

**К ВОПРОСУ ОБ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТКАНЕЙ В СИСТЕМЕ
«АППАРАТ ИЛИЗАРОВА – КОНЕЧНОСТЬ»**

Е.Н. ОВЧИННИКОВ*, Е.Н. ГОРБАЧ*, М.В. СТОГОВ*, О.В. ДЮРЯГИНА*, А.В. СКРИПАЛЬ**,
В.Г. ГОРГОЦ*

*ФГБУ «Российский научный центр «Восстановительная травматология и ортопедия»
им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава РФ, ул. Марии Ульяновой, д. 6, г. Курган, 640005, Россия
**Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского, ул. Большая Казачья, д. 112А, г. Саратов, 410012, Россия

Аннотация. Исследуется электропроводность тканей в системе «аппарат Илизарова – конечность» у 12 пациентов с переломами костей голени. Измерение электропроводности осуществляли между дистальными и проксимальными спицами аппарата Илизарова через каждые пять дней послеоперационного периода. Выполнены модельные исследования в системе «аппарат Илизарова – электролит (физиологический раствор)» с использованием измерительного стенда. Обнаружено, что электропроводность тканей сегмента конечности между проксимальными и дистальными спицами аппарата Илизарова *in vivo* имела значительные флуктуации во времени (от 0,15 до 0,9 Ом⁻¹). В то время как при модельных исследованиях *in vitro* электропроводность среды в течение всего периода наблюдений не изменялась. По результатам исследования *in vivo* также показано, что на имплантируемых спицах возникала точечная коррозия. Делается вывод, что флуктуация электропроводности в исследованиях *in vivo* может быть связана с течением репаративных процессов в тканях и органах травмированного сегмента. Дальнейшее изучение биофизических процессов, происходящих в системе аппарат – конечность, может быть полезным для разработки средств для мониторинга и управления генезом тканей при применении аппаратов внешней фиксации.

Ключевые слова: аппарат Илизарова, электропроводность, остеорепаляция.

**TO THE QUESTION ABOUT THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF TISSUES IN THE SYSTEM
«ILIZAROV APPARATUS – LIMB»**

E.N. OVCHINNIKOV*, E.N. GORBACH*, M.V. STOGOV*, O.V. DYURYAGINA*, A.V. SKRIPAL**,
V.G. GORGOTS*

*Russian Ilizarov Scientific Center "Restorative Traumatology and Orthopaedics",
Maria Ulyanova Str., 6, Kurgan, 640005, Russia
**Saratov State University, Bolshaya Kazachya Str., 112A, Saratov, 410012, Russia

Abstract. The article investigates the electrical conductivity of tissues in the system "Ilizarov apparatus - limb" in 12 patients with fractures of the leg bones. The authors measured the electrical conductivity between the distal and proximal spokes of the Ilizarov apparatus every five days of the postoperative period. Model studies were carried out in the system "Ilizarov apparatus - electrolyte (physiological solution)" using a measuring stand. The authors found that the electrical conductivity of tissues of the limb segment between the proximal and distal spokes of the Ilizarov apparatus *in vivo* had significant fluctuations in time (from 0.15 to 0.9 Ohm⁻¹). At the same time, in model *in vitro* studies, the electrical conductivity of the medium did not change during the entire observation period. According to the *in vivo* study, it was also shown that pitting occurred on implanted spokes. The authors concluded that the fluctuation of electrical conductivity *in vivo* may be associated with the course of reparative processes in tissues and organs of the injured segment. Therefore, further study of the biophysical processes occurring in the apparatus-limb system may be useful for developing means for monitoring and controlling tissue genesis when using external fixation devices.

Keywords: Ilizarov apparatus, electrical conductivity, osteoreparation.

Введение. В практике ортопедии и травматологии для лечения большого числа заболеваний широко используется аппарат внешней фиксации конструкции Г.А. Илизарова [9]. Ранее показано, что аппарат Илизарова с позиции электротехники, представляет собой сложную приёмопередающую антенну с параметрами определяемыми конфигурацией конкретной системы, что вызывает в зоне аппарата определенные биологические эффекты [6]. На имплантированные чрескожные металлические элементы аппарата наводятся всевозможные токи различных частот и формируются гармоники, возникающие от основных сигналов переотраженных окружающими предметами. Одновременно элементы аппарата Илизарова вступают в контакт с внутренней средой организма, образуя различные гальванические элементы и связи [2].

Возможности практического применения данных биофизических процессов для целей управления остеогенезом фактически не изучены, хотя, по нашему мнению, это позволило бы решить несколько практических задач: управление регенерацией, снижение частоты осложнений при применении металлических имплантатов, сокращение времени реабилитации пациентов с металлическими имплантируемыми изделиями [5, 10].

Выполненные в этом направлении исследования единичны. Так, в период активного изучения метода Илизарова, были получены уникальные данные об электромагнитных характеристиках системы «аппарат - конечность» Г.А. Илизаровым и О.В. Тарушкиным. В частности в 1978 году впервые была проведена оценка электрической активности на спицах аппарата Илизарова. Было показано, что при разрыве гальванического соединения между отдельными частями аппарата Илизарова при лечении пациентов с переломами костей голени, электродвижущая сила, создаваемая между спицами, существенно менялась. Токи, регистрируемые в цепи, составляли значения порядка 10^{-7} - 10^{-6} А (неопубликованные данные: отчет по теме «Влияние магнитного поля на заживление переломов костей голени при лечении по Илизарову»/КНИИЭКОТ – № ГР 77035138. Курган, 1978. 102 с.). Позднее Е.В. Добродородный (2008) с позиции применения биоимпедансных анализаторов отмечает возможность использования в качестве электродов для оценки электропроводности имплантируемые элементы (спицы) конструкций аппарата Илизарова [1]. В исследовании S. Kumaravel и S. Sundaram (2012) было отмечено изменение параметров напряжения и сопротивления в системе «аппарат-конечность» в зависимости от стадии консолидации отломков у пациентов с переломами костей голени в ходе лечения по методу Илизарова [11].

Цель работы – исследовать изменение электропроводности тканей в системе «конечность – аппарат Илизарова» и определить факторы, влияющие на неё.

Материалы и методы исследования. В клинической части исследования изучена электропроводность тканей в системе «аппарат–конечность» у 12 пациентов с переломами костей голени. Все пациенты пролечены с применением аппарата Илизарова, использована однотипная его компоновка. Измерение электропроводности осуществляли между дистальными и проксимальными спицами аппарата Илизарова через каждые пять дней послеоперационного периода.

В экспериментальной части *in vitro* исследовали электропроводность в системе «аппарат Илизарова – электролит (физиологический раствор)» с использованием модельного измерительного стенда (рис. 1).



Рис. 1. Измерительный стенд для оценки электропроводности

Стабильную гальваническую изоляцию спиц, как в клинической части, так и в модельных исследованиях, обеспечивали разработанные нами шайбы-втулки, в результате чего базовое значение сопротивления в системе «спица – опора аппарата Илизарова» составило более чем 10^4 МОм.

Электропроводность на чрескожных спицах определяли применением цифрового осциллографа RIGOL DS1052D (Китай, SN DS1EU152400652). Состояние поверхности спиц в клинической части определяли методом сканирующей электронной микроскопии (микроскоп электронный EVO 18, Германия) до их имплантации и после демонтажа аппарата Илизарова.

Результаты и их обсуждение. На первом этапе исследования на стендовой модели *in vitro* нами изучено изменение электропроводности различных сред между спицами. Обнаружено, что при постоянстве среды между спицами (постоянный объем и постоянный химический состав) отсутствовала электропроводность дистиллированной воды, тогда как электропроводность физиологического раствора за период наблюдения была величиной постоянной, составляя около $0,5 \text{ Ом}^{-1}$ (рис. 2).

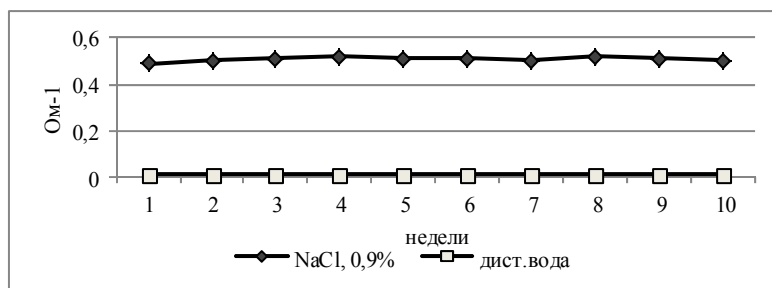


Рис. 2. Электропроводность в модельной системе «аппарат–электролит»

Сопоставление модельных экспериментов с данными наблюдений *in vivo* обнаружило ряд отличий. Так, измерение электропроводности тканей сегмента конечности между проксимальными и дистальными спицами аппарата Илизарова показало отсутствие постоянства данного показателя во времени (рис. 3). Электропроводность тканей оперированного сегмента в посттравматическом периоде колебалась в среднем от 0,15 до 0,9 Ом⁻¹. По нашему мнению, такая флуктуация показателя в исследованиях *in vivo* может быть связана: во-первых, процессами репарации органов травмированного сегмента (изменения кровотока, отеки, изменения метаболизма и др. [4, 8]). В этом плане отмечаемая флуктуация может быть сопоставима с фазами течения посттравматического периода по С.А. Селезневу с соавт. (2005) [7]; во-вторых, с электрохимическими процессами на границе спица-ткани конечности. Такое явление возможно при имплантации металлических изделий [3].

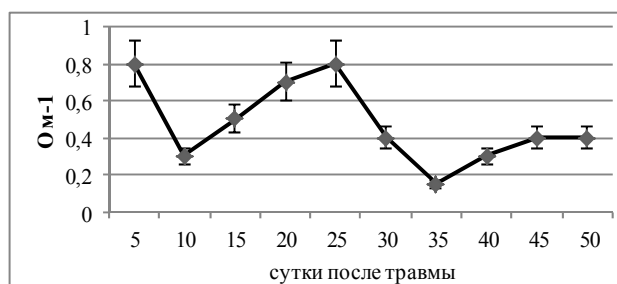


Рис. 3. Электропроводность тканей оперированного сегмента в посттравматическом периоде (среднее арифметическое ± стандартное отклонение)

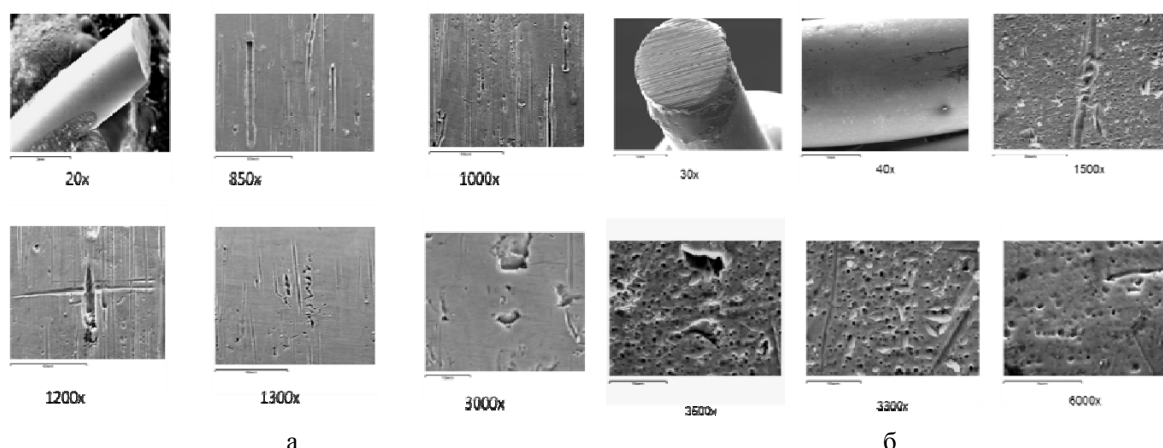


Рис. 4. Микрорельеф поверхности спицы до (а) и через 120 суток (б) имплантации в биологические ткани в участках, свободных от органического матрикса (сканирующая электронная микроскопия)

Исследования поверхности спиц методом сканирующей электронной микроскопии показали, что через 120 суток имплантации в биологические ткани на её поверхности обнаруживались равномерно распределенные микропоры, диаметром 0,3-2 мкм, отсутствующих на интактных образцах (рис. 4). Ме-

тодом построения карт в характеристическом рентгеновском излучении элементов, входящих в состав сплава спиц, через 120 суток после имплантации на поверхности и в структуре материала обнаруживались в микроколичествах элементы *Cl* и *O* в весовых % - 0,013 и 0,01, соответственно (рис. 5). Эти факты подтверждают наличие окислительных процессов на поверхности спиц после ее нахождения в биологических тканях *in vivo*.

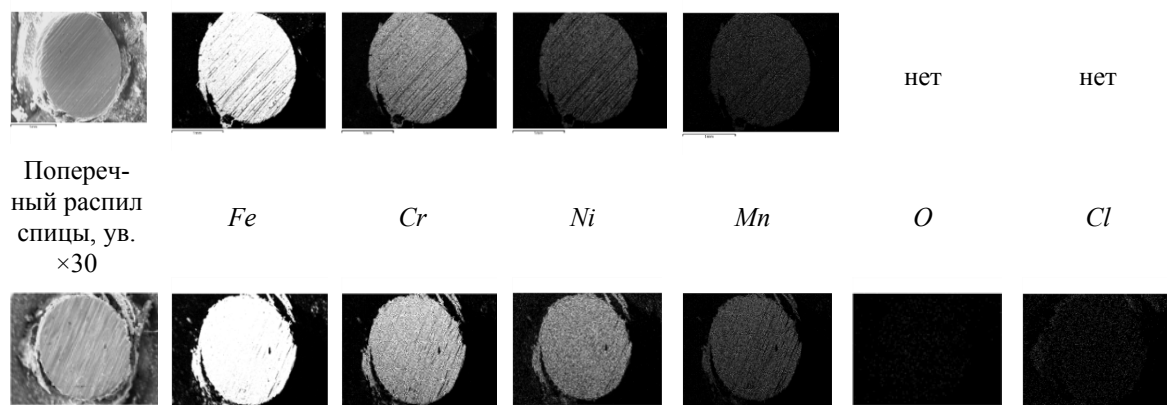


Рис. 5. Электронные карты распределения каждого из элементов, входящих в состав сплава спицы в их характеристическом рентгеновском излучении до (верхний ряд) и через 120 суток (нижний ряд) после имплантации *in vivo*

Наличие хлора в структуре спицы, возможно, свидетельствует о т.н. точечной коррозии, развитие которой происходит с участием основного межклеточного электролита – хлорида натрия. Первая стадия представляет собой растворение пассивационного слоя оксида хрома: $Cr_2O_3 + 10Cl + 2H_2O = 2CrCl_3 + 4HClO$, а вторая состоит в окислении железа в материале спицы: $2Fe + 3ClO = Fe_2O_3 + 3Cl$.

Таким образом, можно полагать, что при имплантации спиц на интерфейсе «спица-ткань» действительно может возникать точечный коррозионный элемент, однако его влияние на наблюдаемое изменение электропроводности в системе «аппарат-конечность» не существенно. Это обстоятельство позволяет полагать, что основным фактором, определяющим флуктуацию электропроводности в системе «аппарат-конечность» *in vivo*, является проводимость тканей травмированного сегмента. Колебания последней, по нашему мнению, являются отражением восстановительных процессов в органах поврежденного сегмента (прежде всего кость и мышцы).

Закключение. Таким образом, полученные данные демонстрируют наличие значительной флуктуации электропроводности между спицами аппарата Илизарова, которая, по нашему мнению, определяется состоянием репаративных процессов в поврежденных органах. Поэтому дальнейшее изучение биофизических процессов, происходящих в системе аппарат-конечность, может быть полезным для разработки средств (изделий) для мониторинга и управления генозом тканей при применении аппаратов внешней фиксации.

Литература

1. Добродородный Е.В. Нераскрытые возможности аппарата Илизарова // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 5. С. 84–87.
2. Илизаров Г.А., Катаев И.А., Предеин А.П. Некоторые закономерности и перспективы развития аппаратов для чрескостного компрессионно-дистракционного остеосинтеза. Изобретательство и рационализаторство в травматологии и ортопедии: Сб. трудов ЦИТО. М., 1983. С. 85–91.
3. Коррозия металлов в полости рта, как фактор развития гальваноза / Михальченко Д.В. [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3.
4. Лунева С.Н., Ткачук Е.А., Стогов М.В. Биохимические показатели в оценке репаративного остеогенеза у пациентов с различными типами скелетной травмы // Гений ортопедии. 2010. № 1. С. 112–115.
5. Паевский С.А., Барабаш А.П., Котельников В.П. Миробостатическое действие постоянного электрического тока в тканях // Ортопедия, травматология. 1980. № 3. С. 37–40.
6. Паевский С.А., Смелышев Н.Н., Шевцов В.И. Исследование бактерицидных свойств кожи поврежденных конечностей у больных с закрытыми переломами костей при лечении аппаратом Илизарова. Теоретические и практические аспекты чрескостного компрессионного и дистракционного остеосинтеза: Тезисы докладов. Курган, 1976. С. 90–91.

7. Травматическая болезнь и ее осложнения / под ред. Селезнева С.А., Багненко С.Ф., Шапота Ю.Б., Курыгина А.А. СПб.: Политехника, 2005. 410 с.
8. Щуров В.А. Регионарная гемодинамика при лечении заболеваний и травм конечностей. Saarbrücken: LAP Lambert, 195 с.
9. Contribution of G.A. Ilizarov to bone reconstruction: historical achievements and state of the art. Strategies / Gubin A.V. [et al.] // Trauma Limb Reconstr. 2016. Vol. 11, № 3. P. 145–152.
10. Effect of capacitive coupled electrical stimulation on regenerate bone / Pepper J.R. [et al.] // J. Orthop. Res. 1996. Vol. 14, № 2. P. 296–302.
11. Kumaravel S., Sundaram S. Monitoring of fracture healing by electrical conduction: A new diagnostic procedure // Indian J. Orthop. 2012. Vol. 46, № 4. P. 384–390.

References

1. Dobrorodnyj EV. Neraskrytye vozmozhnosti apparata Ilizarova [The noble EV Undisclosed capabilities of the Ilizarov apparatus]. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2008;5:84-7. Russian.
2. Ilizarov GA, Kataev IA, Predein AP. Nekotorye zakonomernosti i perspektivy razvitija apparatov dlja chreskostnogo kompressionno-distrakcionnogo osteosinteza [Some patterns and prospects for the development of devices for transosseous compression-distraction osteosynthesis]. Izobretatel'stvo i racionalizatorstvo v travmatologii i ortopedii: Sb. trudov CITO. Moscow; 1983. Russian.
3. Mihal'chenko DV, et al. Korrozija metallov v polosti rta, kak faktor razvitija gal'vanoza [Corrosion of metals in the oral cavity, as a factor in the development of galvanosis]. Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2015;3. Russian.
4. Luneva SN, Tkachuk EA, Stogov MV. Biohimicheskie pokazateli v ocenke reparativnogo osteogeneza u pacientov s razlichnymi tipami skeletnoj travmy [Biochemical parameters in the assessment of reparative osteogenesis in patients with various types of skeletal injury]. Genij ortopedii. 2010;1:112-5. Russian.
5. Paevskij SA, Barabash AP, Kotel'nikov VP. Mirobostatsicheskoe dejstvie postojannogo jelektricheskogo toka v tkanjah [Mirobostatic effect of direct electric current in tissues]. Ortopedija, travmatologija. 1980;3:37-40. Russian.
6. Paevskij SA, Smelyshev NN, Shevcov VI. Issledovanie baktericidnyh svojstv kozhi povrezhdennyh konechnostej u bol'nyh s zakrytymi perelomami kostej pri lechenii apparatom Ilizarova [The study of the bactericidal properties of the skin of damaged limbs in patients with closed bone fractures during treatment with the Ilizarov apparatus]. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty chreskostnogo kompressionnogo i distrakcionnogo osteosinteza: Tezisy dokladov. Kurgan; 1976. Russian.
7. Travmaticheskaja bolezn' i ee oslozhnenija [Traumatic disease and its complications]. Pod red. Selezneva SA, Bagnenko SF, Shapota JuB, Kurygina AA. Sankt-Peterburg: Politehnika; 2005. Russian.
8. Shhurov VA. Regionarnaja gemodinamika pri lechenii zaboivanij i travm konechnostej [Regional hemodynamics in the treatment of diseases and injuries of limbs]. Saarbrücken: LAP Lambert. Russian.
9. Gubin AV, et al. Contribution of G.A. Ilizarov to bone reconstruction: historical achievements and state of the art. Strategies. Trauma Limb Reconstr. 2016;11(3):145-52.
10. Pepper JR, et al. Effect of capacitive coupled electrical stimulation on regenerate bone. J. Orthop. Res. 1996;14(2):296-302.
11. Kumaravel S, Sundaram S. Monitoring of fracture healing by electrical conduction: A new diagnostic procedure. Indian J. Orthop. 2012;46(4):384-90.

Библиографическая ссылка:

Овчинников Е.Н., Горбач Е.Н., Стогов М.В., Дюрягина О.В., Скрипаль А.В., Горгоц В.Г. К вопросу об электропроводности тканей в системе «аппарат Илизарова – конечность» // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2019. №6. Публикация 3-4. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2019-6/3-4.pdf> (дата обращения: 20.11.2019). DOI: 10.24411/2075-4094-2019-16312.*

Bibliographic reference:

Ovchinnikov EN, Gorbach EN, Stogov MV, Dyuryagina OV, Skripal AV, Gorgots VG. K voprosu ob jelektrprovodnosti tkanej v sisteme «apparat Ilizarova – konechnost'» [To the question about the electrical conductivity of tissues in the system «Ilizarov apparatus – limb»]. Journal of New Medical Technologies, e-edition. 2019 [cited 2019 Nov 20];6 [about 5 p.]. Russian. Available from: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2019-6/3-4.pdf>. DOI: 10.24411/2075-4094-2019-16312.

* номера страниц смотреть после выхода полной версии журнала: URL: <http://medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2019-6/e2019-6.pdf>