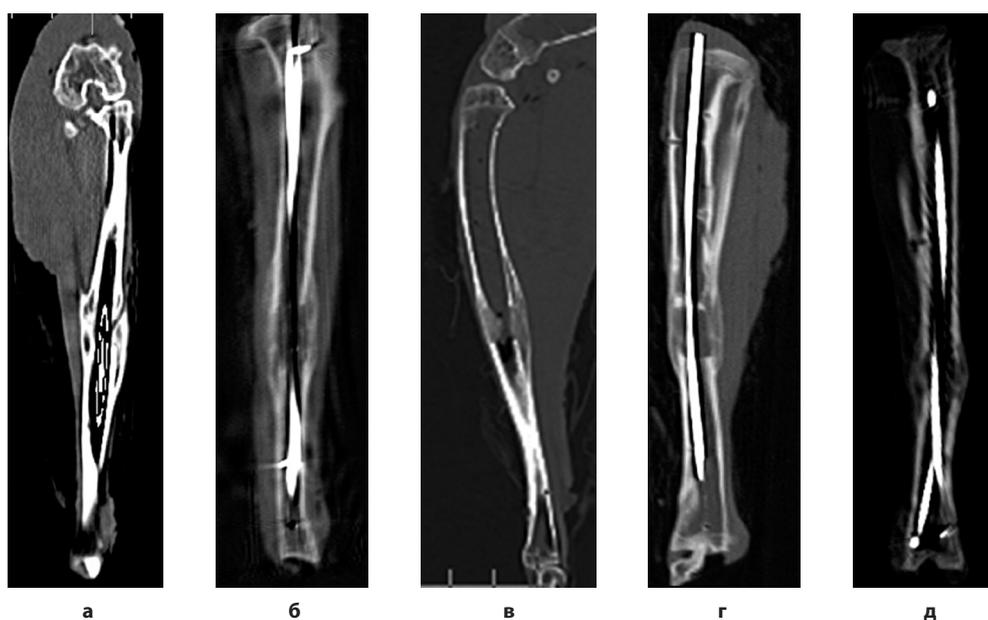
При рентгенографии, КТ и морфологических исследованиях отмечено, что в группах ЭМ-1 и МС-1 формировались однотипные по структуре регенераты, как и в группах ЭМ-2 и МС-2. В то же время регенераты, формируемые при последовательном и комбинированном применении чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза отличаются от контрольного регенерата, где интрамедуллярная фиксация не применяется, а также между собой. При последовательном применении чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза отмечено формирование выраженного периостального



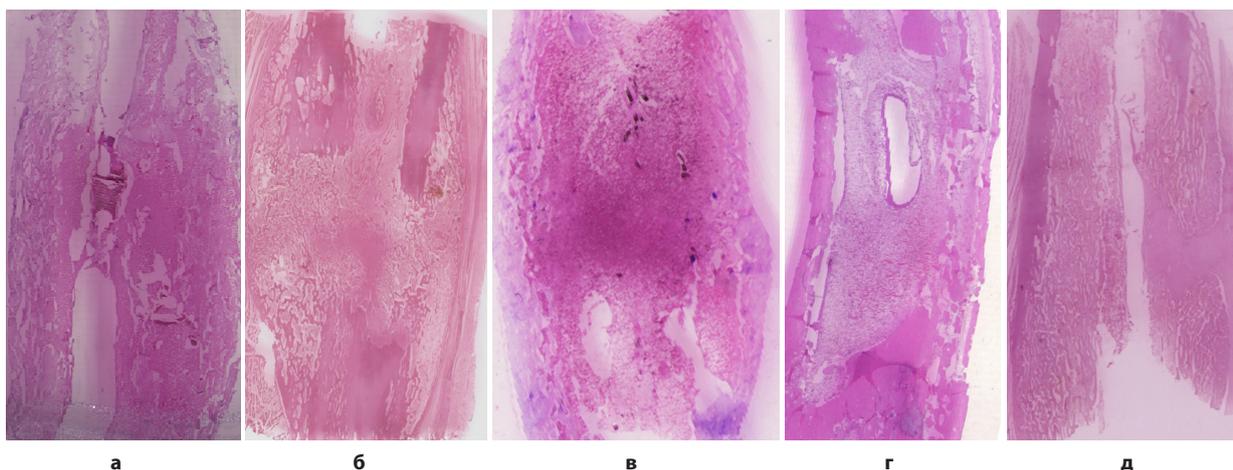
**Рис. 8.** Положение конечности в покое (а) и при движениях (б) в период фиксации в аппарате  
**Fig. 8.** The position of the limb at rest (a) and during movements (б) during the period of fixation in the apparatus



**Рис. 9.** Рентгенограммы на сроке 30 суток фиксации: а – группа ЭМ-1; б – группа МС-1; в – группа КР; г – группа ЭМ-2; д – группа МС-2  
**Fig. 9.** X-rays on 30<sup>th</sup> day of fixation: а – group EM-1; б – group CM-1; в – group CR (control regenerate); г – group EM-2; д – group CM-2

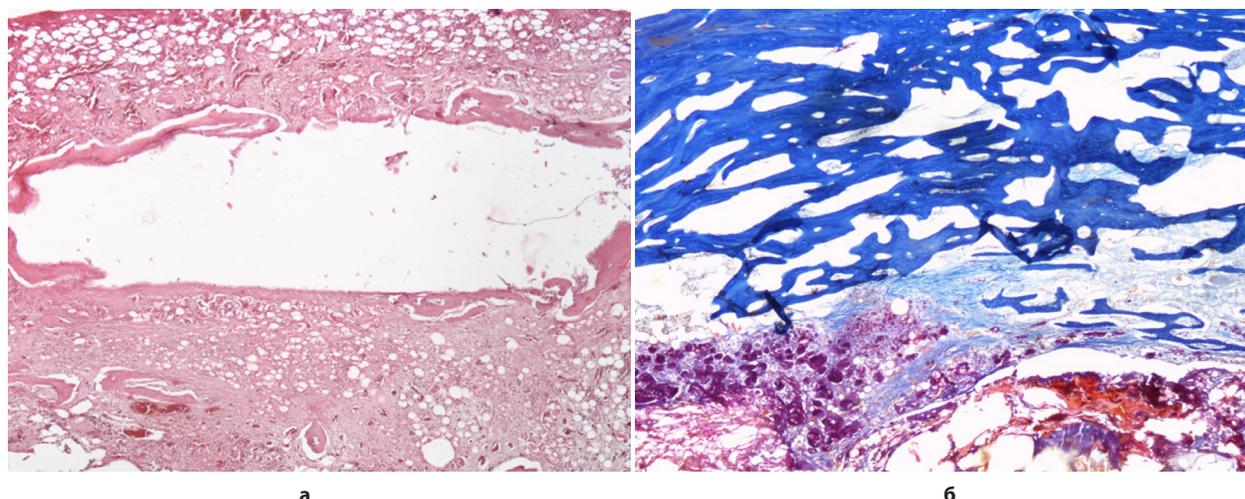


**Рис. 10.** КТ-реформации на сроке 30 суток фиксации: а – группа ЭМ-1; б – группа МС-1; в – группа КР; г – группа ЭМ-2; д – группа МС-2  
**Fig. 10.** CT reformating on 30<sup>th</sup> day of fixation: а – group EM-1; б – group CM-1; в – group CR (control regenerate); г – group EM-2; д – group CM-2



**Рис. 11.** Гистотопограммы регенератов на 30-е сутки фиксации (окраска гематоксилин-эозином): **а** – группа ЭМ-1; **б** – группа МС-1; **в** – группа КР; **г** – группа ЭМ-2; **д** – группа МС-2

**Fig. 11.** Histotopography of the regenerates on 30<sup>th</sup> day of fixation (hematoxylin and eosin staining): **a** – group EM-1; **б** – group CM-1; **в** – group CR (control regenerate); **г** – group EM-2; **д** – group CM-2



**Рис. 12.** Гистологическая картина эндостальной зоны регенерата на 30-е сутки фиксации при комбинированном и последовательном использовании чрескостного и интрамедуллярного блокируемого остеосинтеза: **а** – формирование соединительнотканной капсулы вокруг интрамедуллярного фиксатора (окраска гематоксилин-эозином; ув.  $\times 40$ ); **б** – восстановление структуры костного мозга в пространстве между капсулой и формирующейся кортикальной пластинкой с превалированием жировой ткани (окраска по Маллори; ув.  $\times 40$ )

**Fig. 12.** The histological picture of the endosteal zone of the regenerate on the 30<sup>th</sup> day of fixation with the combined and sequential use of transosseous and intramedullary blocked osteosynthesis: **a** – formation of a connective tissue capsule around the intramedullary fixator (staining with hematoxylin-eosin; magnification  $\times 40$ ); **б** – restoration of the bone marrow structure in the space between the capsule and the forming cortical plate with the prevalence of adipose tissue (Mallory stain; magnification  $\times 40$ ) fixation in the apparatus

компонента регенерата (рис. 9а, б, рис. 10а, б), Регенераты имели веретенообразную форму, тогда как в контрольном регенерате (рис. 9в, рис. 10в) – преимущественно цилиндрическую.

При этом мощные кортикальные пластинки, по данным морфологических исследований, формируются из периостальной и интермедиарной зон (рис. 11а, б). В то же время при комбинированном применении чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза при «удлинении поверх гвоздя» кортикальные пластинки формируются более тонкими и преимущественно из периостального компонента регенерата (рис. 10г, д, рис. 11г, д), но регенерат тоже ближе к веретенообразной форме (рис. 9г, д, рис. 10г, д). К 15-м суткам фиксации во всех группах при интрамедуллярной фиксации

формируется соединительнотканная капсула вокруг конструкции, на 30-е сутки капсула утолщается (рис. 12а), и в промежутке между капсулой и формирующимися кортикальными пластинками восстанавливаются структуры костного мозга, представленного преимущественно жировой тканью (рис. 12б).

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные при комбинированном применении чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза соотносятся с данными других экспериментальных исследований, где отмечается активизация периостального костеобразования [1, 7, 8, 9, 10, 11], в то же время ряд авторов отмечают угнетение эндостального костеобразования [1, 7], убедительных доказательств которого

нами не отмечено. При последовательном применении чрескостного и интрамедуллярного остеосинтеза мы уже отмечали в предварительном сообщении [16] о формировании мощных кортикальных пластинок в периостальной и интермедиарной зонах. Но результаты экспериментальных исследований по этой методике в периодической литературе отсутствуют. Из экспериментальных моделей лучшие качества показали модели с сохранением аппарата для имитации блокирования интрамедуллярного фиксатора. Надёжность фиксации обеспечивает сохранение достигнутой величины регенерата и предотвращает деформации. Время, суммарно затрачиваемое на оперативные вмешательства, при этих методиках на 25–50 % меньше, чем при попытке заблокировать интрамедуллярные спицы и снять аппарат. На надёжность фиксации при сохранении аппарата указывали ещё С.С. Lin et al. [17], когда после удлинения голени коз интрамедуллярный стержень не блокировали, а сохраняли монологатеральный аппарат, имеющий по 2 стержня Шанца в проксимальном и дистальном отделах. Методику комбинированной техники удлинения с переходом с циркулярного на монологатеральный аппарат описывают М.А. Степанов с соавт. [18], при этом также отмечаются особенности формирования регенерата с активизацией периостального костеобразования. Но если в экспериментах на крупных животных (собаки, овцы) на современном этапе целесообразно применять варианты стандартных блокируемых стержней и демонтировать аппарат по окончании distraction, то для более мелких животных (кролики) целесообразно использовать модели с сохранением аппарата как имитацию блокирования интрамедуллярного фиксатора. На разработанный способ моделирования последовательного применения чрескостного и интрамедуллярного заблокированного остеосинтеза получен патент РФ № 2593583 [19].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные методики для экспериментального моделирования последовательного и комбинированного применения чрескостного и интрамедуллярного заблокированного остеосинтеза при удлинении конечностей с сохранением фиксации аппаратом для имитации блокирования интрамедуллярного фиксатора зарекомендовали себя как надёжные с точки зрения фиксации и простые в применении. Их целесообразно использовать на таких лабораторных животных, как кролики, при исследованиях особенностей формирования distractionного регенерата, что позволяет расширять экспериментальные группы и увеличивать достоверность исследований за счёт проведения экспериментов на инбредных животных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ерофеев С.А. Особенности репаративного остеогенеза и управление distractionным остеогенезом при чрескостном остеосинтезе. В кн.: *Основы чрескостного остеосинтеза*. М.: БИНОМ; 2014; 1: 220-250.
2. Kusec V, Jelic M, Borovecki F, Kos J, Vukicevic S, Korzinek K. Distraction osteogenesis by Ilizarov and unilateral external fixators in a canine model. *Int Orthop*. 2003; 27(1): 47-52. doi: 10.1007/s00264-002-0391-z
3. Hvid I, Horn J, Huhnstock S, Steen H. The biology of bone lengthening. *J Child Orthop*. 2016; 10(6): 487-492. doi: 10.1007/s11832-016-0780-2
4. Pithioux M, Roseren F, Jalain C, Launay F, Charpiot P, Chabrand P, et al. An efficient and reproducible protocol for distraction

osteogenesis in a rat model leading to a functional regenerated femur. *J Vis Exp*. 2017; (128): 56433. doi: 10.3791/56433

5. Aleksyniene R, Thomsen JS, Eckardt H, Bundgaard KG, Lind M, Hvid I. Parathyroid hormone PTH(1–34) increases the volume, mineral content, and mechanical properties of regenerated mineralizing tissue after distraction osteogenesis in rabbits. *Acta Orthop*. 2009; 80: 716-723. doi: 10.3109/17453670903350032

6. Lybrand K, Bragdon B, Gerstenfeld L. Overview of biological mechanisms and applications of three murine models of bone repair: closed fracture with intramedullary fixation, distraction osteogenesis, and marrow ablation by reaming. *Curr Protoc Mouse Biol*. 2015; 5(1): 21-34. doi: 10.1002/9780470942390.mo140166

7. Еманов А.А., Митрофанов А.И., Борзунов Д.Ю., Колчин С.Н. Экспериментально-клиническое обоснование комбинированного остеосинтеза при замещении дефектов длинных костей (предварительное сообщение). *Травматология и ортопедия России*. 2014; 1(71): 16-23. doi: 10.21823/2311-2905-2014-0-1-16-23

8. Brunner UH, Cordey J, Schweiberer L, Perren SM. Force required for bone segment transport in the treatment of large bone defects using medullary nail fixation. *Clin Orthop Relat Res*. 1994; (301): 147-155.

9. Caton J, Rubini J, Panisset JC, Fau D, Guichet JM, Arlot M, et al. L'allongement progressif des membres par clou mécanique centro-médullaire d'allongement: étude expérimentale chez le mouton. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*. 2001; 87(3): 237-247.

10. Yamaguchi K, Fujita Y, Funayama A, Kanaji A, Susa M, Toyama Y, et al. Experimental assessment of a novel intramedullary nail for callus distraction by the segmental bone transport method. *J Orthop Sci*. 2014; 19(2): 323-331. doi: 10.1007/s00776-013-0516-9

11. Wendelburg KM, Lewis DD, Sereda CW, Reese DJ, Wheeler JL. Use of an interlocking nail-hybrid fixator construct for distal femoral deformity correction in three dogs. *Vet Comp Orthop Traumatol*. 2011; 24(3): 236-245. doi: 10.3415/VCOT-10-05-0076

12. Council Directive 86/609/EEC of 24 November 1986 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States regarding the protection of animals used for experimental and other scientific purposes. *Official Journal L*. 1986; (358): 1-28.

13. National Research Council. *Guide for the care and use of laboratory animals*. Washington, DC: The National Academies Press; 1996.

14. Соломин Л.Н. Метод унифицированного обозначения чрескостного остеосинтеза. В кн.: *Основы чрескостного остеосинтеза*. М.: БИНОМ; 2014; 1: 45-55.

15. Попков Д.А., Ерофеев С.А., Чиркова А.М. Удлинение голени с использованием интрамедуллярного напряженного армирования (экспериментальное исследование). *Гений ортопедии*. 2005; (4): 81-91.

16. Щепкина Е.А., Лебедков И.В., Соломин Л.Н., Нетьлько Г.И. Экспериментальное обоснование комбинированного и последовательного применения чрескостного и интрамедуллярного блокируемого остеосинтеза. *Достижения Российской травматологии и ортопедии: Материалы XI Всероссийского съезда травматологов-ортопедов*. СПб.: Издательство ВВМ; 2018; 1: 354-357.

17. Lin CC, Huang SC, Liu TK, Chapman MW. Limb lengthening over an intramedullary nail. An animal study and clinical report. *Clin Orthop Relat Res*. 1996; (330): 208-216. doi: 10.1097/00003086-199609000-00028

18. Степанов М.А., Кононович Н.А., Горбач Е.Н. Репаративная регенерация костной ткани при удлинении конечности методикой комбинированного distractionного остеосинтеза. *Гений ортопедии*. 2010; (3): 89-94.

19. Щепкина Е.А., Соломин Л.Н., Нетьлько Г.И., Лебедков И.В., Кулеш П.Н. *Способ моделирования последовательного применения чрескостного и интрамедуллярного блокируемого остеосинтеза*: Пат. 2593583 Рос. Федерация; МПК G09B (2006.01). Патентообладатель ФГБУ РНИИТО

им. Р.Р. Вредена. № 2015129138/14; заявл. 16.07.2015; опубл. 10.08.2016. Бюл. № 22.

REFERENCES:

1. Erofeev SA. Features of reparative osteogenesis and management of distraction osteogenesis in transosseous osteosynthesis. In: *Fundamentals of transosseous osteosynthesis*. Moscow: BINOM; 2014; 1: 220-250. (In Russ.)
2. Kusec V, Jelic M, Borovecki F, Kos J, Vukicevic S, Korzinek K. Distraction osteogenesis by Ilizarov and unilateral external fixators in a canine model. *Int Orthop*. 2003; 27(1): 47-52. doi: 10.1007/s00264-002-0391-z
3. Hvid I, Horn J., Huhnstock S, Steen H. The biology of bone lengthening. *J Child Orthop*. 2016; 10(6): 487-492. doi: 10.1007/s11832-016-0780-2
4. Pithioux M, Roseren F, Jalain C, Launay F, Charpiot P, Chabrand P, et al. An efficient and reproducible protocol for distraction osteogenesis in a rat model leading to a functional regenerated femur. *J Vis Exp*. 2017; (128): 56433. doi: 10.3791/56433
5. Aleksyniene R, Thomsen JS, Eckardt H, Bundgaard KG, Lind M, Hvid I. Parathyroid hormone PTH(1–34) increases the volume, mineral content, and mechanical properties of regenerated mineralizing tissue after distraction osteogenesis in rabbits. *Acta Orthop*. 2009; 80: 716-723. doi: 10.3109/17453670903350032
6. Lybrand K, Bragdon B, Gerstenfeld L. Overview of biological mechanisms and applications of three murine models of bone repair: closed fracture with intramedullary fixation, distraction osteogenesis, and marrow ablation by reaming. *Curr Protoc Mouse Biol*. 2015; 5(1): 21-34. doi: 10.1002/9780470942390.mo140166
7. Emanov AA, Mitrofanov AI, Borzunov DYU, Kolchin SN. Experimental and clinical substantiation of combined osteosynthesis in the replacement of long bone defects (preliminary report). *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2014; 1(71): 16-23. (In Russ.). doi: 10.21823/2311-2905-2014-0-1-16-23
8. Brunner UH, Cordey J, Schweiberer L, Perren SM. Force required for bone segment transport in the treatment of large bone defects using medullary nail fixation. *Clin Orthop Relat Res*. 1994; (301): 147-155.
9. Caton J, Rubini J, Panisset JC, Fau D, Guichet JM, Arlot M, et al. L'allongement progressif des membres par clou mécanique centro-médullaire d'allongement: étude expérimentale chez

- le mouton. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*. 2001; 87(3): 237-247.
10. Yamaguchi K, Fujita Y, Funayama A, Kanaji A, Susa M, Toyama Y, et al. Experimental assessment of a novel intramedullary nail for callus distraction by the segmental bone transport method. *J Orthop Sci*. 2014; 19(2): 323-331. doi: 10.1007/s00776-013-0516-9
11. Wendelburg KM, Lewis DD, Sereda CW, Reese DJ, Wheeler JL. Use of an interlocking nail-hybrid fixator construct for distal femoral deformity correction in three dogs. *Vet Comp Orthop Traumatol*. 2011; 24(3): 236-245. doi: 10.3415/Vcot-10-05-0076
12. Council Directive 86/609/EEC of 24 November 1986 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States regarding the protection of animals used for experimental and other scientific purposes. *Official Journal L*. 1986; (358): 1-28.
13. National Research Council. *Guide for the care and use of laboratory animals*. Washington, DC: The National Academies Press; 1996.
14. Solomin LN. Method of unified designation of transosseous osteosynthesis. In: *Fundamentals of transosseous osteosynthesis*. Moscow: BINOM; 2014; 1: 45-55. (In Russ.)
15. Popkov DA, Erofeev SA, Chirkova AM. Shin lengthening using intramedullary stress reinforcement (experimental study). *Genij Ortopedii*. 2005; (4): 81-91. (In Russ.)
16. Shchepkina EA, Lebedkov IV, Solomin LN, Netylko GI. Experimental substantiation of the combined and sequential use of transosseous and intramedullary blocked osteosynthesis. *Dostizheniya Rossiyskoy travmatologii i ortopedii: Materialy XI Vserossiyskogo sjezda travmatologov-ortopedov*. Saint Petersburg: BBM; 2018; 1: 354-357. (In Russ.)
17. Lin CC, Huang SC, Liu TK, Chapman MW. Limb lengthening over an intramedullary nail. An animal study and clinical report. *Clin Orthop Relat Res*. 1996; (330): 208-216. doi: 10.1097/00003086-199609000-00028
18. Stepanov MA, Kononovich NA, Gorbach EN. Reparative bone tissue regeneration during limb lengthening using combined distraction osteosynthesis. *Genij Ortopedii*. 2010; (3): 89-94. (In Russ.)
19. Shchepkina EA, Solomin LN, Netylko GI, Lebedkov IV, Kulesh PN. A method for modeling the sequential use of transosseous and intramedullary blocked osteosynthesis: Patent N 2593583 of the Russian Federation. 2016. (In Russ.)

Сведения об авторах

**Щепкина Елена Андреевна** – кандидат медицинских наук, доцент, старший научный сотрудник научного отделения лечения травм и их последствий, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава России; доцент кафедры травматологии и ортопедии и кафедры общей врачебной практики (семейной медицины), ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова» Минздрава России, e-mail: shchepkina\_elena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6132-0305>

**Лебедев Иван Валерьевич** – врач-травматолог-ортопед травматолого-ортопедического отделения № 1, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава России, e-mail: positivism@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1484-5971>

**Нетьлюко Георгий Иванович** – доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник научного отделения профилактики и лечения раневой инфекции, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава России, e-mail: doctornetylko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5074-6204>

**Соломин Леонид Николаевич** – доктор медицинских наук, профессор; ведущий научный сотрудник научного отделения лечения травм и их последствий, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава России; профессор кафедры общей хирургии, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», e-mail: solomin.leonid@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3705-3280>

**Трушников Владислав Вячеславович** – заведующий патологоанатомическим отделением, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава России, e-mail: trushnikov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9067-5137>

**Вершинин Дмитрий Михайлович** – заведующий отделением лучевой диагностики, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава России, e-mail: dmitrill@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6740-0218>

Information about the authors

**Elena A. Shchepkina** – Cand. Sc. (Med), Docent, Senior Research Officer at the Scientific Department of the Treatment of Injuries and Their Consequences, Vreden National Medical Center for Traumatology and Orthopedics; Associate Professor at the Department of Traumatology and Orthopedics and the Department of General Medical Practice (Family Medicine), Academician I.P. Pavlov First St. Petersburg State Medical University, e-mail: shchepkina\_elena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6132-0305>

**Ivan V. Lebedkov** – Orthopedic Surgeon at the Traumatology and Orthopedic Department N 1, Vreden National Medical Center for Traumatology and Orthopedics, e-mail: positivism@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1484-5971>

**Georgiy I. Netylko** – Dr. Sc. (Med.), Leading Research Officer at the Scientific Department for Prevention and Treatment of Wound Infection, Vreden National Medical Center for Traumatology and Orthopedics, e-mail: doctornetylko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5074-6204>

**Leonid N. Solomin** – Dr. Sc. (Med.), Professor, Leading Research Officer at the Scientific Department of the Treatment of Injuries and Their Consequences, Vreden National Medical Center for Traumatology and Orthopedics; Professor at the Department of General Surgery, Saint Petersburg State University, e-mail: solomin.leonid@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3705-3280>

**Vladislav V. Trushnikov** – Head of the Anatomic Pathology Department, Vreden National Medical Center for Traumatology and Orthopedics, e-mail: trushnikov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9067-5137>

**Dmitriy M. Vershinin** – Head of the Department of Diagnostic Radiology, Vreden National Medical Center for Traumatology and Orthopedics, e-mail: dmitrill@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6740-0218>

**Вклад авторов:**

Щепкина Е.А. – разработка концепции и дизайна исследования; проведение операций в эксперименте; анализ и интерпретация полученных данных наблюдения за животными, данных морфологических и лучевых методов исследования; участие в написании всех разделов статьи.

Лебедев И.В. – участие в разработке концепции и дизайна исследования; проведение операций в эксперименте; наблюдение за лабораторными животными на протяжении эксперимента; подготовка материала для морфологических исследований; участие в оценке полученных данных морфологических и лучевых исследований; участие в написании всех разделов статьи.

Нетьлько Г.И. – участие в разработке дизайна исследования; организация экспериментальной работы; контроль проведения операций; наблюдение за экспериментальными животными на протяжении эксперимента; выведение животных из эксперимента; участие в написании текста статьи.

Соломин Л.Н. – существенный вклад в разработку концепции и дизайна исследования; консультирование при оценке результатов исследований; участие в написании текста статьи.

Трушников В.В. – выполнение и оценка результатов морфологических исследований; участие в написании текста статьи в разделе методов и результатов морфологических исследований.

Вершинин Д.М. – выполнение и оценка результатов лучевых методов исследования (рентгенография и КТ); участие в написании текста статьи в разделе методов и результатов лучевых методов исследования.

Статья получена: 09.03.2021. Статья принята: 12.04.2021. Статья опубликована: 15.06.2021.

Received: 09.03.2021. Accepted: 12.04.2021. Published: 15.06.2021.