

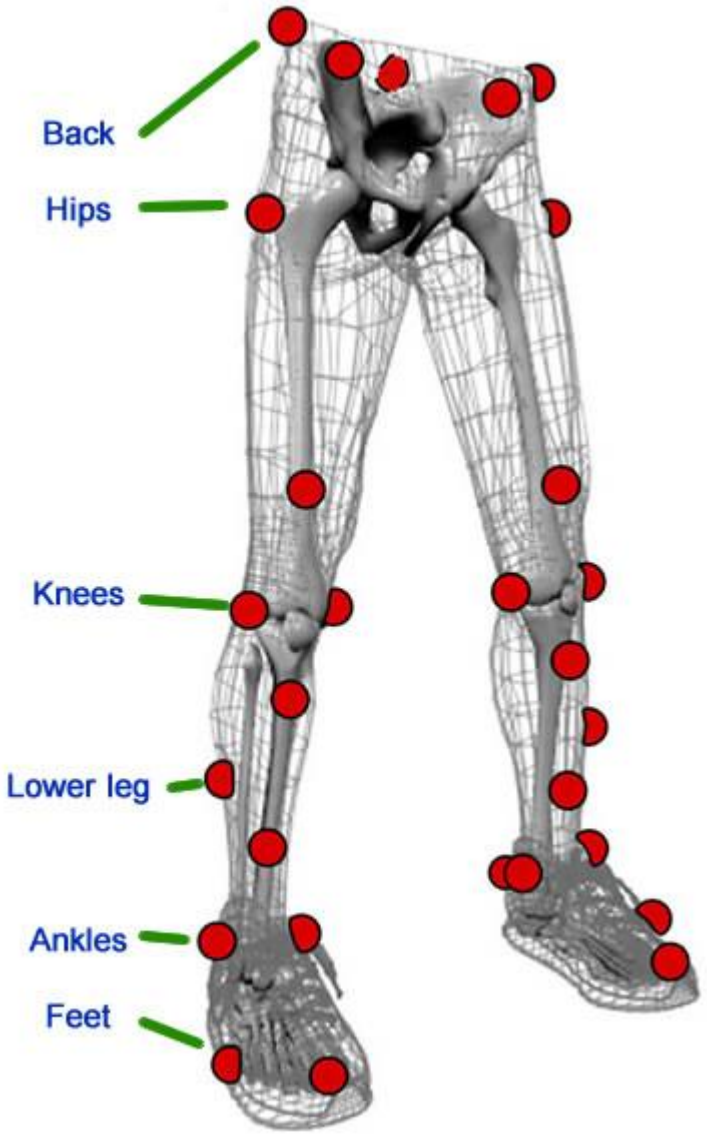
SATBAYEV UNIVERSITY

Алимбаев Чингиз Абдраимович

Биомеханика

Дәріс №4-5. Жүру биомеханикасы. Жүруді талдау әдістері
Биологиялық сұйықтықтар биомеханикасы. Синовиальды сұйықтық

ЖҮРІС ТАЛДАУЫ



Жүрісті талдау – адамның қимыл-қозғалысын (жүру, жүгіру, баспалдақпен көтерілу немесе түсу) сандық тұрғыдан өлшеп, бағалау.

Бұл әдісті әртүрлі салалар қолданады:

Ғалымдар – дені сау адамдарда бұлшықет жиырылулары буындар арқылы қалай үйлесіп, жүру немесе баспалдақпен көтерілу сияқты қимылдарды орындайтынын зерттейді.

Дәрігерлер – қалыптан тыс қозғалыс үлгілерін түсініп, дұрыс емдеу жолдарын таңдау үшін пайдаланады

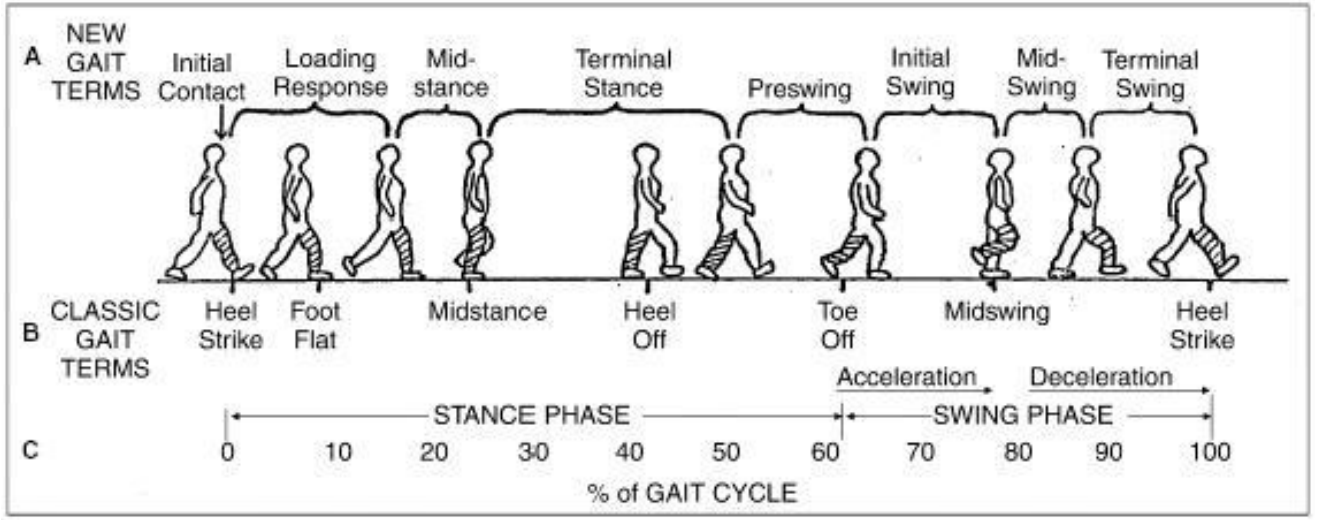
Спорт биомеханиктері, спортшылар мен жаттықтырушылар – қимылды талдау арқылы спорттық нәтижені жақсарту және жарақат алу себептерін анықтау үшін қолданады

Спорт құрал-жабдық өндірушілері – өз өнімдерінің бәсекелестеріне қарағанда артықшылықтарын сандық түрде дәлелдеуге тырысады.

Жүрісті талдау келесі патологияларда қолданылады:

Аяқ ампутациясы
Сал (церебралды паралич)
Дегенеративті буын аурулары
Буын эндопротездеуі (жасанды буын орнату)
Полиомиелит
Бұлшықет дистрофиясы
Миелодисплазия
Ревматоидты артрит
Жұлын жарақаты
Инсульт
Ми жарақаты (traumatic brain injury)

ЖҮРІС ЦИКЛІ



Әдетте жүріс циклі – адамның аяғы жерге алғаш тиген сәттен (foot contact, initial contact) сол аяқ қайтадан жерге тигенге дейінгі уақыт аралығы деп анықталады.

Жүріс циклі екі бөлікке бөлінеді:

Тірек фазасы (stance phase) – аяқ жермен жанасып тұрған кезең.

Тербеліс фазасы (swing phase) – аяқ жерден көтеріліп, алға қозғалған кезең.

Heel Strike – өкшенің тиюі.

Foot Flat – табанның толық тиюі.

Midstance – тірек кезеңінің ортасы.

Heel Off – өкшенің көтерілуі.

Toe Off – башпайдың көтерілуі.

Heel Strike – қайтадан өкшенің тиюі.

Initial Contact – аяқтың алғашқы жерге тиюі.

Loading Response – салмақтың аяққа ауысуы.

Midstance – аяқтың дене салмағын толық көтеріп тұрған сәті.

Terminal Stance – тірек фазасының соңына қарай, өкшенің көтерілуі.

Preswing – аяқтың жерден ажырауға дайындалуы.

Toe Off (Foot Off) – аяқтың жерден толық ажырауы.

Initial Swing – аяқтың алға көтерілуі (жүрудің басталуы).

Midswing – аяқтың ең жоғарғы әрі ортаңғы сатыда болуы.

Terminal Swing – аяқтың қайтадан жерге тиюге дайындалуы.

Gait Cycle

Stance
60%

Reference foot is in contact with floor

Initial double limb support
10%

Both feet on ground

- Loading response
  10%

Single limb support
40%

1 foot on ground

- Mid-stance
  20%
- Terminal stance
  20%

  Heel off

Terminal double limb support
10%

Both feet on ground

- Pre-swing
  10%

Swing
40%

Reference foot is not in contact with floor

- Initial
  13.3%
- Mid
  13.3%
- Terminal
  13.3%



Ipsilateral initial contact to contralateral toe off



Contralateral toe off to ipsiplateral heel rise



Ipsilateral heel rise to contralateral initial contact



Contralateral initial contact to ipsilateral toe off



Ipsilateral toe off to a point where the swing limb foot crosses the stance limb foot

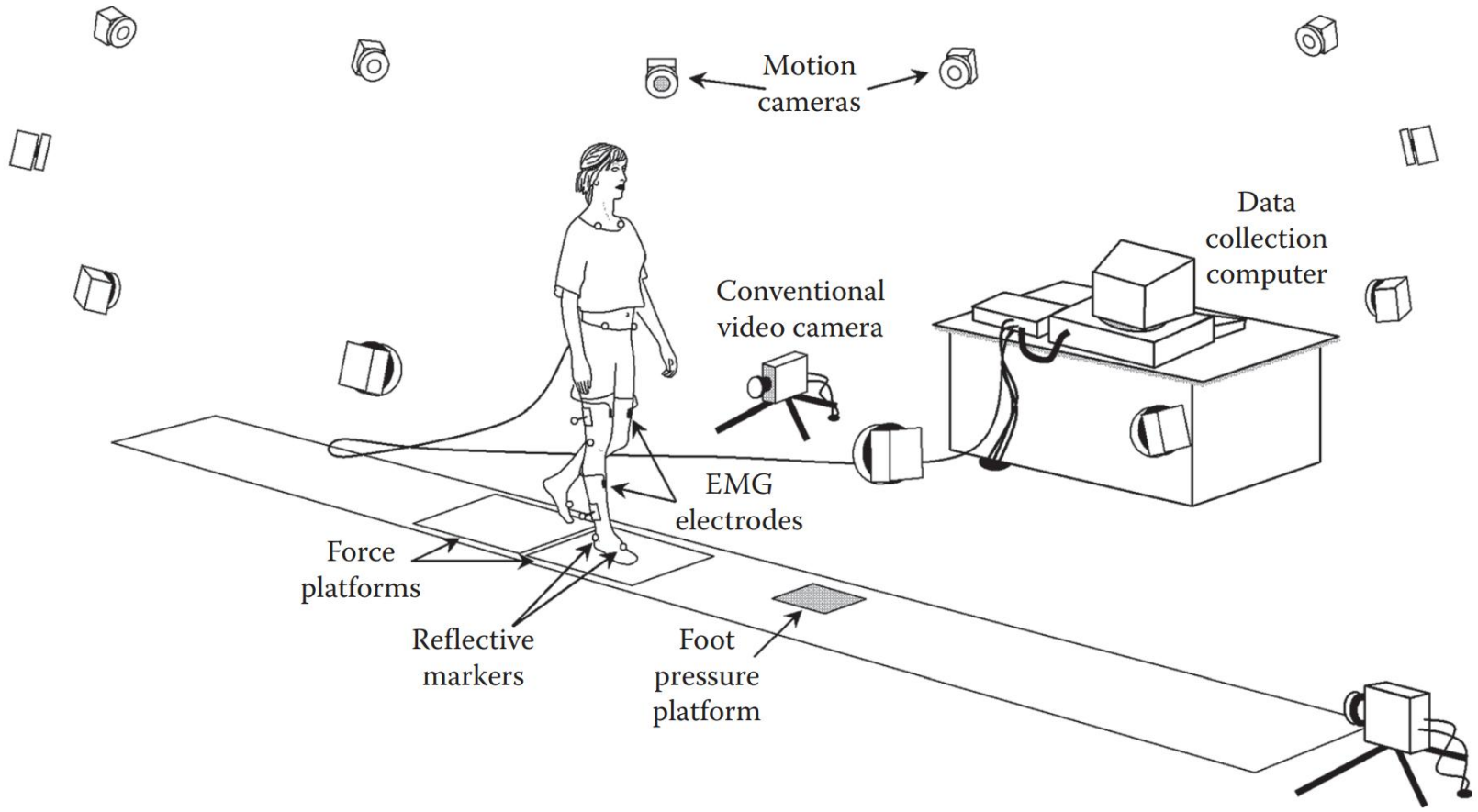


Swing limb foot crossing of the stance limb to the point where the tibia is vertical



Vertical tibia to ipsilateral initial contact

ЖҮРІСТІ ТАЛДАУ ЖҮЙЕСІ



Жүрісті талдау жүйесі – адамның жүруін жан-жақты зерттейтін әдіс. Ол үшін денеге арнайы маркерлер қойылады, олардың қозғалысын камералар 3D форматта тіркейді. Күш платформалары аяқтың жерге тиген сәтіндегі күшті өлшейді, ал педобарография табанға қысымның қалай таралатынын көрсетеді. Электромиография (ЭМГ) бұлшықеттердің қай сәтте белсенді жұмыс істейтінін анықтайды. Барлық мәлімет компьютерге жіберіліп, дәрігер немесе зерттеуші жүріс ерекшеліктерін бағалап, емдеу жоспарын жасайды.

Жүріс деректерін өңдеу. Кинематика және кинетика

Клиникалық жүрісті зерттеудің негізгі тәсілі – дененің белгілі анатомиялық нүктелеріне сыртқы маркерлерді орналастыру. Маркерлер жеке-жеке немесе біріктірілген кластерлер түрінде қойылады.

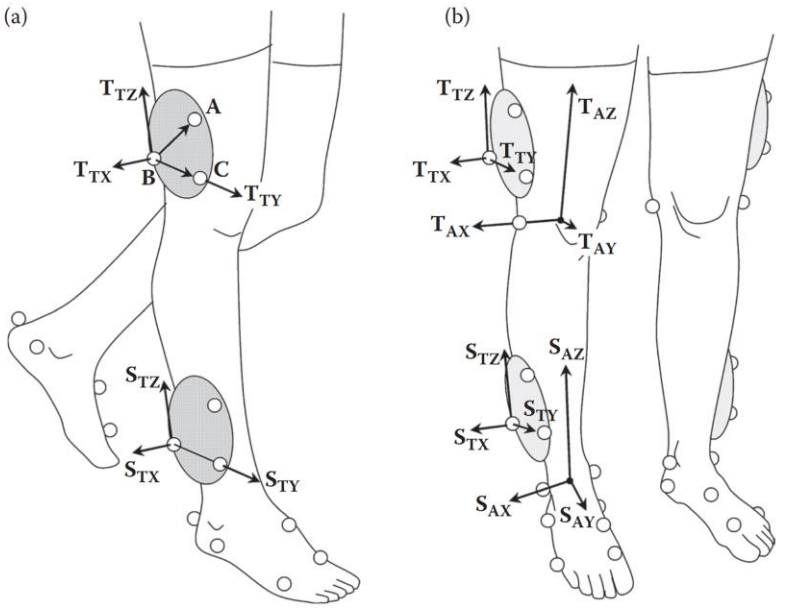
Жиналған мәліметтің нәтижесі – әр маркердің жүріс циклі бойындағы 3D координаталары. Егер әр сегментке кемінде үш маркер қойылса, онда оның кеңістіктегі орналасуын (алты еркіндік дәрежесін – орын ауыстыру мен бұрылу) анықтауға болады. Мысалы, сан мен сирақка үш маркерден қойылса, олардың векторлары арқылы сол сегментке техникалық координаталық жүйе есептеледі (мысалы: STX, STY, STZ – сирақ үшін). Бұл жүйе шамамен анатомиялық осьтерді көрсетеді. Дегенмен, дәлірек болу үшін субъектіні калибрлеу жасалады: науқас тік тұрған кезде қосымша маркерлер арқылы нақты анатомиялық нүктелер (мысалы, тізе және тобық орталықтары, жамбас басы) белгіленеді. Осылайша техникалық координаталық жүйелер анатомиялық жүйелерге сәйкестендіріледі.

Координаталық жүйелерді сәйкестендірген соң буын бұрыштары есептеледі. Көбіне Эйлер бұрыштары (Cardan angles) қолданылады. Олар қозғалысты үш реттілікпен сипаттайды: бүгу–жазу (flexion–extension), әкету–әкелу (abduction–adduction), айналу (rotation).

Жүріс талдауда аяқ сегменттерінің қозғалысын өлшеу үшін сыртқы маркерлер (ақ дөңгелектер) денеге қойылады. Камералар олардың қозғалысын тіркеп, әрбір сегменттің (сан, сирақ) кеңістіктегі координаталық жүйесін есептейді.

a – Техникалық координаталық жүйелер. Санда үш маркер (A, B, C), сирақта үш маркер қойылған.Осы маркерлер арқылы техникалық осьтер (T_{TX}, T_{TY}, T_{TZ}; S_{TX}, S_{TY}, S_{TZ}) құрылады.Бұл осьтер нақты анатомиялық осьтерді (мысалы, санның ұзын осі) шамамен бейнелейді. Яғни, бұл – «маркерлер арқылы есептелген жасанды координаталық жүйе».

b – Анатомиялық координаталық жүйелер (Anatomical coordinate systems)Мұнда нақты анатомиялық нүктелер (мысалы, тізе буынының медиалды және латералды аймақтары, тобық аймағы) анықталған.Осы нүктелерге маркерлер қойылып, анатомиялық координаталық жүйелер (T_{AX}, T_{AY}, T_{AZ}; S_{AX}, S_{AY}, S_{AZ}) есептеледі. Кейін техникалық жүйелер осы анатомиялық жүйелермен сәйкестендіріледі (калибрлеу процесі).



Жұмсақ тіндер (бұлшықет, байламдар, буын қапшығы) тудыратын буын маңындағы күш моменттері Ньютон механикасы негізінде есептеледі.

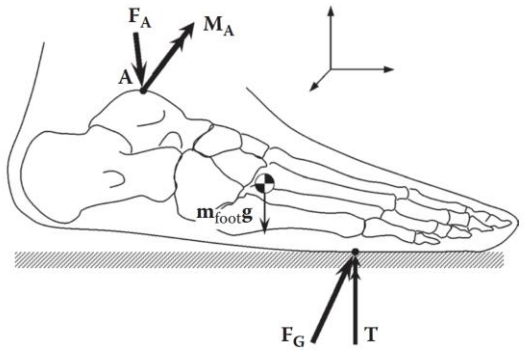
- Force platform жер реакция күшін (F_G) және айналу моментін (T) өлшейді.
- Осы мәліметтер арқылы белгісіз буындық күштер (F_A) және моменттер (M_A) есептеледі.
- Процесс әр сегмент үшін (табанда – тобық, сирақта – тізе, санға – жамбас) қайталанады.

Механикалық қуат – буын моментінің (M_A) және бұрыштық жылдамдықтың (ω) скалярлық көбейтіндісі арқылы есептеледі. Мысалы:

$$P = M_A \cdot \omega_A$$

ω_A – сирақка қатысты табанның бұрыштық жылдамдығы

Есептеулерде дене сегменттері қатты дене деп алынады (яғни жұмсақ тін қозғалысы ескерілмейді). Маркерлер әрқашан сүйекке қатысты тұрақты деп қарастырылады. Масса таралуы қозғалыс кезінде өзгермейді деп болжанады. Сондықтан маркерлерді дұрыс жерге бекіту маңызды. Мысалы, сирақ бұлшықеттеріне емес, сіңір үстіне қою қажет.



$m_{(foot)}g$ – табанның өз салмағы. Бұл күш төменге қарай әсер етеді.

F^G – жердің табанға әсер ететін реакция күші (ground reaction force). Біз жүргенде жер бізге қарсь күш береді.

T – жерден шығатын момент немесе қосымша жанама күш (торк).

F^A – тобық буынында пайда болатын реакция күші. Бұлшықеттер мен сүйектердің ішкі күштері арқылы қалыптасады.

M^A – тобық аймағындағы момент (айналдырушы күш), яғни аяқтың қозғалысын тұрақтандырады.

Бұл суретте адамның табанына әсер ететін күштердің еркін дене диаграммасы көрсетілген. Яғни, табанға түсетін сыртқы және ішкі күштердің бәрі жеке-жеке белгіленген

Осы күштер мен моменттердің бәрін Ньютон механикасының заңдары арқылы талдау арқылы табан мен тобықтағы нақты жүктемені есептеуге болады. Бұл әдіс жүру немесе жүгіру кезіндегі қозғалысты түсінуге, сондай-ақ протездер мен ортопедиялық құрылғыларды жобалауда қолданылады.Қысқасы, сурет аяққа түсетін салмақ пен жердің қарсы әсерін және олардан пайда болатын күштер мен моменттердің қалай теңесетінін көрсетеді.

Клиникалық мысал

Жоғарыда айтылғандай, клиникалық жүрісті талдауда қолданылатын мәліметтерге статикалық физикалық тексеру нәтижелері, қадам және уақыт параметрлері, сегмент пен буын кинематикасы, буын кинетикасы, электромиография (ЭМГ) және бейнежазба кіреді. Осы мәліметтердің негізінде медициналық топ пациенттің жүрісіндегі ауытқуларды бағалап, олардың себебін анықтауға және емдеу жолдарын ұсынуға мүмкіндік алады.

Осылайша, дәрігерлер қозғалыс бұзылысына әкелген биомеханикалық жеткіліксіздікті бөліп көрсете алады және науқастың қандай компенсаторлық қимыл қолданатынын байқай алады. Мысалы, науқаста тобықтың дорсифлексиясын атқаратын бұлшықет әлсіз болса (негізгі проблема), ол аяқтың тербеліс фазасында табанды көтеру үшін жамбасын шамадан тыс көтеруі мүмкін (компенсаторлық қимыл).

Мысал ретінде, церебралды сал ауруымен ауыратын, сол жақ спастикалық гемиплегиясы бар 6 жасар баланың жүрісін талдау берілген. Барлық бейнежазбалар, клиникалық тексеру және сандық жүріс деректері зерттеліп, негізгі проблемалар мен ықтимал себептердің тізімі жасалды. Жиналған деректерге 3D-кинематика (1 сурет), кинетикалық деректер (2 сурет) және динамикалық ЭМГ (3 сурет) кірді.

Сагитталды жазықтықта сол аяқта жүру және тербеліс фазасында тобық шамадан тыс төмен түсіп кетеді, бұл тобықтың плантарлы бұлшықеттерінің қатты тартылуына байланысты. Оң аяқта тобық ерте төмен түседі, бірақ бұл өздігінен пайда болған компенсация, себебі оң жақтағы қозғалыс сақталған. Сол тізе қадам басқанда артық бүгіліп кетеді, ол хамстринг бұлшықеттерінің қаттылығымен түсіндіріледі. Ал тербеліс кезінде тізе жеткілікті бүгіле алмайды, оған ректус феморис бұлшықетінің артық белсенділігі және тобық пен жамбастың жеткіліксіз күші себеп болады. Сондай-ақ сол жақ тірек фазасында жамбас алға қарай шамадан тыс еңкейіп кетеді, бұл жамбас пен санды бөлек қозғалта алмаудан туындайды.

Трансверсальды жазықтықта сол жақ жамбас пен аяқ ішке қарай артық бұрылады, аяқтың бағыты да ішке бағытталған. Жамбастың айналуы да асимметриялы болады. Мұның бәрі сол жақ сан сүйегінің ішкі торсиясына байланысты.

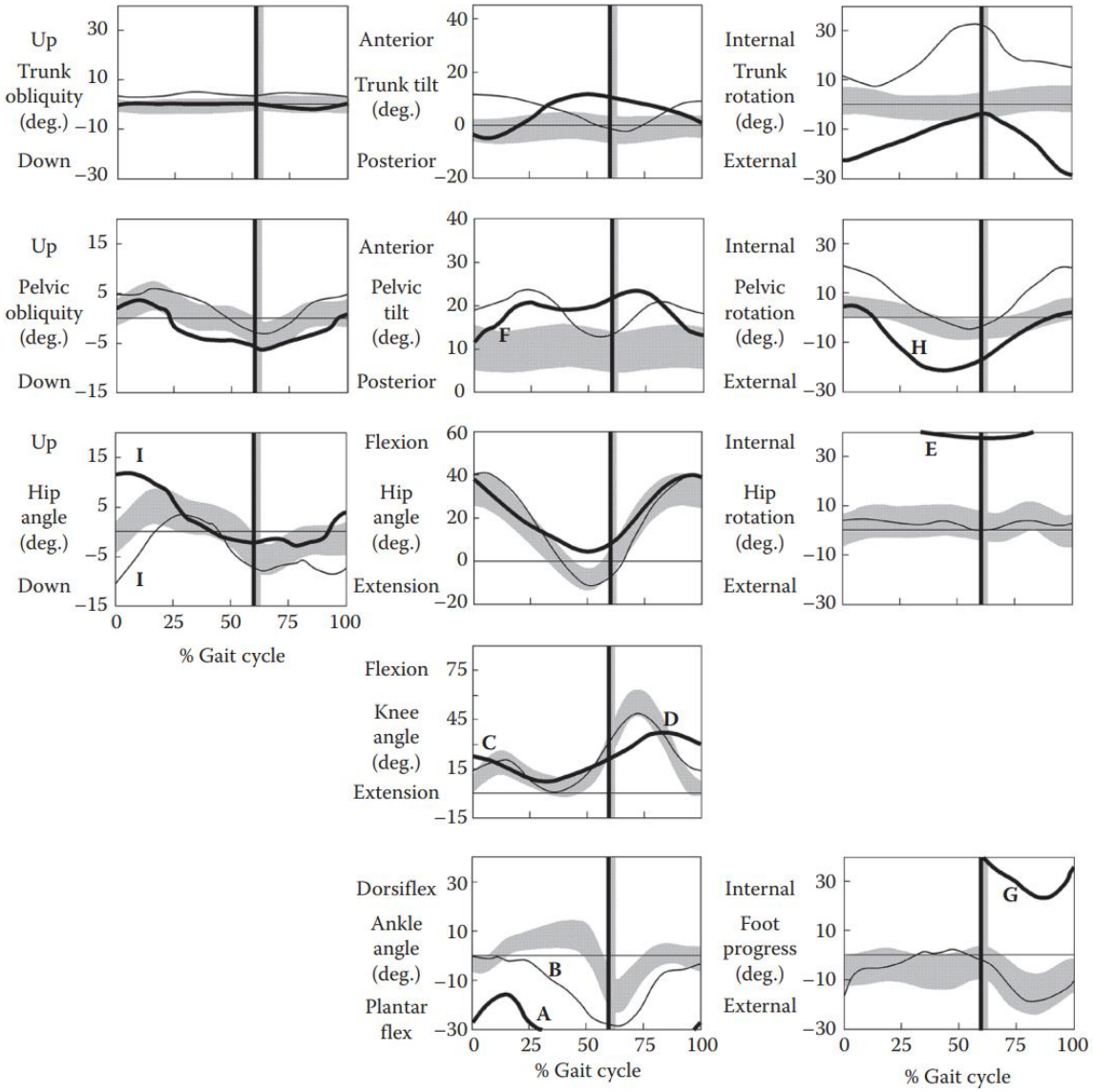
Корональды жазықтықта жамбастың асимметриялы қозғалысы байқалады, ол да жамбастың айналуындағы бұзылыспен байланысты.

Церебралды сал ауруы (сол жақ спастикалық гемиплегиясы) бар 6 жасар баланың жүріс кинематикасының талдауы.

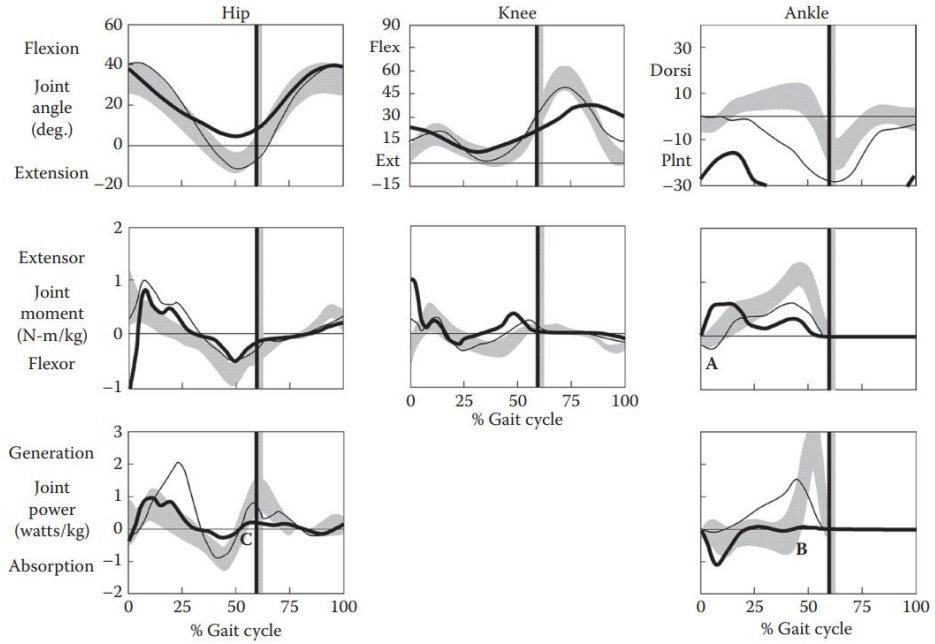
Қара сызық (жуан) – баланың сол аяғы (зақымдалған жақ).
Қара сызық (жіңішке) – оң аяғы (сау жақ).
Сұр аймақ – дені сау балалардың орташа көрсеткіштері (норма).

Әрбір график белгілі бір қимылды көрсетеді:
Trunk (кеуде) – еңкею (tilt), қисаю (obliquity), айналу (rotation).
Pelvis (жамбас) – қисаю, еңкею, айналу.
Hip (жамбас-сан буыны) – бүгілу/жазылу (flexion/extension), айналу (rotation).
Knee (тізе) – бүгілу/жазылу.
Ankle (тобық) – дорсифлексия/плантарлы флексия.
Foot progression (аяқтың бағыты) – ішке/тысқа бұрылуы.

Негізгі ақаулар әріптермен белгіленген:
A – сол тобық шамадан тыс плантарлы флексияда (аяқ "төмен түсіп кеткен").
B – оң тобықта да қалыптан тыс ерте плантарлы флексия (компенсация).
C – сол тізе қадам басқанда артық бүгіліп кетеді (хамстрингтің спастикасы).
D – сол тізе тербеліс фазасында жеткілікті бүгіле алмайды (ректус феморис белсенділігі артық).
E – сол жамбас ішке шамадан тыс айналған.
F – жамбас алға еңкейген (антериорлық еңкею).
G – аяқтың ішке бағытталуы (foot progression ішкі ротация).
H – жамбастың асимметриялық айналуы (сол жағы сыртқа қарай).
I – жамбастың қисаюы (асимметрия).



Бұл графиктер баланың жүрісінде **сол жақ аяқтағы негізгі қозғалыс бұзылыстарын** көрсетеді. Яғни, тобықтағы шамадан тыс плантарлы флексия, тізе мен жамбас буындарының дұрыс қозғалмауы, жамбастың асимметриясы және аяқтың ішке бұрылуы анық байқалады.



Кинетикалық талдау. Мұнда жамбас, тізе және тобық буындарының қозғалыс бұрыштары, буын моменттері және қуат генерациясы қадамдық цикл бойына көрсетілген.

Сол жақ тобықта (қалың сызық) шамадан тыс плантарлы флексия байқалады (А нүктесі), яғни аяқ «төмен түсіп кеткен».

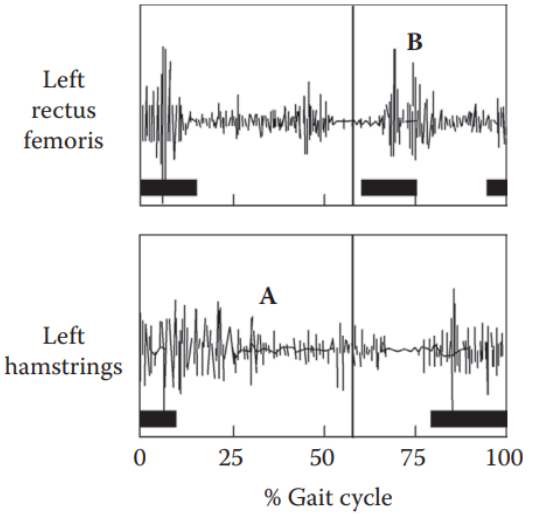
Оң жақ тобықта да қалыптан тыс ерте плантарлы флексия бар (В), бұл сол жақтағы әлсіздікті өтеу үшін пайда болған «vault» компенсациясы.

Сол жақ жамбас пен тізеде қуат генерациясының жеткіліксіздігі анық көрінеді (С), бұлшықеттер дұрыс күш шығара алмайды. Жалпы айтқанда, бұл кинетикалық графиктер баланың төменгі аяқ буындарында күштегі және қозғалыстағы үйлесімсіздікті көрсетеді.

ЭМГ жазбасы. Мұнда бұлшықет белсенділігін уақыт бойынша өлшеген.

Сол жақ хамстринг бұлшықеттерінде артық белсенділік байқалады (А нүктесі), бұл тізенің шамадан тыс бүгілуін түсіндіреді.

Сол жақ ректус феморис бұлшықеті тербеліс фазасында қажетсіз белсенді болып тұр (В нүктесі), бұл тізенің жеткілікті бүгілуіне кедергі жасайды.



Кинетикалық талдауда балада аяқ буындарының қозғалысы мен күші дұрыс бөлінбегенін көрсетеді, әсіресе тобық пен тізеде.

ЭМГ жазбасында бұлшықеттер дұрыс уақытта жұмыс істемей, артық немесе орынсыз жиырылатынын көрсетеді.

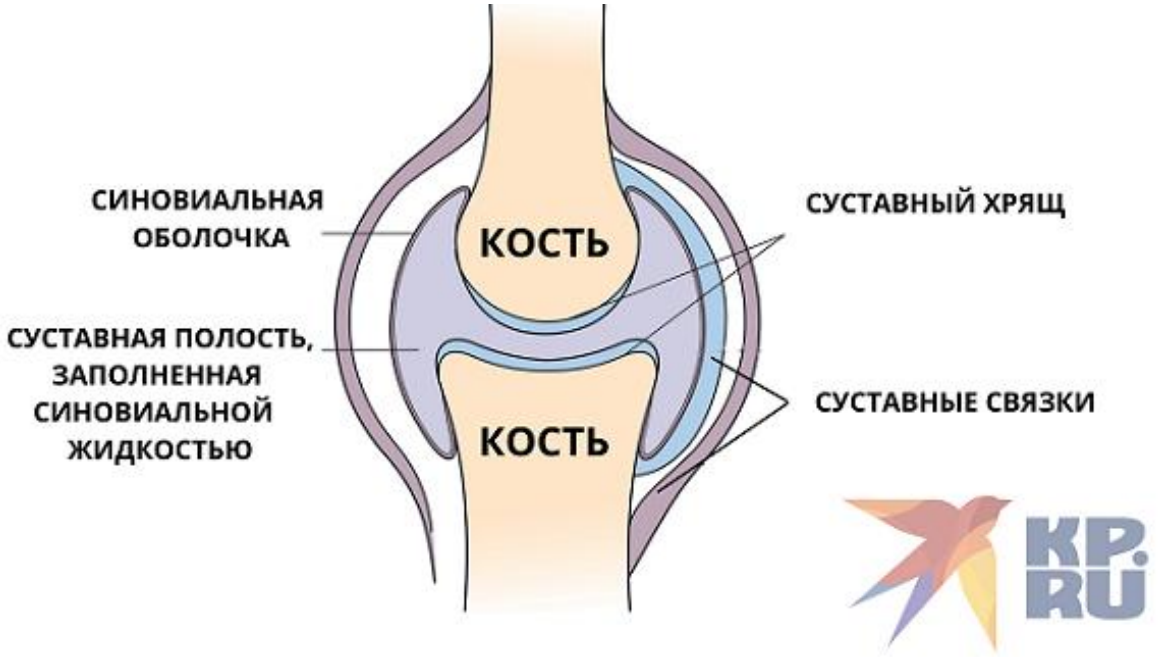
Жүрісті жан-жақты талдау әдістері патологияны түсінуге, нақты емдеу тәсілдерін таңдауға және нәтижелерді жақсартуға үлкен үлес қосты. Дегенмен, кез келген өлшеу әдісіндегідей, жүрісті талдау барысында алынған мәліметтердің дәлдігіне әсер ететін қателік көздері бар. Мысалы, жұмсақ тіндердің сүйекке қатысты ығысуы. Дегенмен, соңғы жылдары мұндай қателерді азайтуға арналған талдау әдістері жетілдіріліп келеді. Жамбас буынының орталығын дұрыс анықтау – жамбас кинематикасы мен кинетикасын есептеу үшін өте маңызды. Жаңа технологиялар мен есептеу тәсілдері арқасында буын орталығының қозғалыс кезіндегі орнын нақты анықтау клиникада қолжетімді бола бастады. Бірақ семіз немесе артық салмақты науқастарда жамбастағы май тіндері өлшеуге кедергі келтіруі мүмкін. Ал кішкентай балаларда маркерлер арасындағы қашықтық аз болатындықтан, бұрыштық өлшемдердің дәлдігі төмендеуі ықтимал. Камера сапасының және бейнеөңдеу технологиясының дамуы бұл мәселені біршама шешуге мүмкіндік берді. Дегенмен, маркердің дұрыс қойылмауы немесе аяқтың тербеліс фазасында күш платформасына тиіп кетуі сияқты басқа да қателер нәтижелерді бұрмалауы мүмкін. Сондықтан клиникалық топ мұндай қателіктердің ықтимал әсерін түсініп, мәліметтерді соған сәйкес талдай білуі керек.

Кинематика, кинетика және динамикалық ЭМГ деректерінен бөлек, бұлшықет-сіңір ұзындығын бағалау әдістері де клиникалық тәжірибеге енуде. Бұл әдістер де жұмсақ тіндердің ығысуынан және буын орталығын анықтаудағы қателіктерден зардап шегуі мүмкін. Дегенмен, бұлшықет-сіңір ұзындықтарын басқа клиникалық және қозғалыс деректерімен біріктіріп қарастыру көрші буындардың өзара байланысын жақсырақ түсінуге көмектеседі. Сонымен қатар, компьютерлік модельдеу арқылы жүрістің алға бағытталған симуляциялары жүргізілуде. Олар патологиялық жүрістің механизмдерін зерттеуде пайдалы құрал болып отыр. Бұл әдістер бұлшықет пен сіңір патомеханикасын тереңірек түсінген кезде және клиникалық жағдайларда әр науқасқа жеке қолданылғанда одан да тиімді болады.

Жүрісті мұқият талдау қарапайым бақылауға қарағанда анағұрлым жүйелі әрі сандық деректер береді. Мұндай деректердің көмегімен дәрігер негізгі себептерді қосымша компенсациялық қимылдардан ажырата алады. Мысалы, көзбен байқаған әсер мен нақты буын бұрыштары (кинематика) арасындағы қайшылықтар науқастың жағдайын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. Жүріс талдауы дәрігерге көпдеңгейлі операцияларды нақты жоспарлап, әртүрлі емдеу тәсілдерінің (мысалы, хирургиялық араласу немесе ортопедиялық құрылғылар) тиімділігін объективті бағалауға жағдай жасайды. Сондай-ақ, көзге көрінбейтін қозғалыстар (аяқ сегменттерінің ұзын осьтері бойынша айналу) мен бұлшықет белсенділігін, буындардағы күштерді де бағалауға болады.

Синовиальная жидкость, синовия — густая эластичная масса, заполняющая полость суставов. В норме прозрачная или слегка желтоватая. В организме выполняет функцию внутрисуставной смазки, предотвращая трение суставных поверхностей и их изнашивание; участвует в поддержании нормального соотношения суставных поверхностей в полости сустава, повышая их подвижность; обеспечивает питание суставного хряща; служит дополнительным амортизатором. Жидкость продуцируется синовиальной оболочкой сустава и заполняет его полость

Синовиум (Синовиальная оболочка) производит синовиальную жидкость – она распределяется по суставу тонкой пленкой и играет роль смазки, которая уменьшает трение между костями и позволяет им двигаться относительно друг друга. При некоторых заболеваниях количество синовиальной жидкости изменяется, в ее составе появляются аномальные компоненты – лейкоциты, кровь, кристаллы.



Синовиальная жидкость вырабатывается из сыворотки крови. Сначала сыворотка пропотевает, то есть проходит через кровеносные сосуды в суставную щель. Похожий процесс фильтрации происходит в почках, когда образуется первичная моча. Получившийся из сыворотки транссудат обогащается гиалуроновой кислотой и любрицином, которые синтезируются в синовиуме.

Наличие гиалуроновой кислоты и любрицина отличает синовиальную жидкость от сыворотки крови, в которой этих веществ нет. Любрицин и гиалуроновая кислота играют роль смазки, которая позволяет равномерно распределять давление в суставе и преодолевать силу трения.



Синовиальные суставы (подвижные) - обеспечивают широкий диапазон движений (например, плечевой, коленный суставы).

Полуподвижные суставы (амфиартрозы) - ограниченные движения (например, межпозвоночные диски).

Неподвижные соединения (синартрозы) - отсутствует движение (например, швы черепа).

Функции и Физико-химические свойства синовиальной жидкости



Вязкость

- Определяется концентрацией гиалуроновой кислоты.
- Уменьшается при воспалении суставов (например, артритах).

Эластичность

- Обеспечивает устойчивость к нагрузкам.

pH

- Норма: 7,3–7,5.
- Сдвиг pH может свидетельствовать о воспалительных процессах.

Осмолярность

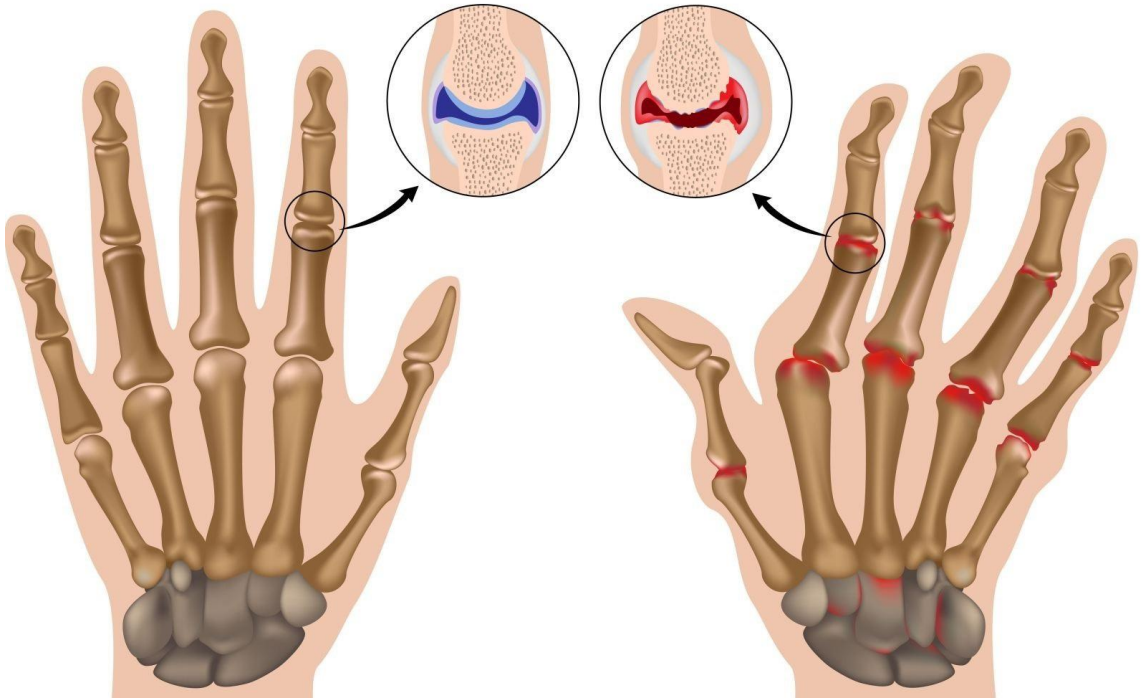
- Схожа с плазмой крови (~300 мОсм/л).

Состав синовиальной жидкости



Нарушения в составе и функции синовиальной жидкости

Артрит - воспаление приводит к снижению вязкости из-за разрушения гиалуроновой кислоты

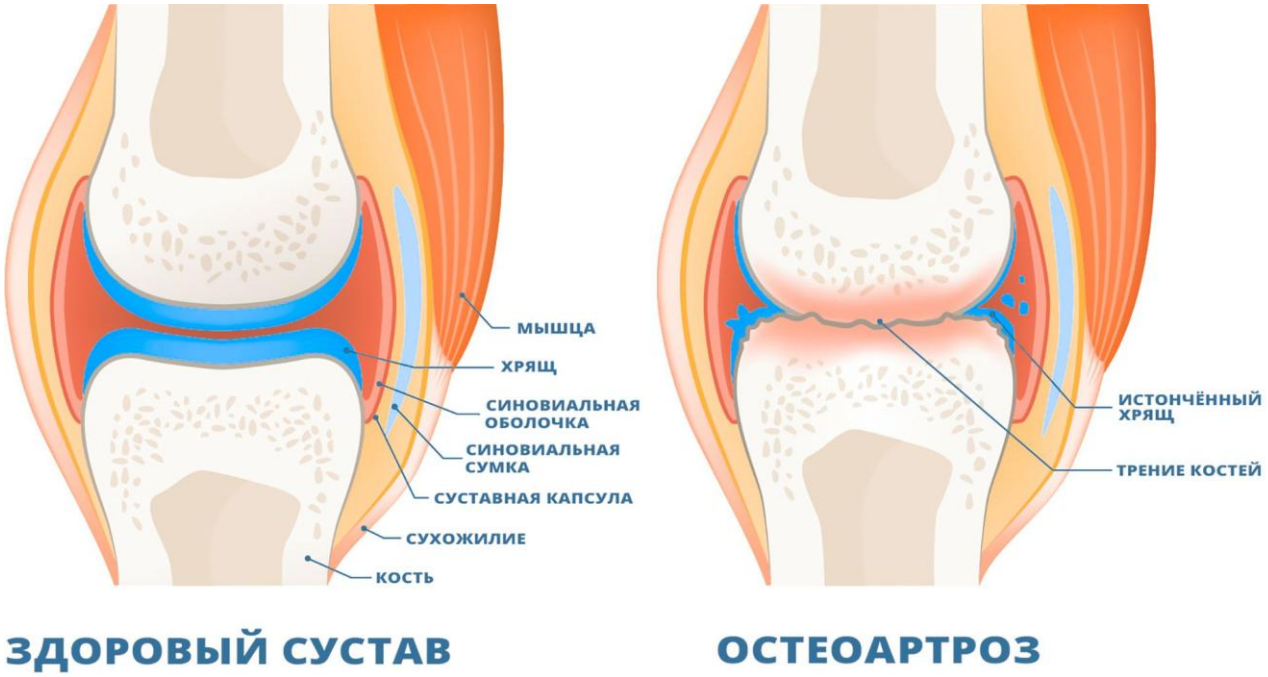




Остеоартроз

Остеоартроз – заболевание, которое затрагивает все компоненты сустава: капсулу, синовиальную оболочку, хрящ, субхондральную кость, связки, околосуставные мышцы

Характеризуется снижением объема жидкости и нарушением её состава



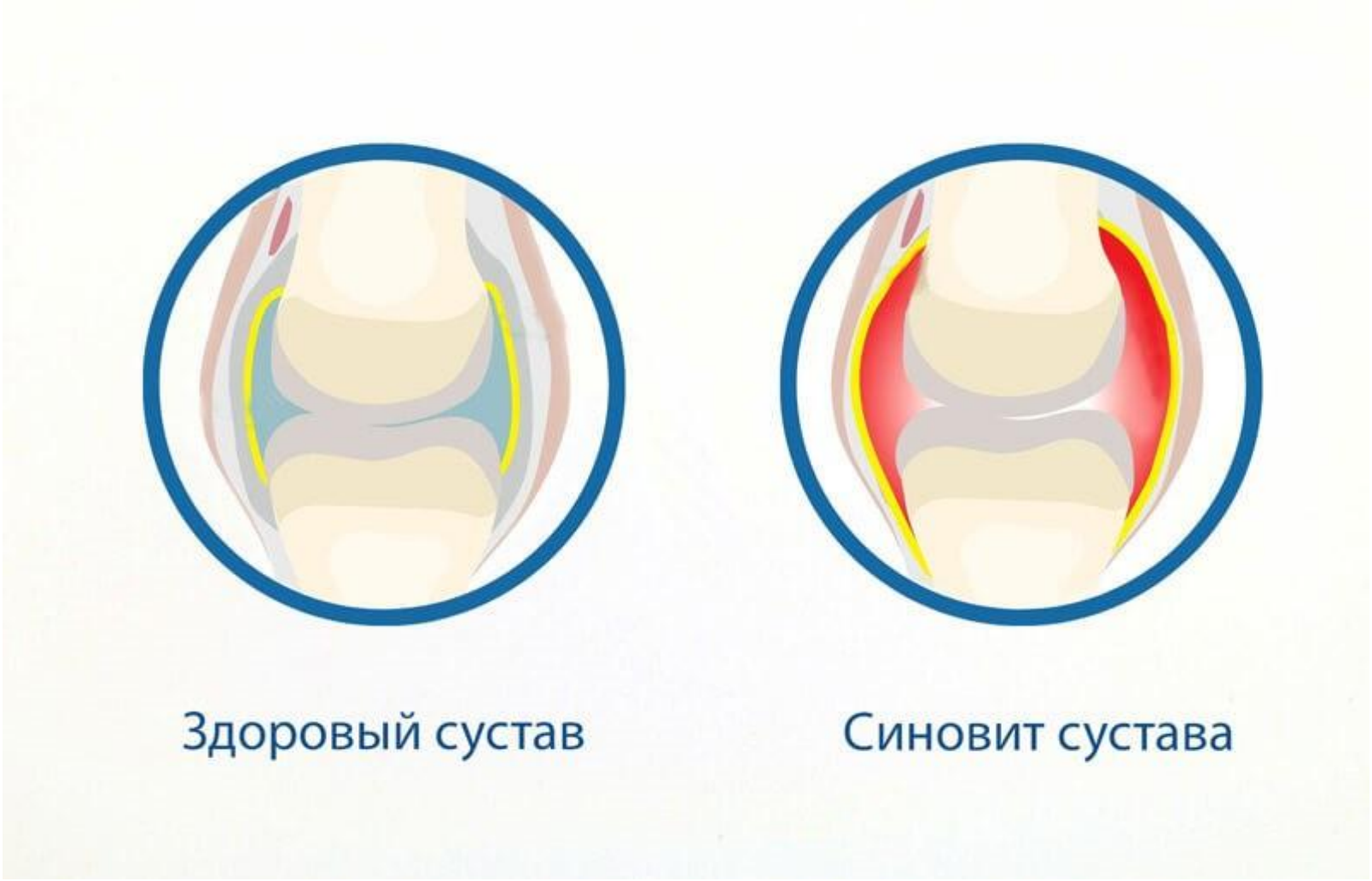


Артритом называют воспалительные заболевания суставов. Они способны вызвать ухудшение качества синовиальной жидкости. При артрите воспалительный процесс приводит к увеличению выработки жидкости, что может вызвать её избыток и привести к отёку и увеличению давления внутри сустава. При этом уровень гиалуроновой кислоты может снижаться, что ухудшает смазывающие свойства жидкости и способствует дальнейшему разрушению хряща.

Остеоартроз является дегенеративным заболеванием, характеризующимся постепенным истончением хряща и изменением синовиальной жидкости, что ведет к снижению её вязкости и смазывающей способности. В результате уменьшения количества гиалуроновой кислоты и других важных компонентов, у пациентов с остеоартрозом суставы теряют свою амортизационную способность, что вызывает боль при движении и ограничение подвижности. Длительное течение заболевания может привести к значительной деформации сустава и потере его функции, что серьезно сказывается на качестве жизни пациентов.

Инфекции

Приводят к накоплению бактерий, лейкоцитов и продуктов распада тканей



Травмы

Повышение объема жидкости из-за увеличенной проницаемости сосудов



