

## Использование импедансной плетизмографии для оценки внутрикостной гемодинамики в условиях чрескостного остеосинтеза по Илизарову

### Аннотация

Продемонстрирована возможность использования импедансной плетизмографии для оценки особенностей внутрикостного кровообращения. Собакам выполняли остеосинтез аппаратом Илизарова неповрежденных костей голени. Изучали внутрикостную гемодинамику в зависимости от пространственного расположения спиц. Сделали выводы о том, что чрескостная фиксация костей голени методом Илизарова на протяжении 35 суток приводит к снижению скорости кровотока в большеберцовой кости в результате вазодилатации артерий. Максимальные изменения происходят в ранний послеоперационный период (через 7 суток), когда объемное пульсовое кровенаполнение в костно-мозговом канале уменьшается более чем на 80 % ( $p = 0,01$ ) от нормы. Гипотонус сосудов выражен значительно при меньшей травматизации мягких тканей передне-латеральной области голени фиксаторами.

### Введение

Создание условий для достаточного кровоснабжения костной и мягких тканей оказывает положительное влияние на результаты оперативного лечения патологии опорно-двигательного аппарата. Хирургическое вмешательство относится к числу причин изменения локальной васкуляризации. Интрамедуллярный остеосинтез оказывает негативное влияние на внутрикостный кровоток [1]. Варианты накостной фиксации создают неблагоприятные условия для кровоснабжения параспинальных мягких тканей, надкостницы, корковой пластинки [2], [3]. Внеочаговый чрескостный остеосинтез по Илизарову признан наименее травматичным методом, хотя при его выполнении фиксаторы неизбежно проводятся через кожу, фасции и мышцы [4]. Известно, что между сосудистыми системами костей и прилегающих тканей существует тесная связь [5]. Имеются сведения о влиянии состояния мышц и миогенной реакции на питательную артерию и другие сосуды, обеспечивающие кровообращение в большеберцовой кости [6], [7]. Учитывая эти обстоятельства, была выдвинута гипотеза о том, что при чрескостном остеосинтезе костей голени методом Илизарова кровоток в берцовых костях может зависеть от пространственного расположения фиксаторов в тканях передне-латеральной поверхности сегмента.

В настоящее время для определения перфузии костной ткани *in vivo* и количественной оценки скорости кровотока как в клинической медицине, так и при экспериментальных исследованиях чаще всего используют лазерную доплеровскую флоуметрию и ее модификации, магнитно-резонансную томографию (МРТ), позитронно-эмиссионную томографию (ПЭТ) и фотоплетизмографию [7]-[10]. Несмотря на достаточную эффективность в плане оценки костного кровоснабжения,

эти методы имеют определенные ограничения. В частности, МРТ и ПЭТ являются дорогостоящими методиками. Лазерная доплеровская флоуметрия и фотоплетизмография – более доступные методы, вместе с тем с их помощью регистрируют в большей степени периостальный кровоток. Однако не меньший интерес представляет внутрикостная гемодинамика, так как кровоснабжение длинных костей, в частности большеберцовой, на 70 % обеспечивается внутрикостной сосудистой сетью [11]. Для его оценки продемонстрировала свою эффективность импедансная плетизмография (реография, реовазография) [12], [13].

**Цель исследования:** изучить влияние чрескостной внеочаговой фиксации по Илизарову на внутрикостную гемодинамику большеберцовой кости.

### Материалы и методы

Выполнили 2 серии экспериментов на 10 взрослых беспородных собаках в возрасте 1,5 лет. Методом реовазографии изучали особенности внутрикостного кровоснабжения неповрежденной большеберцовой кости после ее остеосинтеза аппаратом Илизарова. Манипуляции на животных осуществляли в соответствии с требованиями Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментов и других научных целей.

Наркотизированному животному на неповрежденные кости голени монтировали «классическую» компоновку аппарата Илизарова по известной технологии, максимально приближенной к таковой у человека (рис. 1а) [14]. Для фиксации применяли 8 стальных спиц Киршнера диаметром 1,8 мм. В серии 1 ( $n = 5$ ) две спицы (на уровнях второй и третьей опор) вводили консольно с медиальной поверхности, не пронизывая ткани с противоположной стороны. В серии 2 ( $n = 5$ ) все фиксаторы вводили с латеральной поверхности.

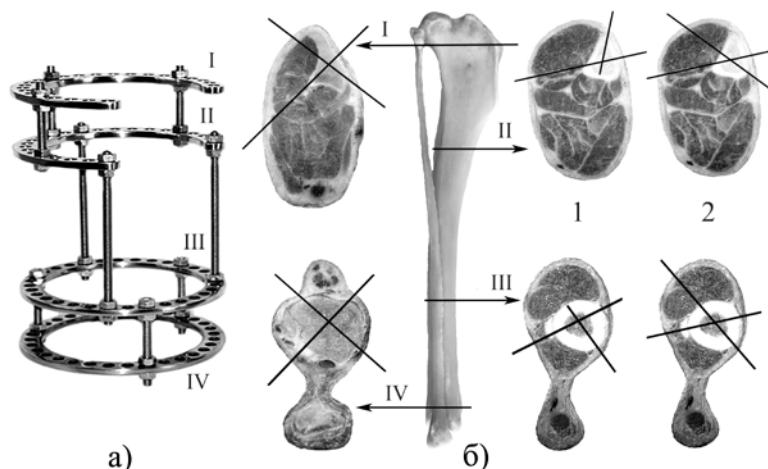


Рис. 1. Дизайн остеосинтеза: а) компоновка аппарата Илизарова; б) расположение спицевых фиксаторов. I, II, III, IV – уровни расположения спиц и опоры для их фиксации; расположение спиц на уровнях II и III в первой (1) и второй (2) сериях

саторы проводили через ткани передне-латеральной и медиальной поверхностей голени (насквозь) (рис. 1б).

Для изучения особенностей внутрикостного кровообращения с медиальной поверхности диафиза большеберцовой кости устанавливали два электрода, в качестве которых использовали спицы Киршнера. Их засверливали перпендикулярно продольной оси кости таким образом, чтобы внутрикостно расположенный конец не соприкасался с противоположным кортикальным слоем. Расстояние между электродами составляло 2,5...3,0 см.

Реовазографию выполняли при помощи реографа-полианализатора РГПА-6/12 «РЕАН-ПОЛИ» (НПКФ «МЕДИКОМ-МТД», Россия). Для этого к наружным концам электродов, введенных в кость, присоединяли электродные кабели, входящие в комплект принадлежностей к оборудованию. Они, в свою очередь, были подключены к соответствующим каналам реографа-полианализатора (рис. 2).

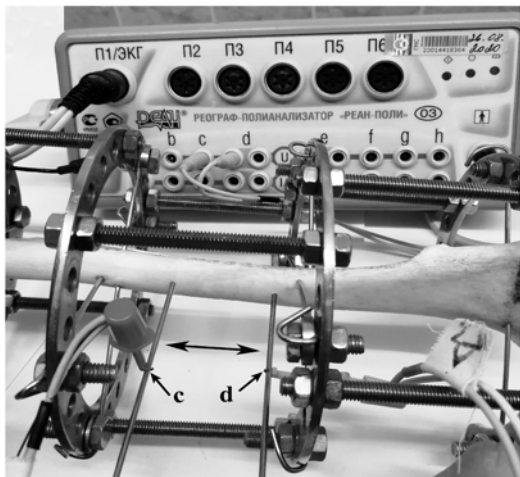


Рис. 2. Макет биотехнической модели для регистрации внутрикостного кровообращения: длинная двусторонняя стрелка – спицы-электроды, введенные внутрикостно; стрелки «с» и «d» – электродные кабели, подключенные к спицам-электродам и к каналам «с» и «d» реографа-полианализатора

На протяжении каждого обследования снятие данных производили не менее трех раз в течение 3 мин. После окончания обследования спицы-электроды не удаляли. Их присоединяли к опорам аппарата Илизарова при помощи кронштейнов и болтов спицефиксаторов. Перед каждым последующим обследованием фиксационные элементы (кронштейны и болты) демонтировали.

Анализировали параметры: время распространения пульсовой волны (ВРПВ, мс), реографический индекс (РИ, Ом), максимальная скорость быстрого кровенаполнения (МСБКН, Ом/с), средняя скорость медленного кровенаполнения (ССМКН, Ом/с), дикротический индекс (ДКИ, %), диастолический индекс (ДСИ, %). Обследования выполняли: перед началом эксперимента (ДО); непосредственно после оперативного вмешательства (Д1); через 7 (Ф 7), 14 (Ф 14), 21 (Ф 21), 35 (Ф 35) суток после операции. В качестве контрольных ис-

пользовали значения, полученные в период «ДО» и при обследовании 15 интактных сегментов, которые принимали за 100 %.

Количественные данные подвергали статистической обработке с использованием программы «AtteStat 13.1» (Россия). Вычисляли средние арифметические величины ( $M$ ) и стандартные отклонения ( $SD$ ). Для сравнения независимых совокупностей использовали  $U$ -критерий Манна-Уитни, а для связанных выборок применяли  $W$ -критерий Вилкоксона для сопряженных пар. Различия считались статистически значимыми при уровне значимости  $p < 0,05$ .

## Результаты

Непосредственно после операции функциональное состояние магистральных артерий (ВРПВ), сосудов мелкого калибра и артериол (ДКИ), а также интенсивность венозного оттока (ДСИ) значимо не изменялись. В серии 1 происходило снижение МСБКН и ССМКН, характеризующих вязко-упругие свойства сосудов крупного и среднего калибра, по отношению к норме ( $p = 0,04$ ) и в сравнении с серией 2 ( $p = 0,04$ ). В серии 2 эти параметры были понижены в меньшей степени (МСБКН –  $p = 0,6$ ; ССМКН –  $p = 0,27$ ). Следствием такого изменения являлось уменьшение РИ, отражающего пульсовое кровенаполнение: в серии 1 – более чем на 73 % ( $p = 0,01$ ); в серии 2 – на 30 % ( $p = 0,23$ ).

Через 7 суток после операции все параметры в обеих сериях снижались по отношению к норме и предыдущему периоду обследования. Изменения были более выражены в серии 1. У этих животных ДКИ уменьшался в 18 раз ( $p = 0,001$ ), а ДСИ – в 3 раза ( $p = 0,01$ ) от нормы. В серии 2 параметр ДКИ снижался в 4,6 раза ( $p = 0,03$ ), ДСИ – в 2,7 раза ( $p = 0,04$ ). Во всех сериях ВРПВ как на данном этапе, так и на последующем достоверных отличий с нормой не имел. К 14-м суткам регистрировали заметное повышение изучаемых показателей. В этот период во всех сериях ДКИ и ДСИ варьировали в диапазоне нормальных значений ( $p = 0,5...0,8$ ). Изменения других параметров через 7 и 14 суток эксперимента по отношению к норме приведены в табл. 1.

К 21-м суткам в серии 1 параметры РИ, МСБКН и ССМКН сохранялись на достигнутом уровне и в дальнейшем практически не изменялись, но имели при этом тенденцию к увеличению, а в серии 2 – достигали нижней границы нормальных значений. В обеих сериях ДКИ и ДСИ соответствовали предыдущему этапу обследования.

К окончанию эксперимента (Ф 35) в серии 2 происходило незначительное понижение параметров от предыдущего срока: РИ – на 42 % ( $p = 0,12$ ), МСБКН – на 35 % ( $p = 0,13$ ), ССМКН – на 35,4 % ( $p = 0,12$ ), и они от нормы составляли 54,7 % ( $p = 0,05$ ), 59 % ( $p = 0,04$ ), 45,6 % ( $p = 0,03$ ) соответственно. В обеих сериях ДКИ и ДСИ варьировали в диапазоне нормы.

На рис. 3-5 представлена динамика вязко-упругих свойств внутрикостных сосудов большеберцовой кости после монтажа аппарата Илизарова на неповрежденный сегмент при разном расположении спицевых фиксаторов (согласно выделенным экспериментальным сериям).

Результаты показали, что чрескостная фиксация неповрежденных костей голени аппаратом Илизарова значимо не влияла на тонус магистрального ствола *a.nutricia tibiae*, но приво-

Таблица 1

**Внутрикостная гемодинамика неповрежденной большеберцовой кости собаки в условиях остеосинтеза по Илизарову на ранних этапах эксперимента**

| Номер серии | Срок опыта, сут. | Параметры, % от нормы |                  |                    |
|-------------|------------------|-----------------------|------------------|--------------------|
|             |                  | РИ                    | МСБКН            | ССМКН              |
| 1           | 7                | 4,7 %; $p = 0,01$     | 7 %; $p = 0,04$  | 4,4 %; $p = 0,03$  |
|             | 14               | 28,8 %; $p = 0,03$    | 25 %; $p = 0,04$ | 20,6 %; $p = 0,03$ |
| 2           | 7                | 20 %; $p = 0,01$      | 22 %; $p = 0,04$ | 13,3 %; $p = 0,03$ |
|             | 14               | 70,6 %; $p = 0,6$     | 69 %; $p = 0,04$ | 57,5 %; $p = 0,03$ |

дила к изменению вязко-упругих свойств внутрикостных сосудов меньшего калибра. Состояние последних зависело от пространственного расположения спицевых фиксаторов. Изменения имели однонаправленный характер, но с разной степенью выраженности. Непосредственно после остеосинтеза происходило уменьшение пульсового кровенаполнения в результате снижения тонуса внутрикостных сосудов крупного и среднего калибров. Это было сильнее выражено в случаях с меньшим повреждением мышц и других тканей с передней и латеральной поверхностей сегмента. Некоторые авторы в экспериментах на животных также наблюдали значительное снижение локального кровотока при внешней фиксации переломов бедра, связывая такой сосудистый ответ в том числе с меньшей степенью травматизации тканей [1]. Подобный эффект был замечен у пациентов при лечении повреждений голени аппаратом наружной кольцевой конструкции, когда в случаях вин-

тообразных переломов скорость кровотока в зоне регенерата снижалась в два раза, а при оскольчатых – усиливалась [15].

Другие исследователи при интрамедуллярном остеосинтезе экспериментальных переломов с разным состоянием мягких тканей определяли уменьшение локального кровотока в первые часы после операции и в последующие 3...14 суток, а в дальнейшем наблюдали его усиление [2], [7], [9]. Вероятно, первоначальный сосудистый ответ на травму, характеризующийся вазодилатацией эндотелия, связан с действием ингибиторов синтеза оксида азота. Последующее усиление кровотока происходит в результате ангиогенеза [10]. В клинических исследованиях выраженный гипотонус сосудов надкостницы определяли у пациентов при интрамедуллярном остеосинтезе стержнями либо наkostными пластинами в эти же сроки (через 10 суток после операции). ГипокINETический тип кровообращения преобладал на всем протяжении лечения [16].

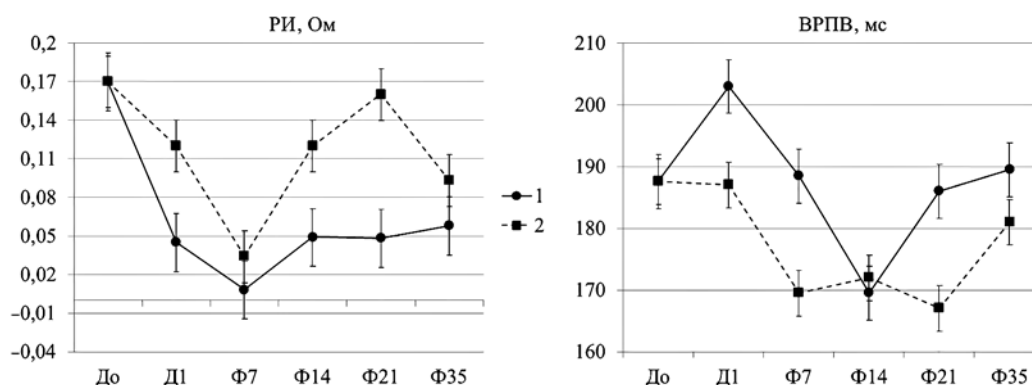


Рис. 3. Динамика объемного пульсового кровенаполнения (РИ) и функционального состояния магистральной артерии (ВРПВ) в костномозговом канале большеберцовой кости

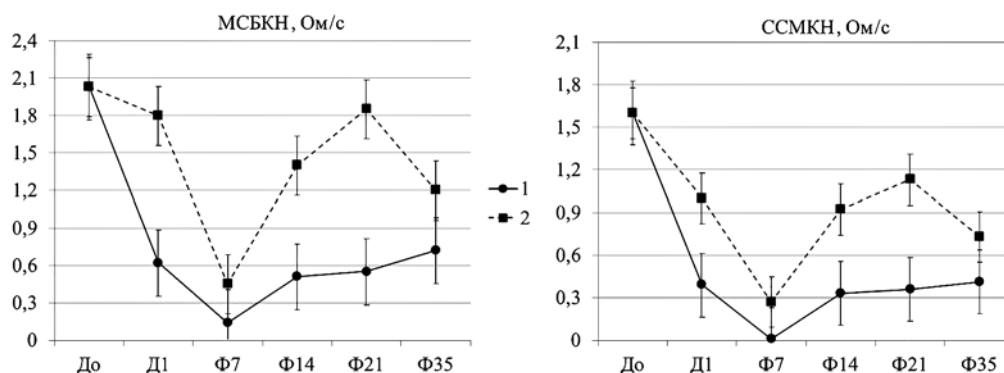


Рис. 4. Динамика функционального состояния внутрикостных артерий большеберцовой кости крупного (МСБКН) и среднего (ССМКН) калибров

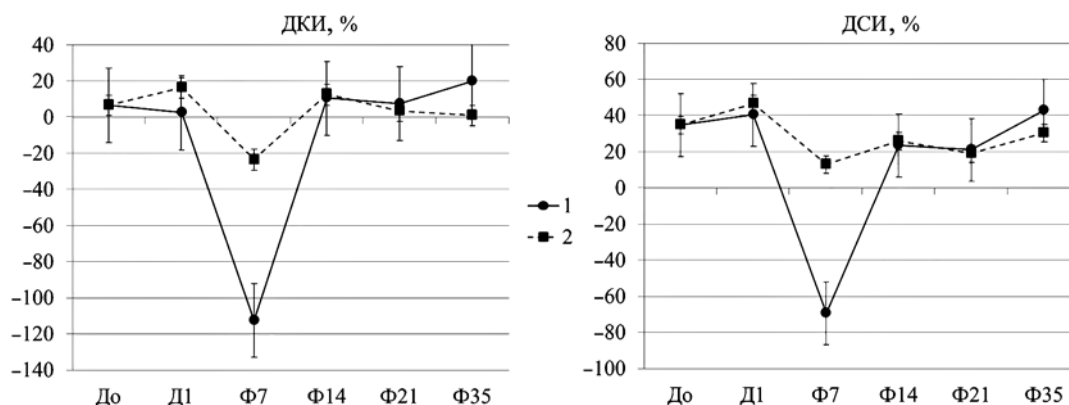


Рис. 5. Динамика функционального состояния внутрикостных артерий большеберцовой кости мелкого калибра, артериол (ДКИ) и венозный отток (ДСИ)

В выполненных исследованиях были получены аналогичные результаты. Наиболее значительные изменения определяли через 7 суток, когда скорость кровенаполнения резко снижалась, как следствие выраженной вазодилатации артерий крупного, среднего и мелкого калибров и артериол. Венозный отток был усилен. К 14-м суткам, независимо от варианта проведения фиксаторов, вязко-упругие свойства мелких сосудов, артериол и венозный отток восстанавливались. При более травматичной фиксации скорость кровотока достигала нормального уровня к 21-м суткам и вновь понижалась к окончанию опыта (Ф 35). По всей видимости, в этой серии постепенное увеличение тонуса сосудов, определяемое после 7 суток фиксации, происходило в результате действия медиаторов воспаления, которые влияют на местную перфузию и метаболизм [17]. При меньшей степени повреждения мягких тканей выраженная вазодилатация артерий крупного и среднего калибров сохранялась на всем протяжении эксперимента.

## Заключение

Таким образом, определили, что после монтажа аппарата Илизарова на неповрежденную голень происходит изменение внутрикостной гемодинамики. Это характеризуется резким снижением пульсового кровенаполнения в раннем послеоперационном периоде в результате вазодилатации сосудов. Степень выраженности и продолжительности таких изменений зависят от пространственного расположения фиксаторов в массиве мягких тканей.

Полученные результаты сопоставимы с известными литературными данными, они продемонстрировали возможность эффективного использования импедансной плетизмографии для оценки внутрикостного кровообращения, что имеет определенные дополнительные перспективы использования данного метода в клинической практике.

**Работа выполнена в рамках программы НИР государственного задания на 2021-2023 гг. «Биоактивный остеосинтез повреждений длинных трубчатых костей».**

## Список литературы:

1. Kalbas Y., Qiao Z., Horst K. et al. Early local microcirculation is improved after intramedullary nailing in comparison to external fixation in a porcine model with a femur fracture // *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*. 2018. Vol. 44. PP. 689-696.
2. Smith S.R., Bronk J.T., Kelly P.J. Effect of fracture fixation on cortical bone blood flow // *Journal of Orthopaedic Research*. 1990. Vol. 8. № 4. PP. 471-478.
3. Li J., Qin L., Yang K., Ma Z., Wang Y., Cheng L., Zhao D. Materials evolution of bone plates for internal fixation of bone fractures: A review // *Journal of Materials Science & Technology*. 2020. Vol. 36. PP. 190-208.
4. Glatt V., Evans C.H., Tetsworth K.A. Concert between Biology and Biomechanics: The Influence of the Mechanical Environment on Bone Healing // *Front. Physiol.* 2017. Vol. 7. P. 678.
5. Илларионов В.В., Шпаченко Н.Н., Давыдов Д.И. Анатомо-физиологические особенности голени и их роль в возникновении, течении и заживлении двойных переломов (обзор литературы) // *Травма*. 2009. Т. 10. № 1. С. 94-101.
6. Mateus J., Hargens A.R. Bone hemodynamic responses to changes in external pressure // *Bone*. 2013. Vol. 52 (2). PP. 604-610.
7. Melnyk M., Henke T., Claes L., Augat P. Revascularisation during fracture healing with soft tissue injury // *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2008. Vol. 128 (10). PP. 1159-1165.
8. Hanne N.J., Easter E.D., Stangeland-Molo S., Cole J.H. A minimally invasive technique for serial intraosseous perfusion measurements in the murine tibia using laser Doppler flowmetry // *MethodsX*. 2020. Vol. 7. P. 100814.
9. Бакланова Д.А., Шакирова Ф.В., Ахтямов И.Ф., Ключицина Ю.А. Артериальная гемодинамика тазовых конечностей кролика при интрамедуллярном остеосинтезе имплантатами с покрытиями нитридами титана и гафния // *Ветеринарный врач*. 2015. № 5. С. 37-40.
10. Tomlinson R.E., Silva M.J. Skeletal blood flow in bone repair and maintenance // *Bone Research*. 2013. Vol. 1. PP. 311-322.
11. Almansour H., Jacoby J., Baumgartner H., Reumann M.K., Nikolaou K., Springer F. Injury of the Tibial Nutrient Artery Canal during External Fixation for Lower Extremity Fractures: A Computed Tomography Study // *Journal of Clinical Medicine*. 2020. Vol. 9 (7). P. 2235.
12. Бунов В.С., Тепленький М.П., Олейников Е.В. Особенности гемодинамики в шейке бедренной кости у детей с асептическим некрозом головки бедра // *Гений ортопедии*. 2016. № 4. С. 50-55.
13. Горбач Е.Н., Кононович Н.А. Внутрикостная гемодинамика большеберцовой кости при автоматическом удлинении голени с темпом 3 мм в сутки за 120 приемов // *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 2017. Т. 103. № 11. С. 1303-1314.
14. Kononovich N.A., Petrovskaya N.V., Krasnov V.V. Treating dogs with tibial shaft fractures using the transosseous osteosynthesis method according to Ilizarov // *European Journal of Companion Animal Practice*. 2014. Vol. 24. № 2. PP. 51-58.
15. Щуров В.А., Мацукатов Ф.А. Функциональное состояние больных с переломами костей голени при лечении при помощи аппарата Мацукидиса-Шевцова // *Ортопедия, травматология и протезирование*. 2013. № 2. С. 69-72.
16. Писарев В.В., Львов С.Е., Васин И.В., Тихомолова Э.В. Регионарная гемодинамика при различных видах оперативного лечения диафизарных переломов костей голени // *Травматология и ортопедия России*. 2012. № 1. С. 36-42.
17. Horst K., Eschbach D., Pfeifer R., Hübenthal S., Sassen M. et al. Local inflammation in fracture hematoma: Results from a combined trauma model in pigs // *Mediators of Inflammation*. 2015. Vol. 2015. Article ID 126060. 8 p.

Наталья Андреевна Кононович,  
канд. вет. наук, вед. научный сотрудник,  
экспериментальная лаборатория,  
Александр Леонидович Шастов,  
канд. мед. наук, научный сотрудник,  
ФГБУ «Национальный медицинский  
исследовательский центр травматологии  
и ортопедии им. акад. Г.А. Илизарова»  
Министерства здравоохранения РФ,  
г. Курган,  
e-mail: n.a.kononovich@mail.ru