

ОРТОДОНТИЧЕСКОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЗУБОВ: ИСТОРИЯ ПОНИМАНИЯ И ТЕОРИИ МЕХАНИЗМА

Игорь Узун,
Лучия Аворник,
Валентина Трифан,
Георгий Михайлович,
Игорь Чумейко

*Universitatea de Stat de Medicină și Farmacie
„Nicolae Testemițanu“*

Резюме

В данном исследовании был проведен обзор специальной литературы с целью изучения основных гипотез и теорий, объясняющих механизм ортодонтического перемещения зубов. На протяжении долгого времени люди делали попытки объяснить характер биологического процесса, ответственного за возможность искусственного смещения зубов. Параллельно с развитием способов лабораторного исследования для научного сообщества открывалось все больше особенностей реакции околозубных тканей на экзогенные механические стимулы. Это, в свою очередь, приводило к образованию большого количества теорий и гипотез, объясняющих механизм ортодонтического перемещения зубов. Несмотря на то, что в настоящее время нам стало известно большое количество информации, касающейся биологических процессов, происходящих во время воздействия ортодонтических аппаратов, никто до сих пор не может описать точный механизм, запускающий эти процессы. Современные исследования сосредоточены на нескольких актуальных морфо-биологических теориях ортодонтического перемещения зубов, что говорит о наличии познавательного интереса ортодонтотв к этой теме.

Ключевые слова: *механизм ортодонтического перемещения зубов, теории ортодонтического перемещения зубов, биологический аспект.*

Введение

До настоящего времени было выдвинуто много гипотез относительно процессов, происходящих в тканях пародонта во время ортодонтического лечения, а также сформировано большое

ORTHODONTIC TOOTH MOVEMENT: THEORIES AND THE HISTORY OF UNDERSTANDING

Igor Uzun,
Lucia Avornic,
Valentina Trifan,
Gheorghe Mihailovici,
Igor Ciumeico

*Universitatea de Stat de Medicină și Farmacie
„Nicolae Testemițanu“*

Summary

In this study, a literature review was conducted to examine the main hypotheses and theories explaining the mechanism of orthodontic tooth movement. For a long period of time, people have made attempts to explain the nature of the biological process responsible for possibility of artificial tooth displacement. Along with the development of methods of laboratory investigation, more and more facts about the periodontal tissues' response to exogenous mechanical stimuli have been revealed to the scientific community. This, in turn, led to the formation of many theories and hypotheses to explain the mechanism of orthodontic tooth movement. Although a wealth of information concerning the biological processes occurring during exposure to orthodontic appliances is now known, no one is yet able to describe the exact mechanism that triggers these processes. Current studies focus on several morpho-biological theories of orthodontic tooth movement, which indicates that there is a cognitive interest in this topic among orthodontists.

Key words: *orthodontic tooth movement, theories of orthodontic tooth movement, biological aspect.*

Introduction

Up until now, many hypotheses regarding the processes occurring in the periodontal tissues during orthodontic treatment have been proposed and a large number of theories of the mechanism of orthodontic tooth movement have been created.

The gradual emergence of new research methods (histological, radiological, etc.) has contributed to a new level of understanding of the biological processes that take place during orthodontic treatment.

количество теорий механизма ортодонтического перемещения зубов.

Постепенное появление новых способов исследования (гистологическое, рентгенологическое и др.) способствовало выведению понимания биологических процессов, происходящих во время ортодонтического лечения, на новый уровень.

Многие из выдвинутых ранее предположений были раскритикованы и упразднены. Другие, с вою очередь, удалось не только подтвердить, но и раскрыть, дополняя новыми данными.

Тем не менее, до сих пор в литературе нет однозначного ответа на один из важнейших вопросов: какой механизм обеспечивает преобразование экзогенной механической нагрузки в стимул, способный вызвать такой сложный и многообразный биологический ответ околозубных тканей.

Цель исследования:

Теоретическая оценка основных гипотез и теорий, объясняющих механизм ортодонтического перемещения зубов.

Задачи исследования:

1) ретроспективный анализ специальной литературы, касающейся развития понимания механизма ортодонтического перемещения зубов, акцентируя внимание на важнейших открытиях в этой области.

2) освещение наиболее значимых теорий механизма перемещения зубов во время ортодонтического лечения.

Методология отбора источников литературы

Источники:

В рамках данного исследования была использована информация из статей, учебников и веб-страниц на английском, русском и румынском языке, найденных в электронных источниках. Для изучения информации использовалось только оригинальное содержание статей без перевода. В качестве базы данных были использованы платформы, содержащие медицинские статьи и удовлетворяющие критериям поиска:

- PubMed
- ScienceDirect
- Reserch4Life
- Oxford Academic

Критерии поиска:

При использовании каждого сайта электронной базы данных применялись следующие фильтры:

- тип текста (full-text)
- тип статьи (мета-анализ, систематический обзор, оригинальное исследование)
- язык (английский)

Ключевые слова:

Ключевые слова, с помощью которых нам удалось найти необходимые статьи были следую-

Many of the earlier assumptions have been criticised and abolished. Others, in turn, have not only been confirmed, but also uncovered and further extended.

Nevertheless, there is still no clear answer in the literature to one of the most important questions: what mechanism ensures the conversion of exogenous mechanical loading into a stimulus capable of inducing such a complex and diverse biological response of the periodontal tissues.

The aim of the study:

A theoretical evaluation of the main hypotheses and theories explaining the mechanism of orthodontic tooth movement.

Research objectives:

1) A retrospective analysis of the specialized literature concerning the development of the understanding of the mechanism of orthodontic tooth movement, focusing on the most important discoveries in this field.

2) To highlight the most significant theories of tooth movement mechanism during orthodontic treatment.

Methodology for selection of literature sources

Sources:

Information from articles, textbooks and web pages in English, Russian and Romanian found in electronic sources was used in this study. Only the original content of the articles without translation was used. Platforms containing medical articles and meeting the search criteria were used as a database:

- PubMed
- ScienceDirect
- Reserch4Life
- Oxford Academic

Search criteria:

The following filters were applied to each electronic database site:

- type of text (full-text)
- type of article (meta-analysis, systematic review, original study)
- language (English)

Keywords:

The keywords with which we were able to find the required articles were: tooth movement, orthodontics, biological tooth movement, pressure-tension theory, bone-bending theory, bioelectricity, biological electricity, history of orthodontics.

Exclusion criteria:

Articles that contained the terms 'Drugs', 'Medication', 'Orthodontic appliances', and 'Orthodontic techniques' were excluded because this study was conducted to assess the development of an understanding of the mechanism of orthodontic treatment, but not the methods of that treatment or the effects of medication on it.

шие: tooth movement, orthodontics, biological tooth movement, pressure-tension theory, bone-bending theory, bioelectricity, biological electricity, history of orthodontics.

Критерии исключения:

Были исключены статьи, которые содержали термины “Drugs”, “Medication”, “Orthodontic appliances”, “Orthodontic techniques” по причине того, что данное исследование было проведено для оценки развития понимания механизма ортодонтического лечения, но не методов этого лечения и не влияния на него лекарственных препаратов.

Из 17 отобранных статей 14 предоставлялись бесплатно в полном доступе, доступ к полному тексту 3-х платных статей был получен с помощью электронного ключа, предоставленного сотрудниками научной медицинской библиотеки ГУМФ „Nicolae Testemițanu“.

Развитие понимания механизма ортодонтического перемещения зубов

Перемещение зубов под действием механической силы известно еще с древних времен.

Так, Авл Цельс (Aulus Celsus), живший в период 25 лет до н. э. — 50 лет н. э., говорил о том, что “при необходимости переместить постоянный зуб, пациент должен с помощью пальца прикладывать к зубу силу в нужном направлении в течение долгого времени до тех пор, пока зуб не займет правильное положение” [9].

Тем не менее, никто в то время не мог объяснить, почему и как это происходит.

Дантист 19 века Норман Кингсли (1825—1896 гг.) говорил: “Кость может быть растворена или воссоздана под влиянием внешних факторов. Перемещенный зуб создает давление, растворяющее кость” [9]. Такое предположение представляло собой одну из первых правдоподобных попыток объяснения механизма перемещения зубов.

Интерес к биологическим процессам, происходящим во время искусственного перемещения зубов с тех пор, не угасал. Появление лабораторных методов визуализации микроструктур околозубных тканей помогло научному сообществу быстрее продвинуться в данном направлении.

Важнейшими из таких методов являются световая микроскопия, электронная микроскопия, клеточное культивирование *in vitro*, радиография [18].

Для исследования начала 20 века характерно в основном стремление анализировать гистологические изменения в околозубных тканях после перемещения зуба.

Эти исследования описывали разнообразную клеточную активность в периодонте, подвергшемуся механической нагрузке, включая деятельность фибробластов, эндотелиоцитов, остеобластов и остеоцитов [12].

Of the 17 selected articles, 14 were available free of charge in full access, while access to the full text of 3 for-pay articles was obtained with an electronic key provided by the staff of the Medical Scientific Library IP USMF „Nicolae Testemițanu“.

Developing an understanding of the mechanism of orthodontic tooth movement

The movement of teeth through mechanical force has been known since ancient times.

For instance, Aulus Celsus, who lived between 25 BC and 50 AD, said that „if there is a need to move a permanent tooth, the patient should use his finger to push it in the right direction for a long time until the tooth reaches the correct position“ [9].

However, no one back then could explain why or how this happens.

The 19th century dentist Norman Kingsley (1825—1896) said, „Bone can be dissolved or re-constructed by external influences. A moved tooth creates a pressure that dissolves the bone“ [9]. This assumption represented one of the first plausible attempts to explain the mechanism of tooth movement.

Interest in the biological processes that occur during mechanically induced tooth movement has not waned since then. The advent of laboratory methods to visualise the microstructures of the periodontal tissues has helped the scientific community to move faster in this direction.

The most important of these methods were light microscopy, electron microscopy, *in vitro* cell cultivation, and radiography [18].

Research at the beginning of the 20th century was mainly characterised by a desire to analyse histological changes in the tissues surrounding the tooth after a tooth movement.

These studies described a variety of cellular activities in the periodontium subjected to mechanical stress, including activities of fibroblasts, endothelial cells, osteoblasts and osteocytes [12].

In 1904 — 1905 the scientist Carl Sandstedt was able to demonstrate convincingly that movement of the tooth is caused by processes of bone resorption and opposition [18].

In addition, mechanical stress was found to modify the structural properties of periodontal tissues at the cellular, molecular and genetic levels [12].

The nature of these changes was not yet clear for that time, but nowadays the current literature is already full of data on both molecular and genetic levels of cellular response to orthodontic treatment [1,16,18].

Referring to the results of his own histological and radiological studies of the alveolar bone of a re-positioned tooth Sandstedt wrote that „the (alveolar) wall apparently moves“ due to processes of bone opposition on one side of the wall, which is compensated by bone resorption on the opposite side and vice versa [16].

In the 1950s, Reitan extended the world’s under-

В 1904 — 1905 году ученый Carl Sandstedt сумел убедительно продемонстрировать, что перемещение зуба обусловлено процессами костной резорбции и оппозиции [18].

Кроме этого, было обнаружено, что механический стресс приводит к изменению структурных свойств тканей периодонта на клеточном, молекулярном и генетическом уровнях [12].

Характер этих изменений для того времени был еще неясен, но в настоящее время современная литература уже полна данными как о молекулярном, так и генетическом уровне клеточного ответа на ортодонтическое лечение [1,16,18].

Ссылаясь на результаты собственных гистологических и радиологических исследований кости альвеолы перемещаемого зуба Sandstedt писал, что “стенка (альвеолы) видимо движется” благодаря процессам оппозиции кости с одной стороны стенки, которая компенсируется резорбцией кости с противоположной стороны и наоборот [16].

В 1950-е годы Reitan с помощью гистоморфометрического исследования тканей человека расширил представления мирового сообщества о ортодонтическом перемещении зубов, освещая ответ околозубных тканей, который зависит от величины силы, типа перемещения зуба и индивидуальных особенностей организма [6].

С началом активного использования радиологии в 1960-х годах впервые возникли описания того, как под действием механической нагрузки ткани периодонта действовали как “вязкоэластический гель”, который “упруго отталкивает” (bounces) кратковременные силы, но выдавливается из периодонтального пространства в случае действия продолжительной силы [16].

Одновременно в 1960—1970 годы внимание ученых привлекла теория “сжатия” кости (Bone-bending theory) при ортодонтическом перемещении зубов и метаболические процессы, к которым это сжатие приводило [16].

Для 1970-х годов характерно активное изучение молекулярных процессов перемещения зубов, которое помогло ученым прийти к однозначному выводу о том, что ортодонтические нагрузки на зубы стимулируют клеточную активность и молекулярную активность околозубных тканей, которая в свою очередь модулирует активность специфических клеток, ответственных за изменение положения зуба в пределах гидродинамического пространства периодонта и альвеолярной кости.

Такое открытие привело к появлению и развитию новой теории, объясняющей перемещение зубов — теории “давления-натяжения” [6, 16], которая до сих пор является самой популярной.

В 1991 в статье “Tooth Movement” Davidovitch Z. провел критический анализ эволюции концепта биологических основ ортодонтического перемещения зубов и подробно описал большинство

standing of orthodontic tooth movement by illuminating the response of the periodontal tissues, which depends on the magnitude of the force, the type of tooth movement and the individual characteristics of the body [6].

With the beginning of the active use of radiography in the 1960s, descriptions of how the periodontal tissues acted as a „viscoelastic gel“, which „bounces“ short-term forces, but squeezes out of the periodontal space when subjected to prolonged force, first emerged [16].

In 1960—1970, the Bone-bending theory in orthodontic tooth repositioning, and the metabolic processes resulting from it, also attracted scientific attention [16].

The 1970s were characterised by an active study of the molecular processes of tooth movement, which helped scientists to reach the clear conclusion that orthodontic loads on the teeth stimulated the cellular activity and the molecular activity of the periodontal tissues, which in turn modulated the activity of specific cells responsible for changing the position of the tooth within the hydrodynamic space of the periodontium and the alveolar bone.

This discovery led to the emergence and development of a new theory to explain tooth movement, the „Pressure-tension theory“ [6,16], which is still the most popular theory.

In 1991, Davidovitch Z. performed a critical analysis of the evolution of the concept of the biological basis of orthodontic tooth movement in his article „Tooth Movement“ and described in detail most of the known mechanical and biological processes known at the time [18].

Davidovitch Z. analysed 287 sources of literature to create his article.

The most important results of the study included the following:

- The two most important hypotheses of the 20th century which explain tooth movement include the „Bone bending theory“ and the „Pressure-tension“ theory. Modern histological studies have confirmed the occurrence of both processes simultaneously;
- The effects of the processes of bone bending and tension-pressure of the PDL lead to a biological response in the cells and non-cellular components of the periodontium and alveolar bone, which eventually leads to bone remodelling;
- In vitro studies of cell cultures have demonstrated that alterations in cell shape can lead to cell activation through the opening of cell membrane ion channels or crystallization of cytoskeleton filaments. At the same time, mechanical alteration of collagen structures, both mineralized (alveolar bone) and non-mineralized (periodontium), can lead to a bioelectrical phenomenon.
- Isolated human periodontal cells produce a biochemical response to exogenous chemical and mechanical stimuli.

известных механических и биологических процессов, известных на тот период [18].

Для создания своей статьи Davidovitch Z. проанализировал 287 источников литературы.

Важнейшие результаты исследования включали следующее:

- Две важнейшие гипотезы 20 века, объясняющие перемещение зубов, включают теорию “сжатия кости” и теорию “давления-натяжения”. Современные статьи гистологические исследования подтвердили, возникновение обоих процессов одновременно;
- Следствием процессов сжатия кости и давления-натяжения связок приводит к биологическому ответу со стороны клеток и неклеточных компонентов периодонта и альвеолярной кости, который в конечном результате приводит к ремоделированию кости;
- Исследования клеточных культур *in vitro* продемонстрировали, что изменение формы клеток может привести к их активации посредством открытия ионных каналов мембраны клеток или кристаллизации филаментов цитоскелета. В то же время, механическое изменение коллагеновых структур, как минерализованных (альвеолярной кости), так и неминерализованных (периодонта), может приводить к возникновению биоэлектрического феномена.
- Изолированные периодонтальные клетки человека дают биохимический ответ на экзогенные химические и механические стимулы.
- Гистологические и иммуногистохимические исследования доказали перемещение периодонтальной жидкости во время перемещения зуба
- Вазоактивные нейротрансмиттеры высвобождаются из нервных окончаний периодонта, что приводит к миграции лейкоцитов из местных капилляров. Лейкоциты в свою очередь высвобождают ряд цитокинов и факторов роста, которые стимулируют активность клеток периодонта и альвеолярной кости, запуская процесс ремоделирования костной ткани.
- Ремоделирующая активность способствуют перемещению зуба в направлении участка резорбции кости [6].

Таким образом, Davidovitch привел мировое сообщество к фундаментальному выводу о том, что биологический ответ на ортодонтическое перемещение зубов включает активность нервной, иммунной и эндокринной системы и указал на важность дальнейшего изучения всех деталей возникающих клеточных и биохимических процессов [6].

Лучшее понимание биологических основ перемещения зубов, по мнению Davidovitch, должно привести к более предсказуемому результату ортодонтического лечения [6].

- Histological and immunohistochemical studies have proven periodontal fluid movement during tooth movement
- Vasoactive neurotransmitters are released from the nerve endings of the periodontium leading to the migration of leukocytes from the local capillaries. Leukocytes in turn release a number of cytokines and growth factors that stimulate periodontal and alveolar bone cell activity, triggering the process of bone remodeling.
- Remodeling activity promotes the movement of the tooth towards the bone resorption site [6].

Davidovitch has thus led the world community to the fundamental conclusion that the biological response to orthodontic tooth repositioning involves nervous, immune and endocrine system activity and pointed out the importance of further studying all the details of the cellular and biochemical processes involved [6].

A better understanding of the biological basis of tooth repositioning, according to Davidovitch, should lead to a more predictable outcome of orthodontic treatment [6].

At the beginning of the 21st century, Krishnan and Davidovitch [12, 13] further expanded their understanding of the process of orthodontic tooth moving, while separately highlighting the reactions occurring in the hard, soft periodontal tissues as well as in the local nerve and vascular network.

In their articles, the authors described the known information about the signalling mechanism in response to mechanical stress: mechanosensing, transduction and cellular responses.

The authors also described the different components of the interconnected biological response chain between cells and extracellular matrix (ECM) in an organised sequence, highlighting the relationship between it and the results of clinical observations [13].

Theories of orthodontic tooth movement

There is enough information in the literature about the morphological and biochemical reactions of the periodontal tissue to the mechanically induced tooth movement.

Currently, most scientists agree that the primary mechanism of orthodontic tooth movement is the processes of bone resorption and bone apposition.

By the correct application of orthodontic forces, the dentist stimulates the molecular and cellular response of the body in such a way that it in turn promotes optimal progression of both resorption and apposition.

Nevertheless, there is still no clear answer in the literature to one of the most important questions: what mechanism ensures the conversion of an exogenous mechanical load into a stimulus capable of inducing such a complex and diverse biological response of the periodontal tissues.

Numerous authors have put forward their hypotheses on the mechanism of tooth movement dur-

В начале 21 века Krishnan и Davidovitch [12, 13] еще больше расширили представления о процессе ортодонтического перемещения зубов, при этом отдельно освещая реакции, происходящие в твердых, мягких околозубных тканях, а также в местной нервной и сосудистой сети.

В своих статьях авторы описали известную информацию о сигнальном механизме в ответ на механическую нагрузку: механовосприятие (mechanosensing), трансдукция (transduction), клеточный ответ (cellular responses).

Авторы также описали различные компоненты взаимосвязанной цепи биологического ответа между клетками и межклеточным веществом (extracellular matrix (ECM)) в организованной последовательности, освещая связь между ним и результатов клинических наблюдений [13].

Теории механизма перемещения зубов под воздействием ортодонтических сил

В специальной литературе достаточно информации о морфологических и биохимических реакциях околозубных тканей на искусственное перемещение зубов.

На настоящий момент большинство ученых сходятся в одном — первостепенным механизмом ортодонтического перемещения зубов являются процессы костной резорбции и оппозиции.

При правильном применении ортодонтических сил врач стимулирует молекулярный и клеточный ответ организма таким образом, чтобы он в свою очередь способствовал оптимальному протеканию как резорбции, так и оппозиции.

Тем не менее, до сих пор в литературе нет однозначного ответа на один из важнейших вопросов: какой механизм обеспечивает преобразование экзогенной механической нагрузки в стимул, способный вызвать такой сложный и многообразный биологический ответ околозубных тканей.

Множество авторов выдвигало свои гипотезы механизма перемещения зубов при ортодонтическом лечении.

Большая часть из них сразу подвергалась критике и признавалась учеными и клиницистами несостоятельной, что в свою очередь помогало исследователем искать новые пути объяснения этого биологического процесса.

Из всего многообразия теорий механизма перемещения зубов во время ортодонтического лечения большинство авторов сходятся во мнении, что наиболее значимыми являются три:

- (1) Теория напряжения кости (син. Bone-Bending theory, Farrar theory)
- (2) Теория биологических токов (син. Biological Electricity Theory, биоэлектрическая теория)
- (3) Теория давления-натяжения (син. Pressure-Tension Theory, Oppenheim theory)

Хотя каждая из этих теорий регулярно крити-

куется ортодонтическим лечением.

Most of them were immediately criticised and considered untenable by scientists and clinicians. This in turn helped researchers look for new ways to explain this unique biological process.

Out of the variety of theories of the mechanism of tooth movement during orthodontic treatment, most authors agree that three are the most significant:

- (1) Bone-Bending theory (syn. Farrar theory)
- (2) Biological Electricity Theory (syn. Bio-electric theory)
- (3) Pressure-Tension Theory (syn. Oppenheim theory)

Although each of these theories had been criticised in present-day articles, no study can completely disprove any of them. Nevertheless, a review of the literature indicates a prevailing tendency for researchers to favour the latter theory.

Bone-bending theory (syn. Farrar theory)

Farrar (1888) was the first to suggest that the bending of the alveolar bone was of paramount importance in orthodontic treatment [12, 15].

According to his theory, the orthodontic force applied to the tooth extends simultaneously to all surrounding tissues, namely the tooth itself, the bone and the periodontal ligament.

Since the bone has more elasticity than the other periosteal tissues, it is the first and most to bend [12, 15].

Bone bending, in turn, leads to active remodeling of the alveolar bone and renewal of the cellular and mineral components of bone and periodontium. These processes are greatly accelerated as the bone remains in the bent state [12, 15].

This hypothesis was later confirmed by Baumrind in his paper „A reconsideration of the property of the pressure tension hypothesis“ in laboratory experiments on rats and by Grimm in his original article „Bone-bending, a feature of orthodontic tooth movement“ [9].

The same authors later also pointed out that „not only the lamina dura but also the surface of each of the cancellous bone trabeculae is reorganised.

The orthodontic force, by bending the bone, spreads along the bone in the form of stress lines, and is the factor that stimulates the biological response of the cells lying perpendicular to these lines [12].

The cellular response, in turn, leads to changes in bone shape and internal organization, representing an adaptation mechanism to exogenous (orthodontic) forces [12].

This theory has many supporters in the scientific world, because it can be used to explain some of the known facts about orthodontic tooth movement, such as [12]:

- 1) a relative delay in the rate of orthodontic tooth movement while attempting to move a large group of teeth, which obviously requires bending a larger volume of bone.

куется в новых статьях, ни одно исследование не может полностью опровергнуть любую из них. Тем не менее, проведенный анализ литературы указывает на преобладающую склонность исследователей к последней теории.

Теория напряжения кости (син. Bone-Bending theory, Farrar theory)

Farrar (1888) первым предположил, что сгибание альвеолярной кости играет первостепенное значение в ортодонтическом лечении [12, 15].

Согласно его теории, ортодонтическая сила, приложенная к зубу, распространяется одновременно на все близлежащие ткани, а именно — на сам зуб, кость и связки периодонта.

Так как кость обладает большей эластичностью, чем другие околозубные ткани, она сгибается в первую очередь и больше всего [12, 15].

Сгибание кости, в свою очередь, приводит к активной перестройке альвеолярной кости и обновлению клеточных и неорганических компонентов кости и периодонта. Эти процессы значительно ускоряются по мере того, как кость остается в согнутом состоянии [12, 15].

Данную гипотезу позже подтвердил Baumrind с помощью лабораторных экспериментов над крысами в статье “A reconsideration of the property of the pressure tension hypothesis” и Grimm — в оригинальной статье “Bone-bending, a feature of orthodontic tooth movement” [9].

Те же авторы позже отмечали, что “реорганизация происходит не только на кортикальной костной пластинке, но также на поверхности каждой трабекулы губчатого вещества кости”.

Ортодонтическая сила, сгибая кость, распространяется по ней в виде линий напряжения, и является фактором, который стимулирует биологический ответ клеток, располагающихся перпендикулярно к этим линиям [12].

Клеточный ответ, в свою очередь, приводит к изменениям формы и внутренней организации кости, представляя собой механизм адаптации воздействию на него к экзогенным силам (ортодонтическим) [12].

Эта теория имеет много сторонников в научном мире по причине того, что с помощью нее можно объяснить некоторые известные факты об ортодонтическом перемещении зубов [12]:

- 1) относительное замедление скорости перемещения при попытке переместить большую группу зубов, при котором

- 2) acceleration of orthodontic tooth movement towards the thinner bone, which is more easily flexed.
- 3) acceleration of orthodontic tooth movement towards the socket of the extracted tooth, where the bone volume is reduced.
- 4) faster orthodontic tooth movement in children who have less mineralization and greater bone elasticity compared to adults.

Although the Bone-bending theory may appear very attractive when it comes to explaining the mechanism of orthodontic tooth movement, convincing information can be found in the scientific literature that casts doubt or denies the validity of such a mechanism.

To get a better idea of the biomechanical processes that occur in the bone according to supporters of the “Bone-bending” theory, let us consider the schematic figure nr. 1, which shows a longitudinal section at the midline of a single-rooted tooth, including the tooth, periodontium and the surrounding alveolar bone.

In the surrounding tissues of a tooth moved with an orthodontic appliance one distinguishes 2 sides: the side that is aligned with the direction of the orthodontic force is called the pressure side and the opposite side is called the tension side.

The concepts of tension and compression, although usually referring to the state of the periodontal fibres, are also used in the „Bone-bending“ [12,15].

According to this theory, on the pressure side the bone, due to its elasticity, compresses and moves in the direction of the acting force, while the bone on the tension side is released from the tension of the dental hard tissue and moves in the same direction. The process on the tension side is called „shear tension“ and on the compression side is known as “shear compression“ [15].

The logical conclusion from the „Bone-bending“ theory can be made that in order to produce bone bending, the orthodontically moved tooth should produce some pressure on the alveolar wall on the side that coincides with the direction of the applied force.

This pressure, in turn, should lead to the very process of bone bending, followed by the processes of modification of the bone of the alveolar bone, which should move the tooth in the direction of the applied pressure.

However, the current literature suggests that in orthodontic treatment the bone on the „pres-

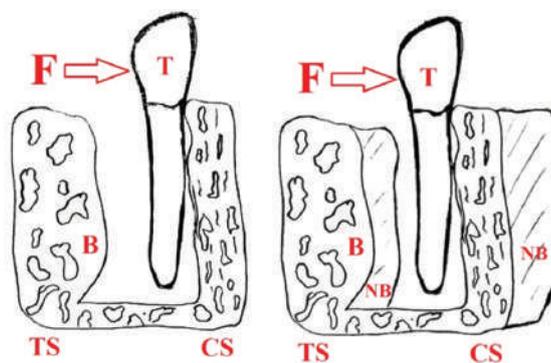


Fig. 1. Schematic representation of the longitudinal section at the level of the single-rooted tooth during orthodontic movement. The arrow indicates the direction of the orthodontic force: F — force applied to the tooth, B — alveolar bone, T — single-rooted tooth, TS — tension side, CS — pressure side, NB — area of newly formed bone.

- очевидно требуется сжать больший объем кости;
- 2) ускорение ортодонтического перемещения зуба в сторону более тонкой кости, которая сгибается легче;
 - 3) ускорение ортодонтического перемещения зуба в сторону лунки удаленного зуба, где объем кости уменьшен;
 - 4) более быстрое ортодонтическое перемещение зуба у детей, у которых отмечается меньшая степень минерализации большая эластичность кости по сравнению со взрослыми.

Хотя теория сгибания кости может показаться очень привлекательной для объяснения механизма ортодонтического перемещения зубов, в научной литературе можно найти убедительную информацию, которая ставит под сомнение или отрицает состоятельность такого механизма.

Для того, чтобы лучше представить себе биомеханические процессы, происходящие в костной ткани по мнению сторонников теории “сгибания” кости, рассмотрим схематический рисунок 1, изображающий продольный срез на уровне средней части однокоренного зуба, включающий сам зуб, периодонт и окружающую их кость лунки.

В окружающих тканях зуба, перемещаемого с помощью ортодонтического аппарата, выделяют 2 стороны: сторона, совпадающая с направлением действия ортодонтической силы называется стороной давления или сжатия (pressure side), а противоположная ей сторона — стороной натяжения (tension side).

Понятия растяжения и сжатия, хотя и относятся обычно к состоянию волокон периодонта, также используются в теории “напряжения кости” [12, 15].

Согласно данной теории, на стороне давления кость, благодаря своей эластичности, сжимается и отодвигается по направлению действующей силы, в то время как кость на стороне натяжения освобождается от напряжения со стороны твердых тканей зуба и перемещается в том же направлении. При этом, процесс, происходящий на стороне натяжения носит название натяжения со сдвигом кости (shear tension), а на стороне сжатия — сжатие ее со сдвигом (shear compression) [15].

Руководствуясь правилами из теории “напряжения кости”, можно сделать логический вывод, что для того, чтобы произвести сжатие кости, поверхность кости лунки перемещаемого зуба на стороне, совпадающей с направлением ортодонтической силы, должна испытывать давление со стороны твердых тканей зуба.

Это давление, в свою очередь, должно приводить к тому самому процессу сгибания (сжатия) костной ткани, за которым последуют процессы изменения кости лунки, способствующие перемещению зуба в направлении оказанного давления.

sure“ side of tooth socket is not subjected to pressure.

The authors of the original research study „Strains in periodontal ligament and alveolar bone associated with orthodontic tooth movement analysed by finite element“ performed micro-CT scans of human jaw segments followed by the creation of high precision electronic models [4].

Using the obtained models, Cattaneo et al. clearly demonstrated the amount of pressure exerted by an orthodontic tooth on the alveolar bone wall.

The digital image obtained as a result of the study shows that an external force applied to the tooth in the range of 50 cN and up to 250 cN (1 cN≈1 g) cannot cause any significant pressure on the alveolar bone and only increasing the force to 400 cN leads to significant compression of the alveolar bone (Fig. 2).

Considering the fact that the force required to move a tooth in orthodontics usually does not exceed 150 g [20, 19], one can conclude that orthodontic tooth movement is not related to the pressure exerted by the tooth on the alveolar bone.

Another factor that puts Farrer’s theory into question is the complete neglect of the effect of the PDL on bone remodelling.

In 1965, Epker B.N. et al. in their original research paper „Correlation of bone resorption and formation with the physical behaviour of loaded bone“ [7] described the phenomenon of tension and bending of the alveolar wall bone on the side opposite to the direction of tooth movement, i.e. on the side of periodontal ligament tension.

The authors attributed this phenomenon specifically to the effects of the PDL tension on the alveolar bone.

The theory of „bone tension“ in turn fails to explain the mechanism of this process.

Biological Electricity Theory (syn. Bio-electric Theory)

The theory was proposed by Basset and Becker in 1962 [15].

The authors of this theory proposed that forces compressing or straining the alveolar bone cause the release of electrical signals that trigger the mechanism of alveolar bone remodelling [15].

According to the theory of biological currents, the pressure exerted by an orthodontically displaced tooth on the alveolar bone leads to a change in its crystalline structure [12,15,17], which is known to produce electrical signals in the bone tissue.

The generated electrical signals, according to Basset and Becker, lead to a change in the metabolism of the alveolar bone and a specific cell differentiation that will lead to tooth movement.

The sequence of events of orthodontic tooth movement suggested by the authors of the theory of biological currents is illustrated in figure 3.

The authors referred to the piezoelectric nature of these signals [15, 17]. Therefore, the mechanism of orthodontic tooth movement in this theory was

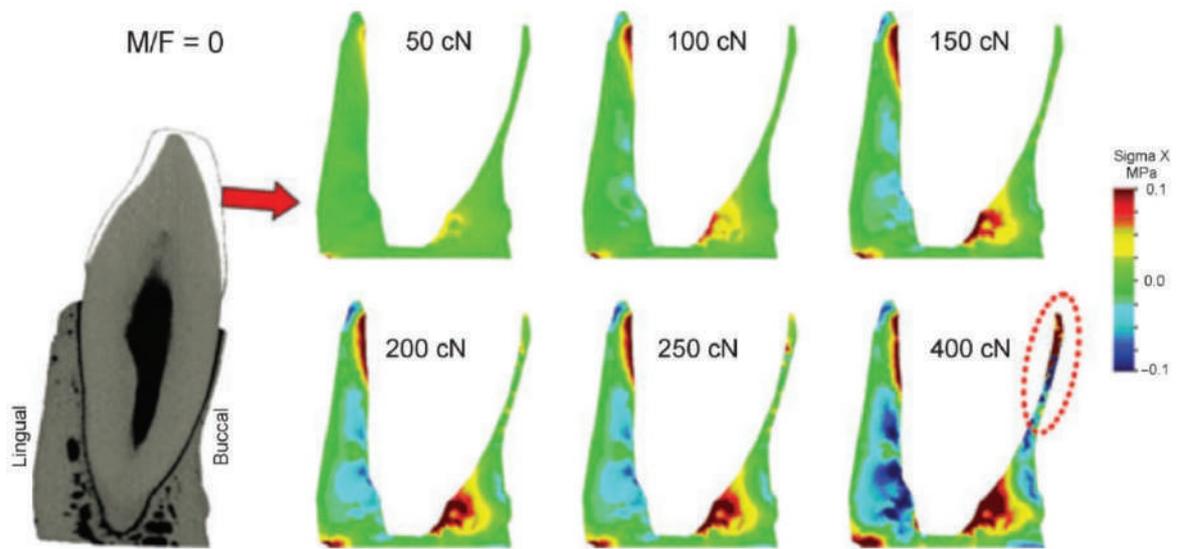


Рис. 2. Поперечный срез альвеолярной кости на уровне продольной оси клыка, к которому приложены силы в орально-вестибулярном направлении величиной от 0 до 400 сН (сантиньютон). Красная стрелка указывает направление приложенной к зубу силы. Отрицательные значения на вертикальной цветной шкале соответствуют участкам сжатия, а положительные — участкам растяжения кости [4].

Fig. 2. Cross-section of the alveolar bone at the level of the longitudinal axis of the canine, to which forces in the oral-vestibular direction of 0 to 400 cN are applied. The red arrow indicates the direction of the force applied to the tooth. Negative values on the vertical colour scale correspond to areas of compression and positive values correspond to areas of bone extension [4].

Тем не менее, имеющиеся в литературе сведения дают основание предполагать, что кость лунки на стороне “давления” в условиях ортодонтического лечения собственно давлению не подвергается.

Авторы оригинальной исследовательской статьи “Strains in periodontal ligament and alveolar bone associated with orthodontic tooth movement analyzed by finite element” провели микро-КТ сканирование сегментов человеческих челюстей с последующим созданием их высокоточных электронных моделей [4].

С помощью полученных моделей Cattaneo и соавторы наглядно показали, какое давление оказывает ортодонтически перемещаемый зуб на костную стенку альвеолы.

На полученном в результате исследования электронном изображении видно, что внешняя сила, приложенная к зубу в диапазоне величин от 50 сН вплоть до 250 сН (1 сН ≈ 1 г), не способна вызвать заметного давления со стороны зуба на кость альвеолы, и только повышение величины силы до 400 сН приводит к выраженному сдвигу костной ткани лунки (рис. 2).

Принимая во внимание тот факт, что сила, необходимая для перемещения зуба в ортодонтии обычно не превышает 150 г [20, 19], можно заключить, что ортодонтическое переме-

based on the piezoelectric effect occurring in the bone and collagen structures of the periodontium.

The properties of piezoelectric signals include (a) the rapid rate of decay, i.e. signals occur when a force is applied but disappear rapidly thereafter, even when the force is still active; (b) the product of an equivalent oppositely directed signal when the force is ceased [9, 14].

When some force is applied to a crystalline substance (such as bone and collagen fibres of the periodontium), a current is generated with its rapid disappearance (even though the applied force is still acting on the tissue). At the moment when the external force ceases, the opposite current is generated (Fig. 4) [17].

Thus, the piezoelectric effect is the result of electrons moving through a crystal structure, which changes its shape under the action of an external force and returns it when that force ceases [15,17].



Рис. 3. Биоэлектрическая теория ортодонтического перемещения зубов [15].

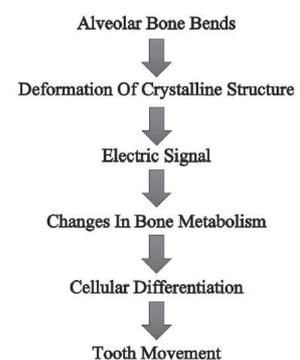


Fig. 3. Bioelectric theory of orthodontic tooth movement [15].

щение зубов не связано с оказыванием давления со стороны зуба на кость альвеолы.

Еще одним фактором, который ставит теорию Фаррера под сомнение, является абсолютное игнорирование сторонниками теории влияния на перестройку костной ткани связок периодонта.

В 1965 году Erker B.N и соавторы в своей оригинальной исследовательской работе "Correlation of bone resorption and formation with the physical behavior of loaded bone" [7] описали явления напряжения и сгибания кости стенки лунки на стороне, противоположной направлению перемещения зуба, то есть на стороне натяжения связок периодонта.

Такой феномен авторы статьи связывали именно с воздействием на кость натянутых волокон периодонта.

Теория "напряжения кости" в свою очередь не способна объяснить механизм этого процесса.

Теория биологических токов (син. Biological Electricity Theory, биоэлектрическая теория)

Теорию предложили Basset и Becker в 1962 году [15].

Авторы данной теории предположили, что силы, давящие на альвеолярную кость или растягивающие ее приводят к высвобождению электрических сигналов, запускающих механизм перестройки альвеолярной кости [15].

Согласно теории биологических токов, давление, оказываемое ортодонтически перемещаемым зубом на альвеолярную кость, приводит к изменению ее кристаллической структуры [12, 15, 17], что, как известно, приводит к возникновению электрических сигналов в костной ткани.

Образованные электрические сигналы, по мнению Basset и Becker, приводят к изменению метаболизма альвеолярной кости и специфической клеточной дифференциации, которая приведет к перемещению зуба.

Предполагаемая авторами теории биологических токов последовательность событий ортодонтического перемещения зубов наглядно обозначена на рисунке 3.

Авторы говорили об пьезоэлектрической природе этих сигналов [15, 17]. Соответственно механизм ортодонтического перемещения зубов в этой теории базировался на пьезоэлектрическом эффекте, возникающем

It has now been established that such properties of piezoelectric signals ensure the maintenance of the original shape of the alveolar bone during short-term forces associated with physiological stresses on the dento-alveolar system (during mastication, articulation) [17].

However, the role of bioelectrical signals in bone modification during active orthodontic treatment has never been confirmed.

The continuous force used in orthodontic tooth movement does not produce neither piezoelectric nor other types of signals in the alveolar bone [15, 17]. As long as the force acting on the alveolar bone remains constant, there is no change at the level of electrical signals [17].

This theory is also opposed by the fact that the use of appliances that exert a vibration effect on the alveolar bone during active orthodontic treatment has not produced any noticeable change in orthodontic tooth movement [17].

Pressure-Tension Theory (syn. Oppenheim theory)

Scientists Sandstedt (1904), Oppenheim (1911) and Schwarz (1932), having studied the changes in periodontal tissues during tooth movement on a histological level, proposed the idea that the tooth movement in the periodontal space creates areas of "pressure" and "tension" [9, 10, 12].

On the pressure side, the authors of the theory detected a disorganization and reduction of fibrous structures as well as vasoconstriction (Fig. 5) [9].

It is assumed that the local blood flow alteration leads to a decrease in cell proliferation with an outcome of inhibited fiber formation.

The microscopic picture on the pressure side is characterized by a narrowed periodontal space, areas of hyalinization and areas of alveolar bone resorption (Fig. 5A) [12, 17, 2, 3].

On the tensioned side, stretching of the periodontal ligament leads to stimulation of cell division. An increased proliferation rate, in turn, leads to an increased synthesis of fibrous structures (12).

The microscopic picture on the tension side is characterized by an expansion of the periodontal space, the formation of new alveolar bone trabeculae extending towards the stretched periodontal ligament in a direction that coincides with the direction of the applied orthodontic force (Figure 5B) [12, 17].

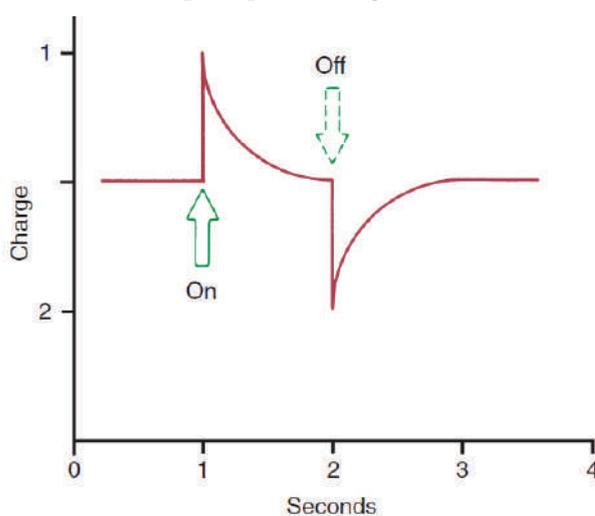


Рис. 4. Свойство пьезоэлектрических сигналов: On - приложение силы, Off — прекращение приложенной силы [17]
Fig. 4. Properties of piezoelectric signals: On — application of force, Off — cessation of applied force [17]

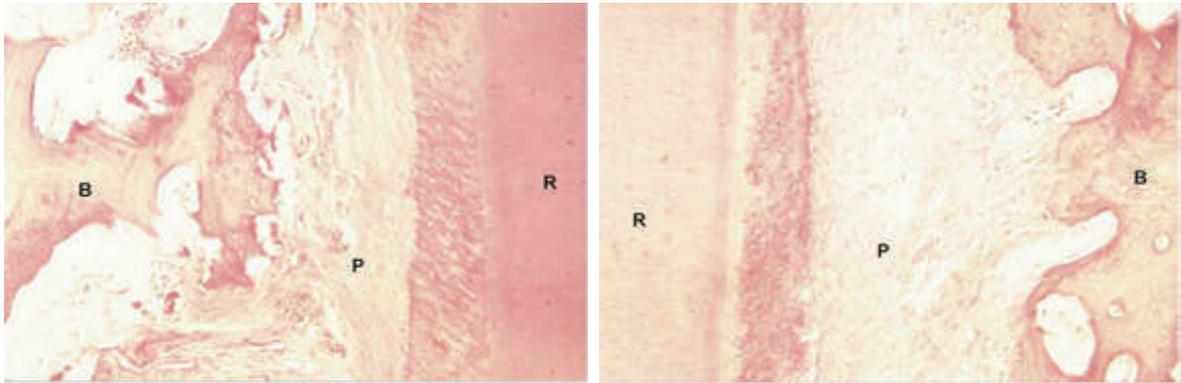


Рис. 5. Сагиттальный срез на уровне клыка верхней челюсти после 14 дней дистального наклонно-вращательного перемещения (окраска гематоксилин-эозином). А. дистальная часть корня зуба (сторона давления), В. мезиальная часть корня зуба (сторона натяжения): R — корень зуба, P — периодонтальные связки, В- альвеолярная кость [9].

Fig. 5. Sagittal section at the level of the maxillary canine after 14 days of distal tipping movement (hematoxylin–eosin staining). A. distal part of the tooth root (pressure side), B. mesial part of the tooth root (tension side): R — tooth root, P — periodontal ligament, B — alveolar bone [9].

в кости и коллагеновых структурах периодонта.

Свойства пьезоэлектрических сигналов включают: а) быструю скорость угасания, то есть сигналы возникают при приложении силы, но быстро исчезают сразу после этого, даже в случае, когда сила продолжает действовать; б) произведение эквивалентного сигнала противоположной направленности в случае прекращения действия силы [9, 14].

Когда некая сила прилагается к кристаллическому веществу (какими являются кость и коллагеновые волокна периодонта) происходит образование тока с его быстрым исчезновением (несмотря на то, что приложенная сила все еще действует на вещество). В момент прекращения действия внешней силы происходит образование тока противоположного значения (рис. 4) [17].

Таким образом, пьезоэлектрический эффект является результатом перемещения электронов по кристаллической решетке, которая изменяет свою форму под действием внешней силы и возвращает ее при прекращении действия этой силы [15,17].

В настоящее время установлено, что такие свойства пьезоэлектрических сигналов обеспечивают поддержание изначальной формы альвеолярной кости во время действия на нее кратковременных сил, ассоциированных с физиологическими нагрузками со стороны зубочелюстной системы (во время жевания, артикуляции) [17].

Тем не менее, роль биоэлектрических сигналов в изменении костной ткани во время активного ортодонтического лечения так и не была подтверждена.

Постоянная сила, используемая при ортодонтическом перемещении зуба, не производит пьезоэлектрических или другого типа сигналов в альвеолярной кости [15,17]. До тех пор, пока сила, действующая на альвеолярную кость, оста-

Moshabab et al. in their review article [12] thoroughly investigated the biological factors influencing orthodontic tooth movement according to pressure–tension theory, arranging them into a table (tab. 1).

Tab. 1. Factors affecting tooth movement according to Pressure–Tension theory. [12]

Factors affecting tooth movement	Pressure side	Tension side
Blood flow	Decreases	Increases
Oxygen level	Decreases	Increases
Carbon dioxide level	Increases	Decreases
Cell replication	Decreases	Increases
Fiber production	Decreases	Increases

Schwarz further developed the “Pressure–tension” theory by indicating the relationship between the response of the periodontal tissues to different values of orthodontic force and the pressure in the periodontal capillary bed.

He concluded that the forces acting on teeth during orthodontic treatment should not exceed the pressure of the periodontal capillary bed (20 — 25 g/cm² of the root surface of the moved tooth) [9].

The application of forces exceeding this pressure leads to physical contact of the tooth with the alveolar bone, leading to cementum resorption and undermining resorption or hyalinization of the alveolar bone at the pressure sites [9].

The main basis for the Pressure–tension theory has always been histological studies of the surrounding tissues. The basic principle of this theory is that changes in the width of the periodontal space cause changes in the number of periodontal and alveolar bone cells and their activity [6, 9].

Cellular changes should in turn lead to bone remodeling.

For instance, periodontal stem cells are thought to differentiate into osteoclasts at sites of PDL pressure and into osteoblasts at sites of PDL tension, causing bone resorption and opposition, respectively [6].

According to the proponents of the classical Pressure–tension theory, the biological response of the

ется постоянной, никаких изменений на уровне электрических сигналов не происходит [17].

Против данной теории выступает также тот факт, что использование аппаратов, оказывающих вибрационное воздействие на альвеолярную кость во время активного ортодонтического лечения, не привело к заметным изменениям в ортодонтическом перемещении зубов [17].

Если бы пьезоэлектрические сигналы приводили бы к ремоделированию костной ткани во время ортодонтического перемещения зубов, вибрационное воздействие на кость альвеолы должно было бы приводить к более быстрой перестройке костной ткани.

Еще в 1979 Shapiro и соавторы использовали в своей оригинальной исследовательской работе "Orthodontic movement using pulsating force-induced piezoelectricity" [17] вибрации для произведения пьезоэлектрических сигналов во время ортодонтического лечения.

Результаты исследования показали отсутствие или незначительные изменения в скорости перемещения зубов.

Хотя интерес к теории активного участия пьезоэлектрических токов в ортодонтическом перемещении зубов снова возрос в 21 веке, до сих пор не выявлено заметного улучшения ортодонтического лечения при генерировании электрических сигналов [17].

Теория давления-натяжения (син. Pressure-Tension Theory, Oppenheim theory)

Ученые Sandstedt (1904), Oppenheim (1911) и Schwarz (1932), изучив изменения в тканях пародонта при перемещении зубов на гистологическом уровне, выдвинули гипотезу о том, что зуб перемещается в периодонтальном пространстве, создавая в последнем сторону "давления" и "натяжения" [9, 10, 12]

На стороне давления авторы теории выявили дезорганизацию и уменьшению синтеза волокнистых структур и сужение сосудов (рис. 5) [9].

Предполагается, что местное снижение кровообращения приводит к уменьшению клеточной пролиферации, исходом чего и является ингибирование образования волокон.

Микроскопическая картина стороны давления характеризуется уменьшением периодонтального пространства, наличием зон гиалинизации и участков резорбции альвеолярной кости (рис. 5А) [12, 17, 2, 3].

На стороне натяжения растягивание связок пародонта приводит к стимулированию клеточного деления. Повышенная скорость пролиферации, в свою очередь, приводит к увеличению синтеза волокнистых структур [12].

Микроскопическая картина стороны натяжения характеризуется увеличением периодонтального пространства, образованием новых трабекул альвеолярной кости, вытягивающихся

periodontal tissues to orthodontic forces involves several successive steps.

The biological response on the pressure side includes:

- 1) pressure on the local capillary bed, alteration for blood supply,
- 2) death of periodontal cells at the site of pressure (area of necrosis, or hyalinization),
- 3) resorption of the necrotic, or hyalinization, areas by macrophages, undermining bone resorption by osteoclasts around the hyalinization areas (occurring simultaneously) [8, 9].

The biological response on the tension side involves a process of bone opposition involving the formation of mature osteoid (or type I collagen matrix) by osteoblasts followed by mineralization of the osteoid with the formation of mature bone [8].

It is important to note that, according to the classical "Pressure-tension" theory, tooth movement is achieved by the formation of zones of cell death (hyalinization) followed by their elimination by macrophages [8].

In his histological studies Reitan pointed out that hyalinization of the alveolar bone is the formation of cell-free areas in the periodontium that have lost their normal structure. Reitan also found that hyalinization processes occur in the periodontium even when light orthodontic forces are applied [8].

However, it is now known that although hyalinization occurs in all orthodontic tooth repositioning [6, 8, 9], it is not the only or primary process responsible for bone resorption on the pressure side.

According to the more recent studies, osteocytes are actively involved in the processes of local resorption during orthodontic tooth movement, perceiving mechanical pressure and triggering a cascade of biological reactions collectively called the "OPG-RANKL pathway" [3, 7, 15], which leads to active local bone resorption.

In addition, it is now known that the inflammatory process [11, 15], in which cells migrate from the bloodstream into the periosteal tissue, plays a significant influence on bone remodeling at pressure and tension sites.

The result of the action of these cells represents another pathway for the activation of cell resorption and opposition specific to orthodontic tooth movement.

Conclusions

1. A retrospective review of the specialist literature regarding the understanding of the mechanism of orthodontic tooth movement shows a long-standing research interest in this topic.

In spite of this, the first plausible hypotheses for the possibility of orthodontic tooth movement were only proposed at the beginning of the 19th century.

The first historical breakthrough in the understanding of the biological processes underlying mechanical tooth movement was the development of new laboratory research methods, the most important of which were light microscopy, electron microscopy, in vitro cell culturing, and radiography [18]. This en-

в сторону натянутых связок периодонта по направлению, совпадающему с направлением приложенной ортодонтической силы (рис. 5B) [12, 17].

Moshabab и соавторы в своей обзорной статье [12] тщательно изучили биологические факторы, влияющие на ортодонтическое перемещение зубов, согласно теории “давления-натяжения”, сгруппировав их в таблицу (таб. 1).

Таб. 1. Биологические факторы, влияющие на ортодонтическое перемещение зубов [12]

Биологические факторы	Сторона давления	Сторона натяжения
Кровоснабжение	Уменьшение	Увеличение
Уровень кислорода	Уменьшение	Увеличение
Уровень углекислого газа	Увеличение	Уменьшение
Скорость клеточной пролиферации	Уменьшение	Увеличение
Скорость образования волокнистых структур	Уменьшение	Увеличение

Schwarz в дальнейшем еще больше развил теорию “давления-натяжения”, обозначив связь между реакцией тканей пародонта на различные величины ортодонтической силы и давление в капиллярном русле периодонта.

Проведя расчеты, ученый пришел к выводу, что силы, действующие на зубы во время ортодонтического лечения не должны превышать давления капиллярного русла периодонта (20 — 25 г/см² поверхности корня перемещаемого зуба) [9].

Приложение сил, превышающих это давление, приводит к физическому контакту зуба с альвеолярной костью, приводя к резорбции цемента и подрывающей резорбции или гиалинизации альвеолярной кости в местах давления [9].

Главной основой теории “давления-натяжения” всегда были гистологические исследования окружающих зуб тканей.

Основной постулат данной теории гласит, что изменения ширины периодонтального пространства вызывает изменения в количестве клеток периодонта и альвеолярной кости, а также их активности [6, 9].

Клеточные изменения должны в свою очередь приводить к ремоделированию костной ткани.

Так, предполагается, что стволовые клетки периодонта дифференцируются в остеокласты в местах давления и в остеобласты в местах натяжения связок периодонта, вызывая явления резорбции и оппозиции костной ткани соответственно [6].

Согласно сторонникам классической теории “давления-натяжения” биологический ответ околозубных тканей на ортодонтические силы включает несколько последовательных этапов.

Биологический ответ на стороне давления включает:

- 1) давление на местное капиллярное ложе, нарушение кровоснабжения,

abled researchers at the beginning of the 20th century to actively carry out histological studies of the periodontal tissues during the induced tooth movement.

The most important results of these studies included the following discoveries:

- resorption and opposition processes underlie tooth movement (1904—1905 Carl Sandstedt)

- The response of the periodontal tissues to orthodontic treatment depends on the magnitude of the force applied, the type of tooth movement and the individual characteristics of the body (Reitan, 1950).

The results of molecular studies in the 1970s concluded that orthodontic forces applied to the teeth were associated with stimulation of cellular and molecular activity in the periodontal tissues [18].

A significant event in the development of understanding of the OTM mechanism was the 1991 article “Tooth Movement” in which Davidovitch Z. made a critical analysis of the evolution of the biological basis concept of orthodontic tooth movement and described in detail most of the known biological processes known at the time [18].

It became clear from Davidovitch’s article that orthodontic tooth movement is not only characterized by histological changes in the periodontal tissues, but also by active cellular and molecular reactions, as well as the involvement of the nervous, immune and endocrine systems of the body in these processes.

Later, Davidovitch along with Krishnan published 2 more review articles [12, 13], in which they further expanded the understanding of the process of orthodontic tooth movement, while separately covering the reactions taking place in the hard (alveolar bone), soft (periodontium) tissues as well as in the local nervous and vascular system.

Both articles are still relevant today and can be actively used by orthodontists as an introduction to the biological basis of orthodontic tooth movement.

2. The analysis of the theories of orthodontic tooth movement brings us to the conclusion that the most important ones are 3: the Bone-bending theory, the Biological Electricity theory and the Pressure-tension theory.

An analysis of all three major theories confirms that none of them can fully and comprehensively explain the mechanism causing tooth displacement during orthodontic treatment.

Each of them focuses on and convincingly explains the individual pathways that, to a greater or lesser extent, trigger the biological changes necessary for tooth movement, while omitting the possibility of others.

Most researchers and, to an even greater extent, practicing orthodontists favor the “Pressure-tension” theory.

It should be kept in mind that although the main points of the classical theory of tooth movement mechanism proposed by Oppenheim et al. are still valid, the current concept of the pressure-tension theory is the result of constant modifications and additions to the original version [12, 18].

- 2) гибель клеток периодонта в местах давления (участок некроза, или гиалинизации),
- 3) резорбция участков некроза, или гиалинизации, макрофагами, подрывающая резорбция кости остеокластами вокруг участков гиалинизации (происходят одновременно) [8, 9].

Биологический ответ на стороне натяжения включает процесс костной оппозиции, предполагающий образование зрелыми остеобластами остеоида (или коллагенового матрикса I типа) с последующей минерализацией остеоида с образованием зрелой кости [8].

Важно отметить, что, согласно классической теории, “давления-натяжения” перемещение зуба происходит благодаря образованию зон клеточной гибели (гиалинизации) с последующей их элиминацией макрофагами [8].

В своих гистологических исследованиях Reitan указывал, что гиалинизация альвеолярной кости представляет собой образование бесклеточных областей в периодонте, утративших свою нормальную структуру. Reitan также обнаружил, что процессы гиалинизации происходят в периодонте даже при применении небольших ортодонтических сил [8].

Тем не менее, в настоящее время известно, что, хотя гиалинизация и происходит при любом ортодонтическом перемещении зубов [6, 8, 9], она не является единственным или основополагающим процессом, обеспечивающим костную резорбцию на стороне давления.

Согласно более новым исследованиям, активное участие в процессах локальной резорбции при ортодонтическом перемещении зубов принимают остециты, которые воспринимают механическое давление, запуская каскад биологических реакций под общим названием “OPG-RANKL pathway” [3, 7, 15], приводящий к активной локальной резорбции костной ткани.

Кроме того, в настоящее время известно, что значительное влияние на перестройку костной ткани в местах давления и натяжения играет воспалительный процесс [11, 15], при котором происходит миграция клеток из кровеносного русла в околозубные ткани.

Результат действия этих клеток представляет собой другой путь активирования клеточной резорбции и оппозиции, специфической для ортодонтического перемещения зубов.

Выводы

1. Ретроспективный анализ специальной литературы, касающийся понимания механизма ортодонтического перемещения зубов, показывает давний интерес исследователей к этой теме.

Несмотря на это, первые правдоподобные гипотезы возможности ортодонтического перемещения зубов были выдвинуты только в начале 19 века.

Первым историческим прорывом в понимании биологических процессов, лежащих в основе механического перемещения зубов, стало появление новых лабораторных методов исследования, важнейшими из которых являлись световая микроскопия, электронная микроскопия, клеточное культивирование *in vitro*, радиография [18]. Это позволило исследователям начала 20 века активно проводить гистологические исследования околозубных тканей во время искусственного перемещения зубов.

Важнейшие результаты этих исследований включали следующие открытия:

- в основе перемещения зуба лежат процессы резорбции и оппозиции (1904—1905 гг. Carl Sandstedt)
- ответ околозубных тканей на ортодонтическое воздействие зависит от величины силы, типа перемещения зуба и индивидуальных особенностей организма (1950 гг. Reitan)

Результаты молекулярных исследований 1970-х годов привели к выводу о том, что ортодонтические нагрузки на зубы сопряжены со стимулированием клеточной и молекулярной активности околозубных тканей [18].

Важнейшим событием для развития понимания механизма ОТМ стала выпущенная в 1991 году статья “Tooth Movement”, в которой Davidovitch Z. провел критический анализ эволюции концепта биологических основ ортодонтического перемещения зубов и подробно описал большинство известных биологических процессов, известных на тот период [18].

Из статьи Davidovitch стало ясно, что для ортодонтического перемещения зубов характерны не только гистологические изменения околозубных тканей, но и активные клеточные и молекулярные реакции, а также участие в этих процессах нервной, иммунной и эндокринной системы организма.

Позже Davidovitch совместно с Krishnan еще 2 обзорные статьи [12, 13], в которых авторы еще больше расширили представления о процессе ортодонтического перемещения зубов, при этом отдельно освещая реакции, происходящие в твердых (альвеолярная кость), мягких (периодонт) околозубных тканях, а также в местной нервной и сосудистой сети.

Обе статьи не потеряли своего значения и до настоящего времени и могут активно использоваться врачами-ортодонтами для знакомства с биологическими основами ортодонтического перемещения зубов.

2. Изучение теорий механизма перемещения зубов во время ортодонтического лечения приводит к выводу о том, что важнейшими из них являются 3: теория напряжения кости, теория биологических токов и теория давления-натяжения.

Анализ всех трех основных теорий убеждает в том, что ни одна из них не может полностью и всесторонне объяснить механизм, обуславливающий перемещение зубов при ортодонтическом лечении.

Каждая из них останавливается и убедительно объясняет отдельные пути, которые, в той или иной степени запускают необходимые для перемещения зубов биологические изменения, в то же время упуская возможность наличия других.

Большинство исследователей и, в еще большей мере, практикующих ортодонтотв отдают предпочтение теории “давления-натяжения”.

При этом нужно иметь в виду, что, хотя основные моменты классической теории механизма перемещения зубов, предложенная Oppenheim и соавторами, до сих пор не утратили своего значения, современное представление о теории “давление-натяжения” является результатом неоднократных изменений и дополнений первоначальной версии [12, 18].

Библиография/Bibliography:

1. Alikhani Mani, Sangsuwon Chinapa, Alansari Sarah, Nervina M. Jeanne, Teixeira Alikhan Cristina C. “Biphasic theory: breakthrough understanding of tooth movement”, *Journal of the World Federation of Orthodontists*, Nr.7(3)/2018, pp. 82-88.
2. Avornic L. „Impactul parodontal în anomaliile dentomaxilare: aspecte de evaluare și de tratament ortodontic complex”, *Curierul Medical*, Nr.1(307)/2009, pp. 47-52.
3. Avornic L., Lupan I., Ciumeico I “Monitorizarea stării parodontiului în tratamentul ortodontic al anomaliilor dentomaxilare”, *Medicina Stomatologică*, Nr.2(19)/2011, pp. 61-65.
4. Cattaneo P M, Dalstra M, Melsen B. “Strains in periodontal ligament and alveolar bone associated with orthodontic tooth movement analyzed by finite element”, *Orthodontics and Craniofacial Research*, Nr.12(2)/2009, pp. 120-128.
5. Chaushu S, Klein Y, Mandelboim O, Barenholz Y, Fleissig O., “Immune Changes Induced by Orthodontic Forces: A Critical Review”, *Journal of Dental Research*, Nr.101(1)/2022, pp. 411-450.
6. Davidovitch Z. “Tooth movement. Critical Review”, *Oral Biol. Med.*, Nr.2(4)/1991, pp. X-X.
7. Epker B N, Frost H M. “Correlation of bone resorption and formation with the physical behavior of loaded bone”, *Journal of Dental Research*, Nr.44(1)/1965, pp. 33-41.
8. Henneman S., Von den Hoff J. W., Maltha J. C. “Mechanobiology of tooth movement”, *European Journal of Orthodontics*, Nr.30(3)/20XX, pp. 299-306.
9. <https://historyoforthodontics.weebly.com/before-1900s.html> consultat la 22.10.2022
10. Jiang C., Li Z., Quan H., Xiao L., Zhao J, Wang Y, Liu J., Gou Y., An S., Y. Huang, W. Yu, Y. Zhang, W. He, Y. Yi, Y. Chen, J. Wang “Osteoimmunology in orthodontic tooth movement”, *Oral Diseases*, Nr.21(6)/2015, pp. 694-704.
11. Jiang N., Guo W., Chen M., Zheng Y., Zhou J., Gyoon Kim S., Embree M. C, Songhee Song K., Marao H. F, Mao J. J. “Periodontal Ligament and Alveolar Bone in Health and Adaptation: Tooth Movement”, *Front. Oral Biol.*, Nr.18/2016, pp. 1-8.
12. Krishnan Vinod, Davidovitch Zeev “Cellular, molecular, and tissue-level reactions to orthodontic force”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, Nr.129(4)/2006, pp. 469.e1-469.e32.
13. Krishnan Vinod, Davidovitch Zeev “On a path to unfolding the biological mechanisms of orthodontic tooth movement”, *J Dent Res*, Nr.88(7)/2009, pp. 597-608
14. Laura Y. Li, Shannyn A. J., Little H., Ching-Chang Ko “Orthodontic tooth movement: The biology and clinical implications: a systematic review”, *The Kaohsiung Journal of Medical Sciences*, Nr.34(4)/2018, pp. 207-214.
15. Moshabab A. Asiry “Biological aspects of orthodontic tooth movement”, *Saudi Journal of Biological Sciences*, Nr.25(6)/2018, pp. 1027—1032.
16. Murray C Meikle “The tissue, cellular, and molecular regulation of orthodontic tooth movement: 100 years after Carl Sandstedt”, *Eur J Orthod*, Nr. 28 (3)/2018, pp. 221-240.
17. Proffit R. William, *Contemporary orthodontics Sixth Edition*, Elsevier, Philadelphia, 2019, 746 p.
18. Shroff Bhavna, *Biology of orthodontic tooth movement: Current Concepts and Applications in Orthodontic Practice*, Springer, Switzerland, 2016, 171 p.
19. Simon J. Littlewood. Laura Mitchell “An Introduction to Orthodontics — Fifth edition”, Oxford, Oxford, 2019, 369 p.
20. Персин Л.С., Ортодонтия. Диагностика и лечение зубочелюстно-лицевых аномалий и деформаций, ГЭОТАР-Медиа, Москва, 2016, 640 с.