Стоматология
2025, Т. 104, №5, с. 84–91
https://doi.org/10.17116/stomat202510405184

Stomatology
2025, vol. 104, no. 5, pp. 84–91
https://doi.org/10.17116/stomat202510405184

Персонифицированное управление темпом дистракционного остеогенеза нижней челюсти: влияние механических и физических факторов на созревание костного регенерата

© Ф.Ф. ЛОСЕВ, П.И. ШАПОВАЛОВ, Д.И. РАХМАТУЛЛИН

ФГБУ НМИЦ «Центральный научно-исследовательский институт стоматологии и челюстно-лицевой хирургии» Минздрава России, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Дистракционный остеогенез (ДО) нижней челюсти — широко используемый метод хирургического удлинения кости, основанный на постепенном растяжении остеотомированных фрагментов с последующим формированием костного регенерата. Стандартный темп дистракции составляет 1 мм в сутки, однако, в клинической практике наблюдаются индивидуальные вариации в скорости минерализации регенерата, что ставит под вопрос необходимость строгого соблюдения универсального протокола. В последние годы активное изучается индивидуальный подход к коррекции темпа дистракции с целью оптимизации сроков лечения и повышения качества костного регенерата. Проведен анализ 127 публикаций, представленных в базе PubMed, а также данных из Scopus, Web of Science и Google Scholar за последние 10 лет. Рассматривали исследования, изучающие влияние механических факторов, таких как темп и режим дистракции, на скорость формирования костного регенерата, а также эффективность физиотерапевтических методов стимуляции остеогенеза: низкоинтенсивного импульсного ультразвука (LIPUS — Low-Intensity Pulsed Ultrasound), низкоинтенсивной лазерной терапии (LLLT — Low-Level Laser Therapy), терапии импульсными электромагнитными полями (PEMF — Pulsed Electromagnetic Field Therapy), электростимуляции и гипербарической оксигенации (ГБО).Указанные методы позволяют объективно оценивать степень зрелости костного регенерата и своевременно корректировать темп дистракции.

Ключевые слова: *дистракционный остеогенез, дистракция, физиотерапия, нижняя челюсть, дистракционный регенерат*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Лосев Ф.Ф. — https://orcid.org/0000-0002-9448-9614
Шаповалов П.И. — https://orcid.org/0000-0002-1929-717X
Рахматуллин Д.И. — https://orcid.org/0009-0002-6701-141X
Автор, ответственный за переписку: Шаповалов П.И. — e-mail: shapovalov_pi@cniis.ru

КАК ЦИТИРОВАТЬ:
Лосев Ф.Ф., Шаповалов П.И., Рахматуллин Д.И. Персонифицированное управление темпом дистракционного остеогенеза нижней челюсти: влияние механических и физических факторов на созревание костного регенерата. *Стоматология*. 2025;104(5):84–91. https://doi.org/10.17116/stomat202510405184

Personalized control of distraction rate in mandibular distraction osteogenesis: influence of mechanical and physical factors on bone regenerate maturation

© F.F. LOSEV, P.I. SHAPOVALOV, D.I. RAKHMATULLIN

Central Research Institute of Dentistry and Maxillofacial Surgery, Moscow, Russia

ABSTRACT

Mandibular distraction osteogenesis (DO) is a widely used surgical technique for bone lengthening based on the gradual separation of osteotomized bone segments with subsequent formation of a regenerate. The standard distraction rate is 1 mm per day; however, clinical observations reveal individual variations in regenerate mineralization rates, challenging the necessity of a uniform protocol. In recent years, increasing attention has been given to the personalized adjustment of distraction rates to optimize treatment duration and enhance bone quality. For this review, we analyzed 127 publications indexed in PubMed, as well as data from Scopus, Web of Science, and Google Scholar over the past 10 years. The review focuses on studies evaluating the effects of mechanical factors—such as distraction rate and regimen—on regenerate formation, as well as the efficacy of physiotherapeutic methods for stimulating osteogenesis, including low-intensity pulsed ultrasound (LIPUS), low-level laser therapy (LLLT), pulsed electromagnetic field therapy (PEMF), electrical stimulation, and hyperbaric oxygen therapy (HBOT). The development of automated distractors with feedback systems may represent the next step in the evolution of this technique, providing dynamic control of distraction based on objective data.

Key words: *distraction osteogenesis, distraction rate, physiotherapy, mandible, bone regenerate.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Losev F.F. — https://orcid.org/0000-0002-9448-9614
Shapovalov P.I. — https://orcid.org/0000-0002-1929-717X
Rakhmatullin D.I. — https://orcid.org/0009-0002-6701-141X
Corresponding author: Shapovalov P.I. — e-mail: shapovalov_pi@cniis.ru

TO CITE THIS ARTICLE:
Losev FF, Shapovalov PI, Rakhmatullin DI. Personalized control of distraction rate in mandibular distraction osteogenesis: influence of mechanical and physical factors on bone regenerate maturation. *Stomatology.* 2025;104(5):84–91. (In Russ.).
https://doi.org/10.17116/stomat202510405184

Введение

Дистракционный остеогенез (ДО) нижней челюсти — метод постепенного растяжения костной ткани после остеотомии, позволяющий сформировать новый костный регенерат в образующемся промежутке [1]. Стандартный темп дистракции, традиционно применяемый в клинической практике, составляет около 1 мм/сут [1, 2], что эмпирически признано оптимальным балансом между механической нагрузкой, растяжением тканей и скоростью остеогенеза. Известно, что темп >1—2 мм/сут приводит к образованию слабого фиброзного регенерата, или несращению [3, 4], тогда как темп <0,5 мм/сут чреват преждевременным окостенением остеотомированного участка до достижения нужной длины [1, 2].

Скорость дистракции напрямую влияет на качество и скорость созревания новой кости. Возникает клинически важный вопрос: возможно ли персонифицировать темп дистракции — ускорять либо замедлять его в зависимости от того, насколько быстро созревает костный регенерат у конкретного пациента — с тем, чтобы сократить общий срок лечения, не ухудшая качество костной ткани [4, 5].

Цель обзора: анализ современных научных данных, полученных за последние 10 лет, касающихся влияния различных факторов на процессы созревания костного регенерата при ДО нижней челюсти. Особое внимание уделено физиотерапевтическим методам стимуляции остеогенеза, методам объективного мониторинга состояния регенерата (цифровая рентгенография, двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия — DEXA, ультразвук и др.), а также влиянию механических параметров, таких как темп и режим дистракции. Кроме того, рассмотрены возможности адаптивного изменения темпа удлинения костного сегмента на основании данных о состоянии регенерата [6—8].

Влияние физиотерапии на скорость созревания регенерата

Физиотерапевтические методы (физические факторы) широко исследуются как способы ускорения репаративного остеогенеза при дистракции и сокращения периода консолидации [9]. К физиотерапевтическим факторам относятся низкоинтенсивный ультразвук (LIPUS), лазерное излучение (LLLT), электромагнитные поля (PEMF), электростимуляция, гипербарическая оксигенация (ГБО) и др. Далее приведены данные современных исследований, подтверждающие или опровергающие эффективность таких методов.

Низкоинтенсивный импульсный ультразвук (Low-Intensity Pulsed Ultrasound, LIPUS). Эффективность низкоинтенсивного ультразвука (LIPUS) при ДО подтверждена в ряде экспериментальных и клинических исследований: метод ускоряет минерализацию и сокращает сроки консолидации (Y. Ding et al., 2009; L.K. Xie et al., 2011; M. Dudda et al., 2011 [10—13]). Однако данные остаются неоднородными, и необходимы рандомизированные исследования с большими выборками.

Таким образом, большинство данных подтверждает положительное влияние ультразвуковой стимуляции на скорость созревания костного регенерата.

Низкоуровневая лазерная терапия (LLLT). Лазерное излучение близко по механизму действия к ультразвуку. В экспериментах отмечено, что лазер, подобно ультразвуку, повышает минерализацию регенерата. Например, по данным B. Kocyigit (2012) [14] и лазер и LIPUS при использовании в зоне дистракции улучшают исходы остеогенеза, повышая минеральную плотность новообразованной кости. Эксперимент, проведнный G. Andrade в 2013 г. [15] при дистракции в области нижней челюсти показал статистически значимое повышение минеральной плотности (BMD) регенерата при использовании как лазера, так и ультразвука. Наибольший прирост BMD был получен при ультразвуковом воздействии [14]. Комбинация методов может дать дополнительный эффект. H. Medeiros (2015) [16] сообщили, что одновременное применение ультразвука и лазера приводило к максимальному ускорению созревания кости по сравнению с применением этих же методов отдельно. Таким образом, лазеротерапия также считается эффективной для ускорения созревания костного регенерата при ДО, особенно, в комбинации с ультразвуком [16].

Электромагнитные поля и магнитотерапия. Действие низкочастотных импульсных магнитных полей (Pulsed Electromagnetic Field Therapy) на костную регенерацию изучается давно [17]. Предполагается, что электромагнитное воздействие может имитировать естественные электрические токи, возникающие при механической нагрузке на кость, и тем самым стимулировать остеогенез. В экспериментах на животных получены положительные результаты. Воздействие постоянного магнитного поля в сочетании с лазером улучшало качество регенерата нижней челюсти у кроликов и отмечали более высокую прочность и минерализацию новой кости по сравнению с таковыми в контрольной группе. Кроме того, исследования на кроликах и собаках показали, что PEMF увеличивает зону новообразованной кости при ДО длинных костей.

Клинические данные по магнитотерапии противоречивы: убедительных доказательств эффективности электромагнитной стимуляции при ДО пока нет, хотя метод широко применяется в травматологии. В экспериментах (В.Н. Шастов, 2015) у собак отмечено ускорение созре-

вания костного регенерата и повышение его плотности по данным компьютерной томографии (КТ). Таким образом, магнитотерапия рассматривается как перспективное направление, но требует подтверждения в клинических исследованиях.

Электростимуляция током также рассматривается как способ ускорения остеогенеза. Эксперименты показали, что постоянный и переменный ток ускорят деление остеобластов, формирование трабекул и повышают BMD регенерата. Однако клиническое применение метода остается ограниченным из-за технической сложности и нехватки рандомизированных данных.

Другие методы. К прочим физическим методам ускорения остеогенеза относятся фототерапия (например, освещение красным светом), локальная гипероксигенация тканей и пр. Так, есть данные, что чрескожная подача CO_2 в зону регенерата усиливает ангиогенез и экспрессию факторов роста (VEGF, BMP-2 и др.), что ускоряет эндохондральное окостенение, и в эксперименте у кроликов это позволило ускорить созревание костного регенерата. ГБО улучшает остеогенез в условиях нормотопической (не облученной) кости у кроликов. Однако широкого применения эти методы еще не нашли.

Большинство современных исследований подтверждают положительное влияние физических факторов на скорость созревания дистракционного регенерата. Наиболее доказана эффективность LIPUS (ультразвука) и LLLT (лазера) — они ускоряют минерализацию кости, повышают ее плотность и сокращают сроки фиксации аппарата (ретенционный период). Комбинированное применение нескольких физических факторов может усилить эффект. Электромагнитные и электрические стимулы также способны улучшать результаты ДО, но для их применения в клинике необходимо проведение дополнительных исследований.

Важно отметить, что все перечисленные методы являются неинвазивными и относительно безопасными, однако в контексте поставленной задачи (персонификация темпа дистракции) они рассматриваются скорее как фоновые средства. Пациенториентированная настройка скорости дистракции требует, прежде всего, методов для надежной оценки состояния костного регенерата в динамике.

Методы контроля состояния костного регенерата

Эффективная персонификация темпа дистракции невозможна без объективного мониторинга созревания костного регенерата. Классический метод оценки с доказанной эффективностью — выполнение рентгенографического исследования. Оценка рентгенограмм (в двух проекциях) через определенные интервалы позволяет врачу субъективно оценивать степень минерализации и наличие непрерывных кортикальных перемычек (формирование 3 — 4 кортикальных стенок регенерата принято считать критерием достаточной консолидации для снятия аппарата). Однако только лишь рентгенологический контроль имеет ограниченную точность и воспроизводимость. Известно, что оценка по рентгенограммам зависит от наблюдателя, а решение о снятии аппарата только на основе субъективной оценки рентгенограмм приводит к разноречивым результатам. По данным в литературы, частота переломов регенерата после удаления аппарата варьирует от 3 до 50% [7, 18, 19]. Следовательно, необходимы методы, на основе которых возможна оценка количественных показателей прочности или минерализации регенерата. При этом метод должен быть безопасным, чтобы его можно было применять многократно в динамике лечения пациентов с применением метода ДО.

За последние годы предложен ряд подходов к квантитативной оценке регенерата при ДО. Далее рассмотрены наиболее перспективные с точки зрения сочетания информативности и безопасности.

Цифровая рентгенография с анализом минеральной плотности кости. Обычный рентгеновский снимок можно превратить в инструмент количественного анализа, используя компьютерную обработку изображения. Например, введен показатель Pixel Value Ratio (PVR) — отношение средней яркости (денситометрической плотности) области регенерата к яркости участка интактной кости рядом. Это безразмерное число отражает относительную минерализацию новообразованной кости. В ретроспективном исследовании A. Bafor и соавт. (2020) [6] показано, что динамика PVR тесно коррелирует с прочностью регенерата и может служить практическим ориентиром: достигнув определенного порога (близкого к 1, т.е. когда BMD регенерата составляет почти 100% от BMD нормальной кости), пациентам безопасно увеличивать нагрузку, т.е. использовать фрагменты под физиологическую нагрузку без дополнительной внешней фиксации [6]. Преимущество метода в том, что он использует обычные рентгенограммы, которые пациенты и так выполняют, и не требует дополнительного облучения либо дорогостоящего оборудования. Уже в 1999 г. сообщалось, что цифровая радиография позволяет количественно прогнозировать жесткость регенерата. Так, S. Kolbeck и соавт. (1999) [18] обнаружили корреляцию между оптической плотностью зоны удлинения и фактической механической жесткостью кости. Современные цифровые системы делают такой анализ еще более доступным. Таким образом, рентгенденситометрия — перспективный частый метод мониторинга, хотя ее точность может зависеть от калибровки снимка и условий экспозиции.

Двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия (DEXA). Метод широко используется для оценки минерализации кости при остеопорозе и может быть адаптирован к дистракционному остеогенезу. Метод дает количественные значения BMD с высокой точностью при минимальной дозе облучения [7, 20]. A. Reiter и соавт. (1996) [21] показали, что максимальная минерализация регенерата наблюдается через 4—6 нед от начала дистракции, а M. Wallace и соавт. (2008) [7] продемонстрировали, что снижение прироста BMD <10% в месяц служит надежным критерием для снятия аппарата, предотвращая переломы. S. Song и соавт. (2017) [20] и S. Hazra и соавт. (2008) [21] предложили использовать коэффициент прироста BMD для динамической оценки консолидации. Ограничением метода являются необходимость специализированного денситометра и сложность применения в челюстно-лицевой области.

Ультразвуковая диагностика (УЗИ) регенерата. Стандартное УЗИ часто используется для оценки мягких тканей, но в отношении костного регенерата оно также находит применение. Несмотря на то что ультразвуковые волны не проходят через сформированную кортикальную кость, а отражаются от ее поверхности, УЗИ остается информативным на ранних стадиях, когда регенерат еще не подвергся полной минерализации. УЗИ позволяет выявлять неоваскуляризацию и кровоток вокруг регенерата (с помощью допплера или контрастного усиления), что служит ранним

признаком успешного остеогенеза [8, 21, 22]. Кроме того, ультразвуком можно измерять параметры, косвенно связанные с количеством новой кости. Например, предложен показатель глубины проникновения ультразвукового луча (Beam Penetration Depth, BPD), который определяет, насколько глубоко проходит ультразвуковой сигнал через зону регенерата; по мере заполнения промежутка костной тканью BPD снижается, т.е. меньшая глубина проникновения указывает на более плотный костный регенерат. Показано, что динамика BPD может использоваться для оценки степени заполнения регенерата и принятия решения о снятии аппарата.

Различные квантитативные ультразвуковые параметры (скорость звука в регенерате, коэффициент затухания, энтропия отраженного сигнала и др.) в исследованиях на моделях также коррелируют с изменением BMD.

В клинических (экспериментальных) условиях J. Glowacki и соавт. (2004) [8] ввели полуколичественный индекс заполнения регенерата, измеряемый и с помощью УЗИ, и рентгенографии. Авторы обнаружили, что при латентном режиме дистракции оценка при УЗИ плотности регенерата превышала радиографическую, свидетельствуя, что по сравнению с УЗИ рентгенологическое исследование недооценивает количество новой кости. Более того, F. Andrade и соавт. (2010) [23] сообщили, что корреляция между ультразвуковой оценкой заполнения и фактическим интраоперационным состоянием кости выше, чем аналогичная корреляция для рентгенографии. Эти данные означают, что ультразвуковая оценка регенерата может быть точнее рентгенологической на ранних этапах.

УЗИ абсолютно безопасно, его можно проводить часто, что является преимуществом. Однако главным недостатком остается отсутствие стандартизированных количественных критериев. В отличие от DEXA или КТ ультразвук требует интерпретации изображений, и параметры (типа BPD) пока не вошли в широкую клиническую практику. Тем не менее современные исследования показывают принципиальную возможность количественно оценивать регенерат с помощью УЗИ, особенно для раннего обнаружения проблем (например, недостаточного кровоснабжения) задолго до того, как они станут видны на рентгенограмме.

Компьютерная томография (КТ) и ее аналоги. КТ обеспечивает прямое томографическое изображение регенерата с возможностью измерять BMD (в единицах Хаунсфилда, HU). В научных работах КТ часто используется как «золотой стандарт» оценки минерализации, так как дает трехмерное представление о структуре регенерата. Например, в эксперименте с магнитотерапией именно КТ позволила количественно зафиксировать разницу плотности костной ткани (439 против 390 HU). Однако в клинике часто выполнять КТ небезопасно из-за высокой лучевой нагрузки, особенно у детей. Поэтому КТ обычно делают ограниченно — разово для принятия решения, либо используют более щадящую конусно-лучевую компьютерную томографию КЛКТ).

КЛКТ применяется в челюстно-лицевой хирургии (ЧЛХ) и дает относительно низкую дозу излучения при визуализации костных структур. F. Andrade и соавт. (2013) [23] использовали КЛКТ-анализ для сравнения эффективности лазера и ультразвука. Таким образом, КЛКТ — очень информативный количественный метод (можно напрямую измерять BMD в HU или объем костной мозоли), но из-за дозовой нагрузки его регулярное применение ограничено (этически оправдано 1—2 раза за курс лечения).

Биомеханические методы. О прочности регенерата судят по его способности не ломаться под нагрузкой, т.е. по жесткости и прочности новообразованной кости. Прямо измерить эти параметры *in vivo* сложно, но предпринимаются косвенные подходы.

A. Dwyer и соавт. (1996) [24] показали, что комбинация DEXA и измерений жесткости позволяет достаточно точно прогнозировать готовность к нагрузке. В повседневной практике чаще ориентируются на косвенные индексы, такие как индекс заживления — соотношение продолжительности фиксации (в днях) к величине удлинения (в сантиметрах). Его среднее значение составляет 30—50 дней/см. Однако важно понимать, что этот индекс может быть рассчитан только ретроспективно, по завершении лечения, и применяется исключительно для анализа и сравнения клинических случаев, а не для принятия решений во время лечения.

Биохимические маркеры. Еще одним направлением мониторинга остеогенеза при дистракции является определение в крови пациента концентрации системных биомаркеров костного метаболизма. К ним относятся маркеры формирования костной ткани — остеокальцин, щелочная фосфатаза, пропептид проколлагена I типа (PINP) и др., а также маркеры резорбции, такие как β-CrossLaps (β-CTX), TRAP-5b и др. Предполагается, что активный остеогенез в организме сопровождается увеличением уровней маркеров формирования, особенно в фазу дистракции, когда происходит интенсивное новообразование костной ткани [9]. Однако основной недостаток — эти маркеры не специфичны для места удлинения. На них влияют возраст, обмен веществ, гормоны и одновременные процессы во всем скелете. Поэтому в индивидуальной коррекции темпа дистракции они мало применимы (разве что для общей оценки замедленного остеогенеза, например, при остеопении).

Представленные доступные методы мониторинга позволяют получать количественные данные о состоянии регенерата без частого применения КТ. Оптимальным клиническим подходом представляется комбинация диагностических методов: регулярное выполнение цифровых рентгенограмм с последующей программной оценкой BMD по показателю PVR и/или ультразвуковой контроль степени васкуляризации — для текущего наблюдения за динамикой остеогенеза, а также эпизодическое определение BMD с помощью DEXA — для количественной оценки зрелости регенерата. Такой комплексный мониторинг позволяет врачу получить объективные данные. Если прирост плотности регенерата замедляется, васкуляризация в зоне удлинения оказывается недостаточной или регенерат визуализируется на снимке как гетерогенная, маломинерализованная структура с размытыми кортикальными границам, что служит основанием для снижения темпа дистракции и увеличения интервалов между активациями. Напротив, если наблюдается опережающее формирование плотного регенерата (высокие значения PVR, положительная динамика BMD, выраженный кровоток по данным УЗИ), то возможно осторожное увеличение темпа дистракции, что позволяет сократить общую продолжительность лечения без риска ухудшения качества кости. В реальности четкие протоколы персональной регулировки темпа только формируются, но фундамент для них — объективные данные о регенерате — уже доступен.

Влияние механических факторов (темп и режим дистракции)

Механические параметры самого процесса удлинения, прежде всего скорость (темп) и ритмичность активации аппарата, являются ключевыми факторами, определяющими успех остеогенеза. Концепция Г.А. Илизарова [1] о «напряженно-деформационном остеогенезе» гласит, что для стимуляции регенерации нужна постепенная и непрерывная нагрузка растяжением, но в определенных пределах. Выход за эти пределы ведет либо к отсутствию костеобразования, либо к преждевременному окостенению. Рассмотрим, как изменения темпа и режима дистракции влияют на костный регенерат.

Стандартный режим. Классически при ДО челюстей выдерживается латентный период 5—7 дней после остеотомии, затем активная дистракция со скоростью около 1 мм/сут, дробно (например, 2 подкрутки по 0,5 мм либо 4 раза по 0,25 мм). Именно такой режим признан обеспечивающим наилучшее сочетание остеогенеза и мягкотканной адаптации. При 1 мм/сут костный регенерат обычно формируется в виде мостиков из костной ткани, разделенных центральной зоной хряща и фиброзной ткани (которая впоследствии тоже оссифицируется). Срок консолидации (фиксации после окончания удлинения) для нижней челюсти варьирует, но часто составляет 6—8 нед либо более, в зависимости от величины удлинения. Если придерживаться стандартного темпа, риск развития осложнений (псевдоартроз, перелом регенерата) минимален, что подтверждено большим числом клинических наблюдений.

Ускоренная дистракция (>1 мм/сут). Повышение суточного шага дистракции исторически рассматривалось как опасное. Еще Г.А. Илизаров [1] установил, что при >1,5—2 мм/сут кость не успевает формироваться, в промежутке остается фиброзная ткань без достаточного оссифицирования. В обзоре по ДО отмечается, что увеличение скорости до 2 мм/сут приводит к несращению или очень слабому костному регенерату, а также к тяжелым нарушениям мягких тканей (контрактуры, повреждение нервов). Экстремально высокие скорости (>2,5 мм/сут) нарушают кровоснабжение регенерата: наблюдается угнетение ангиогенеза и, как следствие, почти полное отсутствие остеогенеза [4, 5]. Эти выводы подтверждены на животных моделях. Например, при удлинении нижней челюсти собаки с темпом 2 мм/сут через 5 дней (общий прирост 10 мм) в контрольной группе наблюдалась лишь фиброзная ткань без костных балок даже спустя несколько недель фиксации. Только дополнительные вмешательства (введение остеоиндуктивных материалов, таких как хитозан) позволили частично восстановить остеогенез. Таким образом, превышение суточного шага 1 мм/сут в традиционном режиме дистракции значительно повышает риск неудачи остеосинтеза.

Однако новейшие исследования пытаются пересмотреть этот порог, используя измененные режимы (ритмы) дистракции. Идея в том, что, если разбить увеличение длины на очень частые микроподкрутки (практически непрерывная дистракция), ткани адаптируются лучше, и, возможно, удастся повысить суммарную скорость. В эксперименте на мини-пигах применили автоматизированную непрерывную дистракцию с интенсивностью до 3 мм/сут, сравнив с непрерывной 1,5 мм/сут и классическим прерывистым режимом 1 мм/сут. Результаты показали, что по сравнению с прерывистыми режимами автоматический режим обеспечивал более высокую клиническую и радиографическую плотность регенерата, а также лучшую стабильность. Удивительно, но качество регенерата при 3 мм/сут (непрерывно) оказалось сопоставимо с качеством при более медленном режиме. Гистологически доля костной ткани в регенерате (почти 64%) не отличалась статистически значимо от группы 1,5 мм/сут или даже от стандартного контроля. Во всех группах сформировалось преобладание костной массы над фиброзом (63—65% кости против 34% фиброзной ткани), хотя до нормальной кости (85% костной ткани) регенерат все же не дотянул. Эти результаты показывают принципиальную возможность ускорения темпа дистракции без ухудшения остеогенеза, если осуществлять ее специальным образом (плавно, без больших разовых шагов).

В клинической практике ЧЛХ также есть случаи, когда приходилось идти на ускоренный темп — например, при тяжелой неонатальной микрогнатии для быстрого устранения обструкции дыхания могут применять темп 2 мм/сут в первые дни [25]. В подобных случаях после быстрой фазы удлинения обычно назначается продленная фаза фиксации, позволяющая регенерату компенсировать отставание в минерализации и достичь необходимого уровня зрелости к моменту снятия аппарата. Таким образом, увеличение темпа >1 мм/сут потенциально возможно у пациентов с хорошим регенератом, но требует очень внимательного мониторинга. Стандартом же по-прежнему остается 1 мм/сут, и ускорение применяется лишь экспериментально или по жизненным показаниям.

Замедленная дистракция (<1 мм/сут). Интуитивно может показаться, что более медленное растяжение должно благоприятствовать остеогенезу (давая больше времени на формирование кости). Однако на практике слишком малый темп приводит к тому, что регенерат окостеневает преждевременно, еще до достижения нужного удлинения. При скорости 0,5 мм/сут отмечали явления ранней консолидации регенерата. По сути, между отломками образуется прочная костная мозоль, дальнейшая дистракция которой становится затруднительной (требуется повторная остеотомия). Еще более низкие скорости (<0,3 мм/сут) не обеспечивают достаточного стимул-эффекта на остеогенез (натяжение недостаточно для активной регенерации). Поэтому замедление темпа <0,5—0,7 мм/сут обычно не практикуется, за исключением случаев, чрезмерно обильного регенерата и наличия риска его «закостенения» раньше времени. В таких ситуациях чаще делают паузу в дистракции (латентный период увеличивают), чем переходят на ультранизкий постоянный темп.

Ритм и кратность активации аппарата. Помимо общей скорости значение имеет количество и размер единичных шагов. Исследования показывают, что дробление суточной дистракции на более мелкие шаги улучшает исход. Например, 1 мм/сут можно выполнять раз в день сразу на 1 мм, либо 4 раза по 0,25 мм; во втором случае остеогенез идет успешнее, т.к. тканям легче адаптироваться к мелким приростам. Г.А. Илизаров [1] рекомендовал ⩾4 подкручивания в день. Современные аппараты могут реализовать и непрерывную подачу (постоянное микродвижение), что, как указано выше, смягчает стресс для тканей. В то же время слишком частые вмешательства неудобны для пациента (если вручную), оптимально — 2 — 4 раза в сутки.

Что касается латентного периода (выдержка после остеотомии перед началом тракции), его изменение тоже влияет: слишком короткий латентный период не дает сформироваться первоначальной грануляционной/фиброзной матрице, и остеогенез может замедлиться; слишком длинный приводит к избыточной костной мозоли и затрудняет начало дистракции. Обычно оптимальная продолжительность латентного периода при дистракции нижней челюсти составляет 5—7 сут. Однако при наличии признаков замедленного остеогенеза (слабый регенерат на рентгенограммах, низкий PVR, отсутствие васкуляризации по данным УЗИ) этот срок может быть продлен до 10—14 дней с целью формирования достаточной остеогенной зоны. Напротив, при наличии выраженного периостального ответа, ранних рентгенологических признаков минерализации и хороших регенераторных способностей пациента возможно начало фазы дистракции раньше стандартных сроков, что позволяет избежать преждевременной консолидации костных фрагментов.

Возможности персонализированного изменения темпа дистракции

Существует ли в настоящее время возможность динамически менять скорость удлинения нижней челюсти у конкретного пациента для оптимизации сроков созревание кости? Современные данные указывают, что адаптивная тактика вполне реальна: при хорошем костном регенерате темп дистракции можно повысить, чтобы сократить общий срок лечения, а при слабом регенерате — замедлить или приостановить удлинение, дав кости «догнать».

Важно понимать, что подобная персонализация не должна осуществляться вслепую — она опирается на объективные критерии состояния регенерата. Например, если по данным рентгенденситометрии и УЗИ видно, что минерализация отстает (низкий PVR, большая глубина проникновения ультразвука, слабый кровоток), то хирургу целесообразно снизить скорость или даже сделать паузу в дистракции. В практике ДО применяется «прием аккордеона» — чередование циклов сжатия и растяжения при замедленном остеогенезе. A. Makhdom и соавт. (2015) [5] описали 4 клинических случая отсутствующего или задержанного регенерата при удлинении конечностей, когда после остановки роста кости проводили серию небольших компрессий и редистракций («прием аккордеона»). В результате у 3 из 4 пациентов удалось заново «запустить» остеогенез и добиться успешного формирования костной ткани. Авторы отмечают, что «прием аккордеона» — безоперационный и безопасный способ стимулировать костеобразование при плохом регенерате, позволяющий избежать трансплантаций или других инвазивных мер. По сути временное замедление с небольшими реверсивными движениями создает дополнительный стимул для костной ткани.

В то же время при очень хорошем регенерате (например, у молодых пациентов с мощным остеогенным ответом) можно попробовать ускорить темп более 1 мм/сут. Моделирование с помощью компьютерных моделей свидетельствуют, что переменный поэтапный темп может улучшить исходы. Китайские исследователи (R. Fu и соавт., 2021 [4]) протестировали в компьютерной симуляции стратегию сначала медленно, потом быстро — т.е. в первые несколько дней дистракция идет медленным темпом, затем повышается. Их модель показала, что такой переменно-высокий темп создает более благоприятные условия для васкуляризации и дифференцировки тканей, в итоге время формирования костных перемычек сокращается, а объем новой кости увеличивается по сравнению с таковым при равномерном медленном режиме.

Этот вывод согласуется с биологической логикой: в начале важно не «оторваться» от способности тканей генерировать сосуды и остеобласты, поэтому темп умеренный, но как только базис остеогенеза заложен, ускорение может быстрее достроить нужный объем кости. Таким образом, адаптивное ускорение в середине процесса — перспективная идея.

В клинике реализация может выглядеть следующим образом: начать стандартно (1 мм/сут), через 2—3 нед оценить регенерат (например, по КТ или плотности на рентгенограмме); если появились выраженные костные балки, увеличить темп до 1,5 мм/сут на оставшийся период. Конечно, это требует осторожности и готовности в любой момент вернуться на меньший темп при признаках ухудшения.

Техническим ограничением персонализации темпа традиционно была сложность изменения режима аппарата. Но современные дистракторы (особенно в ЧЛХ) становятся все более усовершенствованными, так как имеются системы с моторизованным приводом, дистанционным управлением, что облегчает вариацию скорости. В перспективе возможно создание автоматической системы, которая по показателям датчиков (например, тех же УЗИ или встроенных тензодатчиков жесткости) будет сама корректировать скорость подкрутки ежедневно.

Заключение

Персонализация темпа дистракции нижней челюсти — достижимая цель, опирающаяся на следующие положения:

- понимание биологии остеогенеза (границы допустимых скоростей: 0,5—1,5 мм/сут для дискретной дистракции; зон риска, в которых нужно быть особенно аккуратным — смещения диапазона скорости могут приводить к фиброзу или преждевременному окостенению);
- объективный мониторинг созревания регенерата (цифровые рентген-снимки, двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия, ультразвуковое исследование и др., позволяющие количественно отслеживать минеральную плотность, васкуляризацию и структуру новообразованной кости в динамике);
- гибкую тактику врача (умение интерпретировать данные мониторинга и при необходимости менять протокол — замедлять, делать паузу с компрессией — «прием аккордеона» либо ускорять дистракцию, не доводя до осложнений).

Показано, что физиотерапевтические воздействия могут ускорить созревание кости (ультразвук, лазер, магнит — сокращают период консолидации на десятки процентов), однако и без них грамотное изменение механического режима позволяет существенно повлиять на исход. Последние исследования в разных странах (Россия, Китай, страны Европы и Америки) посвящены разработке критериев для такого персонализированного управления дистракционным остеогенезом. Представляется, что ближайшее будущее за интеграцией непрерывного мониторинга реге-

нерата и роботизированных дистракторов, что позволит максимально сократить сроки лечения без потери качества кости. В то же время уже сейчас клиницист, опираясь на доступные методы контроля, может индивидуализировать темп дистракции: ускорять более 1 мм/сут при уверенно созревающем регенерате (учитывая риски) либо замедлять/останавливать при признаках задержки остеогенеза, дополняя лечение стимуляцией остеогенеза. Такой подход повышает шансы на успешное формирование крепкой новой кости в оптимальные сроки.

В целом применение ультразвука и лазера показало ускорение минерализации регенерата, магнитные и электрические стимулы также ускоряют остеогенез, но требуют дальнейших клинических подтверждений. Все методы неинвазивны и могут применяться дополнительно к базовой терапии дистракционный остеогенез.

На практике обычно сочетают несколько методов. Например, рентгенографию — для базового контроля, дополняя ее количественным анализом (PVR); ультразвуковое исследование — для динамики васкуляризации и раннего обнаружения проблем; и один из методов оценки плотности (двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия или, при необходимости, разовая компьютерная томография) — для принятия итогового решения о нагрузке. Такой комплекс обеспечивает частый и объективный мониторинг без чрезмерного облучения пациента.

Дискретный режим — обычные ручные подкрутки с определенным шагом; непрерывный — аппарат подает движение постоянно, микродвижениями. Вывод: безопасным диапазоном для ручной дистракции считается 0,7 —1,25 мм/сут. Выход за эти пределы требует специальных мер: замедление <0,5 мм/сут чревато необходимостью остановок («прием аккордеона») из-за раннего окостенения; ускорение >1,5 мм/сут допустимо только при условии очень частых микроподкруток или непрерывного режима, и то в экспериментальных условиях. Без таких условий превышение 2 мм/сут почти гарантированно ведет к неуспеху остеосинтеза.

Авторы заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interests.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Ilizarov GA. The tension-stress effect on the genesis and growth of tissues. Part II. The influence of the rate and frequency of distraction. *Clin Orthopaed Related Res*. 1989;239:263-285.
2. Aronson J. Bone biology. Part II: Reparation and regeneration in distraction osteogenesis. *Clin Orthopaed Related Res*. 1997;343:135-143 https://doi.org/10.1097/00003086-199706000-00017
3. Peacock ZS, Tricomi BJ, Murphy BA, Magill JC, Kaban LB, Troulis MJ. Automated continuous distraction osteogenesis may allow faster distraction rates: a preliminary study. *J Oral Maxillofac Surg*. 2013;71(6):1073-1084. https://doi.org/10.1016/j.joms.2012.11.015
4. Fu R, Feng Y, Bertrand D, Du T, Liu Y, Willie BM, Yang H. Enhancing the efficiency of distraction osteogenesis through rate-varying distraction: a computational study. *Int J Mol Scie*. 2021;22(21):11734. https://doi.org/10.3390/ijms222111734
5. Makhdom AM, Landao-Bassonga E, Morris SF, Yoshida K, Hamdy RC. The accordion maneuver: a nonsurgical strategy for distraction osteogenesis — associated limb lengthening complications. *Advanc Orthoped*. 2015;2015: 807648. https://doi.org/10.1155/2015/807648
6. Bafor A, Patil S, Daniele L, Wright J, Hosalkar HS. Pixel value ratio as a predictor of time to full weight-bearing in distraction osteogenesis. *Strategies Trauma Limb Reconstruct*. 2020;15(2):74-78. https://doi.org/10.5005/jp-journals-10080-1509
7. Wallace ME, Green DP, Emara KM, Carey TP. Dual-energy X-ray absorptiometry prediction of fixator removal in pediatric limb lengthening. *J Pediatr Orthopaed B*. 2008;17(3):130-136. https://doi.org/10.1097/BPB.0b013e3282feb05f
8. Glowacki J, Shusterman EM, Troulis MJ, Holmes R, Perrott D, Kaban LB. Correlation of biomechanical stiffness with plain radiographic and ultrasound bone fill scores in an experimental mandibular distraction wound. *J Oral MaxillofacSurg*. 2004;62(5):589-596. https://doi.org/10.1016/j.joms.2004.01.009
9. Harrison A, Alt V. Low-intensity pulsed ultrasound (LIPUS) for stimulation of bone healing — a narrative review. *Injury*. 2021;52(Suppl. 2):91-96. https://doi.org/10.1016/j.injury.2021.05.002
10. Ding Y, Li G, Zhang X, Hu Y, Zou X. Effect of low-intensity pulsed ultrasound on bone formation during mandible distraction osteogenesis in a canine model: a preliminary study. *J Oral Maxillofac Surg*. 2009;67(11):2431-2439. https://doi.org/10.1016/j.joms.2009.05.441
11. Lü H, Yang Y, Zeng C, Huang J, Wang C. [Effect of low-intensity pulsed ultrasound stimulation on maturation of regenerate bone]. *Zhong Nan Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban*. 2009;34(10):984-990. https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7347.2009.10.008
12. Xie LK, Wangrangsimakul K, Suttapreyasri S, Cheung LK, Nuntanaranont T. A preliminary study of the effect of low-intensity pulsed ultrasound on new bone formation during mandibular distraction osteogenesis in rabbits. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2011;40(7):730-736. https://doi.org/10.1016/j.ijom.2011.03.016
13. Dudda M, Hauser J, Muhr G, Esenwein SA. Low-intensity pulsed ultrasound as a useful adjuvant during distraction osteogenesis: a prospective, randomized controlled trial. *J Trauma*. 2011;71(5):1376-1380. https://doi.org/10.1097/TA.0b013e31821912b2
14. Kocyigit ID, Coskunses FM, Pala E, Tugcu F, Onder E, Mocan A. A comparison of the low-level laser versus low-intensity pulsed ultrasound on new bone formed through distraction osteogenesis. *Photomed Laser Surg*. 2012; 30(8):438-443. https://doi.org/10.1089/pho.2012.3263
15. Andrade LEG do Nascimento, Sant'Anna EF, Carlos de Oliveira Ruellas A, Nojima LI, Gonçalves Filho AC, Pereira SAF. Laser versus ultrasound on bone density recuperation after distraction osteogenesis: a cone-beam computed tomographic analysis. *J Oral Maxillofac Surg*. 2013;71(5):921-928. https://doi.org/10.1016/j.joms.2012.11.010
16. Medeiros MAB, Nascimento LEAG, Lau TCL, Mineiro ALBB, Pithon MM, Sant'Anna EF. Effects of laser vs ultrasound on bone healing after distraction osteogenesis: a histomorphometric analysis. *Angle Orthodontist*. 2015; 85(4):555-561. https://doi.org/10.2319/061414-431.1
17. Varani K, Vincenzi F, Pasquini S, Blo I, Salati S, Cadossi M, De Mattei M. Pulsed electromagnetic field stimulation in osteogenesis and chondrogenesis: signaling pathways and therapeutic implications. *Int J Mol Scie*. 2021; 22(2):809. https://doi.org/10.3390/ijms22020809
18. Kolbeck S, Bail H, Weiler A, Windhagen H, Haas N, Raschke M. Digital radiography: a predictor of regenerate bone stiffness in distraction osteogenesis. *Clin Orthopaed Related Res*. 1999;(366):221—228. https://doi.org/10.1097/00003086-199909000-00031
19. Liu Q, Liu Z, Guo H, Liang J , Zhang Y. The progress in quantitative evaluation of callus during distraction osteogenesis (Review). *BMC Musculoskeletal Dis*. 2022;23(1):490. https://doi.org/10.1186/s12891-022-05458-8
20. Song SH, Hou XH, Zhen P, Wu J, Zhang Y. Serial bone mineral density ratio measurement for fixator removal in distraction osteogenesis (canine femur model). *BMC Veterinary Res*. 2017;13(1):130. https://doi.org/10.1186/s12917-017-1048-0
21. Reiter A, Götze B, Schwinger P, Raible A, Wolf S, Forst R. Monitoring bone healing during distraction osteogenesis by dual-energy X-ray absorptiometry. *J Pediatr Orthopaed B*. 1996;5(2):130-135.

22. Abu-Serriah M, McGowan DA, Moos KF, Ayoub AF. The role of ultrasound in distraction osteogenesis of the mandible. *Br J Oral Maxillofac Surg*. 2003;41(1):7-12. https://doi.org/10.1016/S0266-4356(02)00211-4

23. Andrade N, Dixon J, Morrison A, Fleming P. Ultrasound versus radiography for assessment of bone regenerate in mandibular distraction osteogenesis. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2010;39(12):1211-1216. https://doi.org/10.1016/j.ijom.2010.09.007

24. Dwyer AF, Simpson SL, Wood MB. The use of DEXA and stiffness for predicting weight-bearing in distraction osteogenesis. *Clin Orthopaed Related Res*. 1996;327:269-275. https://doi.org/10.1097/00003086-199606000-00033

25. Breik O, Cheng AT, Samman N. The effect of rapid distraction on osteogenesis: an experimental study in rabbits. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2016;45(11):1410-1417. https://doi.org/10.1016/j.ijom.2016.06.019

Поступила 06.03.2025
Received 06.03.2025
Принята 28.04.2025
Accepted 28.04.2025