

УДК 531.14:577.359:611.728

А.Е. Стрижков

кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры анатомии человека лечебного факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет)

A.E. Strizhkov

Candidate of Medical Science, Docent of the Department of Human Anatomy of the Faculty of Medicine at Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗРАСТНОЙ ДИНАМИКИ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЯЗОК КОЛЕННОГО СУСТАВА ПЛОДОВ ЧЕЛОВЕКА

MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF AGE DYNAMICS OF BIOMECHANICAL PROPERTIES OF KNEE LIGAMENTS OF THE KNEE JOINT IN HUMAN FETUSES

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Стрижков Алексей Евгеньевич, доцент кафедры анатомии человека лечебного факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет)
Адрес: 125 009, РФ, Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 10
Тел.: +7 (916) 542-93-96; e-mail: strizhkov@inbox.ru

Статья поступила: 20.10.2017

Статья принята: 01.12.2017

CONTACT INFORMATION

Strizhkov Alexey, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Human Anatomy of the Faculty of Medicine at Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «I.M. Sechenov First Moscow State Medical University» of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)

Address: 11, p. 10, Mohovaya str., Moscow, Russia, 125 009
Tel.: +7 (916) 542-93-96; e-mail: strizhkov@inbox.ru

Article received: 20.10.2017

Article approved: 01.12.2017

Аннотация

Проведено исследование строения и биомеханических свойств связок коленного сустава трупов 180 плодов в возрасте от 16 до 38 недель внутриутробного развития. Установлена корреляция между возрастной динамикой упруго-прочностных свойств и усложнением фиброархитектоники связок. Предел прочности вещества связок снижается при формировании пучков коллагеновых волокон второго и третьего порядков и увеличивается при их созревании. Модуль упругости обратно пропорционален степени извитости и продольной кривизны пучков коллагеновых волокон первого и второго порядков. Предельное относительное удлинение наименьшее при относительном преобладании эндотениона над пучками коллагеновых волокон связок.

Ключевые слова: коленный сустав, связки, фиброархитектоника, предел прочности, модуль упругости.

Abstract

A study of the structure and biomechanical properties of knee joint ligaments in 200 fetus corpses at the age of 12 to 38 weeks of intrauterine development was conducted. A correlation was established between age dynamics of elastic-strength properties and complexity of fibroarchitectonics of ligaments. The strength limit of the ligament substance decreases with the formation of bundles of collagen fibers of the second and third orders and increases with their maturation. The modulus of elasticity directly depends on the degree of tortuosity and longitudinal curvature of bundles of collagen fibers of the first and second orders. The limiting relative elongation is greatest with relative prevalence of endotenonion over bundles of collagen fibers of the ligaments.

Keywords: knee joint, ligaments, fibroarchitectonics, ultimate strength, elastic modulus.

Ведущей функцией волокнистых элементов опорно-двигательного аппарата является механическая. Особенности биомеханических свойств опорных структур определяются внутриорганной организацией волокнистых элементов [1]. Поэтому выяснение особенностей строения и прочностных свойств плотных соединительнотканых структур является важной задачей морфологии. Известно, что прочностные свойства связок суставов зависят от локализации, возраста, морфологической конституции и др. [2, 3]. В связи с этим возникает интерес к изучению возрастных и морфофункциональных особенностей связок разных суставов у человека [4, 5].

Целью исследования явилось выявление устойчивых связей строения и упруго-прочностных свойств связок коленного сустава на протяжении плодного периода развития человека.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1. Изучалось анатомическое и гистологическое строение связок коленного сустава плодов человека разного возраста.
2. Проводилось исследование упруго-прочностных свойств связок коленного сустава плодов человека разного возраста.
3. На основании полученных цифровых данных проводилось выявление связей между количественными параметрами возрастных преобразований строения и биомеханических свойств связок коленного сустава плодов человека разного возраста.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования явились связки коленного сустава: передняя и задняя крестообразные, большеберцовая и малоберцовая коллатеральные и надколенника — 180 трупов плодов человека в возрасте от 16 до 38 недель внутриутробного развития, не имевших патологии опорно-двигательного аппарата. Возраст плода определялся по результатам измерения теменно-копчиковой и теменно-пяточной длин [6].

Анатомия связок изучалась макро- и микроскопическими методами на нативных и окрашенных гипосульфитом серебра препаратах с использованием бинокулярного микроскопа МБС-9 и цифрового измерительного микроскопа BW1008-500X. Для исследования внутрисуставных и капсулярных связок применялось внутрисуставное контрастирование — заполнение полости сустава окрашенными пластическими массами [7].

Гистологическое исследование проводилось на продольных и поперечных гистологических сре-

зах связок, окрашенных гематоксилином и эозином и по Ван Гизону. Препараты изучались и фотографировались под микроскопом МБС-15 и микроскопом-микровизором mVizo-103. Морфометрия пучков коллагеновых волокон проводилась с использованием стандартного программного обеспечения микроскопа mVizo-103. Проводилось поляризационно-микроскопическое исследование срезов нативных и окрашенных гематоксилином и эозином препаратов.

Биомеханические испытания проводились на разрывной машине ZM-10. Для этого при помощи специального пресс-ножа стандартной формы из среднего участка связок с достоверно известными изотропными механическими свойствами вещества связок изготавливался «стандартный образец» с размерами рабочей части 1×5 мм и расширенными концевыми фрагментами. Толщина рабочей части измерялась для каждого образца. При испытаниях регистрировались предельные нагрузка и удлинение и велась запись графика деформации. В последующем рассчитывались предел прочности и предельное относительное удлинение образцов. На графике деформации определялись координаты 10 равноудаленных точек, по которым проводилось математическое моделирование и рассчитывался коэффициент (модуль) упругости (Юнга).

Анализ полученных количественных данных проводился стандартным программным обеспечением MS Excel 2007 и Statistica 10.0.

В результате проведенного исследования были получены следующие результаты.

Анализ биомеханических свойств связок коленного сустава проводился на связках, анатомически обособленных от капсулы и других связок коленного сустава, у которых можно выделить участок с изоморфной рабочей частью, размеры которой соответствуют стандартному образцу для биомеханических испытаний вещества связок. Для связки надколенника, передней и задней крестообразных связок испытания на упруго-прочностные свойства проводились с 16-й недели, для коллатеральных связок — с 24-й недели внутриутробного развития.

Анализ возрастной динамики предела прочности вещества связок коленного сустава (табл. 1) выявил, что на протяжении плодного периода показатель изменяется в пределах от $1,11 \pm 0,31$ МПа до $5,38 \pm 0,76$ МПа.

Анализ возрастной динамики предела прочности связочного аппарата коленного сустава плодов человека выявил локальные особенности возрастной динамики параметра у разных связок (см. табл. 1). Связка надколенника показывает два статистически значимых ($p < 0,05$) минимальных экстремума предела прочности — на 20–23-й и 32–35-й неделях внутриутробного развития. Предел прочности вещества передней крестообразной связки увеличивается

Таблица 1
Предел прочности связок коленного сустава плодов человека (МПа)

Связка	16–19-я недели	20–23-я недели	24–27-я недели	28–31-я недели	32–35-я недели	36–38-я недели
Связка надколенника	3,09 ± 0,53	1,85 ± 0,12*	4,87 ± 0,59*	4,05 ± 1,17	1,78 ± 0,21	4,13 ± 0,52
Передняя крестообразная связка	1,11 ± 0,31	1,20 ± 0,41	2,53 ± 0,48*	3,73 ± 0,14*	3,61 ± 0,85	3,98 ± 0,61
Задняя крестообразная связка	1,14 ± 0,12	2,14 ± 0,34*	3,25 ± 0,53	1,20 ± 0,08*	3,75 ± 0,52*	3,43 ± 0,43
Большеберцовая коллатеральная связка	—	—	4,41 ± 0,54	5,27 ± 0,85	2,21 ± 0,23*	5,38 ± 0,76*
Малоберцовая коллатеральная связка	—	—	4,80 ± 0,84	3,81 ± 0,88*	2,79 ± 0,09	4,45 ± 0,68

Примечание: * — статистически значимое различие с предыдущей возрастной группой ($p < 0,05$).

Таблица 2
Предельное относительное удлинение (предельная деформация) связок коленного сустава плодов человека

Связка	16–19-я недели	20–23-я недели	24–27-я недели	28–31-я недели	32–35-я недели	36–38-я недели
Связка надколенника	0,93 ± 0,22	1,05 ± 0,13	0,73 ± 0,06*	0,70 ± 0,08	0,69 ± 0,08	0,82 ± 0,06
Передняя крестообразная связка	0,67 ± 0,03	0,54 ± 0,07	0,62 ± 0,03	0,60 ± 0,08	0,55 ± 0,05	0,64 ± 0,03
Задняя крестообразная связка	0,97 ± 0,05	0,59 ± 0,06*	0,67 ± 0,05	0,60 ± 0,03	0,75 ± 0,06*	0,70 ± 0,05
Большеберцовая коллатеральная связка	—	—	0,68 ± 0,04	0,89 ± 0,10*	0,69 ± 0,04	0,75 ± 0,06
Малоберцовая коллатеральная связка	—	—	0,65 ± 0,05	1,04 ± 0,18	0,80 ± 0,10	0,90 ± 0,12*

Примечание: * — статистически значимое различие с предыдущей возрастной группой ($p < 0,05$).

Таблица 3
Модуль упругости (Юнга) связок коленного сустава плодов человека (МПа)

Связка	16–19-я недели	20–23-я недели	24–27-я недели	28–31-я недели	32–35-я недели	36–38-я недели
Связка надколенника	5,19 ± 1,82	2,87 ± 0,59	8,87 ± 0,98*	6,24 ± 0,92	4,34 ± 0,65	6,23 ± 0,73
Передняя крестообразная связка	1,46 ± 0,81	2,29 ± 0,86	5,80 ± 0,97*	8,46 ± 1,43	9,92 ± 2,46	9,60 ± 1,21
Задняя крестообразная связка	1,20 ± 0,48	5,43 ± 1,08*	6,99 ± 0,86	2,63 ± 0,20*	7,47 ± 1,25*	7,46 ± 0,73
Большеберцовая коллатеральная связка	—	—	9,03 ± 0,58	6,75 ± 0,09*	3,18 ± 0,22*	7,93 ± 0,71*
Малоберцовая коллатеральная связка	—	—	8,55 ± 0,81	5,86 ± 0,56*	8,38 ± 1,92	7,47 ± 0,63

Примечание: * — статистически значимое различие с предыдущей возрастной группой ($p < 0,05$).

на протяжении плодного периода относительно равномерно без статистически значимых экстремумов. Предел прочности задней крестообразной и коллатеральных связок коленного сустава плодов человека имеет один возрастной экстремум: у задней крестообразной связки на 28–31-й неделях, у коллатераль-

ных — на 32–35-й неделях внутриутробного развития. Наименьшие показатели предела прочности на протяжении плодного периода отмечаются у крестообразных связок, наибольшие — у коллатеральных.

Предельное относительное удлинение разрыва у связок коленного сустава на протяжении плод-

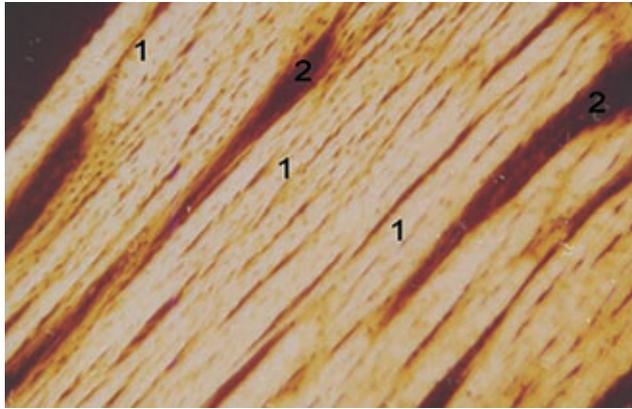


РИС. 1. Средняя часть передней крестообразной связки коленного сустава плода 22–23-й недели внутриутробного развития. Пучки коллагеновых волокон первого порядка (1). Формирование прослоек эндотенония между пучками коллагеновых волокон второго порядка (2). Поляризационная микроскопия. Окраска гематоксилином и эозином. Микрофото. Объектив 16, окуляр 12,5

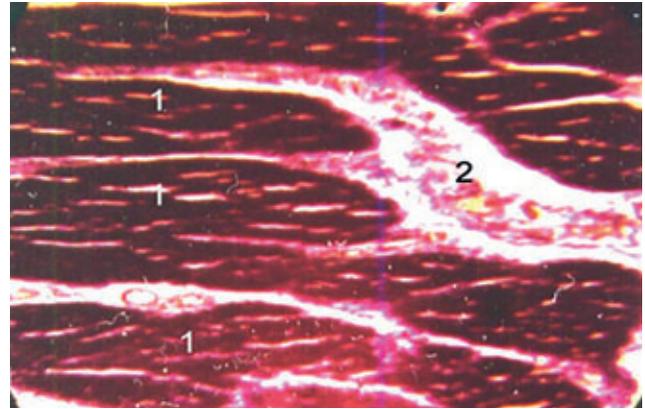


РИС. 2. Средняя часть передней крестообразной связки плода 30–31-й недели внутриутробного развития. Между пучками коллагеновых волокон второго порядка (1) выявляются широкие прослойки эндотенония (2). Окраска гематоксилином и эозином. Микрофото. Объектив 10, окуляр 12,5

ного периода у всех связок не показывает статистически значимых изменений (табл. 2). От других связок отличается передняя крестообразная связка, предельное относительное удлинение которой наименьшее среди других связок коленного сустава плодов.

Модуль упругости (Юнга) связок коленного сустава человека в плодном периоде у разных связок меняется неодинаково (табл. 3). В возрастной динамике модуля упругости связки надколенника выявляются два минимальных экстремума: $2,87 \pm 0,59$ МПа (на 20–23-й неделях) и $4,34 \pm 0,65$ МПа (на 32–36-й неделях). Передняя крестообразная связка после минимума на 16–23-й неделях демонстрирует постоянный рост показателя. В плодном периоде у задней крестообразной связки выявлены также два наименьших значения: $1,20 \pm 0,48$ МПа (на 16–19-й неделях) и $2,63 \pm 0,20$ МПа (на 28–31-й неделях). Коллатеральные связки коленного сустава плодов демонстрируют высокие показатели модуля упругости по сравнению с другими связками сустава. Статистически значимое минимальное значение модуля упругости большеберцовой коллатеральной связки отмечается на 32–35-й неделях ($3,18 \pm 0,22$ МПа), а малоберцовой — на 28–31-й ($5,86 \pm 0,56$ МПа).

Гистологическое исследование выявило возрастные особенности усложнения фиброструктуры средней части связок коленного сустава плодов человека. На 16–17-й неделях внутриутробного развития волокнистые элементы представлены пучками коллагеновых волокон первого порядка, разделенных клетками фибробластического ряда. Пучки волокон плохо воспринимают красители, извитость волокон не выражена.

На 20–23-й неделях у связки надколенника и передней крестообразной связки начинают формиро-

ваться пучки коллагеновых волокон второго порядка (рис. 1) — между группами пучков волокон первого порядка формируются относительно широкие промежутки эндотенония. У задней крестообразной связки подобная гистологическая картина обнаруживается на 24–27-й неделях, а у большеберцовой и малоберцовой коллатеральных связок — на 28–31-й неделях внутриутробного развития.

Формирование пучков коллагеновых волокон третьего порядка отмечено у связки надколенника и передней крестообразной связки на 30–31-й неделях внутриутробного развития. Между пучками коллагеновых волокон второго порядка выявляются широкие промежутки рыхлой соединительной ткани эндотенония (рис. 2). У задней крестообразной и коллатеральных связок в плодном периоде пучки третьего порядка не определяются.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Гистологическое исследование фиброструктуры связок коленного сустава у плодов разного возраста позволило найти морфологическое объяснение выявленных биомеханических особенностей. Предел прочности вещества связок снижается при появлении нового элемента фиброструктуры: пучков коллагеновых волокон второго и третьего порядков. Дальнейшее созревание пучков коллагеновых волокон, сопровождающееся увеличением их толщины, при относительно неизменном состоянии эндотенония ведет к увеличению предела прочности.

Модуль упругости (Юнга) обратно пропорционально зависит от степени извитости и продольной кривизны пучков коллагеновых волокон первого

и второго порядков. Чем сильнее выражена извитость пучков волокон, тем меньше модуль упругости. В начале плодного периода этот показатель был больше у связки надколенника, а на 36–38-й неделях — у задней крестообразной и коллатеральных связок коленного сустава.

Предельное относительное удлинение на протяжении плодного периода у связок коленного сустава статистически значимо не менялось. Наименьшее значение показателя (различия статистически значимы, $p < 0,05$) отмечено у передней крестообразной связки, у которой по сравнению со всеми другими обследованными связками отмечалось относительное преобладание рыхлой соединительной ткани эндотенония над волокнистыми элементами.

Выявленные особенности взаимной зависимости строения и механических свойств связок коленного сустава имеют прикладное значение при планировании способа оперативного лечения [8] и устанавливают пределы и допуски параметров для компьютерного моделирования коленного сустава.

ВЫВОДЫ

4. Предел прочности вещества связок снижается при первичном формировании пучков коллагеновых волокон второго и третьего порядков и увеличивается при их последующем созревании.
5. Модуль упругости обратно пропорционально зависит от степени извитости и продольной кривизны пучков коллагеновых волокон первого и второго порядков связок сустава.
6. Предельное относительное удлинение наименьшее при относительном преобладании эндотенония над пучками коллагеновых волокон связок.

Финансирование. Работа не имеет финансовой поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николенко В.Н. Морфобиомеханические закономерности и индивидуальная изменчивость конструкции спинного мозга: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Саранск, 1997. [Nikolenko V.N. Morphobiomechanical regularities and individual variability of the structure of the spinal cord. The dissertation author's abstract on competition of a scientific degree of the doctor of medical sciences. Saransk, 1997 (In Russian).]

2. Николенко В.Н., Грешнова О.Г., Загоровская Т.М. Деформативно-прочностные свойства продольных связок поясничного отдела позвоночного столба в зависимости от типов телосложения. Морфология. 2002; 121(2–3): 114. [Nikolenko V.N., Greshnova O.G., Zagorovskaya T.M. Deformative-strength properties of longitudinal ligaments of the lumbar vertebral column, depending on the type of constitution. Morphology. 2002; 121(2–3): 114 (In Russian).]
3. Николенко В.Н., Грешнова О.Г., Соловьев А.М. Варианты изменчивости деформативно-прочностных свойств продольных связок поясничного отдела позвоночного столба. Морфологические ведомости. 2002; 1–2: 29–32. [Nikolenko V.N., Greshnova O.G., Soloviev A.M. Variants of variability of deformation-strength properties of longitudinal ligaments of the lumbar vertebral column. Morphological sheets. 2002; 1–2: 29–32 (In Russian).]
4. Ахметдинова Э.Х., Вагапова В.Ш. Фиброархитектоника мест фиксации связок коленного сустава у плодов и новорожденных детей. Медицинский вестник Башкортостана. 2015; 10(1): 65–68. [Ahmetdinova E.H., Vagapova V.Sh. Fibroarhitektonika places of fixation of ligaments of the knee joint in fetuses and newborn children. Medical bulletin of Bashkortostan. 2015; 10(1): 65–68 (In Russian).]
5. Ахметдинова Э.Х., Вагапова В.Ш. Биомеханические свойства мест фиксации связочного аппарата коленного сустава у плодов и новорожденных детей человека. Морфология. 2016; 149(3): 22. [Ahmetdinov E.H., Vagapova V.Sh. Biomechanical properties of the fixation of the ligamentous apparatus of the knee joint in fetuses and newborn human children. Morphology. 2016; 149(3): 22 (In Russian).]
6. Стрижков А.Е. Математическая модель оценки возраста плода человека по его наружным антропометрическим показателям. Российские морфологические ведомости. 2000; 1–2: 94–99. [Strizhkov A.E. A mathematical model for estimating the age of a human fetus according to its external anthropometric indices. Russian Morphological Bulletin. 2000; 1–2: 94–99 (In Russian).]
7. Стрижков А.Е., Нуриманов Р.З. Способ выделения капсульно-связочного аппарата суставов путем заполнения полости контрастным веществом. Патент РФ на изобретение RU 2 618 201 С1. Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент). 2017; 13. [Strizhkov A.E., Nurimanov R.Z. The method of isolating the capsular-ligament apparatus of the joints by filling the cavity with contrast medium. Patent of the Russian Federation for invention RU 2 618 201 C1. Inventions. Useful models. Official Bulletin of the Federal Service for Intellectual Property (Rospatent). 2017; 13 (In Russian).]
8. Николенко В.Н., Блувштейн Г.А., Булычев Г.И., Лабунский Ю.В. Сравнительная оценка прочности связок акромиального конца ключицы и способов его экспериментального соединения с лопаткой. Математическая морфология. 2002; 4(1). URL: <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-8-html/nikolenko.html> [Nikolenko V.N., Bluvstein G.A., Bulychev G.I., Labunsky Yu.V. Comparative evaluation of the strength of the ligaments of the acromial end of the clavicle and the methods of its experimental connection to the scapula. Mathematical morphology. 2002; 4(1). URL: <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-8-html/nikolenko.html> (In Russian).]