

УДК 611.71 + 611.019 + 591.4

БИОМЕХАНИКА ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА ЧЕЛОВЕКА

© 2021 г. Нечаев В. И.

«Наши представления о биомеханике позвоночного столба примитивны и мало научны» [1].

Единицей поясничного отдела позвоночника является поясничный позвонок и смежные межпозвоночные диски. При ходьбе позвонки смещаются в противоположных направлениях вокруг своих кинематических осей. Каждый позвонок состоит из правых и левых составных рычагов поперечных и остистых отростков. Каждый шаг сопровождается ротацией поясничных позвонков вокруг правых и левых, восходящих и нисходящих осей, торсия – вокруг восходящих осей, деторсия – вокруг нисходящих осей. Торсионные и деторсионные ротации поясничного отдела позвоночника совершаются потому, что векторы ротаций бедренных костей, таза и грудной клетки всегда противоположны. Торсия поясничных позвонков вызывает в нижних смежных дисках натяжение нисходящих волокон от нижних половин талий тел смежных позвонков, в верхних смежных дисках – натяжение восходящих волокон от верхних половин талий тел верхних смежных позвонков. Компенсация внутренних сил механической энергии для каждого поясничного позвонка возникает при напряжении волокон смежных межпозвоночных дисков.

Ключевые слова: *системные позвоночные единицы и позвоночные двигательные комплексы, кинематические оси позвонков, рычаги позвонков, восходящие и нисходящие волокна межпозвоночных дисков, силовые линии тел позвонков, талии тел позвонков.*

Общепринятым обозначением структурной и функциональной единицы позвоночника является позвоночный двигательный сегмент (ПДС, spinal motion segment) - анатомический комплекс, состоящий из двух смежных позвонков с соответствующими суставами, мышечно-связочным аппаратом на этом уровне и межпозвоночным диском между позвонками [2].

Формулировка ПДС в качестве позвоночной единицы не согласуется с теорией кинематики, согласно которой сегмент, это - всегда структура в единственном числе, в нашем примере - один позвонок, а два смежных позвонка «с соответствующими суставами», это - уже две кинематические цепи.

Базовым для верификации единицы позвоночного столба является наличие системной организации его структур: целостности, устойчивости, взаимной зависимости, иерархичности.

Мы определили, что структуры ПДС не обладают свойствами системной организации и не могут обеспечить позвоночный столб системными свойствами. По этим причинам мы не рассматриваем позвоночный двигательный сегмент в качестве структурной и двигательной единицы позвоночника, но используем его в качестве топографического обозначения межпозвоночных дисков и отверстий.

Определиться с понятием *единица позвоночника* совершенно необходимо, т.к. *стабильность* (устойчивость) позвоночного столба определяется минимальной стабильностью каждой его единицы, а топография нестабильной единицы обозначит место нестабильности позвоночника.

Мы выявили дополнительные элементы организации позвонков: кинематические оси позвонков, рычаги позвонков, восходящие и нисходящие волокна межпозвоночных дисков, силовые линии тел позвонков, позвонковые двигательные комплексы, талии тел позвонков.

Анатомический комплекс, состоящий из дополнительных элементов, в сочетании с аксиоматическими структурами поясничных позвонков, обладает свойствами системной организации, не противоречит кинематической теории, что позволяет рекомендовать его в качестве *единицы позвоночника*, обладающей системными свойствами.

Состав системной единицы поясничного отдела позвоночника:

1. Поясничный позвонок.
2. Нижние межпозвоночные (дуго-отростчатые, art. zigarophysiales) суставы.
3. Мышцы между остистыми и поперечными отростками смежных позвонков.
4. Смежные межпозвоночные диски.
5. Виртуальные элементы: кинематические оси позвонка, рычаги позвонка, силовые линии в теле позвонка.

Следует принимать во внимание, что взаимодействие грудного и поясничного отделов позвоночника находится на уровне межпозвоночного диска Th XI – X. Грудной отдел позвоночника (Th I – X) по отношению к поясничному отделу (Th XI – LV) функционирует как сегментированный монолит и ротируется в противоположную сторону от векторов ротации опорного бедра.

Колеблющиеся ребра не ограничивают движения нижних грудных позвонков Th XI и Th XII, о чем свидетельствуют целые реберные ямки на телах позвонков, отсутствие связок между головками ребер и межпозвоночными дисками, отсутствие реберно-поперечных суставов. Th XI и Th XII имеют анатомические признаки поясничных позвонков: остистые отростки Th XI – XII широкие, плоские, направлены назад, межпозвоночные суставы имеют такое же строение, как у поясничных позвонков.

Суставные поверхности верхних суставных отростков Th XI плоские, ориентированы вперед и медиально, как у всех грудных позвонков, тело Th X имеет только верхние реберные ямки.

LV имеет наклон, равный углу наклона крестца, обладает мощным связочным аппаратом с тазом, имеет структурные отличия от других поясничных позвонков, что позволяет считать его переходным и приводом от крестца к поясничному отделу позвоночника.

Кинематические оси поясничных позвонков

Смежные позвонки сочленяются межпозвонковыми (дуготростчатые) суставными, поэтому движения позвонка могут совершаться и совершаются вокруг четырех осей, правых и левых восходящих и нисходящих. Правая восходящая ось проходит между правым нижним и левым верхним суставными отростками, правая нисходящая – между правым верхним и левым нижним суставными отростками. Левая восходящая ось проходит между левым нижним и правым верхним суставными отростками, левая нисходящая – между правым верхним и левым нижним суставными отростками.

Между верхними и нижними межпозвонковыми суставами проходят межсуставные кинематические оси.

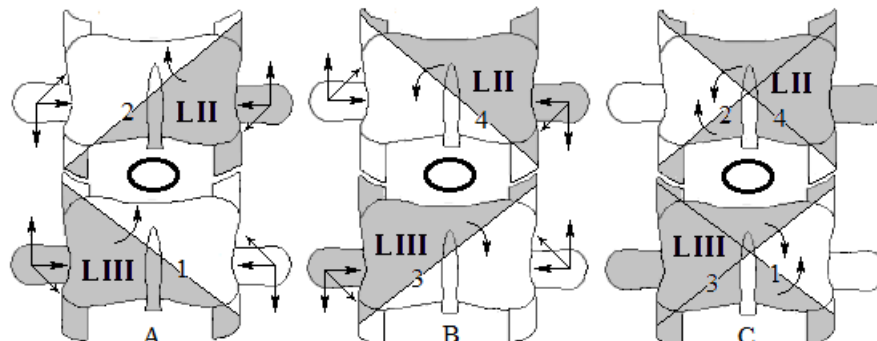


Рис.1. Кинематические оси поясничных позвонков.

1. Ось над левым поперечным отростком от правого нижнего суставного отростка – левая восходящая ось. 2. Ось над правым поперечным отростком от левого нижнего суставного отростка – правая восходящая ось. 3. Ось под левым поперечным отростком от левого нижнего суставного отростка – левая нисходящая ось. 4. Ось под правым поперечным отростком от правого нижнего суставного отростка – правая нисходящая ось.

При ротации вокруг левой восходящей оси (1) позвонок ротируются против часовой стрелки. Левый поперечный отросток смещается вправо, вверх и назад. Правый поперечный отросток смещается влево, вперед и вниз.

При ротации вокруг правой восходящей оси (2) позвонок ротируются по часовой стрелке. Правый поперечный отросток смещается влево вверх и назад. Левый поперечный отросток смещается вправо, вниз и вперед.

При ротации вокруг левой нисходящей оси (3) позвонки ротируются по часовой стрелке. Лавый поперечный отросток смещается вправо, вниз и назад. Правый поперечный отросток смещается влево, вверх и вперед.

При ротации позвонка вокруг правой нисходящей оси (4) позвонки ротируются против часовой стрелки. Правый поперечный отросток смещается влево, вниз и назад. Левый поперечный отросток смещается вправо, вверх и вперед.

Волокнистые элементы межпозвоночных дисков

В состав межпозвоночных дисков входят восходящие и нисходящие пучки фиброзных и эластических волокон, имеющие наклоны в сторону ротаций смежных позвонков.

Восходящие пучки волокон межпозвоночных дисков начинаются широкими фиброзными основаниями на верхних замыкательных пластинках нижних позвонков и заканчиваются суженными эластическими верхушками на нижних замыкательных пластинках верхних позвонков.

Нисходящие волокна межпозвоночных дисков начинаются широкими фиброзными основаниями на нижних замыкательных пластинках верхних позвонков и заканчиваются суженными эластическими верхушками на верхних замыкательных пластинках нижних позвонков.

Позвонки при смещении тянут за собой широкие, преимущественно фиброзные, основания пучков волокон межпозвоночных дисков и растягивают узкие, преимущественно эластические части пучков волокон. Поэтому волокна наклонены в направлении ротаций смежных позвонков. Наличие противонаправленных пучков волокон в межпозвоночных дисках структурно подтверждают смещения смежных поясничных позвонков в противоположные стороны.

Растяжение и напряжение восходящих пучков волокон возникают под влиянием движений нижних позвонков, что генерирует в телах верхних позвонков восходящие силовые линии с тягой от верхних боковых поверхностей тел верхних смежных позвонков.

Движения верхних позвонков вызывает напряжение пучков нисходящих волокон, что генерирует в телах нижних позвонков нисходящие силовые линии с тягой от нижних боковых поверхностей тел нижних смежных позвонков.

Углы наклона силовых линий в телах позвонков совпадают с углами наклона пучков волокон межпозвоночных дисков (Рис. 2).

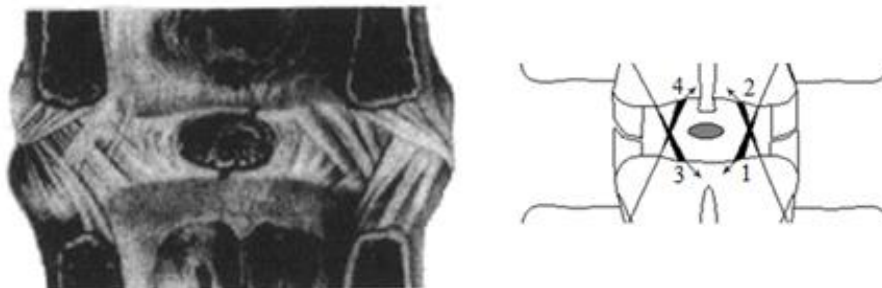


Рис. 2. Волокнистые элементы межпозвонкового диска (рисунок с препарата Х. Люшка, 1858).

1. Правые восходящие волокна.
2. Правые нисходящие волокна.
3. Левые восходящие волокна.
4. Левые нисходящие волокна.

Рычаги позвонков

M.m. rotatores соединяют поперечные отростки нижних позвонков с остистыми отростками верхних позвонков. Мышцы притягивают смежные позвонки друг к другу, ротируя их в противоположных направлениях вокруг восходящих осей нижних позвонков и нисходящих осей верхних смежных позвонков.

Каждая мышца является приводом для двух рычагов. Правый *m. rotator* является приводом для рычага правого поперечного отростка нижнего позвонка и рычага правой стороны остистого отростка верхнего позвонка. Левый *m. rotator* является приводом для рычага левого поперечного отростка нижнего смежного позвонка и рычага левой стороны остистого отростка верхнего позвонка (Рис. 3).

Поперечный отросток, это – точка приложения силы для рычага силы поперечного отростка, правого или левого. Остистый отросток верхнего смежного позвонка, это – точка приложения силы правого или левого рычага силы остистого отростка.

Рычаг правого поперечного отростка опирается на левый нижний суставной отросток нижнего позвонка, правый рычаг остистого отростка верхнего позвонка опирается на правый нижний суставной отросток верхнего позвонка. Структурным подтверждением наличия точек опоры на нижние суставные отростки являются их выпуклые суставные поверхности.

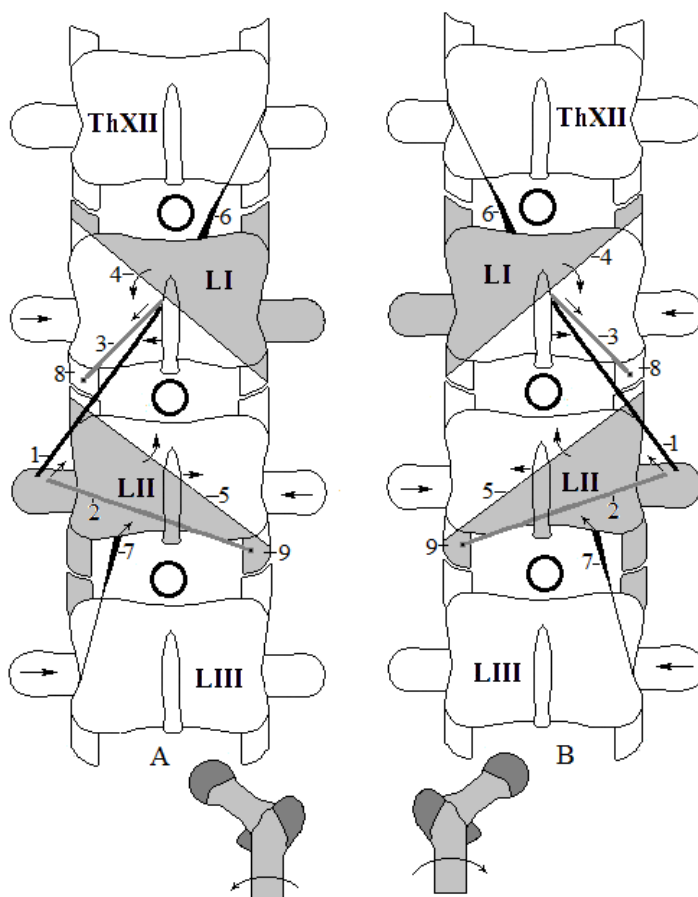


Рис. 3. Рычаги поперечных и остистых отростков смежных позвонков.

1. Поперечно-остистые мышцы, тяги за поперечные отростки LII и остистые отростки LI.
2. Плечи рычагов поперечных отростков LII. 3. Плечи рычагов остистых отростков LI. 4. Нисходящие оси рычагов остистых отростков. 5. Восходящие оси рычагов поперечных отростков. 6. Восходящие волокна межпозвонкового диска ThXII - LI. 7. Нисходящие волокна межпозвонкового диска LII - III. 8. Точки опоры рычагов остистых отростков. 9. Точки опоры рычагов поперечных отростков.

Рис 3 А. Левая поперечно-остистая мышца LI-II сближает остистый отросток LI и левый поперечный отросток LII. Мышца приводит в действие и объединяет нисходящий левый рычаг остистого отростка LI и восходящий рычаг левого поперечного отростка LII. Плечо левого (нисходящего) рычага силы остистого отростка LI (3) находится на прямой линии между левой стороной остистого отростка LI и точкой опоры - левым нижним суставным отростком LI (8). Тяга поперечно-остистой мышцы за левую сторону остистого отростка вызывает ротацию позвонка вправо вокруг нисходящей оси правого рычага остистого отростка (4), что растягивает правые восходящие волокна вправо и вниз (6) и генерирует тягу силовых линий от верхней части правой талии тела ThXII.

Плечо рычага силы левого поперечного отростка LII (2) – находится на прямой линии между левым поперечным отростком LII и правым нижним

суставным отростком LII (9). Точка приложения силы рычага – левый поперечный отросток LII. Рычаг ротирует позвонок вокруг восходящей оси (5), влево и вверх вызывает растяжение нисходящих волокон и генерирует тягу силовых линий от нижней части левой талии тела LIII (7).

Рис. 3 В. Правая поперечно-остистая мышца LI-II, сближая остистый отросток LI и правый поперечный отросток LII, объединяет простой восходящий рычаг силы правого поперечного отростка LII и левый нисходящий рычаг силы остистого отростка LI. Плечо правого рычага силы остистого отростка (3) находится на прямой линии между остистым отростком LI справа и правым нижним суставным отростком LI (8). Точка приложения силы – остистый отросток LI справа. Правый *m. rotator* LI-II тянет остистый отросток LI влево, вперед и вниз (7). LI ротируется влево, вперед и вверх вокруг нисходящей оси (9). Растягиваются и напрягаются левые восходящие пучки волокон в верхнем диске LI (11), и генерируются тяги силовых линий от верхней части левой талии тела ThXII. Плечо рычага силы правого поперечного отростка LII (2) находится между правым поперечным отростком LII (точкой приложения силы) и левым нижним суставным отростком LII (точкой опоры рычага). Правый *m. rotator* LII-III (1) тянет правый поперечный отросток позвонка вверх и назад, позвонок смещается вокруг восходящей оси (3), растягивает и напрягает правые нисходящие пучки волокон в межпозвоновом диске LII-III и генерирует тяги силовых линий от нижней части правой талии тела LIII (7).

Рычаги поясничных позвонков работают как составные рычаги, в которых выходное усилие одного рычага является входным для второго рычага.

Талии тел поясничных позвонков

Талии тел позвонков располагаются на их боковых поверхностях и являются результатом силового влияния смежных позвоночных единиц. Верхние части талий тел поясничных позвонков формируются в результате тяги вниз восходящих пучков волокон нижнего межпозвоночного диска через силовые линии тел позвонков при ротации нижних смежных позвонков вокруг нисходящих осей.

Нижние части талий тел поясничных позвонков – результат влияния тяги вверх нисходящих пучков волокон смежных верхних межпозвоночных дисков через силовые линии тел позвонков при ротации верхних смежных позвонков вокруг восходящих осей (Рис. 4).

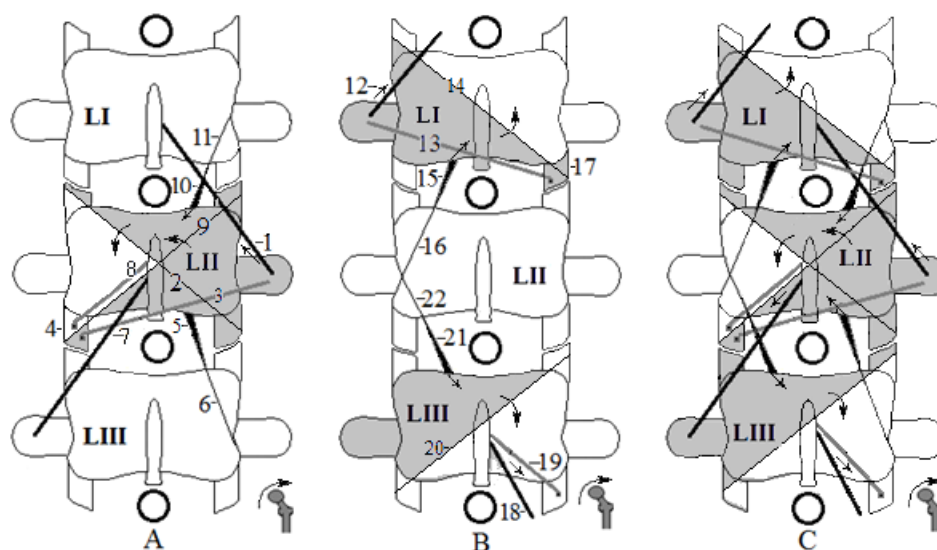


Рис.4. Системные составляющие позвоночной единицы LII (А), смежных позвонков LI и LIII (В), позвоночного комплекса LII (С).

Рис.4 А. Правый *m. rotator* в LI-II (1) производит тягу вверх и назад правого поперечного отростка LII и приводит в действие рычаг правого поперечного отростка LII (3). Рычаг правого поперечного отростка LII ротирует позвонок вправо и вверх вокруг правой восходящей оси (9), точка опоры рычага - левый нижний суставной отросток LII (4). В LII-III - напряжение правых нисходящих пучков волокон (5) и тяга силовых линий (6) от нижней части правой талии тела LIII. Левый *m.rotator* в LII- III (7) реализует тягу остистого отростка LII вправо, вниз и вперед и приводит в действие левый рычаг остистого отростка LII (8), который ротирует позвонок вправо и вниз вокруг правой нисходящей оси (2), точка опоры нисходящего рычага – левый нижний суставной отросток LII (4). В диске LI-II - напряжение правых восходящих пучков волокон, и тяга силовых линий (11) от верхней части правой талии тела LI.

Рис. 4 В. Левый *m. rotator* (12) производит тягу вверх и назад левого поперечного отростка LI, что ротирует позвонок вокруг левой восходящей оси (14). Точка опоры рычага – правый нижний суставной отросток LI (17). В диске LI-II происходит растяжение левых нисходящих пучков волокон (15) и тягу силовых линий (16) от нижней части левой талии тела LII. Правый *m. rotator* (18) производит тягу вниз, вперед и влево за правую сторону остистого отростка LIII (18), что ротирует LIII с помощью правого рычага остистого отростка (19) вокруг левой нисходящей оси (20) влево и вниз. Точка опоры рычага – правый нижний суставной отросток LIII. В диске LIII-II происходит растяжение левых восходящих пучков волокон (21) и тягу силовых линий (22) от верхней части левой талии тела LII.

Рис. 4 С. Системные составляющие двигательного комплекса LII состоят из системных составляющих позвоночной единицы LI и смежных двигательных единиц.

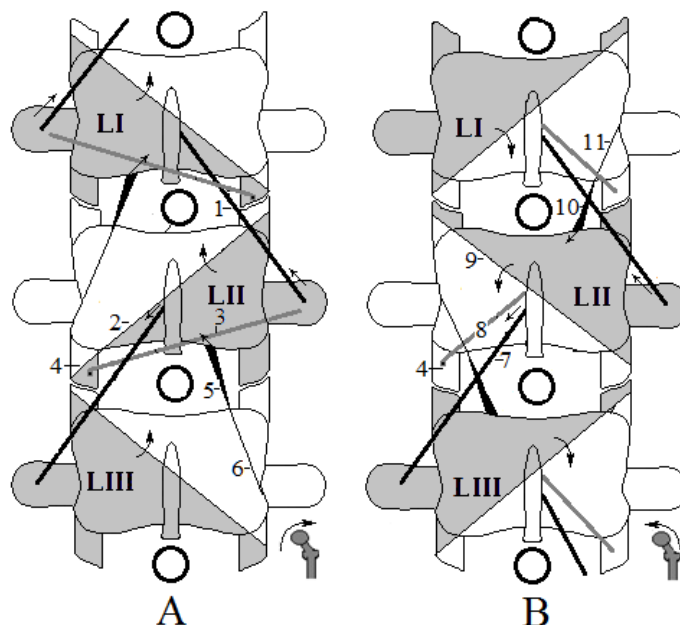


Рис. 5А. Позвоночный комплекс LII в фазе супинации правого бедра при сгибании правого тазобедренного и коленного суставов.

Рис. 5В. Позвоночный комплекс LII в фазе пронации правого бедра при разгибании правого тазобедренного и коленного суставов.

1 – правая поперечно-остистая мышца, 2 – восходящая ось, 3 – рычаг правого поперечного отростка, 4 – левый нижний суставной отросток, 5 – нисходящие пучки волокон нижнего межпозвоночного диска, 6 – нисходящая силовая линия в теле LIII, 7 – левая поперечно-остистая мышца, 8 – левый рычаг остистого отростка LII, 9 – нисходящая ось, 10 – восходящие пучки волокон верхнего межпозвоночного диска, 11 – восходящая силовая линия в теле LI.

Биомеханика поясничного отдела позвоночника человека

Силы механической энергии между стопами и опорными поверхностями, действующие при ходьбе, являются *внешними*. Внешние силы генерируют в теле человека *внутренние силы механической энергии*, которые через системы костных рычагов реализуют функции преодоления сил гравитации, амортизацию и равновесие.

В поясничном отделе позвоночника восходящие внутренние силы механической энергии действуют со стороны таза и нижних конечностей. Нисходящие внутренние силы возникают под влиянием движений грудной клетки, свободных верхних конечностей.

Находясь между тазом и костями голени, бедренные кости выполняют функции привода для этих частей тела. Подтверждением этому являются

выпуклые суставные поверхности на эпифизах бедренных костей: головка бедра на проксимальном эпифизе и суставные поверхности мыщелков бедренных костей на дистальных мыщелках (3). С выпуклыми суставными поверхностями эпифизов бедренных костей сочленяются вогнутые суставные поверхности на тазовых и большеберцовых костях.

Суфинация и сгибание бедра происходит при тяге мышц передней группы пояса нижних конечностей за малый вертел. Бедро ротируется рычагом шейки бедра вокруг опорной оси и рычагом диафиза бедра вокруг диафизарной оси.

Суфинация бедра сопровождается и ограничивается растяжением и напряжением *передней* крестообразной связки коленного сустава.

Под влиянием суфинации бедра головка бедра оказывает силовое влияние на таз, который ротируется в противоположную от ротации бедра сторону.

Разгибание тазобедренного сустава и пронация бедра является результатом тяги задней группы мышц пояса нижних конечностей за большой вертел бедра. Пронация бедра и разгибание коленного сустава и сопровождается растяжением и напряжением *задней* крестообразной связки коленного сустава.

В не опорном периоде стопа не фиксируется на опорной поверхности и при переносе вперед вся нижняя конечность супинируется.

Грудной отдел позвоночника, как сегментированный монолит, противодействует поясничному отделу, что лежит в основе кинематики позвоночного столба (Рис.6).

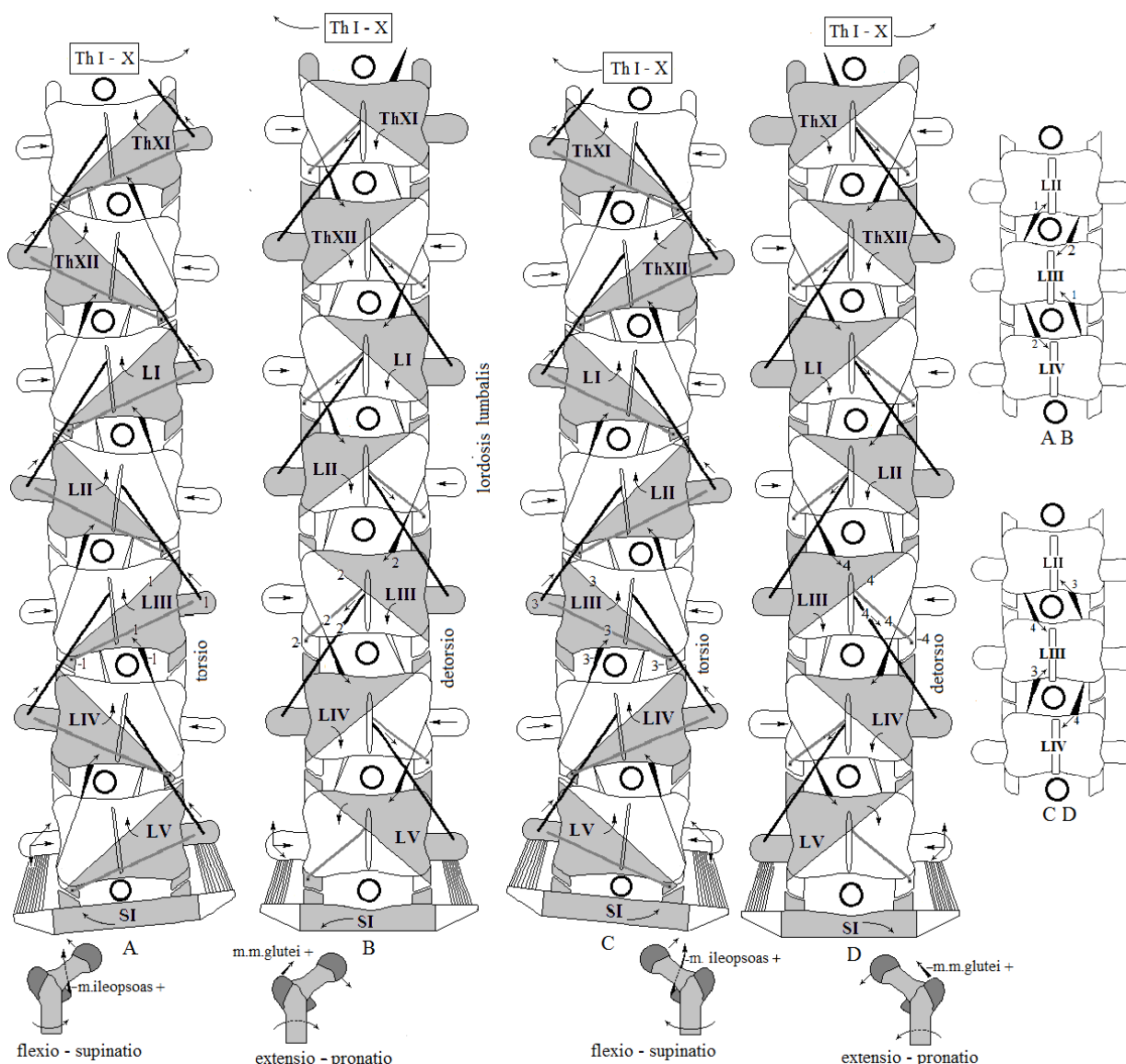


Рис. 6. Схема биомеханики поясничного отдела позвоночника при ходьбе.

А. Сгибание тазобедренного сустава и супинация левого бедра, торсия позвоночника

Левая нога впереди, сгибается, стопа фиксирована на опорной поверхности. Грудной отдел позвоночника ротируется *по часовой стрелке*. Мышцы передней группы тазового пояса тягой за малый вертел ротируют левое бедро *против часовой стрелки*. Головка бедра смещается вверх, таз и SI ротируются *по часовой стрелке*, смещая в этом же направлении LV. Сокращения m.m. rotatores реализуют тяговые силы за поперечные отростки, что приводит в действие рычаги поперечных отростков. Опираясь на нижние суставные отростки, рычаги поперечных отростков ротируют смежные позвонки вокруг восходящих ядерно-суставных осей в противоположные стороны. Позвонки, тянут вверх пучки нисходящих волокон в нижних

межпозвоночных дисках и через силовые линии деформируют нижние половины талий тел нижних смежных позвонков. Поясничный отдел позвоночника приобретает форму правого полувитка сжатой и напряженной пространственной спирали (торсия). Компенсатором внутренних сил механической энергии являются *пучки нисходящих волокон межпозвоночных дисков*.

В. Разгибание тазобедренного сустава и пронация левого бедра, деторсия позвоночника

Левая, фиксированная на опорной поверхности, стопа смещается назад. Грудной отдел позвоночника ротируется *по часовой стрелке*.

Мышцы задней группы тазового пояса тягой за большой вертел ротируют левое бедро *по часовой стрелке*, (пронация). Головка бедра смещает таз и LV *против часовой стрелки*.

M.m. rotatores реализуют тяговые силы за остистые отростки верхних смежных позвонков, что приводит в действие рычаги остистых отростков. Опираясь на нижние суставные отростки, рычаги ротируют верхние смежные позвонки вокруг нисходящих осей позвонков.

Позвонки, тянут вниз пучки восходящих волокон в верхних межпозвоночных дисках и через силовые линии деформируют верхние половины талий тел верхних смежных позвонков.

Компенсатором силовых влияний являются *пучки восходящих волокон межпозвоночных дисков*.

С. Сгибание тазобедренного сустава и супинация правого бедра, торсия позвоночника

Правая нога впереди, суставы конечности сгибаются, стопа фиксирована на опорной поверхности, грудная клетка до уровня Th XI ротирована *по часовой стрелке*.

Мышцы передней группы тазового пояса тягой за малый вертел сгибают тазобедренный сустав и ротируют правое бедро наружу *по часовой стрелке*. Головка бедра смещает таз и LV *против часовой стрелки*, реализуется торсия поясничного отдела позвоночника.

Сокращение m.m. rotatores реализуют тяги за поперечные отростки, что приводит в действие рычаги поперечных отростков. Опираясь на нижние суставные отростки, рычаги ротируют смежные позвонки вокруг восходящих осей в противоположные стороны.

Позвонки, тянут вверх пучки нисходящих волокон в нижних межпозвоночных дисках и через силовые линии деформируют нижние половины талий тел нижних смежных позвонков.

Поясничный отдел позвоночника приобретает форму левого полувитка сжатой и напряженной пространственной спирали.

Компенсатором силовых влияний в поясничном отделе позвоночника являются *пучки нисходящих волокон межпозвоночных дисков*.

Д. Разгибание тазобедренного сустава и пронации правого бедра, деторсия позвоночника

Суставы правой опорной конечности разгибаются, правая стопа, фиксированная на опорной поверхности, смещается назад. Грудной отдел позвоночника до уровня Th XI ротируется *против часовой стрелки*.

Мышцы задней группы тазового пояса тягой за большой вертел ротируют правое бедро *против часовой стрелки*, (пронация). Головка бедра смещает таз и LV *вниз и по часовой стрелке*, реализуется деторсия поясничного отдела позвоночника.

При напряжении и растягивании восходящих пучков волокон верхних межпозвоночных дисков смежные позвонки притягиваются друг к другу.

При отрыве стопы от опорной поверхности поясничный отдел позвоночника приобретает форму лордоза.

Компенсатором силовых влияний являются *пучки восходящих волокон верхних межпозвоночных дисков*.

Структурная организация и биомеханика поясничного отдела позвоночника является реальной и стабильной, т.к. в их основе лежит единица позвоночника, обладающая системной организацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Из письма проф. В. А. Глотова автору, <http://e.mail.ru/1477652302000000604>.
2. Schmorl G., Junghans H., 1932. Die gesunde und kranke Wirbelsaule im Rontgenbilde - Leipzig, 1957.
3. Артеменко Б.А. Кинематический принцип строения конечностей наземных животных. Труды Пятого Всесоюзного съезда А.Г. и Э. Ленинград, 5 – 11 июля 1949 г. – Л.; Медгиз, 1951 – С. 107 – 108.

BIOMECHANICS OF THE HUMAN LUMBAR SPINE

Nechaev V. I.

The unit of the lumbar spine is the lumbar vertebra and adjacent intervertebral discs. When walking, the vertebrae move in opposite directions around their kinematic axes. Each vertebra consists of right and left compound levers of the transverse and spinous processes. Each step is accompanied by rotation of the

lumbar vertebrae around the right and left, ascending and descending axes, torsion around the ascending axes, detorsion around the descending axes. Torsion and detorsion rotations of the lumbar spine occur because the vectors of rotation of the femur, pelvis, and chest are always opposite. The torsion of the lumbar vertebrae in the lower adjacent discs causes the tension of the descending fibers from the lower half of the waist of the bodies of the adjacent vertebrae, in the upper adjacent discs - the tension of the ascending fibers from the upper half of the waist of the bodies of the upper adjacent vertebrae. Compensation of internal forces of mechanical energy for each lumbar vertebra occurs when the fibers of adjacent intervertebral discs are strained.

Key words: lumbar vertebra, biomechanic.

ФГБОУ ВО «Смоленский государственный медицинский университет»
Минздрава России
Кафедра анатомии человека
Смоленск, Россия
Израиль
Поступила в редакцию 24.01.2021.