

УДК 531/534:57+612.7

БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЫШЕЛКОВ НИЖНЕЙ ЧЕЛЮСТИ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ТЯЖЕЛЫХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ

К. Изуми*, Т. Шимода*, Ш. Сумиоши*, С. Озеки*, С. Цуцуми**

* Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Fukuoka Dental College, Fukuoka, Japan, e-mail: kiwachan@college.fdcnet.ac.jp

** Department of Medical Simulation Engineering, Institute of Frontier Medical Sciences, 53, Kawahara-cho, Shogoin, Sakyo-ku, Kyoto 606-8507, Japan, e-mail: tsutsumi@frontier.kyoto-u.ac.jp

* Стоматологический колледж, кафедра челюстно-лицевой хирургии, г. Фукуока, Япония

** Институт передовых медицинских наук, кафедра медицинского моделирования и инженерии, г. Киото, Япония

Аннотация. Рассмотрены направления переноса нагрузки в мышелках нижней челюсти при атрофических изменениях, вызванных остеоартритом в последней стадии. Анализируются морфологические изменения мышелков нижней челюсти человека при регрессивных процессах. Для этой цели четыре мышелка нижней челюсти человека с морфологическими изменениями (дегенеративные мышелки) были проанализированы с помощью периферической количественной компьютерной томографии при толщине слоев 110 мкм и интервале между слоями 150 мкм. Также было измерено распределение плотности. Основываясь на изображениях, полученных методом компьютерной томографии, были изготовлены четыре трехмерных модели. Затем проведен линейный статический анализ на основе метода конечных элементов, что позволило оценить корреляцию между распределением напряжений и минеральной плотностью кости. При сравнении с нормальным мышелком нижней челюсти было установлено, что объемное содержание спонгиозной ткани было меньше на 10% при умеренных дегенеративных изменениях и примерно на 50% – при тяжелых. Также было замечено, что передне-заднее расстояние было меньше у мышелков плоского типа в сравнении с мышелками углового типа. Корреляция между распределением напряжений и объемной минеральной плотностью была высокой в районе от медиальной до центральной области верхней части при умеренно дегенеративных мышелках и от центральной до латеральной области верхней части при тяжелых дегенеративных поражениях. В заключение отмечается, что при тяжелом дегенеративном поражении мышелков возникает тяжелая атрофия и зона, воспринимающая нагрузку, включает медиальную, центральную и латеральную области верхней части мышелка. В противоположность этому при нормальных мышелках нижней челюсти только центральная часть передней области мышелка воспринимает нагрузку.

Ключевые слова: мышелок нижней челюсти человека, морфологическое изучение, периферийная количественная компьютерная томография, метод конечных элементов, анализ напряжений.

1. Введение

Известно, что структура и морфология костей рациональны с точки зрения механики [1]. Биомеханические исследования височно-нижнечелюстного сустава показали, что форма мышелка нижней челюсти в основном зависит от функциональных нагрузок [2–4]. Авторы данной работы ранее проводили исследования для определения механических факторов, приводящих к регрессивным изменениям, связанным с остеоартритом нормального мышелка нижней челюсти человека без морфологических нарушений. Это позволило изучить происхождение и дать прогноз дегенерации мышелка. В работе [5] проведено биомеханическое изучение нормальных мышелков нижней челюсти человека без морфологических нарушений. Показано, что зона восприятия нагрузки находится в центральной части мышелка в соответствии с суставным бугорком. Однако направление передачи силы и область передачи нагрузки атрофических мышелков нижней челюсти не исследовались. В настоящем исследовании были изготовлены трехмерные модели для нескольких мышелков нижней челюсти человека с выраженными морфологическими изменениями. Анализ напряжений был проведен методом конечных элементов, что позволило понять важность морфологического строения мышелков нижней челюсти человека, имеющих изменение формы. Изучена также корреляция между распределением напряжений и минеральной плотностью кости.

2. Материалы и методы

2.1. Материалы. Из 28 мышелков нижней челюсти у трупов, имевшихся в распоряжении авторов, четыре мышелка нижней челюсти с выраженными морфологическими изменениями (дегенеративные мышелки) были использованы для изучения. Для контроля один мышелок нижней челюсти без морфологических изменений (нормальный мышелок нижней челюсти) был также проанализирован.

Все дегенеративные мышелки были атрофированы. Все они были уплощены и вогнуты на поверхности сустава. Были использованы следующие четыре параметра: 1) отношение объема трабекулярной кости к объему всего мышелка нижней челюсти; 2) горизонтальный угол мышелка, который представляет собой внутренний угол, образованный горизонтальной длинной осью мышелка и ветвью нижней челюсти; 3) медио-латеральное расстояние мышелка; 4) отношение передне-заднего расстояния мышелка к медио-латеральному расстоянию. Четыре дегенеративных мышелка были разделены на две группы, основываясь на тяжести морфологических нарушений: группа 1 – умеренная дегенерация и группа 2 – тяжелая дегенерация (табл. 1).

2.2. Изготовление трехмерных моделей. Используя установку для периферической количественной компьютерной томографии (*Norland – STRATEG*), были сканированы мышелки нижней челюсти с помощью слоев толщиной 110 мкм при расстоянии между слоями 150 мкм. Одновременно была измерена минеральная плотность. Затем, используя вычислительную программу пересчета данных компьютерной томографии в данные для компьютерного проекта (*Mimics Ver. 7.21, Magics Ver. 7.2, Materialise*), были построены контурные линии. После этого была использована вычислительная программа для трехмерного математического моделирования (*Rhinoceros Ver. 2.0, Robert McNeel & Associates*), были построены трехмерные модели мышелков нижней челюсти. Формы кортикальной и трабекулярной костей были точно воспроизведены с помощью трехмерных моделей (рис. 1).

Таблица 1

Морфологическая классификация мышцелков нижней челюсти

	Нормальные мышцелки	Мыщелки группы			
		1-A	1-B	2-A	2-B
Отношение объема трабекулярной кости к общему объему мышцелка	0,641	0,553	0,581	0,262	0,351
Горизонтальный угол мышцелка	90°	95°	90°	112°	108°
Медико-латеральное отношение мышцелка	21,60	20,91	22,38	17,35	17,65
Отношение передне-заднего расстояния к медико-латеральному расстоянию	0,53	0,53	0,39	0,44	0,38
Система классификации мышцелка	выпуклый	угловой	плоский	угловой	плоский

2.3. Конструкция трехмерных конечно-элементных моделей. Вышеописанные трехмерные модели, изготовленные на основе данных компьютерной томографии мышцелков нижней челюсти, были подвергнуты разбиению на конечные элементы с помощью десятиузловых тетраэдральных элементов. Для этой цели была использована вычислительная программа (COSMOS 2003, S.R.A.C.) . Результаты представлены на рис. 2а.

2.4. Материальные константы. В моделях были выделены области кортикальной и трабекулярной кости. Значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона были приняты равными 10000 МПа и 0,3 , соответственно, для кортикальной ткани мышцелков и 500 МПа и 0,3 для трабекулярной костной ткани.

2.5. Анализ условий. Нижняя поверхность моделей была ограничена во всех степенях свободы. Нагружение силой 10 Н проводилось в нормальном направлении на медиальной, центральной и латеральной поверхностях переднего, верхнего и заднего отделов мышцелка нижней челюсти. При расчете проводился линейный статический анализ (рис. 2b).

2.6. Оценка. Для оценки были использованы эквивалентные напряжения Мизеса. Для установления связи между минеральной плотностью и распределением напряжений каждая модель была горизонтально сканирована с интервалом между слоями 660 мкм и далее исследована корреляция между минеральной плотностью кости и средним напряжением в каждом слое. Всего 30 слоев было получено из двух мышцелков группы 1 (дегенеративные мышцелки 1А и 1В) и 23 слоя были получены из двух мышцелков группы 2 (дегенеративные мышцелки 2А и 2В). Коэффициент Пуассона был также использован для корреляционного анализа.

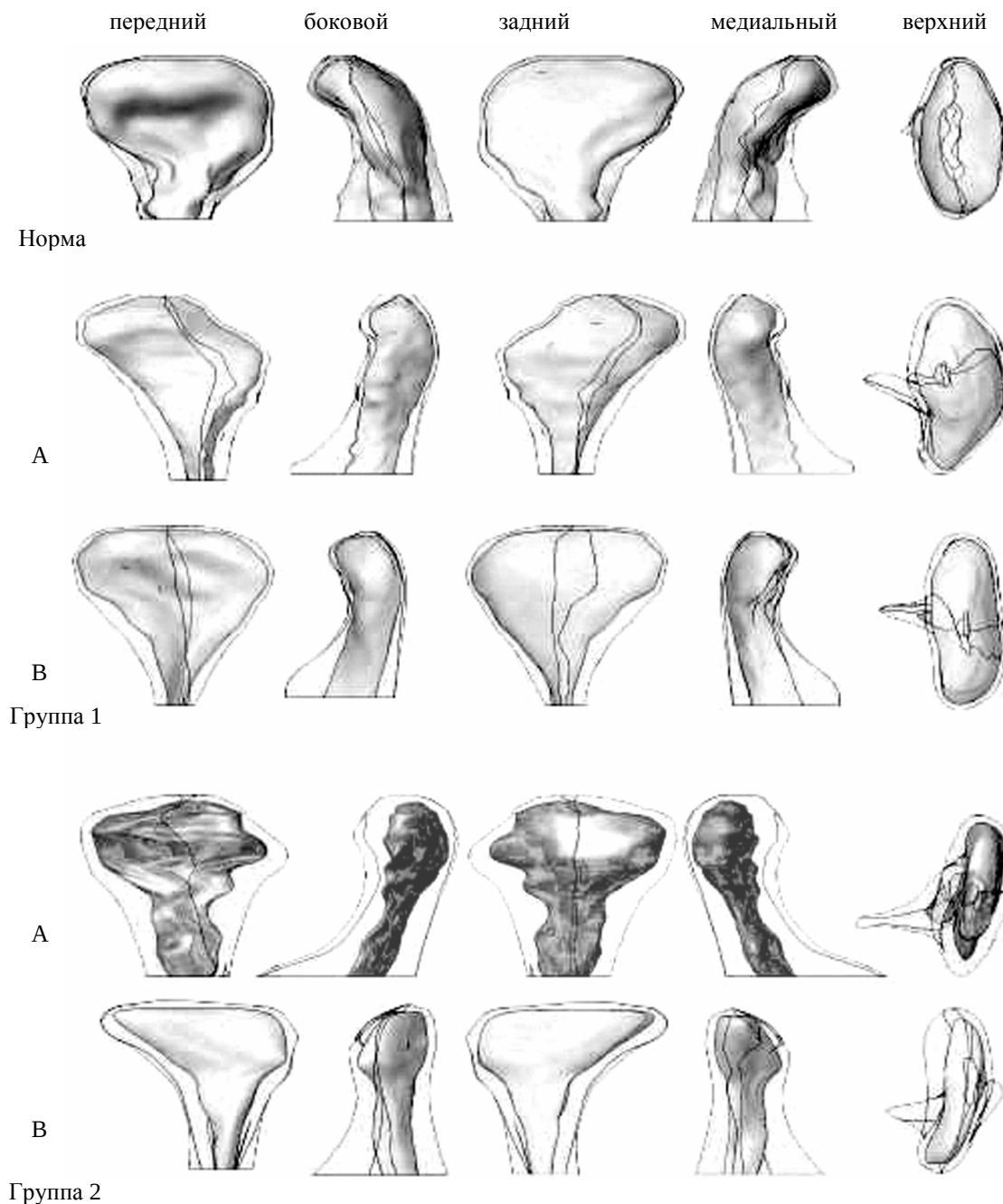


Рис. 1. Трехмерная модель мыщелка нижней челюсти. Норма: нормальный мыщелок без морфологических нарушений, классифицируется как мыщелок выпуклого типа. Группа 1: мыщелок с умеренными дегенеративными изменениями, группа 1А – мыщелок углового типа, группа 1В – мыщелок плоского типа. Группа 2: мыщелок с тяжелыми дегенеративными изменениями, группа 2А – мыщелок углового типа, группа 2В – мыщелок плоского типа

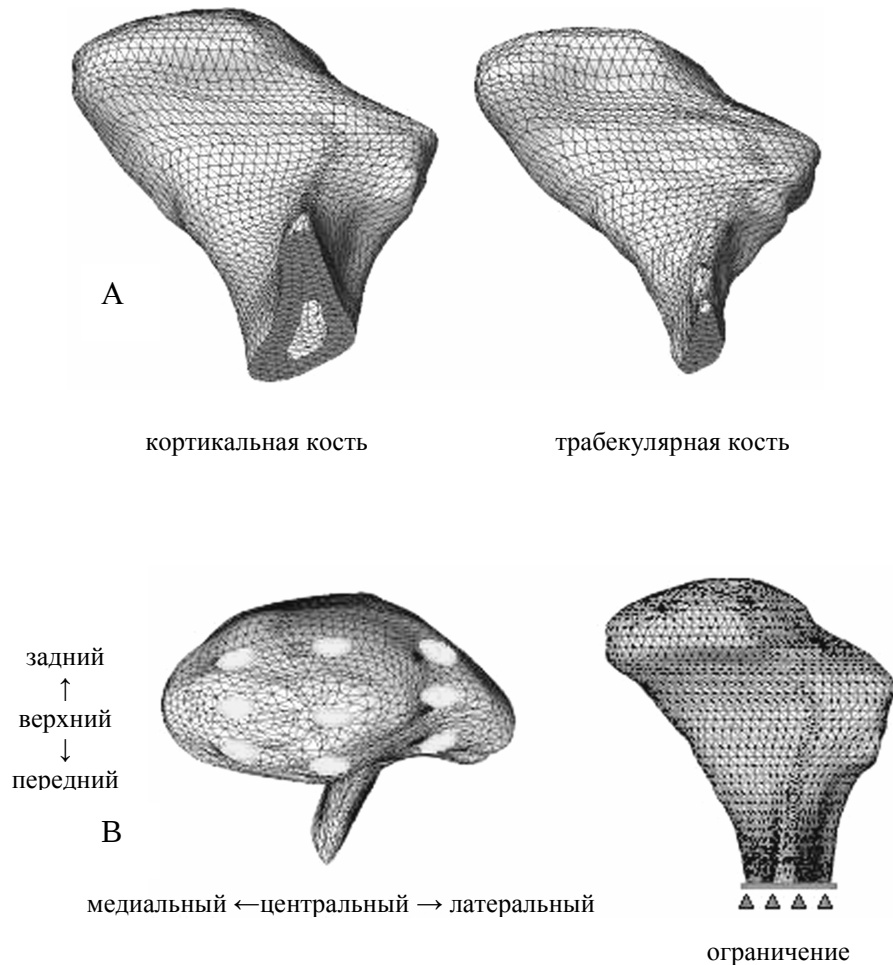


Рис. 2. А: трехмерная конечно-элементная модель мыщелка нижней челюсти содержит кортикальную и трабекулярную ткани; 2В: область нагружения и ограничения.

3. Результаты

3.1. Четыре параметра морфологических изменений.

(1). Отношение объема трабекулярной кости к объему всего мыщелка нижней челюсти. Для нормального мыщелка нижней челюсти это отношение равно 0,641. Для дегенеративных мыщелков 1А и 1В оно меньше, а именно 0,553 и 0,581, соответственно. Для дегенеративных мыщелков 2А и 2В – еще меньше: 0,262 и 0,351, соответственно.

(2). Горизонтальный угол мыщелка в отношении к ветви нижней челюсти. Для нормального мыщелка нижней челюсти этот угол составляет 90°. Для дегенеративных мыщелков 1А и 1В – 95° и 90°, соответственно. Для дегенеративных мыщелков 2А и 2В – еще больше: 112° и 108°, соответственно.

(3). Медио-латеральное расстояние мыщелка. Для нормального мыщелка нижней челюсти это расстояние было равно 21,6 мм. Для дегенеративных мыщелков 1А и 1В оно было сравнимым, а именно 20,91 мм и 22,38 мм, соответственно. Для дегенеративных мыщелков 2А и 2В это расстояние было меньше: 17,35 мм и 17,65 мм, соответственно.

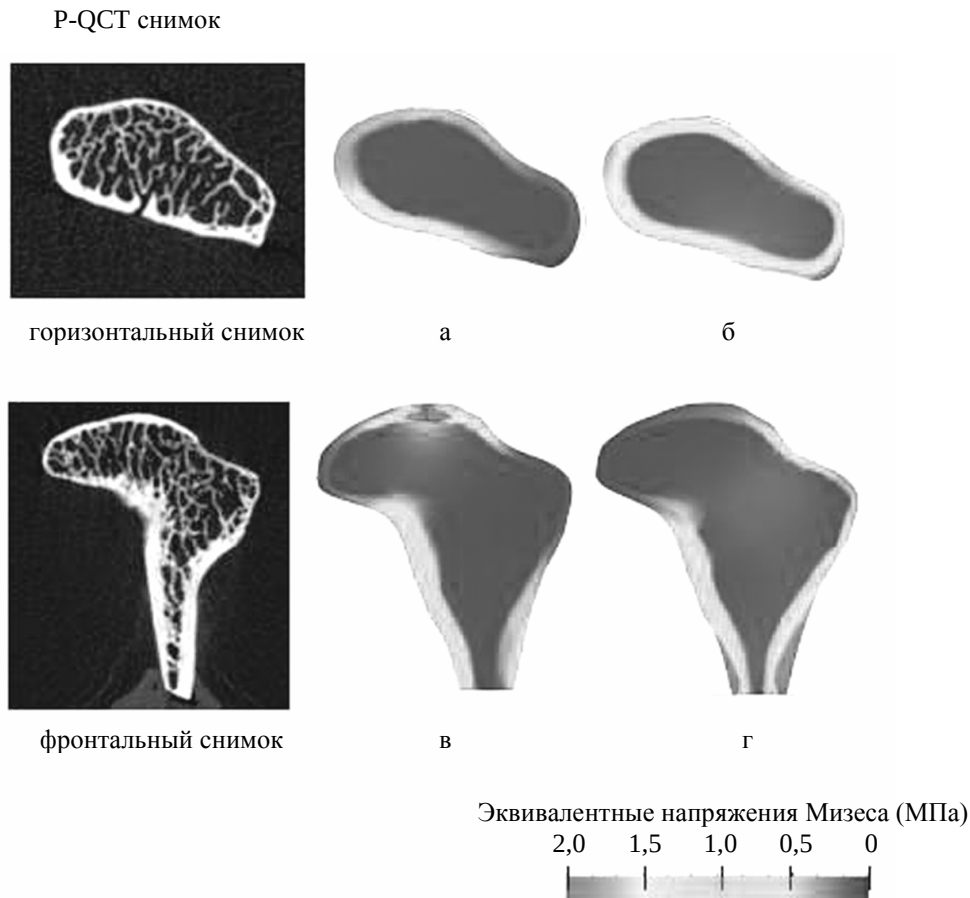


Рис. 3. Сравнение томографического изображения и распределения напряжений: а, в – распределение напряжений в центральной зоне верхней области; б, г – распределение напряжений в латеральной зоне задней области (на рис. 3а и 3в распределение напряжений подобно изображению и величины напряжений умеренные, на рис. 3б и 3г распределение напряжений не подобно изображению и величины напряжений высокие)

(4). Отношение передне-заднего расстояния мышечков к медио-латеральному расстоянию. Для нормальных мышечков нижней челюсти это расстояние было равно 0,53. Для дегенеративных мышечков 1А и 1В оно составило 0,53 и 0,39, соответственно. Для дегенеративных мышечков 2А и 2В – 0,44 и 0,38, соответственно.

3.2. Дегенеративные мышечки 1А и 1В. Что касается соотношения между минеральной плотностью кости и распределением напряжений в каждом горизонтальном слое, то была выявлена пропорциональность между ними. Также было отмечено, что распределение напряжений в трабекулярной кости в каждом слое имело сходство со структурой кости (рис. 3, 4). В дегенеративном мышечке 1А средние значения напряжений в медиальной и центральной зонах передней области, в латеральной зоне верхней области и в медиальной, центральной и латеральной зонах задней области было значительно выше, чем значения напряжений в других областях ($p < 0,01$). Исключив эти зоны, можно было заметить высокую степень корреляции между минеральной плотностью кости и распределением напряжений в медиальной зоне передней области ($r=0,908$, $r_2=0,824$, $p < 0,0001$) и центральной зоне верхней области ($r=0,901$, $r_2=0,812$, $p < 0,0001$) (см. рис. 5). Кроме того, в дегенеративном мышечке 1В средние значения напряжений в медиальной зоне передней области и в

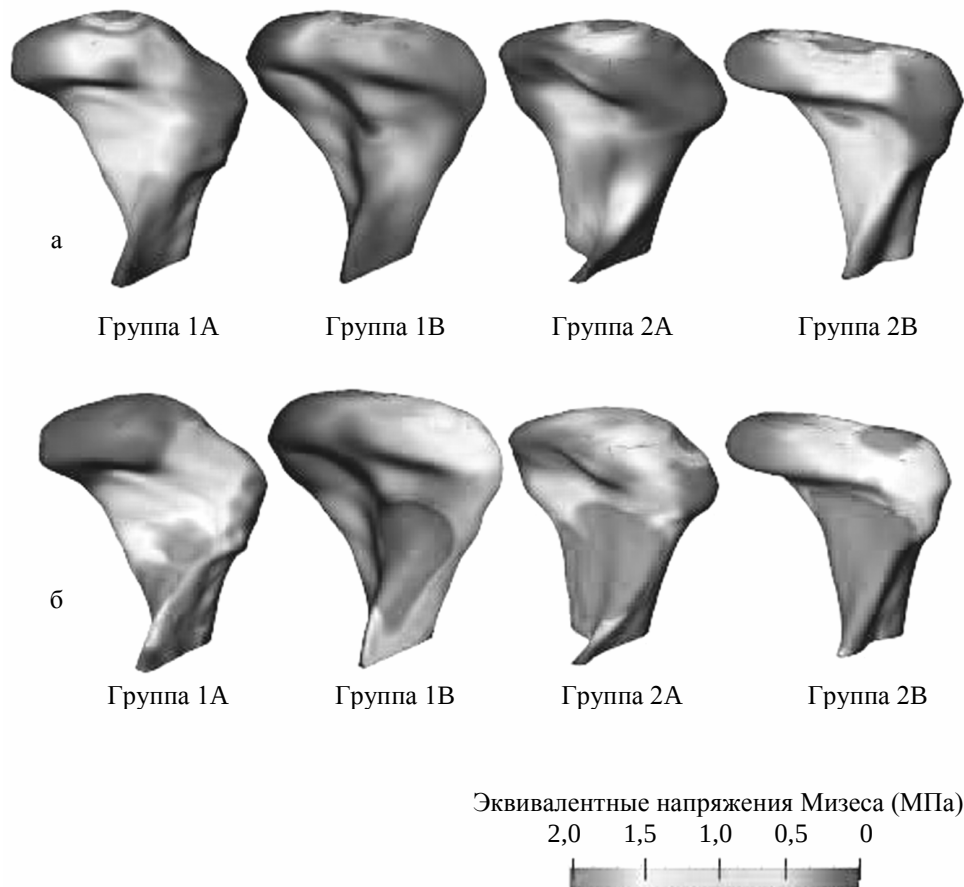


Рис. 4. Распределение напряжений в дегенеративном мыщелке: а – нагружение в центральной зоне верхней области; б – нагружение в боковой зоне задней области. (Так же, как на рис. 3, зона, по оценкам несущая нагрузку (а), показывает допустимые уровни распределения напряжений, но зона, исключенная из нагружения (б), показывает высокий уровень распределения напряжений)

медиальной, центральной и латеральной зонах задней области были значительно больше, чем значения напряжений в других областях ($p < 0,01$). Исключив эти зоны, можно было заметить высокую степень корреляции между минеральной плотностью кости и распределением напряжений в медиальной зоне верхней области ($p = 0,882$, $r_2 = 0,676$, $p < 0,0001$), в центральной зоне верхней области ($r = 0,799$, $r_2 = 0,639$, $p < 0,0001$) и в центральной зоне передней области ($r = 0,646$, $r_2 = 0,417$, $p < 0,0001$) (см. рис. 6).

3.3. Дегенеративные мыщелки 2А и 2В. Относительно соотношения между минеральной плотностью кости и распределением напряжений в каждом горизонтальном слое было подтверждено наличие пропорциональности, как и ранее в первой группе мыщелков.

В дегенеративном мыщелке 2А средние значения напряжений в медиальной, латеральной и центральной зонах передней области, в медиальной зоне верхней области и в латеральной зоне задней области были значительно больше, чем значения напряжений в других зонах ($p < 0,01$). Исключив эти области, можно было заметить большую степень корреляции между минеральной плотностью кости и распределением напряжений в центральной зоне верхней области ($r = 0,804$, $r_2 = 0,646$, $p < 0,0001$), в латеральной зоне верхней области ($r = 0,661$, $r_2 = 0,437$, $p < 0,0005$), в медиальной зоне задней области ($r = 0,680$, $r_2 = 0,462$, $p < 0,0005$) и в центральной зоне задней области

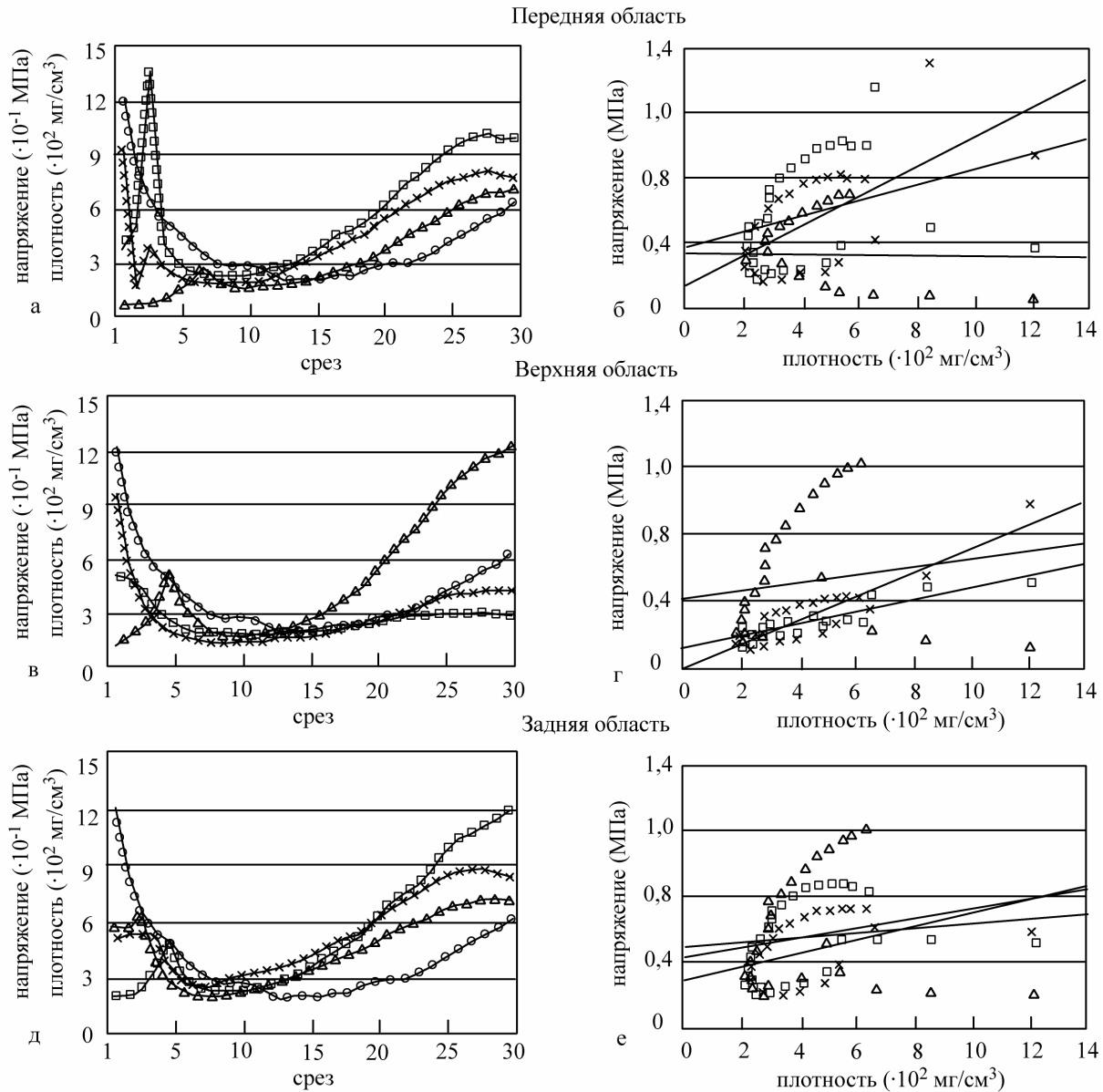


Рис. 5. Анализ напряжений дегенеративного мышечка 1А: а, в, д – соотношение между плотностью материала кости и распределением напряжений для каждого горизонтального снимка; б, г, е – соотношение между распределением напряжений и плотностью материала кости (коэффициенты Пирсона). Минеральная плотность кости (кружки), нагрузка на медиальную (квадратики), центральную (крестики), боковую (треугольники) зоны

($r=0,888$, $r_2=0,789$, $p<0,0001$) (см. рис. 7). Кроме того, в дегенеративном мышечке 2В средние значения напряжений в медиальной и латеральной зонах передней области, в медиальной зоне верхней области и медиальной, центральной и латеральной зонах задней области были значительно больше, чем значения напряжений в других зонах ($p<0,01$). Исключив эти зоны, можно было заметить высокую степень корреляции между минеральной плотностью кости и распределением напряжений в центральной зоне верхней области ($r=0,943$, $r_2=0,889$, $p<0,0001$), в латеральной зоне верхней области ($r=0,756$, $r_2=0,571$, $p<0,0001$) и в центральной зоне передней области ($r=0,839$, $r_2=0,704$, $p<0,0001$) (см. рис. 8).

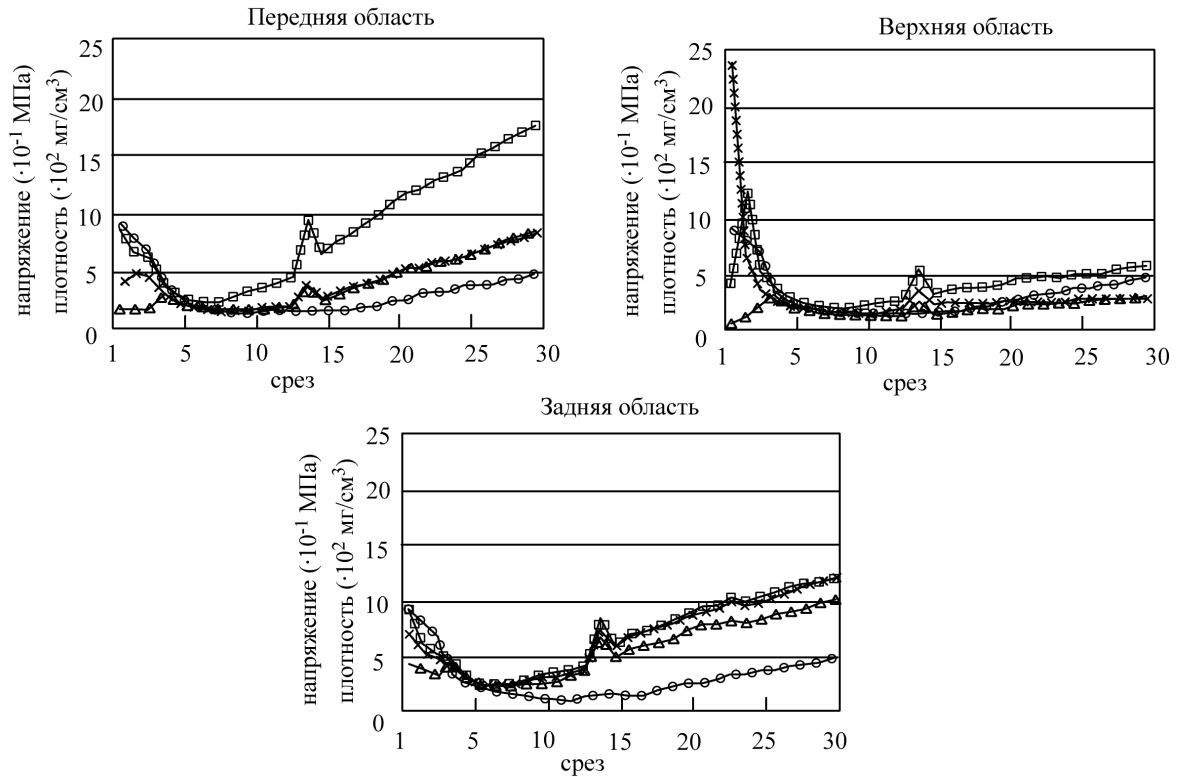


Рис. 6. Соотношение между плотностью материала кости и распределением напряжений для каждого горизонтального снимка дегенеративного мышечка 1В. Минеральная плотность кости (кружки), нагрузка на медиальную (квадратики), центральную (крестики), боковую (треугольники) зоны

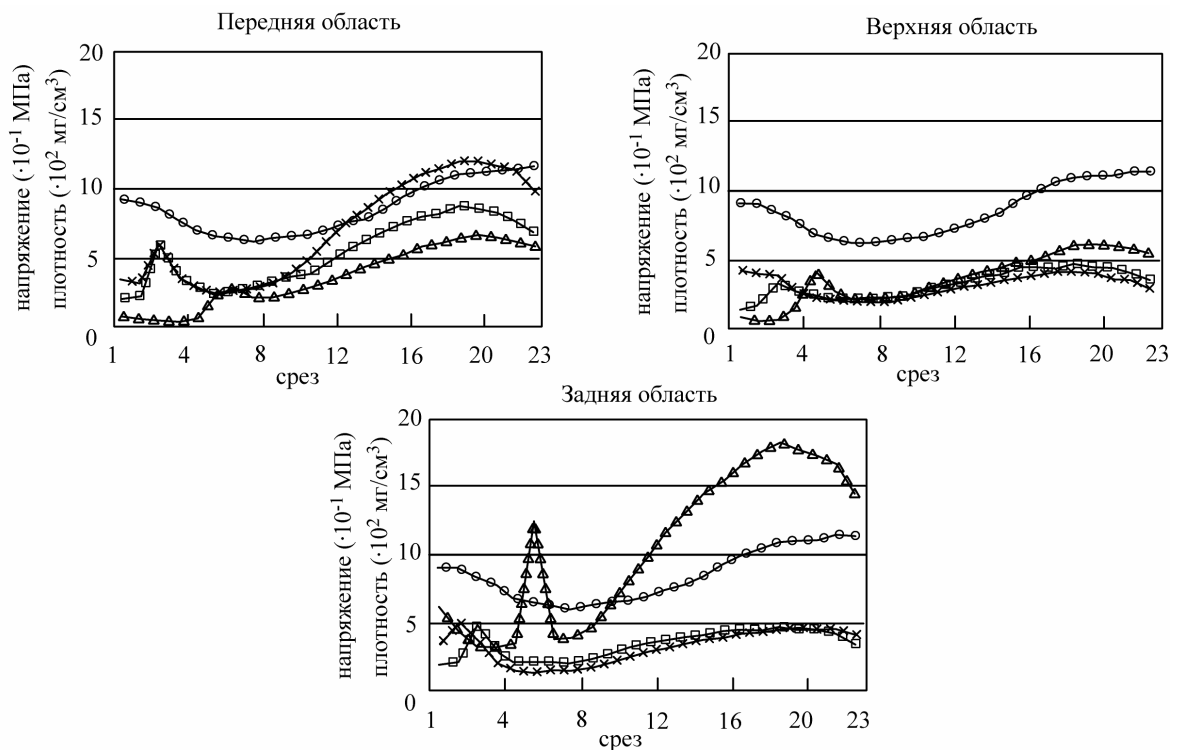


Рис. 7. Соотношение между плотностью материала кости и распределением напряжений для каждого горизонтального снимка дегенеративного мышечка 2А. Минеральная плотность кости (кружки), нагрузка на медиальную (квадратики), центральную (крестики), боковую (треугольники) зоны

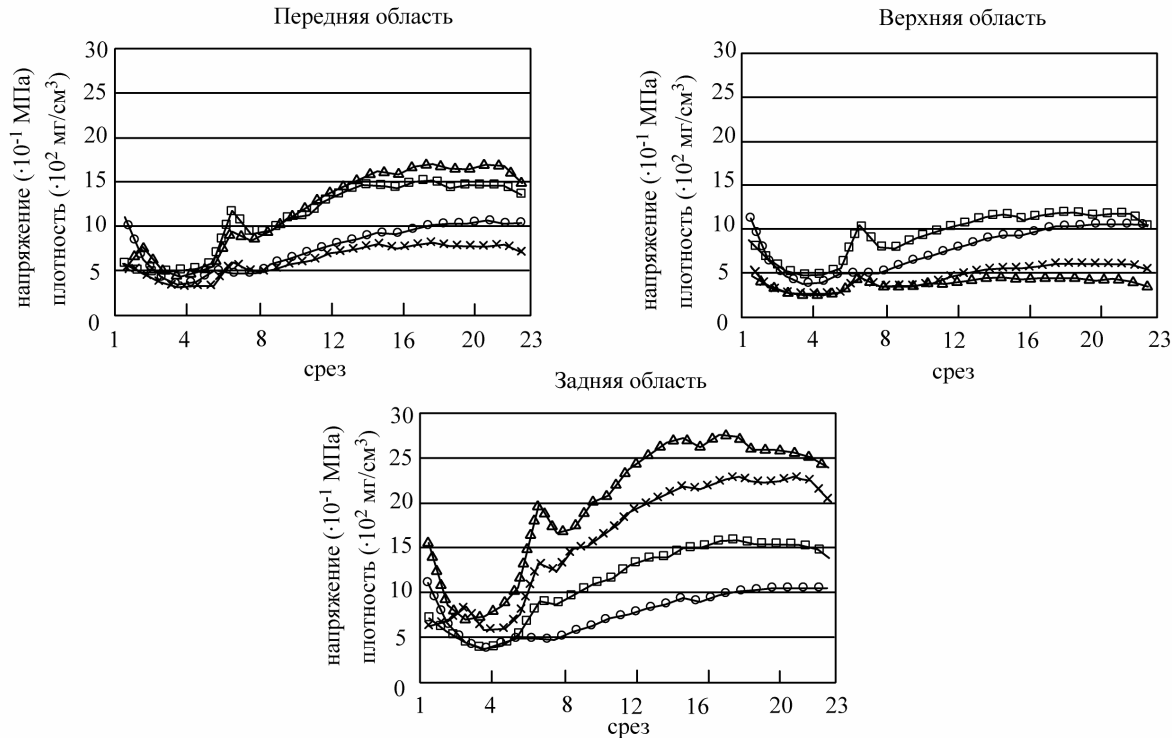


Рис. 8. Соотношение между плотностью материала кости и распределением напряжений для каждого горизонтального снимка дегенеративного мышелка 2В. Минеральная плотность кости (кружки), нагрузка на медиальную (квадратики), центральную (крестики), боковую (треугольники) зоны

4. Обсуждение

4.1. Морфологическая классификация мышелков нижней челюсти. Имеется много исследований по морфологической классификации и анализу регрессивных изменений в мышелках нижней челюсти, используя фронтальное и горизонтальное изображения [6 – 9]. Согласно исследованию, описанному в работе [6], наиболее часто встречаются мышелки выпуклого типа [9 – 10]. В некоторых работах есть указания на то, что с возрастом уменьшается количество мышелков выпуклого типа и увеличивается количество мышелков плоского типа [6 – 8]. Однако эти исследования не охватывали весь период жизни человека и имели существенные индивидуальные отличия. Поэтому надежность этих наблюдений вызывает сомнения. Другими словами, высказывания о зависящих от возраста регрессивных изменениях в мышелках нижней челюсти пока в основном носят гипотетический характер.

В течение жизни человека мышелки нижней челюсти перестраиваются вследствие следующих факторов: изменения положения и подвижности суставного диска, изменения в относительном расположении мышелка относительно суставной ямки, изменения направления и величины функционального давления. Поэтому такие морфологические типы мышелка, как круглый, выпуклый, угловой и плоский, дают только макроскопическую классификацию и недостаточны для указания на регрессивные изменения. С учетом сказанного в данной работе вдобавок к указанным макроскопическим параметрам мы используем следующие четыре параметра для оценки регрессивных изменений в мышелке: 1) отношение объема трабекулярной кости к объему всего мышелка нижней челюсти; 2) горизонтальный угол мышелка,

который определяется как внутренний угол, образованный горизонтальной длинной осью мыщелка и ветвью нижней челюсти; 3) медио-латеральное расстояние мыщелка и 4) отношение передне-заднего расстояния мыщелка к медио-латеральному расстоянию.

В соответствии с системой классификации, предложенной в работе [6], дегенеративные мыщелки 1А и 2А были классифицированы как мыщелки углового типа, а дегенеративные мыщелки 1В и 2В были классифицированы как мыщелки плоского типа. В мыщелках углового типа отношение передне-заднего расстояния к медио-латеральному расстоянию было большим, а для мыщелков плоского типа оно было значительно меньше. Поэтому в терминах морфологии степень регрессивных изменений была больше для мыщелков плоского типа с меньшим передне-задним расстоянием [8]. Однако, основываясь на отношении объема трабекулярной кости и горизонтального угла мыщелка, четыре дегенеративных мыщелка были разделены на группы 1 и 2 независимо от морфологии фронтального сечения. В результате медио-латеральное расстояние для мыщелков группы 2 было меньше, чем для мыщелков группы 1. С другой стороны, и медио-латеральное и передне-заднее расстояние были больше у нормальных мыщелков нижней челюсти, что было морфологически классифицировано как мыщелки выпуклого типа.

При сравнении с нормальными мыщелками отношение объема трабекулярной кости у мыщелков группы 1 было меньше на 10%, у мыщелков группы 2 – на 50%. Пока не ясно, является ли уменьшенное объемное содержание трабекулярной кости следствием утолщения кортикальной кости мыщелка нижней челюсти или остеосклероза трабекулярной кости. В любом случае медио-латеральное расстояние фронтального сечения было значительно меньше в мыщелках группы 1, чем в мыщелках группы 2, что сопоставимо с их атрофией. Следовательно, объемное содержание трабекулярной кости было наиболее подходящим указателем регрессивных изменений.

Горизонтальный угол мыщелка часто измерялся относительно линии, соединяющей задний край мыщелка, или линии, соединяющей задний конец левой и правой суставной ямки в верхней кости. Так как эти линии не использовались в данном исследовании, горизонтальный угол мыщелка был измерен относительно ветви нижней челюсти, аналогично было сделано в недавних исследованиях [11 – 12]. Этот угол имеет значения около 90°. В результате из-за того, что ветвь нижней челюсти меньше подвержена морфологическим изменениям в мыщелке, это оказалось полезным индикатором с высоким уровнем воспроизводимости. В работе [14] было указано, что увеличение горизонтального угла мыщелка коррелировало с увеличением регрессивных изменений. Хотя в данной работе использован другой метод измерения горизонтального угла мыщелка, чем в работе [14], этот угол был больше для мыщелков группы 2, чем для мыщелков группы 1, что соответствует тяжести регрессивных изменений.

4.2. Соотношение между минеральной плотностью кости и уровнем напряжений.

Внешняя и внутренняя структура костей соответствует стремлению уменьшить, насколько это возможно, концентрацию напряжений. Однако в данном исследовании обнаружены области со значительно повышенным уровнем напряжений, что не соответствует структуре кости мыщелка нижней челюсти. По этой причине в каждой модели мыщелка области со значительно повышенным уровнем напряжений по сравнению с зонами, воспринимающими нагрузку, были проанализированы по отношению к гипотезе о рациональном нагружении.

В данном исследовании при нормальном мыщелке нижней челюсти центральная зона передней области была единственной зоной, несущей нагрузку. Зоны, несущую нагрузку в группах 1 и 2, были в совершенном другом месте мыщелка. В

дегенеративном мышелке 1А зона, несущая нагрузку, располагалась в медиальной и центральной зонах верхней области, а в дегенеративном мышелке 1В эта зона была в медиальной и центральной зонах верхней области. В дегенеративном мышелке 1А корреляция между минеральной плотностью кости и распределением напряжений в медиальной и центральной зонах верхней области была $r=0,908$, $r_2=0,824$, $p<0,0001$ и $r=0,901$, $r_2=0,812$, $p<0,0001$, соответственно. В дегенеративном мышелке 1В эта корреляция была $r=0,882$, $r_2=0,676$, $p<0,0001$ и $r=0,779$, $r_2=0,639$, $p<0,0001$, соответственно. Эти наблюдения подтверждают, что в процессе регрессивных изменений в височно-нижнечелюстном суставе, хотя деформация и атрофия мышелка нижней челюсти нарастают, мышелок нижней челюсти по-прежнему функционирует и подвержен нагружению в различных направлениях. Поэтому биомеханические наблюдения мышелка соответствуют анатомическим и морфологическим изменениям.

Основываясь на корреляции между минеральной плотностью кости и распределением напряжений, можно выделить зоны, несущую нагрузку в дегенеративном мышелке 2А, которыми оказались центральная и латеральная зоны верхней области и медиальная и центральная латеральная зоны задней области. Аналогичными зонами в дегенеративном мышелке 2В были центральная и латеральная зоны верхней области и центральная зона передней области. В дегенеративном мышелке 2А коэффициент корреляции был $r=0,701$ в медиальной зоне верхней области ($r_2=0,492$, $p<0,0001$), $r=0,804$ в центральной зоне верхней области ($r_2=0,646$, $p<0,0001$) и $r=0,661$ в латеральной зоне верхней области ($r_2=0,437$, $p<0,0005$). Аналогично в дегенеративном мышелке 2В коэффициент корреляции был $r=0,831$ в медиальной зоне передней области ($r_2=0,691$, $p<0,0001$), $r=0,943$ в центральной зоне верхней области ($r_2=0,889$, $p<0,0001$) и $r=0,756$ в латеральной зоне верхней области ($r_2=0,571$, $p<0,0001$). Поэтому в мышелках 2А и 2В имеется высокая степень корреляции в центральной и латеральной зонах верхней области, подтверждая, что эти зоны являются зонами, несущими нагрузку в группе 2 мышелков.

В сравнении с группой мышелков 1 толщина кортикальной кости в группе мышелков 2 была больше во всех направлениях, подтверждая более выраженную атрофию. Эти наблюдения служат доказательством того, что регрессивные изменения были более выраженными в группе мышелков 2 в сравнении с группой мышелков 1. Биомеханические наблюдения показывают, что нагрузка от функционального давления перемещается от медиальной к латеральной области верхней области.

В дегенеративных мышелках 1В и 2В, которые классифицируются как мышелки плоского типа, была отмечена высокая степень корреляции между минеральной плотностью кости и распределением напряжений в центральных зонах верхней области и в центральной зоне передней области. С другой стороны, в дегенеративных мышелках 1А и 2А, классифицированных как мышелки углового типа, центральные зоны передней области обнаруживают ненормально высокий уровень напряжений, хотя они не входили в зоны, несущие нагрузку. Эти особенности связаны с различными характеристиками двух морфологических типов. Вышеуказанные наблюдения показывают, что морфология мышелка нижней челюсти влияет на расположение зон, несущих нагрузку.

Тем не менее, необходимо в дальнейшем исследовать области со значительными напряжениями, которые были исключены из зон, несущих нагрузку. Медиальная зона передней области была исключена во всех моделях; эта зона соответствует ямке крыловидной мышцы, где латеральная крыловидная мышца прикрепляется, и было замечено, что плотность трабекулярной кости увеличивается в ответ на тянущую нагрузку, создаваемую латеральной крыловидной мышцей [13]. Результаты компьютерной томографии также показывают, что плотность костных трабекул больше

в медиальной зоне передней области, чем в латеральной. Учитывая, что структура трабекул соответствует распределению напряжений, структура кости не могла выдерживать уровень нагрузки, которая была приложена. Поэтому в латеральной зоне задней области, хотя кортикальная кость достаточно толстая, уровень напряжений оказался значительно выше, что привело к структуре кости, отличной от структуры в зоне, несущей нагрузку.

В настоящем исследовании, когда нагрузка была приложена к центральной зоне верхней области (эта область оценивалась как зона, несущая нагрузку), распределение напряжений и плотность кости соответствовали в поперечном сечении трабекулярной кости. Наши выводы совпадают с результатами работы [5], где было исследовано трехмерное распределение напряжений в нормальных мышелках нижней челюсти. В тех сечениях, где были сконцентрированы напряжения, трабекулярная костная ткань была более плотной, что подтверждает, что эта зона является зоной, несущей нагрузку. Кроме того, была замечена высокая степень корреляции между минеральной плотностью кости и распределением напряжений, подтверждая, что форма и структура мышелков нижней челюсти являются рациональными с точки зрения биомеханики.

5. Выводы

1. Трехмерные модели мышелков нижней челюсти были разделены на две группы, основываясь на макроскопических наблюдениях и следующих четырех параметрах: 1) отношение объема трабекулярной костной ткани к объему всего мышелка нижней челюсти; 2) горизонтальный угол мышелка, который определяется как внутренний угол, образованный горизонтальной длинной осью мышелка и ветвью нижней челюсти; 3) медио-латеральное расстояние мышелка; 4) отношение передне-заднего расстояния мышелка к медио-латеральному расстоянию. Основываясь на соотношении между минеральной плотностью кости и распределением напряжений, были проанализированы направления действия нагрузки, что дает возможность оценить регрессивные изменения в мышелке нижней челюсти.

2. В нормальном мышелке нижней челюсти центральная зона верхней области является единственной зоной, несущей нагрузку, в то время как в дегенеративных мышелках зона, несущая нагрузку, располагается в различных положениях, в основном в центре верхней области. Кроме того, в сравнении с первой группой мышелков объемное отношение трабекулярной кости к объему всего мышелка нижней челюсти было значительно меньше в мышелках второй группы. Горизонтальный угол мышелка был больше, что подтверждает более выраженные регрессивные изменения. Затем было отмечено, что зона восприятия нагрузки движется от медиального расположения к латеральному в верхней области мышелка, что также связано с регрессивными изменениями.

3. В трехмерных моделях для первой и второй групп мышелков распределение напряжений, возникающих от приложенной нагрузки, оценивает зону восприятия нагрузки в соответствии с толщиной кортикальной кости и распределением трабекулярной кости на изображениях, полученных с помощью компьютерной томографии. Это подтверждает, что трехмерные модели точно воспроизводят морфологию и биомеханику мышелков нижней челюсти человека.

Список литературы

1. Curry J.D. The adaptation of bones to stress // J. Theor. Biol., 1968. V. 20. P. 91-106.
2. Kimura A. Stress analysis of the temporomandibular joint by finite element method // Jpn. J. Oral Maxillary Surg. 1990. V. 36. P. 36-52.
3. Sumiyoshi S. Biomechanical simulation of the temporomandibular joint – Effect of lubrication mechanism // Jpn. J. Oral Maxillary Surg. 1996. V. 44. P. 168-182.
4. Mori T., Maeda Y., et al. Biomechanical simulation of the morphological change in the temporomandibular joint. Part II: Shape difference in frontal section // J. Jpn. Soc., T. M. J. 1992. V. 4. P. 230-238.
5. Ohtuka S. Biomechanical analysis for the human temporomandibular joint by three-dimensional finite-element method // J. Fukuoka Dent. Coll. 2000. V. 27. P. 205-217.
6. Yale S.H., Ceballos M., et al. Some observations on the classification of mandibular condyle types // Oral Surg. 1963. V. 16. P. 572-577.
7. Kaburagi M. Anatomical studies on the mandibular condyle // The Journal of the Tokyo Dental College Society // 1970. V. 70. P. 1532-1549.
8. Sugisaki M., Suzuki K., et al. Study of temporomandibular joint of Japanese dry skull – Part III: Shape of condylar head // J. Jpn. Stomatol. Soc. 1990. V. 39. P. 539-550.
9. Mongini F. Dental abrasion as a factor in remodeling of the mandibular condyle // Acta Anat. 1975. V. 92. P. 292-300.
10. Demirjian A. A study of the morphology of the glenoid fossa // Natl. Mus. Canada Bull. 1967. V. 206. P. 1-25.
11. Du Brul E.L. The craniomandibular articulation / In Oral Anatomy, 7th ed. P. 174-209. The C.V. Mosby Co., St. Louis, Toronto, London. 1980.
12. Dowson P.E. Evaluation, diagnosis, and treatment of occlusal problems, 2nd ed. P. 18-27. The C.V. Mosby Co., St. Louis, 1989.
13. Hongou T. Qualitative and morphological studies on the trabecular bones in the processes condylaris of the Japanese mandibula // The Journal of the Tokyo Dental College Society. 1987. V. 87. P. 1583-1611.
14. Westessen P.L., Bifano J.A. Increased horizontal angle of the mandibular condyle in abnormal temporomandibular joints // Oral Surg. Oral Med. & Oral Path. 1991. V. 72. P. 359-363.

BIOMECHANICAL STUDY ON HUMAN MANDIBULAR CONDYLES WITH SEVERE MORPHOLOGICAL CHANGES

K. Izumi, T. Shimoda, S. Sumiyoshi, S. Ozeki (Fukuoka, Japan),
S. Tsutsumi (Kyoto, Japan)

By ascertaining the directionality of load bearing in mandibular condyles with atrophic changes, the last stage of osteoarthritis was considered. The morphological significance of human mandibular condyles with regressive changes was analyzed. Four human mandibular condyles with morphological changes (degenerative condyles) were analyzed using quantitative computer tomography with a slice thickness of 110 mm and slice interval of 150 mm. Simultaneously the bone mineral density was measured. Based on computed tomography images, four three-dimensional solid models were prepared. Then, linear static analysis was performed by the finite element method to assess correlation between stress distribution and bone mineral density.

Compared to a normal mandibular condyle, the volume ratio of cancellous bone to that of mandibular condyle was 10% lower in mildly degenerative condyles, and about 50% lower in severely degenerative condyles. Also, the anteroposterior distance was shorter for flat-type condyles than for angled-type condyles. The correlation between stress distribution and bone mineral density was high from the medial to central areas of the superior region in the mildly degenerative condyles, and from the central to lateral areas of the superior region in the severely degenerative condyles.

In result, in the severely degenerative condyles, atrophy was severe, and the load-bearing zone involved the medial, central and lateral areas of the superior region. In contrast, in the normal, mandibular condyles, the central area of the anterior region was the only load-bearing zone.

Key words: human mandibular condyle, morphological study, quantitative computed tomography, finite element method, stress analysis.

Получено 10 декабря 2003