

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНОЙ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ТЕРАПИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ В КОСТНОЙ ТКАНИ.

С.В. Василевич, С.Н. Курченко

*СПб ГБУЗ Восстановительный центр детской травматологии и ортопедии «Огонек»,
г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургское ш., 101А Россия, 198515
svasilevich@mail.ru*

Резюме

Обоснование: Механизмы действия ударных волн связаны с различными биологическими реакциями, в том числе "механотрансдукцией". Костная ткань под действием механической нагрузки способна генерировать пьезоэлектрические заряды, которые могут быть управляющими сигналами для ремоделирования структуры кости.

В современной литературе отсутствуют работы посвященные взаимосвязи действия ударных волн на возникновения пьезоэлектрических разрядов в кости, что и послужило основанием для проведения исследования.

Цель: качественно оценить влияние ударно-волной терапии (УВТ) на формирование пьезоэлектрических потенциалов в костной ткани.

Материалы и методы: Материалом для исследования выбраны нативные бедренные и большеберцовые кости свиней. Макропрепараты были освобождены от мягких тканей, и сформированы однотипные костные фрагменты длиной 8-10 см, состоящие из участка диафиза, метаэпифиза и эпифиза, а также из двух костей объединенных суставной капсулой (бедренная и большеберцовая кости). Противоположные концы испытуемых макропрепаратов кости были подключены к входу аналого-цифрового преобразователя электрокардиографа. Электрических сигнал с кости регистрировался во временном режиме записи ЭКГ. Регистрация сигналов выполнялась на нескольких участках костной ткани на различном удалении от точки приложения ударной волны.

В качестве источника ударно-волнового воздействия использован аппарат *Storz Medical, MASTERPULS 200*. Характеристики импульса: радиальный, аппликатор диаметром 15 мм, 1 Герц, давление до 5 бар.

Ударное воздействие было приложено к кости в зону диафиза, метафиза и эпифиза. Также оценили изменения амплитуды электрических пьезозарядов при помещении между препаратом кости и аппликатором ЭУВТ мышц и сухожильной ткани.

Результаты: Воздействию радиальной ударной волны на препарат кости вызывало пьезоэлектрические импульсы в ней.

Величина пьезоэлектрических разрядов зависела от акустической (минеральной) плотности кости и энергии ударно-воздействия воздействия на кость. Максимальный пьезоэлектрических разряд возникал в диафизе кости в точке наиболее приближенной к излучателю (до 45 мВ).

Пьезоэлектрические сигналы различной интенсивности регистрировались в пределах препарата целостной кости на удалении от зоны приложения ударной волны на протяжении до 5 см. Заряды не регистрировались в смежной с исследуемой костью (связанных через общую суставную капсулу).

Пьезоэлектрический импульс быстро затухал при помещении мышц или сухожильной ткани между излучателем ударно-волнового аппарата и костью, а также при направлении излучателя УВТ не перпендикулярно к поверхности кости.

Пьезоэлектрический сигнал не регистрировался при воздействии ударно-волной на область сухожилия.

Заключение: Ударно-волновое воздействие на кость вызывает пьезоэлектрические эффекты в ней.

Ударная волна является физиотерапевтическим фактором, поведение которого в теле человека можно упрощенно описать законами распространения акустических волн в средах.

Модель «ударная волна-кость-пьезоэлектрических заряд» может использоваться для моделирования и предварительной оценки воздействия УВТ.

Ключевые слова: ударно-волновая терапия, пьезоэлектрический эффект, костная ткань, остеорепа́рация, механотрансдукция.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE EFFECT OF RADIAL SHOCK WAVE THERAPY ON THE FORMATION OF PIEZOELECTRIC EFFECTS IN BONE TISSUE.

S.V. Vasilevich, S.N. Kurchenko.

*Children's rehabilitation center of orthopaedics and traumatology "Ogonyok" SBHI, St. Petersburg, Saint Petersburg sh., h. 101A, Russia, 198515
svasilevich@mail.ru*

Background: The mechanisms of action of shock waves are associated with various biological reactions, including "mechanotransduction". Bone tissue under the influence of mechanical load is able to generate piezoelectric charges, which can be control signals for remodeling the bone structure.

In the modern literature, we have not found works on the relationship of shock waves on the occurrence of piezoelectric discharges in the bone, which was the basis for the study.

Aims: to qualitatively evaluate the effect of shockwave therapy (SWT) on the formation of piezoelectric potentials in bone tissue.

Materials and methods: The material for the study was selected native femur and tibia of pigs. Macropreparations were released from soft tissues, and the same type of bone fragments were formed 8-10 cm long, consisting of a section of the diaphysis, metaepiphysis and epiphysis, as well as two bones united by an articular capsule (femur and tibia). The opposite ends of the test bone macropreparations were connected to the input of the analog-to-digital converter of the electrocardiograph. The electrical signal from the bone was recorded in the temporary ECG recording mode. Signal registration was performed on several areas of bone tissue at different distances from the point of application of the shock wave.

The Storz Medical device (MASTERPULS 200) was used as a source of shock-wave impact. Pulse characteristics: radial, applicator with a diameter of 15 mm, 1 Hertz, up to 5 bar.

The impact was applied to the bone in the zone of the diaphysis, metaphysis and epiphysis. We also evaluated changes in the amplitude of electric piezo charges when placing muscles and tendon tissue between the bone preparation and the SWT applicator.

Results: The impact of a radial shock wave on the bone preparation caused piezoelectric impulses in it.

The value of piezoelectric discharges depended on the acoustic (mineral) density of the bone and the energy of the impact on the bone. The maximum piezoelectric charge occurs in the bone diaphysis at the point closest to the emitter (up to 45 mV).

Piezoelectric signals of different intensity were recorded in the whole bone preparation at a distance from the zone of application of the shock wave up to 5 cm. Charges were not registered in the adjacent bone (connected through a common joint capsule).

The piezoelectric discharge quickly faded when the muscles or tendon tissue were placed between the shock wave emitter and the bone, as well as when the SWT emitter was not perpendicular to the bone surface.

The piezoelectric signal was not registered when the shock wave was applied to the tendon area.

Conclusions: Shock-wave action on the bone causes piezoelectric effects in it.

Shock wave is a physiotherapy factor whose behavior in the human body can be simplified by the laws of acoustic wave propagation in environments.

The "shock wave-bone-piezoelectric charge" model can be used for modeling and preliminary assessment of the impact of SWT.

Keywords: shock wave therapy, piezoelectric effect, bone tissue, bone regeneration.

Введение.

Ударно-волновая терапия метод физиотерапевтического воздействия, который был изобретен Frank Rieber в 1950 году и изначально ориентирован для неинвазивного лечения новообразований головного мозга. В качестве источника ударных волн использовали электрогидравлический излучатель и фокусирующие линзы. В дальнейшем метод получил развитие и были созданы аппараты ударно-волновой терапии, использующие пьезоэлектрические, электромагнитные и пневматические приводы.

Наиболее результативно на заре своего применения экстракорпоральная ударно-волновая терапия (ЭУВТ) была применена в урологической практике с целью литотрипсии. В последующем ударно-волновая терапия прочно заняла свое место в практической медицине.

В современной литературе представлено множество публикаций о влиянии ударных волн на ткани опорно-двигательной системы человека. В большом массиве публикаций описана способность ударно-волновой терапии уменьшать болевой синдром и воспалительные проявления. Показана возможность индуцирования неангиогенеза.

Не менее интересен эффект увеличения активности стволовых клеток, стимуляция регенерации и заживления тканей [1].

В экспериментах достаточно подробно изучено влияние фокусированной и расфокусированной ЭУВТ на процессы репаративного остеогенеза при дефектах кости. Под воздействием ЭУВТ в костном мозге поврежденной области происходит расширение сосудов, а также выход клеток крови из капилляров и синусоидальных сосудов с созданием массивных участков костного эндостального регенерата, способствующего восстановлению целостности кости, увеличение неоваскуляризации и повышение регуляции ангиогенных и остеогенных факторов роста [2, 3, 4, 5].

Таким образом, ЭУВТ, как частный случай специфической механической нагрузки, в последнее время является наиболее доказанным физиотерапевтическим фактором и приобретает все большее распространение среди физиотерапевтов, травматологов, ортопедов и реабилитологов [6].

Механизмы действия ударных волн связаны с различными биологическими реакциями, возникающими под воздействием специфических акустических волн, посредством "механотрансдукции" (механотрансдукция – процессе, через который силы и другие механические сигналы преобразуются в клеточные сигналы).

Костная ткань, являясь механотрансдуктором, обладает рядом специфических характеристик. Среди таких характеристик следует выделить электрогенез костной ткани.

Пьезоэлектрические свойства кости впервые были описаны Fakuda E. и Jasuda I. [7].

Электрические потенциалы кости связаны с активностью ее метаболизма и целостностью, изменяются при переломах и консолидации костных отломков [8]. Появление электрических потенциалов кости является следствием адаптивной реакции на её сдавливание [9]. Указанные потенциалы имеют взаимосвязь с ремоделированием кости [10, 11].

В кости также был обнаружен и обратный пьезоэффект: под действием приложенного к костным структурам электрического поля в них появлялась ответная реакция в виде механического напряжения (сжатия или растяжения).

Костная ткань восприимчива к различного рода механическим нагрузкам под воздействием которых может перестраиваться или оптимизировать процессы остеорепарации. Пьезоэлектрические эффекты костной ткани возможно являются управляющими стимулами, ответственными за ее метаболизм [12].

В связи с тем, что механический стресс посредством ЭУВТ является сильнейшим стимулом способствующим репаративным процессам, следуют предположить наличие пьезоэлектрических эффектов в костях под воздействием ЭУВТ. Тем не менее в современной литературе отсутствуют работы посвященные этому возможному эффекту действия ударных волн, что и послужило основанием для проведения исследования.

Цель.

Качественно оценить влияние ударно-волновой терапии на формирование пьезоэлектрических потенциалов в костной ткани.

Для этого были решены следующие задачи:

- разработка экспериментальной модели для исследования;
- оценка влияния ударных волн на электрогенез костной ткани различной структуры;
- проанализированы полученные результаты и возможные пути практического применения.

Методы и материалы.

Материалом для исследования послужили нативные бедренные и большеберцовые кости свиней. Макропрепараты были препарированы от мягких тканей. Для стандартизации условий воздействия сформированы однотипные костные фрагменты длиной 8-10 см, состоящие из участка диафиза, метаэпифиза и эпифиза, а также из двух костей объединенных суставной капсулой (бедренная и большеберцовая кости). Противоположные концы испытуемых макропрепаратов кости были подключены к входу аналого-цифрового преобразователя от аппаратно-программного комплекса «Валента» (модуль ЭКГ). Электрический сигнал с кости регистрировался во временном режиме записи ЭКГ. Регистрация сигналов выполнялась на нескольких участках костной ткани на различном удалении от точки приложения ударной волны в пределах одного препарата.

В качестве источника ударно-волнового воздействия использован аппарат Storz Medical, MASTERPULS 200. Характеристики импульса: радиальный, аппликатор (D-actor, акустическая линза с плоской поверхностью) диаметром 15 мм, частота 1 Герц, давления при формировании импульса до 5 бар (максимальное давление).

На рисунке 1 представлена схема эксперимента.

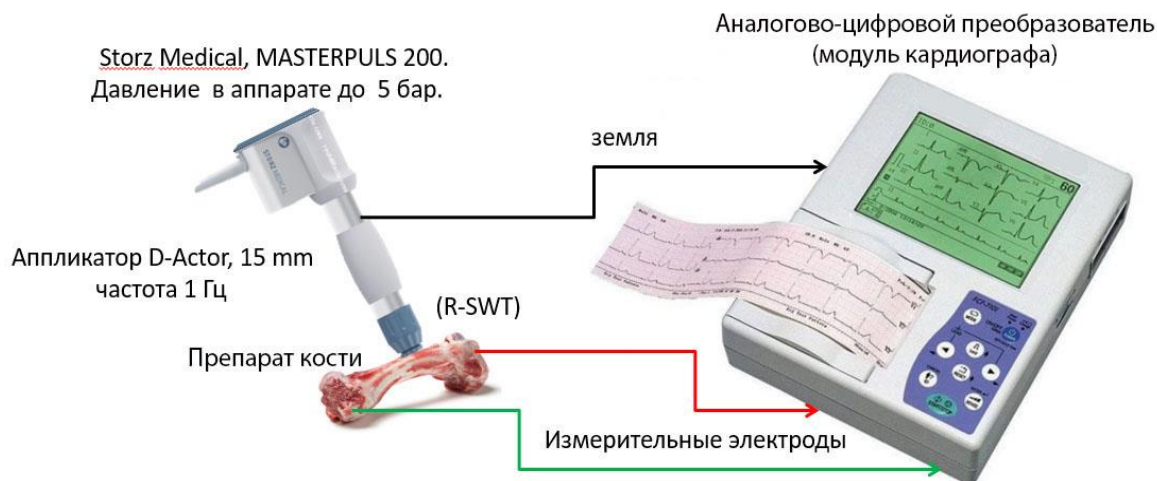


Рис. 1. Схема эксперимента - регистрация пьезоэлектрических сигналов кости под воздействием расфокусированной ударной волны.

Методика воздействия: через акустический гель («Ультрагель» средней вязкости) импульс был непосредственно приложен к макропрепарату экспериментальной кости в зону диафиза, метафиза и эпифиз. Также оценили изменения амплитуды костных пьезозарядов при помещении между препаратом кости и аппликатором ЭУВТ мышц и сухожильной ткани.

Результаты.

При воздействии радиальной ЭУВТ на макропрепарат кости были зарегистрированы пьезоэлектрические импульсы. Появление минимальных пьезоэлектрических разрядов отмечено при давлении в аппарате ЭУВТ 1,8-2 бар, при увеличении интенсивности оказываемого воздействия амплитуда разрядов также увеличиваясь. Максимальная амплитуда наблюдалась при непосредственном приложении ударно-волнового импульса (5 бар) к диафизу кости, при этом величина разности потенциалов на точках кости (с которых регистрировались потенциалы) достигала 40- 45 мВ. Регистрируемые показатели электрической активности на метаэпифизарной зоне кости были несколько меньше (до 25-30 мВ), чем при аналогичной силе ударного импульса приложенного к диафизу кости. Минимальные

показатели электроактивности регистрировались в зоне эпифиза (до 12-15 мВ). На рисунке 2 представлены электрограммы пьезоэлектрических импульсов, зарегистрированных от препарата кости. Межэлектродное расстояние при этой серии измерений не менялось.

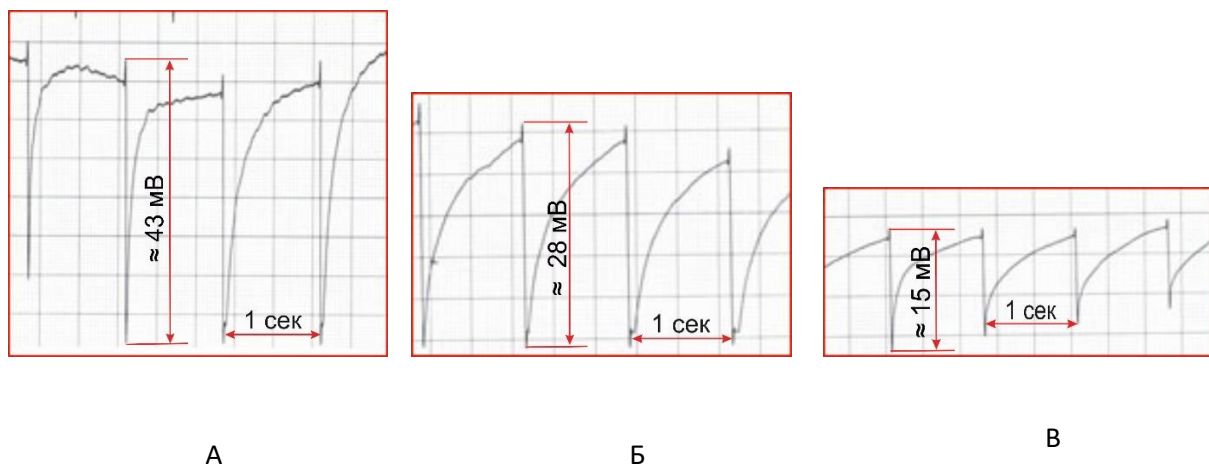


Рис. 2. Электрограмма, зарегистрированная на участках кости под действием радиальной ЭУВТ: А - зона диафиза; Б – метаэпифизарная зона; В – зона эпифиза. (по вертикали напряжение в мВ – 5 мВ на клетку, по горизонтали длительность – интервал между импульсами 1 секунда)

Пьезоэлектрические сигналы регистрировались в пределах препарата целостной кости на удалении от зоны приложения ударной волны (на протяжении до 5 см). Увеличение величины пьезоэлектрических зарядов наблюдалась при приближении регистрирующих электродов в точку приложения импульса от ЭУВТ, и, наоборот, при удалении регистрирующих электродов от зоны приложения ЭУВТ уменьшалось. Заряды не регистрировались в смежной с исследуемой костью (связанных через общую суставную капсулу). Так, например, при исследовании препарата «бедренная кость-коленный сустав-большеберцовая кость» в случае воздействия ЭУВТ на бедренную кость пьезоэлектрический заряды регистрировались в пределах бедренной кости, но не фиксировались на большеберцовой кости.

Амплитуда пьезоэлектрического импульса быстро затухала при помещении мышечной или сухожильной ткани между излучателем ударно-волнового аппарата и костью. Также некоторое уменьшение величины пьезоэлектрического разряда наблюдалось при направлении излучателя ЭУВТ к поверхности кости под углом, отличающимся от перпендикулярного.

Электрический сигнал не регистрировался (имеющимися техническими средствами) при воздействии ударной волной на область сухожилия.

Обсуждение.

Среди различных влияний ударно-волновой терапии на костную ткань присутствует пьезоэлектрический эффект.

Интенсивность пьезоэлектрических и ассоциированных с ним эффектов зависит от акустической (минеральной) плотности кости и энергии ударно-волнового воздействия, что в свою очередь связано с расстоянием от кости до источника ударной волны и техническими характеристиками источника ЭУВТ.

Акустическая плотность ткани, на которую воздействует ЭУВТ и пьезоэлектрических эффект в ней взаимосвязанные характеристики. Акустическая плотность ткани будет определять степень поглощения ударно-волнового импульса, и как следствие его дальнейшую трансформацию. Этим же можно объяснить отсутствие регистрируемых пьезоэлектрических эффектов при воздействии ударной волной на ткань сухожилия, при потенциально имеющихся пьезоэлектрических свойствах у этой ткани [13].

Распространение ударной волны имеет общие закономерности распространения звуковой волны в средах (поглощение, пропускание, отражение или преломление), что следует учитывать при прогнозировании (моделировании) распространении волны и зоны ее возможных воздействий.

Следует предположить, что ударно-волновое воздействие на кость будет максимальным в зоне воздействия с постепенным затуханием в пределах одной кости (на протяжении не менее 5 см, а не только в точке воздействия), при этом передача ударного импульса на смежные (через мягкие ткани, капсулу сустава, связки...) сегменты переходить не будет. Это обусловлено тем, что согласно закономерностям распределения волн (отражение, преломление, рассеивание), максимальные потери волны будут происходить на границах контактах сред с различной акустической плотностью (в данном случае кость и мягкие ткани). Таким образом, практически вся энергия ударной волны распространяющейся по кости будет рассеяна на месте ее контактов с мягкими тканями (суставной хрящ, синовиальная оболочка, мышцы) и на соседнюю кость передана не будет.

Удаленность излучателя ударной волны и его угловое направление к поверхности кости следует учитывать при проведении процедур. В естественных условиях при выполнении процедур ударно-волновой терапии между костью и излучателем всегда располагаются различные мягкие ткани (от нескольких миллиметров кожных покровов до многосантиметровых слоев мышц и подкожной жировой клетчатки), а направление ударного импульса может быть не всегда перпендикулярным к поверхности кости. В случае использования расфокусированной ударной волны для костной реакции целесообразнее выбирать участки для воздействия на кость с минимальной толщиной надлежащих мягких тканей. В этом случае передача энергии через костную ткань на удалении будет значительно эффективнее чем, в случае если ударно-волновое воздействие будет выполняться над костью через массив мягких тканей (которые практически полностью поглощают всю энергию ударно-волнового импульса). В случае использовании фокусированных аппаратов ЭВУТ следует обращать внимание на соответствие расстояния от кожных покровов до кортикального слоя кости и фокусного расстояния акустической линзы излучателя.

Естественно, что использование фокусированной ударно-волновой терапии целесообразнее в патогенетическую точку под контролем ультразвуковой навигации. Современные аппараты позволяют создать практически любой фокусированный ударно-волновой импульс необходимой интенсивности в любой области человеческого тела.

В представленном наблюдении мы не рассматривались биологические эффекты ударной волны. Очевидно, что описанные особенности будут оказывать влияние на клиническую эффективность этой бесспорно действенной процедуры у различных пациентов. Влияние на эффективность окажут многие факторы. Помимо очевидных технических характеристик таких как: тип ударной волны (фокусированная или расфокусированная), плотность энергии, диаметр излучателя, количество импульсов и их частота, на результативность процедуры окажут влияние толщина мягких между аппликатором и костью (для расфокусированных аппаратов), точность фокусировки ударного луча на поверхности кости (для фокусированных аппаратов), различная акустическая плотность различных мягких тканей (из-за рассеивания ударной волны), угол падения ударной волны к поверхности кости, отраженные эффекты ударной волны (связанные с распространением ударной волны на протяжении кости). Анализ эффектов и подбор режимов для стимуляции и торможения метаболических процессов, с учетом описанных особенностей, безусловно расширяет клинические возможности ЭВУТ и требует дальнейшего исследования.

Заключение.

Экспериментальное воздействие ЭУВТ вызывает в костной ткани пьезоэлектрические эффекты. Пьезоэлектрические заряды от воздействия ЭУВТ на костную ткань распространяются в пределах кости на которую оказано воздействие (на протяжении до 5 см), не распространяясь на смежные кости. Максимальный пьезоэлектрический заряд возникает в точке кости наиболее приближенной к излучателю.

Пьезоэлектрический разряд максимален в костной ткани с наибольшей плотностью (диафиз) (достигает 45мВ) и убывает по мере снижения плотности кости – в метаэпифизарной зоне промежуточное значение (до 30 мВ), в эпифизарной зоне минимальное значение (до 15 мВ) (рис. 2 А-В).

Пьезоэлектрический эффект прямо зависит от энергии воздействия и направления воздействия ударной волны. Максимальный эффект при перпендикулярном расположении излучателя ЭУВТ к поверхности кости (достигает 45мВ).

Пьезоэлектрический эффект в костной ткани от расфокусированной ударной волны уменьшается при удалении излучателя от поверхности кости. Причиной этого уменьшения являются мягкие ткани расположенные между поверхностью кости и излучателем ЭУВТ, которые рассеивают ударную волну при прохождении через них.

Ударная волна является физиотерапевтическим фактором, поведение которого в теле человека можно упрощенно описать законами распространения акустических волн в средах.

Модель «ударная волна-кость-пьезоэлектрический разряд» может использоваться для моделирования и предварительной оценки воздействия (геометрия распространения волны, сила прямого и отраженного воздействия).

Список литературы.

1. Shock wave as biological therapeutic tool: From mechanical stimulation to recovery and healing, through mechanotransduction / d'Agostino MC, Craig K, Tibalt E, Respizzi S.// Int J Surg. – 2015. - Vol. 24, Pt B. – P.147-53. doi: 10.1016/j.ijsu.2015.11.030
2. The bone defect healing under the influence of radial extracorporeal shock-wave therapy in experiment/ Gertsen GI, Se-Fey, Ostapchuk RM, Lesovoy AV, Zhrebchuk VV. //Klin Khir. – 2016. - Vol. 3. – P. 54-7. Russian.
3. Biological effects of extracorporeal shockwave in bone healing: a study in rabbits/ Wang CJ, Wang FS, Yang KD. // Arch Orthop Trauma Surg. – 2008. - Vol. 128, 8. – P.879-84. doi: 10.1007/s00402-008-0663-1
4. Impact of radial shock-wave therapy of a low frequency on metabolic processes in the bone tissue in traumatic tibial defects in experiment / Magomedov AM, Gertsen GI, Fey S, Kuzub TA, Krinitskaya OF.// Klin Khir. – 2016. - Vol. 4. – P. 64-6. Russian.
5. High energy focused shock wave therapy accelerates bone healing. A blinded, prospective, randomized canine clinical trial /Kieves NR, MacKay CS, Adducci K, Rao S, Goh C, Palmer RH, Duerr FM.// Vet Comp Orthop Traumatol. – 2015. - Vol.28, 6 - P. 425-32. doi: 10.3415/VCOT-15-05-0084
6. Historical ESWT Paradigms Are Overcome: A Narrative Review / Heinz Lohrer, Tanja Nauck, Vasileios Korakakis and Nikos Malliaropoulos/ BioMed Research International – 2016. - Article ID 3850461 - 7 pages. doi.org/10.1155/2016/3850461
7. Fukada E., On the Piezoelectric Effect of Bone/ Fukada E., Yasuda I. // J. Phys. Soc. Japan – 1957. - vol. 12. - P. 1158-1162.
8. Yasuda I. Dynamic callus and electric callus / Yasuda I., Noguchi K., Sata T. // J. Bone Joint Surg. – 1955. - vol. 37A - P.1292-1293.
9. Andrew C., Bassett L., Robert O. Becker. Generation of Electric Potentials by Bone in Response to Mechanical Stress.// Science. - 1962. - Vol. 137. - Issue 3535 - P. 1063-1064. doi: 10.1126/science.137.3535.1063
10. Shamos MH., and Lavine LS. Physical bases for bioelectric effects in mineralized tissues.// Clin Orthop Relat Res. -1964. - Vol.35. - P.177-88.
11. Возможные механизмы влияния электретных эффектов костей на остеогенез у детей и подростков / Василевич С.В., Арсеньев А.В., Дудин М.Г., Хомутов В.П., Комлев А.Е. В сборнике: VIII Международный конгресс "Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине" Научные труды Конгресса - 2018. - С. 165-166.

12. The influence of low-frequency acoustic vibrations on the osteoreparation of the long bones of extremities at combined radiative-mechanical lesions / Shapovalov V.M., Nadulich, K.A., Vasilevich, S.V., Garipov R.R. // Traumatology and Orthopedics of Russia. – 2008. – Vol. 3,49. - P. 4-10. Russian.
13. Analysis of stress distribution and piezoelectric response in cantilever bending of bone and tendon / Williams WS, Breger L.// Ann N Y Acad Sci. – 1974. – Vol 238. – P. 121-30. doi.org/10.1111/j.1749-6632.1974.tb26782.x