

DOI: 10.18481/2077-7566-2024-20-1-29-34

УДК: 617.52 (075.8)

ПРОЦЕССЫ РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ ПРИ ПЕРЕЛОМАХ НИЖНЕЙ ЧЕЛЮСТИ

Солтанов С. С.¹, Гибадуллина Г. С.¹, Ксембаев С. С.¹, Иванов О. А.^{1,2}, Торгашова О. Е.¹

¹ Казанский государственный медицинский университет, г. Казань, Россия

² Городская клиническая больница № 7 им. М. Н. Садыкова, г. Казань, Россия

Аннотация

Предмет. Представлен обзор литературы, посвященный актуальной проблеме челюстно-лицевой хирургии — процессам регенерации костной ткани при переломах нижней челюсти.

Цель исследования — изучить и проанализировать материалы публикаций о процессах регенерации костной ткани при переломах нижней челюсти.

Методология. Изучены публикации отечественных и иностранных авторов, посвященные процессам регенерации костной ткани при переломах нижней челюсти. Проведен анализ публикаций с использованием научных поисковых библиотечных баз данных: PubMed Central, Google, Cyberleninka, eLibrary. Отбор материалов осуществлялся по ключевым словам. В поиск включались полнотекстовые статьи.

Результаты. В отечественной и зарубежной литературе подробно изучены и описаны процессы восстановления костных структур челюстно-лицевой области как реакция организма на повреждение. Установлено, что при этом одновременно запускаются два процесса: резорбция поврежденных остеоцитов и образование остеоидной ткани, один из которых в определенный момент может быть преобладающим.

Выводы. В настоящей статье представлены современные данные по ключевым моментам регенерации костной ткани в области нижней челюсти. На клеточном уровне описаны все этапы репаративного процесса в костной ткани, подробно, с учетом этапа остеогенеза, представлены сведения о основных механизмах, путях и типах клеток, участвующих в восстановлении костной ткани.

Знание закономерностей биологических процессов в зоне регенерации костной ткани позволяет вести научный поиск и разработку эффективных методов лечения переломов нижней челюсти.

Ключевые слова: перелом нижней челюсти, регенерация костной ткани, репаративный остеогенез, репаративный процесс костной ткани, оксификация

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Сахил Солтан оглы СОЛТАНОВ ORCID ID 0000-0003-4403-4731

аспирант кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии, Казанский государственный медицинский университет, г. Казань, Россия
+7 (987) 1806600
salehss@mail.ru

Гузель Сулеймановна ГИБАДУЛЛИНА ORCID ID 0000-0002-6410-1279

ассистент кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии Казанского государственного медицинского университета, г. Казань, Россия
+7 (987) 4032773
ggilmanova-dentist@yandex.ru

Саид Сальменович КСЕМБАЕВ ORCID ID 0000-0002-0791-1363

д.м.н., профессор, и.о. заведующего кафедрой челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии Казанского государственного медицинского университета, г. Казань, Россия.
+7 (905) 0206886
ksesa@mail.ru

Олег Александрович ИВАНОВ ORCID ID 0000-0002-4394-5480

к.м.н., доцент кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии Казанского государственного медицинского университета; заведующий отделением челюстно-лицевой хирургии, Городская клиническая больница № 7 им. М. Н. Садыкова, г. Казань, Россия
+7 (905) 3770021
o4lh@mail.ru

Ольга Евгеньевна ТОРГАШОВА ORCID ID 0000-0003-1702-7851

к.м.н., доцент кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии Казанского государственного медицинского университета, г. Казань, Россия.
+7 (917) 2922518
trola74@mail.ru

Адрес для переписки: Ольга Евгеньевна ТОРГАШОВА

420012, г. Казань, ул. Бутлерова, д.49. кафедра челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии
Тел. +7 (917) 2922518
trola74@mail.ru

Образец цитирования:

Солтанов С. С., Гибадуллина Г. С., Ксембаев С. С., Иванов О. А., Торгашова О. Е.

ПРОЦЕССЫ РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ ПРИ ПЕРЕЛОМАХ НИЖНЕЙ ЧЕЛЮСТИ. Проблемы стоматологии. 2024; 1: 29-34.

© Солтанов С. С. и др., 2024

DOI: 10.18481/2077-7566-2024-20-1-29-34

Поступила 01.04.2024. Принята к печати 22.04.2024

DOI: 10.18481/2077-7566-2024-20-1-29-34

PROCESSES OF BONE TISSUE REGENERATION IN FRACTURES OF THE LOWER JAW

Soltanov S.S.¹, Gibadullina G.S.¹, Ksembaev S.S.¹, Ivanov O.A.^{1,2}, Torgashova O.E.¹

¹ Kazan State Medical University, Kazan, Russia

² City Clinical Hospital No. 7 named after M.N. Sadykov, Kazan, Russia

Annotation

Item. The review of literature devoted to the actual problem of maxillofacial surgery — processes of bone tissue regeneration in mandibular fractures is presented.

The purpose of the study — to study and analyze the materials of publications on the processes of bone tissue regeneration in mandibular fractures.

Methodology. The publications of domestic and foreign authors devoted to the processes of bone tissue regeneration in mandibular fractures were studied. The publications were analyzed using scientific search library databases: PubMed Central, Google, Cyberleninka, eLibrary. Materials were selected by keywords. Full-text articles were included in the search.

Results. In domestic and foreign literature, the processes of restoration of bone structures of the maxillofacial region as an organism's response to damage have been studied and described in detail. It has been established that two processes are simultaneously launched: resorption of damaged osteocytes and formation of osteoid tissue, one of which may be predominant at the moment.

Conclusions. The article presents modern data on the key moments of bone tissue regeneration in the region of the mandible. All stages of the reparative process in bone tissue are described at the cellular level, and information about the main mechanisms, pathways and cell types involved in bone tissue regeneration is presented in detail, taking into account the stage of osteogenesis.

Knowledge of the regularities of biological processes in the bone tissue regeneration zone allows scientific search and development of effective methods of treatment of mandibular fractures.

Keywords: *fractur of the mandible, bone regeneration, reparative osteogenesis, bone repair process, ossification*

The authors declare no conflict of interest.

Sahil S. SOLTANOV ORCID ID 0000-0003-4403-4731

Graduate Student, Department of Maxillofacial Surgery and Dental Surgery, Kazan State Medical University, Kazan, Russia
salehss@mail.ru

Guzel S. GIBADULLINA ORCID ID 0000-0002-6410-1279

Teaching Assistant of the Department of Maxillofacial Surgery and Dental Surgery, Kazan State Medical University, Kazan, Russia
ggilmanova-dentist@yandex.ru

Said S. KSEMBAEV ORCID ID 0000-0002-0791-1363

Grand PhD in Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Maxillofacial Surgery and Dental Surgery, Kazan State Medical University, Kazan, Russia
ksesa@mail.ru

Oleg A. IVANOV ORCID ID 0000-0002-4394-5480

PhD in Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Maxillofacial Surgery and Dental Surgery, Kazan State Medical University; Head of the Department of Maxillofacial Surgery, City Clinical Hospital No. 7 named after M.N. Sadykov, Kazan, Russia
o4lh@mail.ru

Olga E. TORGASHOVA ORCID ID 0000-0003-1702-7851

PhD in Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Maxillofacial Surgery and Dental Surgery, Kazan State Medical University, Kazan, Russia
trola74@mail.ru

Correspondence address: Olga E. TORGASHOVA

420012, Kazan, str. Butlerova, 49. Department of Maxillofacial Surgery and Surgical Dentistry
+7 (917) 2922518
trola74@mail.ru

For citation:

Soltanov S.S., Gibadullina G.S., Ksembaev S.S., Ivanov O.A., Torgashova O.E.

PROCESSES OF BONE TISSUE REGENERATION IN FRACTURES OF THE LOWER JAW. *Actual problems in dentistry.* 2024; 1: 29-34. (In Russ.)

© Soltanov S.S. et al., 2024

DOI: 10.18481/2077-7566-2024-20-1-29-34

Received 01.04.2024. Accepted 22.04.2024

Введение

Регенерация костной ткани представляет собой сложный, комплексный процесс восстановления поврежденных частей кости. Несмотря на то, что костная ткань жесткая и прочная, она биологически очень активна и постоянно реконструируется благодаря сбалансированной деятельности остеокластов, резорбирующих кость, и остеобластов, образующих кость. Известно, что кость представляет собой одну из немногих тканей, способных заживать без образования фиброзного рубца. Современные сведения о процессах, происходящие в костной ткани, представляют интерес для клиницистов.

Цель. Разработка эффективной стратегии лечения переломов нижней челюсти невозможна без знания закономерностей процессов в зоне регенерирующей кости. Заживление перелома традиционно подразделяют на различные биологические фазы, которые следуют в хронологическом порядке. В процессе регенерации выделяют соединительнотканый, фиброзный и костный этапы. Однако их нельзя строго разделить, поскольку регенерация костной ткани возникает в разное время в разных частях костного сегмента, и на разных этапах репаративного остеогенеза один из них может быть преобладающим.

В процессе регенерации костной ткани участвуют различные типы клеток, а также внутриклеточные и внеклеточные молекулярные сигнальные пути, направленные на восстановление функции скелета, которые играют ключевую роль в костной регенерации [17].

Процесс заживления начинается филогенетически с воспалительной реакции, но интенсивность этого процесса должна строго контролироваться. Нарушение регуляции воспалительного каскада напрямую влияет на последующие фазы заживления и препятствует прогрессу регенерации [20].

Методология. Для создания данного литературного обзора был проведен поиск и анализ научных публикаций зарубежных и российских исследователей, посвященных изучению процессов восстановления костной структуры нижней челюсти при травме. Критерии включения: публикации, зарегистрированные в PubMed Central, Google, Cyberleninka, eLibrary. Поиск оригинальных научных публикаций осуществлялся по ключевым словам. Анализ литературы проводили по 28 источникам.

Результаты. Известно, что ключевой особенностью процесса заживления кости является образование хрящевой мозоли, которая позже подвергается минерализации, резорбции и затем замещается костью.

После образования первичной гематомы происходит интенсивное образование фибробластов, формирующих в основном соединительнотканые элементы в зоне перелома. Дефект заполняется волокнистыми элементами и гранулярным материалом, содержащим

протеогликаны, необходимые для синтеза коллагена, и на месте дефекта формируется богатая фибрином грануляционная ткань [4, 19]. Внутри этой ткани эндохондральное образование происходит между концами перелома и снаружи от периостальных участков. Эти области также механически менее стабильны, а хрящевая ткань образует мягкую мозоль, которая придает перелому стабильную структуру.

При спаде воспалительного процесса параллельно начинается репаративная фаза с образованием грануляционной ткани и восстановлением сосудистой сети. Между фрагментами кости происходит врастание мало дифференцированной соединительной ткани. В качестве переходной ткани грануляционная ткань заменяет временный раневой матрикс на основе фибрина/фибронектина. Грануляционная ткань характеризуется высокой плотностью фибробластов, гранулоцитов, макрофагов, капилляров и рыхло организованных пучков коллагена. Миофибробласты отличаются развитым цитоскелетом, представленным стрессовыми волокнами, что обеспечивает активную миграцию этих клеток и ремоделирование окружающего межклеточного вещества. Однако доминирующей клеткой на этой фазе является фибробласт, который выполняет различные функции, такие как выработка коллагена и веществ внеклеточного матрикса (т. е. фибронектина, гликозаминогликанов, протеогликанов и гиалуроновой кислоты) [24].

Формирование внеклеточного матрикса представляет собой еще один важный шаг, поскольку он обеспечивает основу для клеточной адгезии и регулирует, организует рост, движение и дифференцировку клеток внутри него. Таким образом, фибробласт является предшественником временного раневого матрикса, в котором происходит соответствующая миграция и организация клеток. В конце этой фазы количество созревающих фибробластов снижается за счет дифференцировки миофибробластов и прекращается последовательным апоптозом [22]. Грануляционная ткань обеспечивает стабильность края раны, что имеет большое значение для вновь образующегося соединительно-тканного прикрепления и регенерации [11]. При образовании и последующей атрофии соединительной ткани отмечается обратная связь между синтезом и диссимиляцией коллагена.

Наращение фибробластов и коллагена и их развитие прекращается из-за взаимосвязи волокон и клеток. Это обуславливает выработку клетками ингибиторов роста, распад некоторых фибробластов, превращение других в неактивные фиброциты и в фиброкласты, участвующих в фагоцитозе коллагеновых волокон и секреции коллагеназы. Все эти процессы приводят к перестройке и последующей атрофии соединительной ткани с истончением капсулы.

Для заживления костной раны необходимо достаточное кровоснабжение и кровообращение в области травмы. В процесс заживания эндохондральных пере-

ломов вовлечены не только сосудистые пути, но также аутолиз хондроцитов и трансформация хрящевой ткани, потому что удаление клеток и внеклеточного матрикса необходимо для обеспечения роста кровеносных сосудов в месте восстановления.

Репаративные процессы поврежденной нижней челюсти осуществляются за счет пролиферации клеток остеобластического слоя надкостницы и малодифференцированных плюрипотентных костномозговых клеток. В данном процессе участвуют адвентициальные (периваскулярные) клетки растущих кровеносных сосудов [9, 10]. Вокруг микроциркуляторной сети сосудов челюсти формируется пул остеобластов. Вдоль них образуются первичные костные балочки, характерные для ретикулофиброзной костной ткани. Формирующаяся сеть трабекул включает в свой состав остеобласты, остециты, остеокласты [12]. Таким образом, между структурами зафиксированных фрагментов челюсти образуется костная мозоль без признаков ее трансформации в пластинчатую костную ткань [9, 10].

Тканая кость характеризуется слабыми механическими показателями, но быстро формируется с дальнейшей активной минерализацией, кроме того, на данном этапе обеспечивает механическую фиксацию костных отломков челюсти, за счет чего регенеративная зона вблизи перелома значительно увеличивается [21].

В.Г. Гололобов отметил: «Костные отломки представляют собой органический костный матрикс, вокруг таких осколков, краев отломков, а также в центральных частях регенерата среди хорошо васкуляризированной соединительной ткани обнаруживались остеобласты, формировавшие трабекулы ретикулофиброзной костной ткани, — локусы индуцированного регенерационного остеогистогенеза. Подобный процесс являлся еще одним вкладом в посттравматическую регенерацию костной ткани при заживлении костной раны» [3].

Для прогресса регенерации кости первичная мягкая хрящевая мозоль должна быть резорбирована и заменена твердой костной мозолью. В данную фазу заживления переломов в определенной степени повторяется процесс эмбриологического формирования кости с одновременным протеканием клеточной пролиферации и дифференцировки, ростом клеточного объема и большим отложением матрикса.

Заживление происходит посредством насыщения раны грануляциями, поверхность раны покрывает слоем фибрина. На молекулярном уровне эти репаративные процессы опосредуются конкретными факторами роста, такими как трансформирующий фактор роста- β (TGF- β), костные морфогенетические белки, фактор роста фибробластов (FGF), инсулиноподобный фактор роста (IGF) и производные тромбоцитов фактор роста (PDGF). Тромбоцитарный фактор роста является основным митогеном мезенхимных клеток, TGF- β стимулирует синтез матрикса [7]. Применение факторов

роста показало сильное стимулирующее воздействие на заживление переломов [28].

Ремоделирование является последней фазой заживления. Образование грануляционной ткани прекращается за счет апоптоза клеток. В процессе созревания раны компоненты внеклеточного матрикса претерпевают определенные изменения. По мере пролиферации хондроцитов мозолистой кости перелома они становятся гипертрофическими, а внеклеточный матрикс кальцифицируется. Формируется коллагеновая основа, белковая матрица костной ткани. Коллаген III, который вырабатывался в пролиферативной фазе, теперь заменяется более сильным коллагеном I. Этот тип коллагена ориентирован в виде небольших параллельных пучков и, следовательно, отличается от коллагена «плетения корзинок» в здоровой дерме. В дальнейшем миофибробласты вызывают сокращение раны за счет многократного прикрепления к коллагену и способствуют уменьшению поверхности развивающегося рубца [22]. При этом ангиогенные процессы ослабевают, раневой кровоток снижается, острая раневая метаболическая активность замедляется и, в конечном итоге, прекращается [8]. В ходе гомеостатического ремоделирования мозоль становится более твердой и механически жесткой, происходит восстановление механической прочности и стабильности.

Таким образом, мягкая мозоль состоит из волокнистых или хрящевых соединительных тканей. Стволовые клетки дифференцируются в специальные клетки в различных зонах сформированной мозоли с учетом количества связанных факторов роста, степени ангиогенеза и насыщения кислородом. Мягкая костная мозоль создает механическую поддержку на определенном этапе, а также образует контур для твердой мозоли после минерализации [13]. Поскольку мягкая мозоль сама по себе обеспечивает лишь базовую механическую стабильность, она подвержена оссификации, которая достигается за счет включения фосфата кальция во внеклеточный матрикс [7].

При заживлении переломов формируется первичное или вторичное костное сращение костных отломков. Различают внутримембранозное и энхондральное окостенение, которые возникают в разных условиях и, вероятно, происходят одновременно в разных зонах места перелома [25]. При внутримембранозной оссификации кость развивается без хрящевых промежуточных продуктов. Происходит прямая перестройка компактной кости без формирования внешней мозоли (каллуса). При стимуляции мезенхимальные стволовые клетки дифференцируются в остеобласты, которые продуцируют внеклеточный матрикс, состоящий в основном из коллагена I типа и других специфичных для остеобластов белков, включая остеокальцин. Внеклеточный костный матрикс затем кальцинируется под действием остеобластов, которые откладывают кристаллы фосфата кальция во внеклеточном матриксе. Затем остеобласты окончательно дифференцируются в механочувствительные остециты [6].

Вторичное сращение формируется, как правило, в условиях подвижности концов костных отломков. В отличие от внутримембранозного окостенения, заживление кости достигается за счет хрящевых промежуточных продуктов энхондрального окостенения [14]. Здесь хондроциты, дифференцированные из мезенхимальных стволовых клеток, производят хондрогенный матрикс, который закрывает перелом. В конце хондроциты подвергаются апоптозу [27].

Когда разрыв перелома заполнен костной мозолью, достигается клиническое соединение и начинается фаза ремоделирования. Чтобы создать механически стабильную пластинчатую кость, тканая кость заменяется механически компетентной пластинчатой костью с образованием вторичных остеонов, обеспечивающих плотность кости [13]. Переход тканой кости в пластинчатую опосредуется сбалансированной активностью остеобластов, остеоцитов и остеокластов. Минерализованный хрящ резорбируется остеокластами и замещается грубоволокнистой губчатой костью по всей плоскости перелома [16]. Постепенно тканая кость заменяется жесткой пластинчатой костью, восстанавливая изначальную форму кости и ее пластинчатую структуру. Этот процесс связан с окончательными изменениями в архитектуре кости и позволяет месту бывшего перелома адаптироваться к текущим механическим требованиям [25].

Регенерация костной ткани представляет собой сложный комплекс биологических реакций, возникающий в ответ на повреждение тканей организма [27]. Существуют клинические состояния, при которых регенерация кости требуется в большом объеме, например, при реконструкции костных дефектов нижней челюсти, вызванных травмой. Стратегии лечения направлены на оптимальное заживление костей, что обуславливает поиск эффективных средств регенерации костной ткани. В настоящее время существует множество различных стратегий для улучшения нарушенного процесса костной регенерации: аутологичный костный трансплантат, свободный васкуляризированный трансплантат малоберцовой кости, имплантация аллотрансплантата и использование факторов роста, остеокондуктивные каркасы, остео-прогениторные клетки и дистракционный остеогенез [15, 18, 22]. Улучшение восстановления костной ткани интенсивно изучается с целью создания трансплантатов, которые максимально идентичны нормальной кости, для ускорения общего процесса регенерации [23, 26]. В случаях, когда требуется активация регенерации костной ткани, одним из перспективных способов может стать магнитомеханическая стимуляция, которая вызывает остеогенную дифференцировку мезенхимальных стволовых клеток [5].

Заключение

Таким образом, начальная стадия регенерации характеризуется дезинтеграцией и деградацией окружающих и входящих в состав кости структур, продукты которых обеспечивают пролиферацию специальных клеточных элементов. Далее регенерация характеризуется прогрессирующей пролиферацией и дифференцировкой клеточных элементов, продолжается тканевая организация. В результате сложных биохимических, биофизических, физиологических процессов происходит оссификация. Механическая прочность регенерата нарастает, образуется пластичная костная структура, обеспечивающая восстановление формы и функции кости. Понимание закономерностей процесса регенерации позволило разработать рациональные методы лечения переломов.

Представленные в литературе данные подтверждают, что переломы нижней челюсти преобладают в структуре переломов костей лицевого скелета, отмечен рост числа переломов нижней челюсти. Наибольшее количество переломов нижней челюсти регистрируется в возрастной группе 21–30 лет, чаще встречаются у мужчин, чем у женщин, в среднем в соотношении 4:1. Переломы нижней челюсти могут быть вызваны различными факторами. Восстановление анатомической целостности и функции мышц челюстно-лицевой области требует тщательного рассмотрения вариантов лечения [2]. В литературе описано множество различных методик лечения переломов нижней челюсти, задачами которых является репозиционирование и иммобилизация костных фрагментов. В зависимости от сложности перелома методы лечения варьируются от нехирургического лечения до хирургических процедур с использованием остеосинтеза.

По мнению большинства исследователей в случаях, когда требуется хирургическое вмешательство, методы внутренней жесткой фиксации способствуют лучшей стабилизации и консолидации сломанной кости. Методы иммобилизации костных отломков обычно варьируются в зависимости от типа, количества и локализации перелома [1]. Заживление перелома — чрезвычайно сложный процесс биологического восстановления. Процесс регенерации костной ткани — это последовательный, хорошо организованный ряд биологических событий костной индукции, включающий пул разных типов клеток, а также внутриклеточные и внеклеточные молекулярные сигнальные связи и взаимодействия, с определяемой временной и пространственной последовательностью, направленный на оптимальное восстановление структуры скелета. Представленный нами литературный обзор отражает состояние научных исследований в области изучения механизмов регенерации костной ткани нижней челюсти. На основании имеющейся информации продолжается поиск новых методов и достаточно прочных материалов для фиксации костных отломков нижней челюсти.

Литература/References

1. Абдуллаев Ш.Ю., Халилов А.А., Юсупова Д.З. Аспекты современного лечения переломов нижней челюсти: обзор литературы. In Library. 2021;21(2):190-195. [Sh.Yu. Abdullaev, A.A. Halilov, D.Z. Yusupova. Aspects of modern treatment of mandibular fractures: a review of the literature. In Library. 2021;21(2):190-195. (In Russ.)]. <https://journals.scinnovations.uz/index.php/aposo/article/view/225>
2. Гильманова Г.С., Гасымзаде Д.К., Ксембаев С.С., Гильманов А.А. Распространенность и этиология переломов нижней челюсти. Проблемы стоматологии. 2021;1(17):20-25. [G.S. Gil'manova, D.K. Gasyalmazade, S.S. Ksembaev, A.A. Gil'manov. The prevalence and etiology of fractures of the mandible. Actual problems in dentistry. 2021;1(17):20-25. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.18481/2077-7566-20-17-1-20-25>
3. Гололобов В.Г. Закономерные процессы посттравматического остеогенеза. Морфология. 2019;155(2):83. [V.G. Gololobov. Typical processes of post-traumatic osteo-histogenesis. Morphology. 2019;155(2):83. (In Russ.)]. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38173853&ysclid=lufbja4bxp470520662>
4. Ежов М.Ю., Ежов И.Ю., Кашко А.К. и др. Нерешенные вопросы регенерации хрящевой и костной ткани (обзорно-аналитическая статья). Успехи современного естествознания. 2015;5:126-131. [M.Y. Yezhov, I.Y. Yezhov, A.K. Kashko, A.Y. Kayumov, A.A. Zykina, S.A. Gerasimov. Unresolved issues of the cartilage and bone regeneration (review). Advances in current natural sciences. 2015;5:126-131. (In Russ.)]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23875867>
5. Замай Т.Н., Толмачева Т.В. Новые стратегии регенерации костной ткани с помощью магнетомеханической трансдукции. Сибирское медицинское обозрение. 2021;6:5-11. [T.N. Zamay, T.V. Tolmacheva. New strategies in bone tissue regeneration via application of magnetomechanical transduction. Siberian Medical Review. 2021;6:5-11. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.20333/25000136-2021-6-5-11>
6. Иорданшвили А., Музыкин М., Солдатов В. Закономерности регенерации костной ткани. Стоматологический научно-образовательный журнал. 2019;2:21-29. [A.K. Jordanishvili, M.I. Muzikin, V.S. Soldatov. Regularities of bone tissue regeneration. Journal of dental scientific and education. 2019;2:21-29. (In Russ.)]. https://www.1spbgmu.ru/images/home/universitet/izdatelstvo/DentalScience/2011/DSE_1_2-2019.pdf?ysclid=lufbrydvgkx744705642
7. Костив Р.Е., Калинин С.Г., Матвеева Н.Ю. Трофические факторы роста костной ткани, их морфогенетическая характеристика и клиническое значение. Тихоокеанский медицинский журнал. 2017;1:10-16. [R.E. Kostiv, S.G. Kalinichenko, N.Yu. Matveeva. Trophic factors of bone growth, their morphogenetic characterization and clinical significance. Pacific Medical Journal. 2017;1:10-16. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17238/Pmj1609-1175.2017.1.10-16>
8. Курзанов А.Н., Ледванов М.Ю., Бизенкова М.Н. Возможности применения паратормон-родственного протеина и других лигандов рецептора PTH1R для оптимизации репаративного остеогенеза. Паратормон-родственный белок. 2-е изд. Перераб. и доп. Москва: Издательский Дом «Академия Естествознания». 2020:569-625. [A.N. Kurzanov, M.Yu. Levdanov, M.N. Bizenkova. Paratormone-related protein. 2nd edition revised and supplemented. Moscow: Publishing House «Academy of Natural Sciences». 2020:569-625. (In Russ.)]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44499424&ysclid=lufbxwqymj604634252>
9. Матчин А.А., Стадников А.А., Носов Е.В., Клевцов Г.В. Репаративные процессы в тканях челюстно-лицевой области при использовании наноструктурированного титана. Журнал Медицина и инновации. 2022;1:123-133. [A.A. Matchin, A.A. Stadnikov, E.V. Nosov, G.V. Klevtsov. Repaire processes in tissues of the maxillofacial area when using nanostructured titan. Journal of medicine and innovation. 2022;1:123-133. (In Russ.)]. https://inlibrary.uz/index.php/medicine_and_innovations/article/view/11768
10. Матчин А.А., Стадников А.А., Носов Е.В., Кириакиди С.Х. Экспериментально-морфологическое обоснование применения гипоталамического нейропептида окситоцина при лечении переломов нижней челюсти. Современные технологии в челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии. Материалы Региональной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора, генерал-майора медицинской службы Н.М. Александрова. Санкт-Петербург. 2023:62-67. [A.A. Matchin, A.A. Stadnikov, E.V. Nosov, S.Kh. Kiriakidi. Experimental and morphological substantiation of the use of the hypothalamic neuropeptide oxytocin in the treatment of mandibular fractures. Modern technologies in maxillofacial surgery and surgical dentistry. Materials of the Regional Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Professor, Major General of the Medical Service N.M. Alexandrova. Saint Petersburg. 2023:62-67. (In Russ.)]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=56002431>
11. Никонорова В.Г., Криштоп В.В., Румянцева Т.А. Грануляционная ткань как разновидность соединительных тканей (обзор). Журн. мед.-биол. исследований. 2022;10(2):167-179. [V.G. Nikanorova, T.A. Krishtop. Granulation tissue as a type of connective tissues (Review). Journal of Medical and Biological Research. 2022;10(2):167-179. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z098>
12. Носов Е.В., Блинова Е.В., Матчин А.А., Стадников А.А. О репаративных процессах в зоне экспериментального перелома нижней челюсти у животных. Стоматологическая весна в Белгороде – 2022. Сборник трудов Международной научно-практической конференции в рамках международного стоматологического фестиваля «Площадка безопасности стоматологического пациента», посвященного 100-летию Московского государственного медико-стоматологического университета им. А.И. Евдокимова. Белгород. 2022:173-175. [E.V. Nosov, E.V. Blinova, A.A. Matchin, A.A. Stadnikov. On reparative processes in the zone of experimental mandibular fracture in animals. Dental spring in Belgorod – 2022. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference within the framework of the International Dental Festival «Dental Patient Safety Platform» dedicated to the 100th anniversary of the Moscow State Medical and Dental University named after A.I. Evdokimov. Belgorod. 2022:173-175. (In Russ.)]. <https://elibrary.ru/pysceu?ysclid=lufdibi6zx433119173>
13. Повернов П.А., Шибряева Л.С. Механобиологические аспекты заживления переломов костей с применением биоразлагаемых костных имплантатов. Актуальные проблемы науки и техники. Сборник трудов по материалам Международного конкурса научно-исследовательских работ. Уфа. 2020:29-30. [P.A. Povernov, L.S. Shibryaeva. Mechanobiologic aspects of bone fracture healing using biodegradable bone implants. Actual problems of science and technology. Collection of works on the materials of the International competition of research works. Ufa. 2020:29-30. (In Russ.)]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43794081&ysclid=lufdj4jhl881196160>
14. Сирак С.В., Андреев А.А. Регенерация костной ткани при переломах нижней челюсти, осложненных травматическим остеомиелитом неспецифической этиологии. Стоматолог. 2018;4(31):83-87. [S.V. Sirak, A.A. Andreev. Bone tissue regeneration in mandibular fractures complicated by traumatic osteomyelitis of nonspecific etiology. Dentist. 2018;4(31):83-87. (In Russ.)]. [https://doi.org/10.32993/stomatologist.2018.4\(31\).15](https://doi.org/10.32993/stomatologist.2018.4(31).15)
15. Тоболев Г.В., Кокоев В.А., Коцюба Г.А. Использование медикаментозной коррекции регенераторной активности костной ткани при переломах нижней челюсти у лиц с хронической алкогольной интоксикацией. Медицина. Социология. Философия. Прикладные исследования. 2020;1:3-6. [G.V. Tobolev, V.A. Kokoev, G.A. Kotsoeva. Use of medicinal correction of regenerative activity of bone tissue in fractures of the lower jaw in persons with chronic alcohol intoxication. Medicine. Sociology. Philosophy. Applied research. 2020;1:3-6. (In Russ.)]. https://medsociofil.ru/upload/iblock/c6e/%D0%9C%D0%A1%D0%A4_01_2020_FIN.pdf
16. Урузбаев Р.М., Силантьева Т.А., Горбач Е.Н. и др. Регенеративные свойства тканей и органов, факторы ускорения репаративных процессов (обзор литературы). Медицинская наука и образование Урала. 2017;18(1):171-178. [R.M. Uruzbaev, T.A. Silanteva, E.N. Gorbach, V.G. Bychkov, E.A. Yuzhakova. Regenerativ properties of tissues and organs, factors of improvement of reparative processes (review). Medical science and education in the Urals. 2017;18(1):171-178. (In Russ.)]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36455733&ysclid=lufdpk3c1d198708168>
17. Юшков Б.Г. Клетки иммунной системы и регуляция регенерации. Бюллетень сибирской медицины. 2017;16(4):94-105. [B.G. Yushkov. Immune system and regulation of regeneration. Bulletin of Siberian Medicine. 2017;16(4):94-105. (In Russ.)]. <https://cyberleninka.ru/article/n/kletki-immunnoy-sistemy-i-regulyatsiya-regeneratsii?ysclid=lufdtqwlm343484465>
18. Antúnez-Conde R., Salmerón J.I., Díez-Montiel A. et al. Mandibular reconstruction with fibula flap and dental implants through virtual surgical planning and three different techniques: Double-barrel flap, implant dynamic navigation and CAD/CAM mesh with iliac crest graft // Front. Oncol. – 2021;11:719712. doi: 10.3389/fonc.2021.719712. eCollection 2021.
19. Bosch-Ruè È., Díez-Tercero L., Buitrago J.O., Castro E., Pérez R.A. Angiogenic and immunomodulation role of ions for initial stages of bone tissue regeneration // Acta Biomater. – 2023;166:14-41. doi: 10.1016/j.actbio.2023.06.001.
20. Duda G.N., Geissler S., Checa S. et al. The decisive early phase of bone regeneration // Nat. Rev. Rheumatol. – 2023;19(2):78-95. doi: 10.1038/s41584-022-00887-0.
21. Mackey A.L., Kjaer M. Connective tissue regeneration in skeletal muscle after eccentric contraction-induced injury // J. Appl. Physiol. – 2017;122(3):533-540. doi: 10.1152/jap-physiol.00577.2016.
22. Marcio M.B., Adalberto L.R. Bone Regeneration and Repair Materials // J Funct Biomater. – 2024;21:15(3):78. doi: 10.3390/jfb15030078.
23. Nambiar J., Sonali J., Samit Kumar N. Strategies for Enhancing Vascularization of Biomaterial-Based Scaffold in Bone Regeneration // Chem Rec. – 2022;22(6):202200008. doi: 10.1002/tcr.202200008.
24. Reinke J.M., Sorg H. Wound Repair and Regeneration // European Surgical Research. – 2012;49(1):35-43. <https://doi.org/10.1159/000339613>
25. Schlicke C.W., Kleinert H., Thiesen D.M. et al. Current and future concepts for the treatment of impaired fracture healing // Int. J. Mol. Sci. – 2019;20(22):5805. doi: 10.3390/ijms20225805.
26. Soares A.P., Fischer H., Aydin S. et al. Uncovering the unique characteristics of the mandible to improve clinical approaches to mandibular regeneration // Front. Physiol. – 2023;14:1152301. doi: 10.3389/fphys.2023.1152301.
27. Vermeulen S., Tahmasebi Z., Habibovic P. Birgani Biomaterial-induced pathway modulation for bone regeneration // Biomaterials. – 2022;283:121431. doi: 10.1016/j.biomaterials.2022.121431.
28. Yanfeng T., Jianlin C., Yunbiao Z. Experimental study on accelerated healing of jaw fracture using gelatin sponge compound growth factor // Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi. – 2017;35(5):506-509. doi: 10.7518/hxkq.2017.05.012.11