

Применение физических факторов для оптимизации костной регенерации (обзор литературы)

Л.Б. Резник, К.Ю. Рожков, С.А. Ерофеев, Г.Г. Дзюба, Д.В. Котов

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Омская государственная медицинская академия» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Омск

The use of physical factors in order to optimize bone regeneration (A review of literature)

L.B. Reznik, K.Iu. Rozhkov, S.A. Erofeev, G.G. Dziuba, D.V. Kotov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education (FSBEI HPE)
The Omsk State Medical Academy of the RF Ministry of Health, Omsk

Представлен литературный обзор о возможности применения физических факторов при лечении осложненных переломов костей. Описаны причины нарушения регенерации костной ткани. Проведена оценка возможности использования таких физических факторов, как электромагнитное и лазерное излучение, электрическое и акустическое воздействие. Особое внимание уделено использованию низкочастотного ультразвука. Показано, что использование низкочастотного ультразвукового воздействия для оптимизации регенерации костной ткани является перспективным направлением, но не имеет широкого распространения в клинической практике. Также требует дальнейшего изучения вопрос об оптимальных параметрах ультразвука и точках приложения.

Ключевые слова: регенерация костной ткани, низкочастотное ультразвуковое воздействие, электромагнитное воздействие, лазерное излучение.

The literature review on the possible use of physical factors in treatment of complicated bone fractures presented in the work. The causes of bone tissue regeneration disorder described. The possibility of using such physical factors as electromagnetic and laser radiation, electric and acoustic impact evaluated. Particular attention is paid to using low-frequency ultrasound. The use of low-frequency ultrasound impact to optimize bone tissue regeneration demonstrated to be promising, but it is not widely used in clinical practice. The problem of ultrasound optimal parameters and application points should be studied further. **Keywords:** bone tissue regeneration, low-frequency ultrasound impact, electromagnetic impact, laser radiation.

Лечение пациентов с нарушенной репаративной регенерацией костной ткани является актуальной проблемой. Природа максимально оптимизировала процесс восстановления костей после механического повреждения, однако частота неудовлетворительных результатов лечения переломов остаётся высокой (до 30 %) [1]. Репаративная регенерация костной ткани является сложным биологическим процессом, который включает в себя пространственные и временные взаимодействия многочисленных типов клеток, внеклеточного матрикса и нескольких сотен генов [35]. Можно выделить ряд факторов, компрометирующих репаративный остеогенез: характер травмы (высокоэнергетические повреждения, оскольчатые переломы, размождение мягких тканей, открытые переломы, сопровождаемые грубым нарушением кровообращения и повреждением остеогенных тканей), нарушение технологии лечения перелома, инфекционные осложнения [6, 11]. Определенное значение имеют физиологические особенности организма (пожилой и старческий возраст, сопутствующие заболевания), курение, алкоголизм, а также приём лекарственных препаратов [28]. Комбинация трех и более предрасполагающих факторов позволяет отнести пациента в группу риска по нарушению остеорепарации и является показанием к дополнительному раннему лечению, направленному на стимуляцию остеорепарации [28].

Активация остеогенеза может осуществляться несколькими путями:

1. Остеобластический остеогенез – трансплантация детерминированных остеогенных продромальных клеток (ДОПК), обладающих собственной потенциальной способностью к остеогенезу [1, 2, 3, 10].

2. Остеоиндуктивный остеогенез или остеоиндукция – воздействие специфическими субстанциями, к

которым принадлежит костный морфогенетический белок [1, 10, 11, 16].

3. Стимулированный остеогенез – воздействие на остеогенез факторами, стимулирующими новообразование кости (TGF- β , IGF-I, IGF-II, PDGF, bFGF, aFGF, BMPs) [1, 10, 11].

4. Остеокондуктивный остеогенез или остеокондукция – пассивная стимуляция ДОПК с помощью аллогенных костных трансплантатов, синтетических либо полусинтетических заменителей кости [16, 33].

Все эти способы являются эффективными, но дорогостоящими, трудоёмкими и ресурсоёмкими, что ограничивает их применение в повседневной практике.

В течение последних 50 лет интенсивно изучалась возможность использования физических методов воздействия для стимуляции остеогенеза. Эти методы не специфичны, но являются более доступными, в большинстве случаев неинвазивными, не требующими специальных навыков, дорогостоящего оборудования, характеризуются несравнимо меньшим количеством осложнений, и в то же время дают хорошие результаты.

Широко исследовано влияние переменного электромагнитного поля высокой частоты на процесс регенерации костной ткани и лечение инфекционных осложнений. Отмечено положительное влияние электромагнитного поля на процессы регенерации костной ткани, микроциркуляции и мобилизации резервных возможностей организма – ускорение регенерации и более быстрое подавление инфекционного процесса, улучшению внутрисосудистого компонента микроциркуляции [4]. При этом непосредственного воздействия на инфекционный агент электромагнитное поле не оказывало [5]. Клинически подтверждено и обосновано стимулирую-

щее воздействие высокочастотного магнитного поля на остеогенез при замещении костных дефектов [15]. Определены некоторые механизмы действия электромагнитного поля. В частности, электромагнитное поле вызывает селективную активацию экспрессии гена костного морфогенетического белка. [16]. Каждой структурной единице организма соответствует определенный частотный спектр колебаний. При развитии патологических процессов (например, перелома) происходит изменение спектра колебаний. Воздействие колебаниями частотой, идентичной спонтанной частоте здорового органа, способствует прекращению патологического процесса, а в отношении перелома кости – ускорению регенерации. Такое воздействие может осуществляться с помощью электромагнитного поля [2]. Положительное влияние на подавление инфекционного процесса и, соответственно, на процесс регенерации оказывает постоянный электрический ток. Установлено, что он способен изменять pH в тканях, при этом создаются неблагоприятные условия для роста микроорганизмов, а развитие инфекции нарушает нормальное течение репаративного процесса [14]. Электростимуляция стабилизирует состояние общего и местного иммунитета, создавая условия для нормальной консолидации переломов [23].

Для стимуляции регенерации костной ткани широко используется лазер. Воздействие низкоинтенсивного гелий-неонового лазерного излучения вызывает улучшение кровенаполнения сосудов в области перелома с последующим повышением новообразования сосудов, что способствует активной пролиферации остеогенных клеток [13]. Воздействие лазерного излучения стимулирует активность остеокластов, что способствует более ранней дифференцировке молодой костной ткани в зрелую [3, 13]. С помощью лазера возможно выполнение остеоперфораций, которые оказывают выраженный остеогенный эффект по сравнению с остеоперфорациями, выполненными с помощью спиц ($p < 0,05$) [22]. Интересными являются результаты о том, что лазерное излучение обладает бактерицидным, бактериостатическим и выраженным противовоспалительным действием, активирует местный иммунитет [13].

В ряде исследований отмечен положительный эффект применения механо-акустических волн. При виброакустическом воздействии аппаратом «Витафон» [17] сокращались сроки реабилитации травматологических больных. Перспективным физиотерапевтическим методом активации остеогенеза является ударно-волновая терапия. Эффект воздействия связан с увеличением метаболизма в месте применения стимуляции центростремительных нервных волокон периферических кожных нервов, которые активируют болеподавляющие механизмы в задних рогах спинного мозга, стимуляции выхода эндорфинов, снижающих местную восприимчивость к боли [8].

Кроме низкочастотных колебаний стимуляции регенерации костной ткани способствуют воздействия в ультразвуковом диапазоне. Ультразвук представляет собой упругие колебания, частотой свыше 20000 Гц. В медицине ультразвук используется в трех направлениях: терапевтическое (физиотерапевтическое), диагностическое, хирургическое [1]. В физиотерапевтической практике применяется ультразвук интенсивностью 1-3 Вт/см², в хирургической – 5-300 Вт/см², в диагностической практике

5-50 Вт/см² [20]. Терапевтическое воздействие ультразвука основано на эффекте выделения тепла при прохождении через ткани, при этом достигается эффект прогревания тканей. В связи с этим ультразвуковая физиотерапия весьма эффективна при лечении острых и хронических синовитов, тендовагинитов, фиброзных и оссифицирующих периоститов [12]. Кроме того, ультразвук обладает ярко выраженным анальгезирующим действием – его применение эффективно в остром посттравматическом периоде [12]. Важным терапевтическим эффектом ультразвука является повышение проницаемости клеточных мембран, на этом основано его использование для фонофореза [1]. Помимо повышения клеточной проницаемости ультразвук сам активизирует лекарственные препараты. Воздействие ультразвуком в кавитационной струе способствует двух-, а то и трехкратному повышению активности препаратов (в частности антибактериальных) при значительном снижении их алергенности [7]. Это, с одной стороны, позволяет использование этих препаратов у пациентов с лекарственной непереносимостью, с другой – значительно снизить расход самого препарата. В хирургии ультразвук используется по двум направлениям – инструментальная ультразвуковая техника и локальные разрушения в глубине тканей с помощью фокусированного ультразвука [19, 29].

Влияние ультразвука на процесс регенерации костной ткани известно давно. Dison M. установил, что при прохождении ультразвука через ткани организма происходит поглощение его энергии, причем интенсивность поглощения прямо пропорциональна плотности тканей [29]. Поэтому максимальный тепловой эффект наблюдается в костях. Хотя при перкутанном применении тепловой эффект минимальный (повышение температуры в костях менее 1°), но этого может быть достаточно для активации ряда ферментов, в частности коллагеназ [46]. На основании этого факта ультразвук может быть эффективным для создания оптимальной температуры в дистальных отделах конечностей, где она ниже, а также в областях организма, где кровоток был скомпрометирован (например, спазм регионарных сосудов в месте перелома).

Имеются теоретические предположения к тому, что ультразвук благоприятно действует на репаративную регенерацию. Г.А. Илизаровым доказано, что структура кости адаптируется к механической нагрузке и реконструируется в зависимости от направления приложенной силы, то есть по направлению большего приложения силы кость становится более прочной [10]. Механическое действие ультразвука должно повышать прочность кости, а в случае перелома, способствовать более быстрому формированию костной мозоли. Несмотря на то, что сила механического воздействия ультразвука несравнимо меньше механической силы, действующей на кость в естественных условиях, её оказывается достаточно для ремоделирования кости. Также было отмечено, что кости, подвергающиеся механическому воздействию, генерируют электрический потенциал от вогнутой к выпуклой стороне, то есть кость обладает пьезоэлектрической активностью [26]. Исходя из этого, установлено, что деформация кости под нагрузкой является источником генерации электрических потенциалов, которые, в свою очередь, стимулируют остеогенез [27]. В условиях перелома отсутствует функциональная нагрузка на костные отломки, соответственно электрические потенциалы не генерируются и

остеогенез не активируется. Ультразвуковое воздействие на кость может быть источником внешних суррогатных электрических потенциалов и, соответственно, оказывать стимулирующее воздействие на регенерацию костной ткани [30]. Однако потенциалы, создаваемые ультразвуком, малы по сравнению с теми, которые порождаются деятельностью мышц [26, 30], поэтому данный механизм не может быть единственным во влиянии ультразвука на регенерацию костной ткани.

Изучены некоторые биологические механизмы действия ультразвука. Так, под действием низкочастотного ультразвука усиливается экспрессия гена аггрекана, которая значительно выше на 7-й день после перелома при ультразвуковом воздействии ($p=0,033$) [48]. Аггрекан является протеогликаном, который связывает фибриллы коллагена 2 типа и способствует удержанию воды, то есть участвует в синтезе коллагена, а также способствует энхондральному остеогенезу [31]. При этом показана прямая корреляция между экспрессией гена аггрекана и прочностью костной мозоли. Лабораторные исследования *in vitro* показали активирующее влияние ультразвука на деление культуры хондроцитов [46]. Hasanova G. и соавторы показали, что интенсивность деления хондроцитов под действием ультразвука увеличивается в 1,4-1,6 раза [33]. Ультразвук изменяет поток калия через мембрану клетки (изучено на культуре тимоцитов) и модулирует аденилатциклазу [36], простогландин E, а также трансформирующий фактор роста. Позже установлено активирующее воздействие ультразвука на экспрессию генов трансформирующего фактора роста [36]. Кроме этого, ультразвук активизирует тромбоцитарный фактор роста. При воздействии низкочастотным ультразвуком повышается внутриклеточное содержание кальция (изучено на культивированных хондроцитах) и стимулируется процесс энхондральной оссификации [11, 45]. Доказывая активирующее действие ультразвука на процессы ангиогенеза, Ramli R. с соавт. на культуре клеток показали, что ультразвук низкой интенсивности стимулирует неоангиогенез [43], что может быть использовано для воздействия на аваскулярные зоны.

Таким образом, ультразвук может воздействовать на разные этапы остеогенеза. На начальном этапе формирования костной мозоли, особенно в условиях отсутствия абсолютной стабильности костных отломков, клеточная популяция представлена в основном фибробластами и хондробластами, ультразвук стимулирует рост хондробластов и хондроцитов, то есть активизируется образование первичной мозоли. Следующим этапом регенерации костной ткани является прорастание в зону первичной костной мозоли сосудов и начало энхондрального окостенения. Учитывая влияние ультразвука на неоангиогенез, можно предположить, что под его воздействием активизируется и этот процесс.

В экспериментально-клинических исследованиях по изучению влияния низкочастотного ультразвука на процесс регенерации костной ткани было выявлено активирующее влияние ультразвука на формирование костной мозоли при свежих и вялоконсолидирующихся переломах [27]. Dyson M., Brookes M. показали, что ультразвук наиболее эффективен на ранних стадиях регенерации [26, 29], интенсивность ультразвука при этом была 300 Вт/см². Позже Xavierand сообщил, что низкочастотный ультразвук значительно более мень-

шей мощности (30 мВт/см²) является эффективным не только на ранней стадии репаративной регенерации. Его применение стимулировало консолидацию переломов длинных костей у большинства пациентов на разных сроках лечения [37]. При такой мощности не наблюдалось его травматического действия на мягкие ткани. Другой группой исследователей (Warden S.J., Fuchs R.K. et al.) [45] при анализе костной регенерации при переломах бедренных костей у крыс установлено, что на ранних этапах эксперимента (20 сутки после перелома) не было различий в гистологической картине костной мозоли у животных в условиях применения ультразвука и в контрольной группе. Через 40 суток при воздействии ультразвука в области перелома формировалась выраженная костная мозоль, которая имела высокую минеральную плотность [45]. Авторами доказано, что под влиянием ультразвука активизируется энхондральный остеогенез, т.е. ультразвук оказывает избирательное воздействие на хондроциты. Также оценена скорость консолидации переломов у молодых и старых крыс в условиях низкочастотного ультразвукового воздействия. Установлено, что время формирования хрящевой мозоли одинаково в обеих группах, а начало ее появления у молодых крыс было более ранним. При ультразвуковом воздействии сроки формирования хряща в разных возрастных группах были примерно одинаковыми, что подтверждает факт влияния ультразвука на энхондральный остеогенез [41].

Интересные результаты были получены зарубежными учеными при исследовании влияния низкочастотного ультразвука на разные кости. При консервативном лечении переломов большеберцовой кости Whelan D.B., Bhandari M. [47] у пациентов с ультразвуковым воздействием наблюдали более быстрое формирование полноценной костной мозоли и сокращение сроков клинического выздоровления. Выявлено статистически значимое снижение времени клинического выздоровления ($86\pm 5,8$ дня в группе с ультразвуковым воздействием по сравнению с $114\pm 10,4$ дня в контрольной группе) ($p=0,01$), а также значительное уменьшение времени до появления рентгенологических признаков консолидации ($96\pm 4,9$ дня в группе активного лечения по сравнению с $154\pm 13,7$ дня в контрольной группе) ($p=0,0001$). При оценке влияния ультразвука на скорость регенерации костной ткани при лечении переломов большеберцовой кости в условиях интрамедуллярного остеосинтеза не получено никакой разницы в сроках консолидации. Время до первого появления рентгенологических признаков костной мозоли составило 40 ± 3 дня в группе с ультразвуком и 37 ± 3 дня для группы без ультразвука ($p=0,44$). Время консолидации 155 ± 22 дня (в среднем 113 дней) в группе с ультразвуковым воздействием и 125 ± 11 дней (в среднем 112 дней) в группе без ультразвука. Авторы утверждают, что преимущества интрамедуллярного остеосинтеза превалируют над влиянием ультразвука, кроме того, металлический стержень поглощает акустические ультразвуковые колебания.

Группа исследователей во главе с Maug E. обосновали гипотезу, что величина мягкотканного комплекса, окружающего кость, влияет на эффект ультразвука. Мягкие ткани поглощают ультразвуковые колебания, и до кости доходит ультразвук очень низкой интенсивности. В подтверждение этого они показали, что наилучшие резуль-

таты по стимуляции остеогенеза получены при ультразвуковом воздействии на поверхностно расположенные ладьевидную кость и дистальный метаэпифиз лучевой кости [39]. Срок консолидации при этом сокращался на 38 %. Эти выводы легли в основу работ Hantes M. с группой авторов, выполнивших эксперименты на группе овец, которым ультразвуковой излучатель устанавливали непосредственно на большеберцовую кость после остеотомии. Скорость репаративной регенерации при этом значительно увеличивалась (на 23 %) [35]. Аналогичные результаты получены и другой исследовательской группой (Protorappas VC., Vaga D., Fotiadis DI. et al.) [42]. Исследователи из Японии (Yoshiyasu, Uchiyama) использовали ультразвук при консервативном лечении гипсовой повязкой стресс-переломов диафиза костей голени в средней трети у спортсменов. Основными оцениваемыми параметрами было исчезновение боли, возможность возвращения к тренировкам и МРТ-картина полной консолидации и ремоделирования кости. При воздействии ультразвуком низкой интенсивности боли купировались в среднем через 3,8 месяца, картина ремоделирования кости наблюдалась через 11 месяцев, а возвращение к спортивной нагрузке через 3 месяца. В группе без ультразвукового воздействия – купирование болевого синдрома через 6-9 месяцев, активное занятие спортом через 7,5-11 месяцев. Ремоделирование кости отмечено через 11 месяцев. Таким образом, происходило более быстрое купирование болевого синдрома, было возможным раннее начало занятия спортом, а срок ремоделирования кости остался прежним. Авторы делают выводы, что полученные результаты сравнимы с теми случаями, где использовалось оперативное лечение (блокируемый интрамедуллярный остеосинтез, остеоперфорации), но отсутствует риск послеоперационных осложнений, психологической травмы от операции, а также ограничений, связанных с наличием металлоконструкции [49]. Произведена экономическая оценка затрат на лечение вялоконсолидирующихся и нераскрывшихся переломов длинных трубчатых костей оперативным методом (интрамедуллярный остеосинтез) и консервативным лечением с ежедневным низкочастотным ультразвуковым воздействием. При этом учитывалась стоимость оперативного лечения, металлоконструкции, пребывания в стационаре, амбулаторных посещений, стоимость ультразвукового аппарата, стоимость повторной операции при несращениях и инфекционных осложнениях. Затраты оценивались по данным результатов клинических рандомизированных исследований. В группе с консервативным лечением с опциональным использованием НУЗ положительные результаты (консолидация) были у 84-90 % пациентов (216/256, 46/51) в сроки 5,6-6,2 месяца. Стоимость лечения при этом оценена в 4500 евро. При оперативном лечении стоимость лечения составила 6900 евро на одного пациента с сопоставимыми сроками лечения и числом положительных результатов (наступление консолидации в 70-100 % случаев, сроки консолидации 3,1-6,5 месяца). Авторы считают, что консервативное лечение вялоконсолидирующихся переломов с ультразвуковым воздействием может считаться конкурентоспособным методом в сравнении с оперативным лечением [37].

В работах отечественных исследователей при изучении влияния низкочастотного ультразвука на регенерацию костной ткани были получены противоречивые результаты. В 2004 году группа ученых во главе с Шев-

цовым В.И. проводила оценку влияния на регенерацию костной ткани ультразвука с использованием аппарата EXOGEN [24]. При этом сравнивались сроки консолидации в группе с закрытыми и открытыми переломами костей голени, в группе с косметическим удлинением нижних конечностей и группе с удлинением нижних конечностей на фоне врожденной аномалии развития с использованием ультразвукового воздействия и без него. Положительные результаты были получены в группе с удлинением конечностей на фоне врожденных аномалий развития. Авторы отмечали у них сокращение сроков консолидации (однако, учитывая небольшую выборку, статистический анализ проведен не был). В остальных группах сроки консолидации с ультразвуковым воздействием и без него существенно не отличались. Несмотря на положительное влияние ультразвука на заживление мягких тканей, купирование болевого синдрома, его использование у данных групп пациентов авторы считают нецелесообразным (учитывая стоимость аппарата EXOGEN). В 2013 году Сергеев К.Н. с соавторами [20] также использовали аппарат EXOGEN для оценки влияния ультразвука на регенерацию костной ткани. Суть их исследования заключалась в том, что через 12 недель после оперативного лечения переломов дистального отдела большеберцовой кости на костном остеосинтезом по данным рентгенологического исследования выявлялись пациенты с замедленной консолидацией. Этой группе пациентов проведены курсы лечения, состоящие из 60 ежедневных сеансов (по 20 минут каждый) на ультразвуковом аппарате EXOGEN экспресс. На рентгенологическом контроле через 20-22 недели после операции отмечены признаки полной консолидации переломов у 100 % пациентов. Иващенко С.В. с соавторами [9] установили, что низкочастотный импульсный ультразвук 22, 44 и 60 кГц снижает минеральную насыщенность, прочностные показатели костной ткани, стимулирует ее перестройку без поражения структур, отвечающих за регенерацию кости.

На основании проведенного анализа работ по изучению влияния ультразвука на регенерацию костной ткани Griffin XL. делает вывод, что имеющиеся данные различных исследований хоть и показывают благоприятное воздействие ультразвука, но до настоящего времени еще нет достаточной доказательной базы для его рутинного использования в повседневной практике [32].

Таким образом, применение физических факторов обеспечивает стимулирующее воздействие и оптимизацию репаративной регенерации костной ткани. Интересными и перспективными являются данные по применению в травматологии и ортопедии низкочастотного ультразвука, способного оказывать положительное влияние на процесс регенерации костной ткани. Однако недостаточное количество исследований по применению низкочастотного ультразвукового воздействия не дало широкого распространения его в повседневной практике при лечении переломов костей. На сегодняшний день в доступной литературе нет данных об оптимальных параметрах ультразвукового воздействия (мощность, частота, продолжительность воздействия) и точках его приложения по отношению к области перелома. Учитывая имеющийся мировой опыт по применению низкочастотного ультразвука в травматологии и ортопедии, следует признать дальнейшие исследования в этом направлении перспективными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аюбян В.Б., Ершов Ю.А. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами. Ультразвук в медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 225 с.
2. Берченко Г.Н., Кесян Г.А. Сравнительное экспериментально-морфологическое исследование влияния некоторых используемых в травматолого-ортопедической практике кальций фосфатных материалов на активизацию репаративного остеогенеза // Бюл. ВСНЦ СО РАМН. 2006. № 4. С. 32-33.
3. Дробышев А.Ю., Тарасенко С.В., Гемонов В.В. Исследование регенерации костной ткани после лазерного и механического воздействия // Cathedra. 2000. № 2. С. 53-55
4. Ерофеев С.А., Притыкин А.В., Темникова Н.В. Влияние электромагнитного поля высокой частоты на рост золотистого стафилококка (экспериментальное исследование) // Бюл. СО РАМН. 2010. Т. 30, № 3. С. 113-118
5. Ерофеев С.А., Притыкин А.В., Городилов Р.В. Костеобразование при использовании электромагнитного излучения высокой частоты в условиях гнойной инфекции (экспериментальное исследование) // Гений ортопедии. 2009. № 4. С. 5-10.
6. Ерофеев С.А., Дзюба Г.Г., Одарченко Д.И. Лечение больных хроническим остеомиелитом длинных трубчатых костей на основании использования армирующего локального антибактериального носителя // Гений ортопедии. 2013. № 4. С. 25-29.
7. Зайнудинов А.М. Применение ультразвуковой кавитации при хирургических инфекциях // Казан. мед. журн. 2009. Т. 90, № 3. С. 414-420.
8. Зулкарнеев Р.Р., Валеев К. Е., Степанов Ю. Р. Ударно-волновая терапия травм и заболеваний опорно-двигательного аппарата // Казан. мед. журн. 2009. № 5. С. 53-54.
9. Иващенко С.В. Остапович А.А., Беззубик С.Д. Влияние импульсного ультразвука низких частот на костную ткань // Соврем. стоматология. 2014. № 1 (58). С. 90-93.
10. Илизаров Г.А. Значение комплекса оптимальных механических биологических факторов в регенеративном процессе при чрескостном остеосинтезе // Экспериментально-теоретические и клинические аспекты разрабатываемого в КНИИЭКОТ метода чрескостного остеосинтеза: материалы Всесоюз. симп. с участием иностр. специалистов. Курган, 1984. С. 8-49.
11. Климовицкий В.Г. Клеточные механизмы нарушения репаративного остеогенеза // Ортопедия, травматология и протезирование. 2011. № 2. С. 5-16.
12. Микитин И.Л., Винник Ю.С. Применение низкочастотного ультразвука в лечении больных с длительно незаживающими заболеваниями мягких тканей // Кубан. науч. мед. вестн. 2013. № 4 (139). С. 82-84.
13. Павлов А.В. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения на процессы регенерации костей свода черепа при ксенокраниопластике пластинами коралла: автореф. дис. ... канд. мед. наук. Рязань, 2004. 28 с.
14. Способ лечения спицевой инфекции у больных с внеочаговым остеосинтезом: пат. 2028165 Рос. Федерация. № 4854948/14; заявл. 26.10.1990; опубл. 09.02.1995.
15. Способ воздействия на репаративную регенерацию костной ткани: пат. 2215561 Рос. Федерация. № 2000113914/14; заявл. 16.10.2002; опубл. 10.11.2003
16. Активация экспрессии гена костного морфогенетического белка в костных клетках посредством электромагнитных сигналов: пат. 238881 Рос. Федерация. № 2006129306/13; заявл. 20.02.2008; опубл. 10.05.2010.
17. Способ оптимизации условий репаративного остеогенеза: пат. 243014 Рос. Федерация. № 2010103691/14; заявл. 30.02.2010; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 28. 9 с.
18. Переслыцких П.Ф., Переслыцких Д.А. Репаративный остеогенез в растущих бедренных костях хомячков после создания диафизарных отверстий и воздействия низкочастотной вибрации (предварительное исследование) // Бюл. ВСНЦ СО РАМН. 2012. № 4-2. С. 185-189.
19. Резник Л.Б., Дзюба Г.Г., Новиков А.А. Эффективность применения ультразвука для удаления костного цемента при ревизионном эндопротезировании // Травматология и ортопедия России. 2012. № 1 (63). С. 30-35.
20. Сергеев К.Н., Жалгин А. В. Опыт использования ультразвукового аппарата Эксоджен экспресс (генератора импульсного, низкочастотного ультразвука) в комплексном лечении внутрисуставных переломов дистального метаэпифиза большеберцовой кости (пилона) в травматологическом отделении НУЗ ЦКБ №1 ОАО РЖД // Хирург. практика. 2013. № 1. С. 22-23.
21. Склянчук Е.Д. Алгоритм хирургического лечения посттравматических нарушений костного сращения на основе локальной стимуляции остеогенеза // Центр.-азиат. мед. журн. 2009. Т. XV, приложение 3. С. 281-282.
22. Тарасенко И. В. Содержание факторов роста в регенерате костной ткани бедра крыс после лазерного и механического воздействия // Лазер. медицина. 2011. № 3. С. 43-46.
23. Комплексное лечение открытых переломов нижней челюсти с применением транскраниальной электростимуляции / Е.В. Фомичев, А.Т. Яковлева, В.В. Подольский, И.В. Химич // Волгоград. науч.-мед. журн. 2010. № 1 (25). С. 40-44.
24. Влияние импульсного ультразвука низкой интенсивности на течение репаративного остеогенеза / В.И. Шевцов, А.В. Попков, А.М. Аранович, Д.А. Попков, В.А. Щуров, И.И. Мартель, Л.А. Гребенюк, Ю.М. Сысенко // Гений ортопедии. 2004. № 1. С. 81-88.
25. Anglen J. The clinical use of bone stimulators // J. South. Orthop. Assoc. 2003. Vol. 12, No 2. P. 46-54.
26. Dyson M., Brookes M. Stimulation of bone repair by ultrasound // Ultrasound Med. Biol. 1983. Suppl. 2. P. 61-66.
27. Corradi C., Cozzolino A. Effect of ultrasonics on the development of osseous callus in fractures // Arch Orthop. 1953. Vol. 66, No 1. P. 77-98.
28. Craig W.M., WorkSafeBC Evidence-Based Practice Group. Low intensity ultrasound for treating fracture nonunion and short reviews on other bone growth stimulator devices and orthobionomics. 2006. URL: www.worksafebc.com/evidence
29. Dyson M. Therapeutic applications of ultrasound // Biological effects of ultrasound / Eds. W.L. Nyborg, M.C. Ziskin. New York: Churchill Livingstone, 1985. P. 121-133.
30. Goodship A.E., Lawes T.J., Rubin C.T. Low-magnitude high-frequency mechanical signals accelerate and augment endochondral bone repair: evidence of efficacy // J. Orthop. Res. 2009. Vol. 27, No 7. P. 922-930.
31. Goodship A.E., Kenwright J. The influence of induced micromovement upon the healing of experimental tibial fractures // J. Bone Joint Surg. Br. 1985. Vol. 67, No 4. P. 650-655.
32. Platelet rich therapies for long bone healing in adults / X.L. Griffin, D. Wallace, N. Parsons, M.L. Costa // Cochrane Database Syst. Rev. 2012. doi: 10.1002/14651858.CD009496.pub2.
33. The effect of ultrasound stimulation on the gene and protein expression of chondrocytes seeded in chitosan scaffolds / G. Hasanova, S.E. Noriega, T.G. Mamedov, S. Guha Thakurta, J.A. Turner, A. Subramanian // J. Tissue Eng. Regen. Med. 2011. Vol. 5, No 10. P. 815-822.
34. Enhancement of fracture healing by low intensity ultrasound / M. Hadjiargyrou, K. McLeod, J.P. Ryaby, C. Rubin // Clin. Orthop. Relat. Res. 1998. Suppl. 355. P. S216-S229.
35. Low-intensity transosseous ultrasound accelerates osteotomy healing in a sheep fracture model / M.E. Hantes, A.N. Mavrodontidis, C.G. Zalavras, A.H. Karantanas, T. Karachalios, K.N. Malizos // J. Bone Joint Surg. Am. 2004. Vol. 86-A, No 10. P. 2275-2282.
36. Effects of ultrasound on transforming growth factor-beta genes in bone cells / J. Harle, F. Mayia, I. Olsen, V. Salih // Eur. Cell. Mater. 2005. Vol. 10. P. 70-76.
37. EXOGEN ultrasound bone healing system for long bone fractures with non-union or delayed healing: a NICE medical technology guidance / A. Higgins, M. Glover, Y. Yang, S. Bayliss, C. Meads, J. Lord // Appl. Health Econ. Health Policy. 2014. Vol. 12, No 5. P. 477-484.
38. Low-intensity pulsed ultrasound for bone healing: an overview / K.N. Malizos, M.E. Hantes, V. Protopappas, A. Papachristos // Injury. 2006. Vol. 37, Suppl. 1. P. S56-S62.
39. Does low intensity, pulsed ultrasound speed healing of scaphoid fractures? / E. Mayr, M.M. Rudzki, M. Rudzki, B. Borchardt, H. Häusser, A. Rüter // Handchir. Mikrochir. Plast. Chir. 2000. Vol. 32, No 2. P. 115-122.
40. Distinct anabolic response of osteoblast to low-intensity pulsed ultrasound / K. Naruse, A. Miyauchi, M. Itoman, Y. Mikuni-Takagaki // J. Bone Miner. Res. 2003. Vol. 18, No 2. P. 360-369.

41. Low-intensity ultrasound stimulates endochondral ossification in vitro / P.A. Nolte, J. Klein-Nulend, G.H. Albers, R.K. Marti, C.M. Semeins, S.W. Goei, E.H. Burger // *J. Orthop. Res.* 2001. Vol. 19, No 2. P. 301-307.
42. An ultrasound wearable system for the monitoring and acceleration of fracture healing in long bones / V.C. Protopappas, D.A. Baga, D.I. Fotiadis, A.C. Likas, A.A. Papachristos, K.N. Malizos // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2005. Vol. 52, No 9. P. 1597-1608.
43. The effect of ultrasound on angiogenesis: an in vivo study using the chick chorioallantoic membrane / R. Ramli, P. Reher, M. Harris, S. Meghji // *Int. J. Oral Maxillofac. Implants.* 2009. Vol. 24, No 4. P. 591-596.
44. Ultrasonically enhanced rifampin activity against internalized *Staphylococcus aureus* / S.F. Shi, X.L. Zhang, C. Zhu, D.C. Chen, Y.Y. Guo // *Exp. Ther. Med.* 2013. Vol. 5, No 1. P. 257-262.
45. Acceleration of fresh fracture repair using the sonic accelerated fracture healing system (SAFHS): a review / S.J. Warden, K.L. Benell, J.M. McMeeken, J.D. Wark // *Calcif. Tissue Int.* 2000. Vol. 66, No 2. P. 157-163.
46. Welgus H.G., Jeffrey J.J., Eisen A.Z. Human skin fibroblast collagenase. Assessment of activation energy and deuterium isotope effect with collagenous substrates // *J. Biol. Chem.* 1981. Vol. 256, No 18. P. 9516-9521.
47. Interobserver and intraobserver variation in the assessment of the healing of tibial fractures after intramedullary fixation / D.B. Whelan, M. Bhandari, M.D. McKee, G.H. Guyatt, H.J. Kreder, D. Stephen, E.H. Schemitsch // *J. Bone Joint Surg. Br.* 2002. Vol. 84, No 1. P. 15-18.
48. Exposure to low-intensity ultrasound increases aggrecan gene expression in a rat femur fracture model / K.H. Yang, J. Parvizi, S.J. Wang, D.G. Lewallen, R.R. Kinnick, J.F. Greenleaf, M.E. Bolander // *J. Orthop. Res.* 1996. Vol. 14, No 5. P. 802-809.
49. Effect of low-intensity pulsed ultrasound treatment for delayed and non-union stress fractures of the anterior mid-tibia in five athletes / Y. Uchiyama, Y. Nakamura, J. Mochida, T. Tamaki // *Tokai J. Exp. Clin. Med.* 2007. Vol. 32, No 4. P. 121-125.

REFERENCES

1. Akopian V.B., Ershov Iu.A. Osnovy vzaimodeistviia ul'trazvuka s biologicheskimi ob'ektami. Ul'trazvuk v meditsine, veterinarii i eksperimental'noi biologii [Basics of ultrasound interaction with biological objects. Ultrasound in medicine, veterinary medicine and experimental biology]. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2005. 225 s.
2. Berchenko G.N., Kesian G.A. Sravnitel'noe eksperimental'no-morfologicheskoe issledovanie vliianiia nekotorykh ispol'zuemykh v travmatologo-ortopedicheskoi praktike kal'tsii fosfatnykh materialov na aktivizatsiiu reparativnogo osteogeneza [Comparative experimental-and-morphological study of the effect of some calcium-phosphate materials used in traumatological-orthopedic practice on reparative osteogenesis activation] // *Biul. VSNTs SO RAMN.* 2006. N 4. S. 32-33.
3. Drobyshev A.Iu., Tarasenko S.V., Gemonov V.V. Issledovanie regeneratsii kostnoi tkani posle lazernogo i mekhanicheskogo vozdeistviia [Studying bone tissue regeneration after laser and mechanical impact] // *Cathedra.* 2000. N 2. S. 53-55.
4. Erofeev S.A., Pritykin A.V., Temnikova N.V. Vliianie elektromagnitnogo polia vysokoi chastyoty na rost zolotistogo stafilokokka (eksperimental'noe issledovanie) [The effect of high-frequency electromagnetic field on *Staphylococcus aureus* growth (An experimental study)] // *Biul. SO RAMN.* 2010. T. 30, N 3. S. 113-118.
5. Yerofeyev S.A., Pritykin A.V., Gorodilov R.V. Kosteobrazovanie pri ispol'zovanii elektromagnitnogo izlucheniia vysokoi chastyoty v usloviakh gnoinoi infektsii (eksperimental'noe issledovanie) [Bone formation using electromagnetic radiation of high frequency under the conditions of purulent infection (An experimental study)] // *Genij Ortop.* 2009. N 4. S. 5-10.
6. Erofeev S.A., Dziuba G.G., Odarchenko D.I. Lechenie bol'nykh khronicheskim osteomyelitom dlinnykh trubchatykh kostei na osnovanii ispol'zovaniia armiruiushchego lokal'nogo antibakterial'nogo nositelia [Treatment of patients with chronic osteomyelitis of long tubular bones based on using reinforcing local antibacterial carrier] // *Genij Ortop.* 2013. N 4. S. 25-29.
7. Zainutdinov A.M. Primenenie ul'trazvukovoi kavitatsii pri khirurgicheskikh infektsiakh [The use of ultrasound cavitation for surgical infections] // *Kazan. Med. Zhurn.* 2009. T. 90, N 3. S. 414-420.
8. Zulkarneev R.R., Valeev K. E., Stepanov Iu. R. Udarno-volnovaia terapiia travm i zabolevani oporno-dvigatel'nogo apparata [Shock-wave therapy of the locomotor system injuries and diseases] // *Kazan. Med. Zhurn.* 2009. N 5. S. 53-54.
9. Ivashchenko S.V., Ostapovich A.A., Bezzubik S.D. Vliianie impul'snogo ul'trazvuka nizkikh chastot na kostnuiu tkan' [The effect of low-frequency pulse ultrasound on bone tissue] // *Sovrem. Stomatologiya.* 2014. N 1 (58). S. 90-93.
10. Ilizarov G.A. Znachenie kompleksa optimal'nykh mekhanicheskikh biologicheskikh faktorov v regenerativnom protsesse pri chreskostnom osteosinteze [The value of the complex of optimal mechanical biological factors in regenerative process under transosseous osteosynthesis] // *Eksperimental'no-teoreticheskie i klinicheskie aspekty razrabatyvaemogo v KNIIEKOT metoda chreskostnogo osteosinteza: materialy Vsesoiuz. simp. s uchastiem inostr. spetsialistov* [Experimental-theoretical and clinical aspects of the method developed in the Kurgan Scientific Research Institute of Experimental and Clinical Orthopaedics and Traumatology: Materials of All-Union Symposium with participation of foreign specialists]. Kurgan, 1984. S. 8-49.
11. Klimovitskii V.G. Kletochnye mekhanizmy narusheniia reparativnogo osteogeneza [Cellular mechanisms of reparative osteogenesis disordering] // *Ortop. Travmatol. Protez.* 2011. N 2. S. 5-16.
12. Mikiitin I.L., Vinnik Iu.S. Primenenie nizkochastotnogo ul'trazvuka v lechenii bol'nykh s dlitel'no nezazhivaiushchimi zabolevaniiami miagkikh tkanei [The use of low-frequency ultrasound in treatment of patients with chronic nonhealing soft tissue diseases] // *Kuban. Nauch. Med. Vestn.* 2013. N 4 (139). S. 82-84.
13. Pavlov A.V. Vliianie nizkointensivnogo lazernogo izlucheniia na protsessy regeneratsii kostei svoda cherepa pri ksenokranioplastike platinami koralla [The effect of low-intensity laser radiation on the processes of skull vault bone regeneration under xenocranioplasty using coral plates] [avtoref. dis. ...kand. med. nauk]. Riazan', 2004. 28 s.
14. Sposob lecheniia spitsevoi infektsii u bol'nykh s vneochagovym osteosintezom [A way of wire-related infection in patients under extrafocal osteosynthesis]: patent 2028165 Russian Federation. N 4854948/14; zaiavl. 26.10.1990; opubl. 09.02.1995.
15. Sposob vozdeistviia na reparativnuiu regeneratsiiu kostnoi tkani [A method of impacting bone tissue reparative regeneration]: patent 2215561 Russian Federation. N 2000113914/14; zaiavl. 16.10.2002; opubl. 10.11.2003.
16. Aktivatsiia ekspressii gena kostnogo morfogeneticheskogo belka v kostnykh kletkakh posredstvom elektromagnitnykh signalov [Activation of bone morphogenetic protein gene in bone cells with electromagnetic signals]: patent 238881 Russian Federation. N 2006129306/13; zaiavl. 20.02.2008; opubl. 10.05.2010.
17. Sposob optimizatsii uslovii reparativnogo osteogeneza [A method of optimizing the conditions of reparative osteogenesis]: patent 243014 Russian Federation. N 2010103691/14; zaiavl. 30.02.2010; opubl. 10.10.2011. *Biul.* N 28. 9 s.
18. Pereslytskikh P.F., Pereslytskikh D.A. Reparativnyi osteonez v rastushchikh bedrennykh kostiakh khomiachkov posle sozdaniia diafiznykh otverstii i vozdeistviia nizkochastotnoi vibratsii (predvaritel'noe issledovanie) [Reparative osteogenesis in growing hamster femurs after forming shaft holes and exposure to low-frequency vibration (preliminary study)] // *Biul. VSNTs SO RAMN.* 2012. N 4-2. S. 185-189.
19. Reznik L.B., Dziuba G.G., Novikov A.A. Effektivnost' primeneniia ul'trazvuka dlia udaleniia kostnogo tsementa pri revizionnom endoprotezirovanii [The efficiency of ultrasound use for bone cement removal in revision arthroplasty] // *Travmatol. Ortop. Rossii.* 2012. N 1 (63). S. 30-35.
20. Sergeev K.N., Zhalgin A.V. Opyt ispol'zovaniia ul'trazvukovogo apparata Eksodzhenn ekspress (generatora impul'snogo, nizkochastotnogo ul'trazvuka) v kompleksnom lechenii vnutrisustavnykh perelomov distal'nogo metaepifiza bol'shebertsovoi kosti (pilona) v travmatologicheskoi otdelenii NUZ TsKB №1 OAO RZhD [The experience of using ultrasound Exogen Express device (generator of pulse low-frequency ultrasound) in complex treatment of intraarticular fractures of distal tibial metaepiphysis (pilon) in traumatological department of Non-state Health Institution Central Clinical Hospital No 1 at Open Joint Stock Company Russian Railways] // *Khirurg. Praktika.* 2013. N 1. S. 22-23.
21. Sklianchuk E.D. Algoritm khirurgicheskogo lecheniia posttravmaticheskikh narusheniia kostnogo srashcheniia na osnove lokal'noi stimulatsii osteogeneza [The algorithm of surgical treatment of bone union posttraumatic disorders based on osteogenesis local stimulation] // *Tsent. aziat. Med. Zhurn.* 2009. T. XV, prilozhenie 3. S. 281-282.

22. Tarasenko I.V. Soderzhanie faktorov rosta v regenerate kostnoi tkani bedra krysa posle lazernogo i mekhanicheskogo vozdeistviia [The content of growth factors in the regenerated bone tissue of rat femur exposed to laser and mechanical impact] // *Lazer. Meditsina*. 2011. N 3. S. 43-46.
23. Kompleksnoe lechenie otkrytykh perelomov nizhnei cheliusti s primeneniem transkraniial'noi elektrostimulatsii [Complex treatment of open mandibular fractures using transcranial electrical stimulation] / E.V. Fomichev, A.T. Iakovleva, V.V. Podolskii, I.V. Khimich // *Volgograd. Nauch.-med. Zhurn.* 2010. N 1 (25). S. 40-44.
24. Vliianie impul'snogo ultrazvuka nizkoi intensivnosti na techenie reparativnogo osteogeneza [The effect of low-intensity impulse ultrasound on the process of reparative osteogenesis] / V.I. Shevtsov, A.V. Popkov, A.M. Aranovich, D.A. Popkov, V.A. Shchourov, I.I. Martel, L.A. Grebeniuck, Y.M. Sysenko // *Genij Ortop.* 2004. N 1. S. 81-88.
25. Anglen J. The clinical use of bone stimulators // *J. South. Orthop. Assoc.* 2003. Vol. 12, No 2. P. 46-54.
26. Dyson M., Brookes M. Stimulation of bone repair by ultrasound // *Ultrasound Med. Biol.* 1983. Suppl. 2. P. 61-66.
27. Corradi C., Cozzolino A. Effect of ultrasonics on the development of osseous callus in fractures // *Arch Ortop.* 1953. Vol. 66, No 1. P. 77-98.
28. Craig W.M., WorkSafeBC Evidence-Based Practice Group. Low intensity ultrasound for treating fracture nonunion and short reviews on other bone growth stimulator devices and orthobionomics. 2006. URL: www.worksafebc.com/evidence
29. Dyson M. Therapeutic applications of ultrasound // *Biological effects of ultrasound* / Eds. W.L. Nyborg, M.C. Ziskin. NewYork: Churchill Livingstone, 1985. P. 121-133.
30. Goodship A.E., Lawes T.J., Rubin C.T. Low-magnitude high-frequency mechanical signals accelerate and augment endochondral bone repair: evidence of efficacy // *J. Orthop. Res.* 2009. Vol. 27, No 7. P. 922-930.
31. Goodship A.E., Kenwright J. The influence of induced micromovement upon the healing of experimental tibial fractures // *J. Bone Joint Surg. Br.* 1985. Vol. 67, No 4. P. 650-655.
32. Platelet rich therapies for long bone healing in adults / X.L. Griffin, D. Wallace, N. Parsons, M.L. Costa // *Cochrane Database Syst. Rev.* 2012. doi: 10.1002/14651858.CD009496.pub2.
33. The effect of ultrasound stimulation on the gene and protein expression of chondrocytes seeded in chitosan scaffolds / G. Hasanova, S.E. Noriega, T.G. Mamedov, S. Guha Thakurta, J.A. Turner, A. Subramanian // *J. Tissue Eng. Regen. Med.* 2011. Vol. 5, No 10. P. 815-822.
34. Enhancement of fracture healing by low intensity ultrasound / M. Hadjiargyrou, K. McLeod, J.P. Ryaby, C. Rubin // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 1998. Suppl. 355. P. S216-S229.
35. Low-intensity transosseous ultrasound accelerates osteotomy healing in a sheep fracture model / M.E. Hantes, A.N. Mavrodontidis, C.G. Zalavras, A.H. Karantanas, T. Karachalios, K.N. Malizos // *J. Bone Joint Surg. Am.* 2004. Vol. 86-A, No 10. P. 2275-2282.
36. Effects of ultrasound on transforming growth factor-beta genes in bone cells / J. Harle, F. Mayia, I. Olsen, V. Salih // *Eur. Cell. Mater.* 2005. Vol. 10. P. 70-76.
37. EXOGEN ultrasound bone healing system for long bone fractures with non-union or delayed healing: a NICE medical technology guidance / A. Higgins, M. Glover, Y. Yang, S. Bayliss, C. Meads, J. Lord // *Appl. Health Econ. Health Policy.* 2014. Vol. 12, No 5. P. 477-484.
38. Low-intensity pulsed ultrasound for bone healing: an overview / K.N. Malizos, M.E. Hantes, V. Protopappas, A. Papachristos // *Injury.* 2006. Vol. 37, Suppl.1. P. S56-S62.
39. Does low intensity, pulsed ultrasound speed healing of scaphoid fractures? / E. Mayr, M.M. Rudzki, M. Rudzki, B. Borchardt, H. Häusser, A. Rüter // *Handchir. Mikrochir. Plast. Chir.* 2000. Vol. 32, No 2. P. 115-122.
40. Distinct anabolic response of osteoblast to low-intensity pulsed ultrasound / K. Naruse, A. Miyauchi, M. Itoman, Y. Mikuni-Takagaki // *J. Bone Miner. Res.* 2003. Vol. 18, No 2. P. 360-369.
41. Low-intensity ultrasound stimulates endochondral ossification in vitro / P.A. Nolte, J. Klein-Nulend, G.H. Albers, R.K. Marti, C.M. Semeins, S.W. Goei, E.H. Burger // *J. Orthop. Res.* 2001. Vol. 19, No 2. P. 301-307.
42. An ultrasound wearable system for the monitoring and acceleration of fracture healing in long bones / V.C. Protopappas, D.A. Baga, D.I. Fotiadis, A.C. Likas, A.A. Papachristos, K.N. Malizos // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2005. Vol. 52, No 9. P. 1597-1608.
43. The effect of ultrasound on angiogenesis: an in vivo study using the chick chorioallantoic membrane / R. Ramli, P. Reher, M. Harris, S. Meghji // *Int. J. Oral Maxillofac. Implants.* 2009. Vol. 24, No 4. P. 591-596.
44. Ultrasonically enhanced rifampin activity against internalized *Staphylococcus aureus* / S.F. Shi, X.L. Zhang, C. Zhu, D.C. Chen, Y.Y. Guo // *Exp. Ther. Med.* 2013. Vol. 5, No 1. P. 257-262.
45. Acceleration of fresh fracture repair using the sonic accelerated fracture healing system (SAFHS): a review / S.J. Warden, K.L. Benell, J.M. McMeeken, J.D. Wark // *Calcif. Tissue Int.* 2000. Vol. 66, No 2. P. 157-163.
46. Welgus H.G., Jeffrey J.J., Eisen A.Z. Human skin fibroblast collagenase. Assessment of activation energy and deuterium isotope effect with collagenous substrates // *J. Biol. Chem.* 1981. Vol. 256, No 18. P. 9516-9521.
47. Interobserver and intraobserver variation in the assessment of the healing of tibial fractures after intramedullary fixation / D.B. Whelan, M. Bhandari, M.D. McKee, G.H. Guyatt, H.J. Kreder, D. Stephen, E.H. Schemitsch // *J. Bone Joint Surg. Br.* 2002. Vol. 84, No 1. P. 15-18.
48. Exposure to low-intensity ultrasound increases aggrecan gene expression in a rat femur fracture model / K.H. Yang, J. Parvizi, S.J. Wang, D.G. Lewallen, R.R. Kinnick, J.F. Greenleaf, M.E. Bolander // *J. Orthop. Res.* 1996. Vol. 14, No 5. P. 802-809.
49. Effect of low-intensity pulsed ultrasound treatment for delayed and non-union stress fractures of the anterior mid-tibia in five athletes / Y. Uchiyama, Y. Nakamura, J. Mochida, T. Tamaki // *Tokai J. Exp. Clin. Med.* 2007. Vol. 32, No 4. P. 121-125.

Рукопись поступила 29.09.2014.

Сведения об авторах:

1. Резник Леонид Борисович – Омская государственная медицинская академия, заведующий кафедрой травматологии и ортопедии, д. м. н., профессор; e-mail: omsktravma@mail.ru.
2. Рожков Константин Юрьевич – Омская государственная медицинская академия, очный аспирант кафедры травматологии и ортопедии; e-mail: kosro@gmail.com.
3. Ерофеев Сергей Александрович – Омская государственная медицинская академия, кафедра травматологии и ортопедии, доцент, д. м. н., профессор; e-mail: esa_rncvto@mail.ru.
4. Дзюба Герман Григорьевич – Омская государственная медицинская академия, кафедра травматологии и ортопедии, доцент, к. м. н.; e-mail: germanort@mail.ru.
5. Котов Дмитрий Викторович – БУЗОО «Медико-санитарная часть № 4», г. Омск, врач травматолог-ортопед; e-mail: egkin.kot@mail.ru.

Information about the authors:

1. Reznik Leonid Borisovich – FSBEI HPE The Omsk State Medical Academy of the RF Ministry of Health, Omsk, Head of the Department of Traumatology and Orthopaedics, Doctor of Medical Sciences, Professor; e-mail: omsktravma@mail.ru.
2. Rozhkov Konstantin Iur'evich – FSBEI HPE The Omsk State Medical Academy of the RF Ministry of Health, Omsk, Department of Traumatology and Orthopaedics, a full-time postgraduate student; e-mail: kosro@gmail.com.
3. Erofeev Sergei Aleksandrovich – FSBEI HPE The Omsk State Medical Academy of the RF Ministry of Health, Omsk, Department of Traumatology and Orthopaedics, an assistant professor, Doctor of Medical Sciences, Professor; e-mail: esa_rncvto@mail.ru.
4. Dziuiba German Grigor'evich – FSBEI HPE The Omsk State Medical Academy of the RF Ministry of Health, Omsk, Department of Traumatology and Orthopaedics, an assistant professor, Candidate of Medical Sciences; e-mail: germanort@mail.ru.
5. Kotov Dmitrii Viktorovich – Budget Health Institution of the Omsk Region (BHIOR) Medical Unit No 4, Omsk, a traumatologist-orthopedist; e-mail: egkin.kot@mail.ru.