

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МЕДИЧНИХ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА УСТАНОВА «НАЦІОНАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ ТРАВМАТОЛОГІЇ
ТА ОРТОПЕДІЇ НАМН УКРАЇНИ»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

СИВАК АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК: 616.728.3-007.24-001.5-036.838-089.28(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

**ДІАГНОСТИКА ТА ЛІКУВАННЯ НЕСТАБІЛЬНОСТІ КОЛІННОГО СУГЛОБА
ПРИ ПЕРЕЛОМАХ ПРОКСИМАЛЬНОГО ВІДДІЛУ ВЕЛИКОГОМІЛКОВОЇ
КІСТКИ**

22 – Охорона здоров'я

222 – Медицина

Спеціальність 14.01.21 – травматологія та ортопедія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А.М. Сивак

Науковий керівник:

Калашніков Андрій Валерійович
доктор медичних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Сивак А. М. Діагностика та лікування нестабільності колінного суглоба при внутрішньосуглобових переломах проксимального відділу великогомілкової кістки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 14.01.21 «Травматологія та ортопедія» (222 – Медицина). – ДУ «Національний інститут травматології та ортопедії НАМН України», Київ, 2026.

Дисертаційна робота затверджена на засіданні вченої ради в ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» та є фрагментом науково-дослідної роботи ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» (державний реєстраційний номер 0126U000486).

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-практичного завдання сучасної травматології та ортопедії – покращенню результатів лікування хворих із нестабільністю колінного суглоба при внутрішньосуглобових переломах проксимального відділу великогомілкової кістки шляхом удосконалення діагностики, біомеханічного обґрунтування ризиків посттравматичної нестабільності та розробки диференційованого підходу до хірургічного лікування і реабілітації. Актуальність роботи зумовлена високою частотою супутніх ушкоджень капсульно-зв'язкового апарату й менісків при переломах плато великогомілкової кістки, недостатньою чутливістю стандартної діагностики у гострому періоді та значною часткою незадовільних результатів лікування, що пов'язані з недооцінкою м'якотканинного компонента травми.

Мета роботи – покращити результати лікування хворих із нестабільністю колінного суглоба при внутрішньосуглобових переломах проксимального відділу великогомілкової кістки за рахунок удосконалення діагностики та розробки диференційованого підходу до хірургічного лікування. Об'єкт дослідження – посттравматична нестабільність колінного суглоба при внутрішньосуглобових переломах проксимального відділу великогомілкової кістки. Предмет дослідження – біомеханічні та клінічні чинники, що визначають розвиток

нестабільності колінного суглоба та впливають на вибір тактики лікування при зазначених переломах.

У роботі використано клінічні, променеві, функціональні, біомеханічні та статистичні методи дослідження. Усім пацієнтам виконували рентгенографію та комп'ютерну томографію, а в проспективній групі також магнітно-резонансну томографію для оцінки супутніх ушкоджень зв'язково-меніскового комплексу. Морфологічний аналіз проводили за класифікаціями Schatzker, АО/ОТА та Luo. Біомеханічний етап дослідження базувався на побудові моделі колінного суглоба методом скінченних елементів із подальшим аналізом напружено-деформаційного стану кісткових і м'якотканинних структур при різних сегментарних конфігураціях переломів. Функціональні результати оцінювали за шкалами Rasmussen і Honkonen–Järvinen, а статистичну обробку виконували у програмному середовищі IBM SPSS Statistics 29.0.

Дослідження включало два взаємопов'язані етапи: біомеханічний та клінічний. Клінічна частина охопила 132 пацієнта, із них 87 увійшли до ретроспективної групи і лікувались за традиційною схемою, та 45 – до проспективної групи, у якій застосовано розроблений диференційований підхід. Порівнювані групи були зіставними за віком, статтю, механізмом травми та розподілом переломів за Schatzker. У більшості випадків травма мала високоенергетичний характер.

У ретроспективній групі встановлено, що лише 50 % пацієнтів мали добрі результати лікування, тоді як 30 % – задовільні, а 20 % – негативні. Основними причинами незадовільних наслідків були недостатня репозиція уламків, ушкодження передньої та задньої хрестоподібних зв'язок, бічних зв'язок, менісків і суглобового хряща. При цьому МРТ використовували лише в 1 % випадків, а УЗД – у 7 %, що підтвердило недостатність стандартного діагностичного підходу для своєчасного виявлення ушкоджень м'якотканинних стабілізаторів колінного суглоба.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше встановлено біомеханічні закономірності формування посттравматичної нестабільності колінного суглоба

при переломах проксимального відділу великогомілкової кістки на основі 9-сегментарної класифікації Лю з урахуванням не лише кісткових, а й м'якотканинних структур. Визначено критичні пороги навантаження, перевищення яких асоціюється з ризиком вторинної нестабільності: понад 25 МПа для зв'язкового апарату та понад 12 МПа для менісків. Встановлено, що навіть зміщення 2–3 мм у певних сегментах призводить до клінічно значущого порушення стабільності. Також уперше доведено взаємозв'язок між сегментарною морфологією перелому та можливістю безпечного одноетапного хірургічного лікування залежно від того, чи перетинає траєкторія тунелів для реконструкції зв'язок лінію перелому.

На підставі результатів FEM-моделювання було розроблено диференційований хірургічний підхід, який інтегрує КТ-сегментацію, МРТ-верифікацію ушкоджень зв'язково-меніскового комплексу та біомеханічний аналіз. Для сегментів g, h та їх комбінацій обґрунтовано доцільність одноетапного лікування з поєднанням остеосинтезу та реконструкції стабілізуючих структур. Для медіальних і медіально-центральных сегментів – двоетапну тактику через високий ризик конфлікту тунелів із лінією перелому. Для центральних сегментів e та f визначено необхідність максимально точної артроскопічної або навігаційної репозиції, оскільки навіть мінімальне зміщення суттєво погіршує біомеханіку суглоба.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні диференційованого підходу, який дозволяє обґрунтовано вибирати між одноетапним, двоетапним і консервативним лікуванням, підвищує точність передопераційного планування, зменшує ризик вторинної нестабільності та скорочує терміни функціонального відновлення. Розроблено також структуровану програму післяопераційної реабілітації, яка враховує морфологічний тип перелому, сегментарну локалізацію ушкодження та обсяг оперативного втручання.

Застосування запропонованого підходу у проспективній групі забезпечило кращі функціональні результати порівняно з традиційним лікуванням. Через 12

місяців середній показник за шкалою Rasmussen становив $28,2 \pm 2,3$ проти $25,6 \pm 2,8$ у ретроспективній групі, а за шкалою Honkonen–Järvinen – $92,7 \pm 4,8$ проти $87,4 \pm 5,9$. Частота ускладнень зменшилася з 19,5 % до 8,9 %, а частка добрих результатів зросла з 65 % до 87 % ($p < 0,001$).

Отже, розроблений диференційований підхід до діагностики, хірургічного лікування та реабілітації пацієнтів із внутрішньосуглобовими переломами проксимального відділу великогомілкової кістки є науково обґрунтованим, клінічно ефективним та перспективним для широкого впровадження у практику ортопедії і травматології.

Ключові слова: внутрішньосуглобові переломи проксимального відділу великогомілкової кістки, переломи плато великогомілкової кістки, колінний суглоб, посттравматична нестабільність, біомеханічне моделювання, метод скінченних елементів, остеосинтез, металоостеосинтез, реконструкція зв'язок, меніск, реабілітація, пошкодження передньої хрестоподібної зв'язки, пошкодження задньої хрестоподібної зв'язки, артроскопія колінного суглоба, артроскопія, травма, остеоартрит, перелом, біодеградуючі фіксатори, біомеханічні дослідження.

ABSTRACT

Syvak A.M. Diagnosis and treatment of knee joint instability in intra-articular fractures of the proximal tibia. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in specialty 14.01.21 “Traumatology and Orthopedics” (222 – Medicine). – SI “National Institute of Traumatology and Orthopedics of the NAMS of Ukraine”, Kyiv, 2026.

The dissertation work was approved at the meeting of the Academic Council of the SI “National Institute of Traumatology and Orthopedics of the NAMS of Ukraine” and is a fragment of the research work of the SI “Institute of Traumatology and Orthopedics of the NAMS of Ukraine” (state registration number 0126U000486).

The dissertation work is devoted to solving an actual scientific and practical task of modern traumatology and orthopedics – improving the results of treatment of patients with knee joint instability in intra-articular fractures of the proximal tibia by improving diagnostics, biomechanical substantiation of the risks of post-traumatic instability and developing a differentiated approach to surgical treatment and rehabilitation. The relevance of the work is due to the high frequency of concomitant injuries of the capsular-ligamentous apparatus and menisci in tibial plateau fractures, insufficient sensitivity of standard diagnostics in the acute period and a significant proportion of unsatisfactory treatment results associated with underestimation of the soft tissue component of injury.

The aim of the work is to improve the results of treatment of patients with knee joint instability in intra-articular fractures of the proximal tibia by improving diagnostics and developing a differentiated approach to surgical treatment. The object of the study is post-traumatic instability of the knee joint in intra-articular fractures of the proximal tibia. The subject of the study is biomechanical and clinical factors that determine the development of knee joint instability and influence the choice of treatment tactics in these fractures.

Clinical, radiological, functional, biomechanical and statistical research methods were used in the work. All patients underwent radiography and computed tomography,

and in the prospective group also magnetic resonance imaging to assess concomitant injuries of the ligamentous-meniscal complex. Morphological analysis was carried out according to the Schatzker, AO/OTA and Luo classifications. The biomechanical stage of the study was based on the construction of a knee joint model using the finite element method with further analysis of the stress-strain state of bone and soft tissue structures in various segmental configurations of fractures. Functional results were evaluated using the Rasmussen and Honkonen–Järvinen scales, and statistical processing was performed in the IBM SPSS Statistics 29.0 software environment.

The study included two interrelated stages: biomechanical and clinical. The clinical part included 132 patients, of whom 87 were included in the retrospective group and were treated according to the traditional scheme, and 45 were included in the prospective group, in which the developed differentiated approach was applied. The compared groups were comparable in age, sex, mechanism of injury and distribution of fractures according to Schatzker. In most cases, the injury was high-energy.

In the retrospective group it was established that only 50 % of patients had good treatment results, while 30 % were satisfactory and 20 % were negative. The main causes of unsatisfactory outcomes were insufficient reduction of fragments, injuries of the anterior and posterior cruciate ligaments, collateral ligaments, menisci and articular cartilage. At the same time, MRI was used only in 1 % of cases, and ultrasound in 7 %, which confirmed the insufficiency of the standard diagnostic approach for timely detection of injuries of soft tissue stabilizers of the knee joint.

The scientific novelty of the work lies in the fact that for the first time biomechanical patterns of formation of post-traumatic instability of the knee joint in fractures of the proximal tibia were established based on the 9-segment Luo classification, taking into account not only bone but also soft tissue structures. Critical load thresholds were determined, exceeding which is associated with the risk of secondary instability: more than 25 MPa for the ligamentous apparatus and more than 12 MPa for menisci. It was established that even displacement of 2–3 mm in certain segments leads to clinically significant impairment of stability. Also, for the first time, the relationship between the segmental morphology of the fracture and the possibility of

safe one-stage surgical treatment depending on whether the trajectory of tunnels for ligament reconstruction intersects the fracture line was proven.

Based on the results of FEM modeling, a differentiated surgical approach was developed, which integrates CT segmentation, MRI verification of injuries of the ligamentous-meniscal complex and biomechanical analysis. For segments g, h and their combinations, the expediency of one-stage treatment with a combination of osteosynthesis and reconstruction of stabilizing structures is substantiated. For medial and medio-central segments – a two-stage tactic due to the high risk of tunnel conflict with the fracture line. For central segments e and f, the need for maximally accurate arthroscopic or navigational reduction is determined, since even minimal displacement significantly worsens the biomechanics of the joint.

The practical significance of the obtained results lies in the creation of a differentiated approach that allows to reasonably choose between one-stage, two-stage and conservative treatment, increases the accuracy of preoperative planning, reduces the risk of secondary instability and shortens the time of functional recovery. A structured program of postoperative rehabilitation was also developed, which takes into account the morphological type of fracture, segmental localization of injury and the volume of surgical intervention.

The application of the proposed approach in the prospective group provided better functional results compared to traditional treatment. After 12 months, the average score according to the Rasmussen scale was 28.2 ± 2.3 versus 25.6 ± 2.8 in the retrospective group, and according to the Honkonen–Järvinen scale – 92.7 ± 4.8 versus 87.4 ± 5.9 . The complication rate decreased from 19.5 % to 8.9 %, and the proportion of good results increased from 65 % to 87 % ($p < 0.001$).

Thus, the developed differentiated approach to diagnosis, surgical treatment and rehabilitation of patients with intra-articular fractures of the proximal tibia is scientifically substantiated, clinically effective and promising for wide implementation in the practice of orthopedics and traumatology.

Keywords: intra-articular fractures of the proximal tibia, tibial plateau fractures, knee joint, post-traumatic instability, biomechanical modelling, finite element method,

osteosynthesis, internal fixation, ligament reconstruction, meniscus, rehabilitation, anterior cruciate ligament injury, posterior cruciate ligament injury, knee arthroscopy, arthroscopy, trauma, osteoarthritis, fracture, biodegradable fixators, biomechanical studies.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Калашніков АВ, Літун ЮМ, Чіп ЄЕ, Сивак АМ. Місце малоінвазивних технологій в оперативному лікуванні переломів проксимального відділу гомілки. Вісник Вінницького національного медичного університету. 2024;28(3):479-485. DOI: [10.31393/reports-vnmedical-2024-28\(3\)-18](https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2024-28(3)-18)
2. Калашніков АВ, Літун ЮМ, Чіп ЄЕ, Сивак АМ. Диференційований підхід до хірургічного лікування внутрішньосуглобових переломів проксимального відділу великогомілкової кістки. Біль. Суглоби. Хребет. 2024;14(3):37-44. DOI: <https://doi.org/10.22141/pjs.14.3.2024.429>
3. Сивак АМ, Калашніков АВ, Літун ЮМ. Переломи плато великогомілкової кістки: ретроспективний аналіз результатів лікування та роль посттравматичної нестабільності колінного суглоба. Психосоматична медицина та загальна практика. 2025;10(2). DOI: [10.26766/pmgrp.v10i2.626](https://doi.org/10.26766/pmgrp.v10i2.626)
4. Сивак АМ, Катюкова ЛД. Реабілітація пацієнтів після хірургічного лікування переломів проксимального відділу великогомілкової кістки. Клінічна та профілактична медицина. 2025;7(45):129-138. <https://doi.org/10.31612/2616-4868.7.2025.16>
5. Сивак АМ, Мусієнко ОС. Біомеханічне обґрунтування диференційованого лікування переломів проксимального відділу великогомілкової кістки. Terra Orthopaedica. 2026;1(129):22-29

ЗМІСТ	стор
АНОТАЦІЯ.....	2
СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	10
ЗМІСТ.....	11
СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	13
ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ ПОГЛЯД НА ЛІКУВАННЯ ПЕРЕЛОМІВ.....	22
ПРОКСИМАЛЬНОГО ВІДДІЛУ ВЕЛИКОГОМІЛКОВОЇ КІСТКИ	
(огляд літератури)	22
1.1 Місце переломів проксимального відділу великогомілкової кістки	
в загальній структурі переломів колінного суглоба.....	22
1.2 Діагностика та класифікації.....	24
1.3 Біомеханічні аспекти прогнозування нестабільності кісток суглоба.....	27
1.4 Принципи лікування пацієнтів з ППВБК.....	31
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	35
2.1 Загальна характеристика пацієнтів.....	35
2.2 Методи обстеження.....	37
2.2.1 Методи променевої діагностики.....	37
2.2.2 Класифікації.....	38
2.2.3 Біомеханічні дослідження.....	39
2.2.4 Структурно-функціональні шкали оцінювання.....	42
2.2.5 Оцінювання результатів.....	43
2.2.6 Статистична обробка.....	45
РОЗДІЛ 3. РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЛІКУВАННЯ	
ПАЦІЄНТІВ ІЗ ПЕРЕЛОМАМИ ПРОКСИМАЛЬНОГО ВІДДІЛУ	
ВЕЛИКОГОМІЛКОВОЇ КІСТКИ.....	48
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ БІОМЕХАНІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	
ПЕРЕЛОМІВ ПРОКСИМАЛЬНОГО ВІДДІЛУ ВЕЛИКОГОМІЛКОВОЇ КІСТКИ.....	56
РОЗДІЛ 5. ЛІКУВАННЯ ПАЦІЄНТІВ З ПЕРЕЛОМАМИ ПРОКСИМАЛЬНОГО	
ВІДДІЛУ ВЕЛИКОГОМІЛКОВОЇ КІСТКИ.....	65
5.1 Хірургічні методи лікування проксимального відділу великогомілкової кістки.....	65
5.1.1 Передопераційне планування.....	65

5.1.2 Одноетапне лікування.....	66
5.1.3 Двоетапне лікування.....	67
5.1.4 Артроскопічна та навігаційна репозиція.....	68
5.1.5 Консервативне лікування.....	68
5.2 Післяопераційне ведення та реабілітація.....	68
5.3 Методика диференційованого лікування.....	69
5.4 Програма реабілітації пацієнтів після хірургічного лікування проксимального відділу великогомілкової кістки.....	74
5.5 Результати лікування.....	83
РОЗДІЛ 6. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	87
ВИСНОВКИ.....	92
ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	96
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	98

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КС – колінний суглоб

КТ – комп'ютерна томографія

МРТ – магнітно-резонансна томографія

ППВБК – переломи проксимального відділу великогомілкової кістки

УЗД – ультразвукове дослідження

FEM – метод скінченних елементів

ПХЗ – передня хрестоподібна зв'язка

ЗХЗ – задня хрестоподібна зв'язка

АО/ОТА – Асоціація остеосинтезу

МКЗ – медіальна колатеральна зв'язка

ЛКЗ – латеральна колатеральна зв'язка

AL – сегменти передньо-латеральної колони

PL – сегменти задньо-латеральної колони

ВСТУП

Переломи проксимального відділу великогомілкової кістки становлять від 1-3 % усіх переломів скелета та до 8 % переломів нижньої кінцівки, найчастіше виникають у працездатному віці та супроводжуються високим рівнем тимчасової або стійкої втрати функції. За даними сучасних досліджень, до 35–45 % переломів плато великогомілкової кістки асоціюються з ушкодженнями капсульно-зв'язкового апарату, а при високоенергетичному механізмі частота комбінованих кістково-м'якотканинних травм сягає 60–80 % [71]. Незважаючи на технічний прогрес та впровадження сучасних методів остеосинтезу, кількість незадовільних результатів лікування залишається значною – від 18 до 32 %, що переважно пов'язано з несвоєчасним виявленням ушкоджень стабілізуючих структур колінного суглоба [81].

Посттравматична нестабільність колінного суглоба є одним із найсерйозніших ускладнень переломів плато, її частота, за різними джерелами, становить від 12 до 28 % у середньостроковому періоді, а серед пацієнтів із високоенергетичними переломами – до 40 % [87]. Найчастіше нестабільність формується внаслідок неповністю діагностованих або пропущених ушкоджень передньої та задньої хрестоподібних зв'язок, латерального та медіального колатеральних комплексів, а також розривів менісків, які нерідко мають комбінований характер. До типових клінічних наслідків такої недооціненої травми належать хронічна нестабільність, больовий синдром, зниження толерантності до навантаження, швидке прогресування дегенеративних змін та розвиток деформуючого артрозу.

Структура ускладнень при переломах проксимального відділу великогомілкової кістки включає: вторинну варусну або вальгусну деформацію, артрофіброз, резидуальну інконгруентність суглобової поверхні, невідповідність довжини і ротаційні порушення та, що особливо важливо, посттравматичну нестабільність як наслідок недіагностованих м'якотканинних ушкоджень. Саме цей компонент суттєво впливає на віддалений результат, адже нестабільність

збільшує ризик розвитку деформуючого артрозу у 3–6 разів протягом перших 5 років після травми [86].

Незважаючи на доступність сучасних інструментальних методів, діагностика ушкоджень зв'язково-меніскового комплексу залишається проблематичною: точність клінічного огляду в гострому періоді не перевищує 6–10 %, а до 15 % ушкоджень хрестоподібних зв'язок та понад 20 % меніскових розривів залишаються нерозпізнаними при первинному зверненні. Це призводить до помилок у виборі тактики оперативного лікування, зумовлює неправильну оцінку біомеханічної ситуації та сприяє формуванню вторинної нестабільності навіть після анатомічно виконаного остеосинтезу [88]. Додатковою проблемою є те, що більшість класифікацій переломів плато не враховують системно взаємозв'язок між морфологією кісткового ушкодження та напружено-деформаційними змінами у зв'язковому апараті й менісках, що суттєво обмежує можливість прогнозування ризику нестабільності.

Таким чином, на сучасному етапі існує потреба в комплексному підході, що поєднує високу чутливість діагностики, біомеханічний аналіз та чітко сформульовані хірургічні показання. Необхідним є створення диференційованого підходу, здатного інтегрувати морфологічні дані КТ, результати МРТ, артроскопічну оцінку та біомеханічне моделювання для обґрунтованого вибору між одноетапною та двоетапною тактикою лікування. Водночас актуальним залишається впровадження системної реабілітації, диференційованої залежно від анатомічного типу перелому та наявності супутніх м'якотканинних ушкоджень.

Саме ці невирішені питання клінічної практики, висока частота ускладнень і відсутність стандартизованого підходу до діагностики та лікування посттравматичної нестабільності формують наукове підґрунтя для проведення даного дослідження та визначають необхідність удосконалення підходів до лікування пацієнтів із переломами проксимального відділу великогомілкової кістки.

Мета роботи:

Покращити результати лікування хворих із нестабільністю колінного суглоба при переломах проксимального відділу великогомілкової кістки за рахунок удосконалення діагностики та розробки диференційованого підходу до хірургічного лікування.

Завдання дослідження:

1. На основі ретроспективного аналізу вивчити причини виникнення нестабільності при ППВВК.
2. Визначити біомеханічні закономірності впливу зміщення кісткових фрагментів при переломах плато великогомілкової кістки на м'якотканинні стабілізуючі структури та встановити критичні межі зміщення, що призводять до перевантаження м'якотканинних структур і виникнення нестабільності колінного суглоба.
3. Вдосконалити діагностику нестабільності колінного суглоба та розробити показання до лікування.
4. За допомогою теоретико-біомеханічного моделювання обґрунтувати диференційну тактику лікування нестабільності при ППВВК.
5. Розробити програму реабілітації пацієнтів із ППВВК.
6. Провести порівняльний аналіз ефективності традиційної та розробленої технології лікування.

Об'єкт дослідження:

Посттравматична нестабільність колінного суглоба при переломах проксимального відділу великогомілкової кістки.

Предмет дослідження:

Біомеханічні та клінічні чинники, що визначають розвиток нестабільності колінного суглоба та впливають на вибір тактики лікування при переломах проксимального відділу великогомілкової кістки.

Наукова новизна:

1. Уперше встановлено біомеханічні закономірності формування посттравматичної нестабільності колінного суглоба при переломах проксимального відділу великогомілкової кістки на основі 9-сегментарної класифікації Luo з урахуванням напружено-деформаційного стану не лише кісткових, але й м'якотканинних структур (менісків та зв'язок).
2. Вперше визначено критичні біомеханічні пороги навантаження, при перевищенні яких формується вторинна нестабільність: понад 25 МПа для зв'язкового апарату та понад 12 МПа для менісків; встановлено, що навіть 2–3 мм зміщення у певних сегментах ($g+h$, $b+f+h$, $g+h+f$ тощо) призводить до клінічно значущого порушення стабільності.
3. Уперше доведено взаємозв'язок між сегментарною морфологією перелому та можливістю безпечного одноетапного хірургічного лікування (остеосинтез + реконструкція ПХЗ/меніску) залежно від того, чи перетинає траєкторія тунелів зв'язкової реконструкції лінію перелому, що дозволило формувати індивідуалізовану тактику.
4. Розроблено та науково обґрунтовано диференційований хірургічний підхід до лікування ППВБК, який інтегрує КТ-сегментацію, FEM-моделювання та оцінку м'якотканинних ушкоджень; доведено його ефективність шляхом порівняння з традиційною технологією лікування (зниження ускладнень з 19,5 % до 8,9 %, підвищення добрих результатів за Rasmussen з 65 % до 87 %).
5. Уперше продемонстровано вплив індивідуалізованої тактики на швидкість та якість відновлення функції суглоба, що підтверджено достовірно вищими значеннями через 12 місяців: Rasmussen $28,2 \pm 2,3$ проти $25,6 \pm 2,8$, Honkonen $92,7 \pm 4,8$ проти $87,4 \pm 5,9$ ($p < 0,001$).

Практична значимість отриманих результатів:

1. Розроблений диференційований підхід до лікування переломів проксимального відділу великогомілкової кістки забезпечує обґрунтований вибір між одноетапною та двоетапною хірургічною тактикою, що дозволяє підвищити ефективність лікування, мінімізувати ризик вторинної нестабільності та скоротити терміни функціонального відновлення.
2. Встановлені біомеханічні пороги (25 МПа для зв'язок та 12 МПа для менісків) та критичні величини зміщення (2–3 мм) можуть бути використані як клінічні орієнтири для прийняття хірургічного рішення, що підсилює точність передопераційного планування та підвищує безпеку проведення тунелів при реконструкції ПХЗ.
3. Впровадження КТ-сегментації та аналізу за 9-сегментарною класифікацією Люо дозволяє підвищити точність діагностики, об'єктивізувати морфологічну оцінку переломів і прогнозувати ризик нестабільності ще до операції, що значно покращує контроль якості передопераційного планування.
4. Підтверджена ефективність артроскопічно асистованої одноетапної реконструкції стабілізуючих структур у біомеханічно безпечних сегментах (g, h та їх комбінації) дає можливість зменшити кількість повторних втручань, скоротити період імобілізації та досягти кращих функціональних результатів у коротко- та середньостроковій перспективі.
5. Розроблена та впроваджена структурована програма післяопераційної реабілітації для пацієнтів із ППВБК, яка базується на морфологічному типі перелому та обраній хірургічній тактиці, забезпечує індивідуалізацію навантаження, оптимізацію термінів мобілізації та прискорення відновлення функції колінного суглоба.
6. Запропонована лікувально-діагностична тактика може бути впроваджена у практику травматолого-ортопедичних стаціонарів та клінік, оскільки вона

базується на доступних інструментах (КТ, МРТ, артроскопія) і дозволяє знизити частоту ускладнень удвічі (з 19,5 % до 8,9 %) та підвищити частку добрих результатів до 87 %, що підтверджує його значну клінічну цінність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт Державної установи «Інститут травматології та ортопедії Національної академії медичних наук України» та є складовою частиною комплексної наукової теми відділу травматичних пошкоджень опорно-рухового апарату та проблем остеосинтезу: «Розробити диференційований підхід до лікування переломів кісток гомілки у постраждалих під час військових дій» (державний реєстраційний номер – 0126U000486).

Особистий внесок здобувача

Дисертаційна робота є самостійною завершеною науковою працею. Здобувачем самостійно визначено напрям наукового дослідження, сформульовано мету, завдання роботи, гіпотезу дослідження та обґрунтовано актуальність теми. Автором особисто проведено клінічне обстеження пацієнтів, включення їх у проспективну групу, формування порівнюваних вибірок, збір анамнестичних даних і повний цикл передопераційної та післяопераційної оцінки. Здобувач виконав самостійний аналіз рентгенографічних і комп'ютерно-томографічних даних та сегментацію переломів за 9-сегментарною класифікацією Луо. Автором особисто проведено оцінку супутніх м'якотканинних ушкоджень колінного суглоба на основі МРТ, порівняльну морфологічну інтерпретацію різних типів переломів і визначення ключових факторів ризику посттравматичної нестабільності.

На базі кафедри біомеханіки КПІ ім. Ігоря Сікорського за участю співробітників виконано розробку та побудову біомеханічної моделі колінного суглоба методом скінченних елементів (FEM), здійснено постановку граничних умов, моделювання різних конфігурацій переломів, аналіз напружено-

деформаційних характеристик у кісткових та м'якотканинних структурах, інтерпретацію отриманих результатів та визначення критичних сегментів ризику (Мусієнко О.Б.).

Автором особисто розроблено диференційований лікувально-діагностичний підхід, який включає морфологічну стратифікацію, критерії для одноетапної та двоетапної реконструкції стабілізуючих структур, принципи застосування артроскопічного контролю та КТ-навігації. Здобувач брав безпосередню участь у виконанні оперативних втручань у складі хірургічної бригади, здійснював інтраопераційний контроль коректності остеосинтезу та реконструкції зв'язково-меніскового комплексу.

Здобувачем самостійно зібрано та опрацьовано результати динамічного спостереження, виконано оцінювання функціональних показників за стандартизованими шкалами Rasmussen та Honkonen–Järvinen, проведено променевий моніторинг у післяопераційному періоді, а також сформовано базу даних для статистичного аналізу.

На базі відділу реабілітації ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» за участю лікаря Катюкової Л.Д. розроблена програма реабілітації для пацієнтів із ППВВК.

Автором самостійно проведено статистичну обробку даних, вибір відповідних тестів, побудову порівняльних моделей, інтерпретацію показників достовірності та формування висновків щодо ефективності традиційного і диференційованого підходів до лікування.

Усі основні результати, формулювання наукової новизни, практичної значущості, висновки дисертації та пропозиції щодо впровадження розробленого алгоритму у практику належать особисто здобувачу.

Апробація результатів дисертації

Основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи були апробовані на наукових, науково-практичних та фахових форумах ортопедо-травматологічного спрямування різного рівня. Матеріали дослідження

доповідалися та обговорювалися на засіданнях вченої ради Державної установи «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» 29.04.2025 року та 30.09.2025 року, де отримали позитивну оцінку та рекомендацію до подальшої розробки.

Результати дисертаційної роботи були представлені на:

– щорічних науково-практичних конференціях ортопедів-травматологів України (2025);

Окремі елементи роботи — морфологічний аналіз переломів за 9-сегментарною класифікацією Люо, результати біомеханічного моделювання, апробація алгоритму одноетапної реконструкції стабілізуючих структур — були впроваджені та обговорені під час клінічних розборів у відділенні, майстер-класів з артроскопічної техніки та внутрішньолікарських семінарів.

Проміжні та фінальні результати дослідження представлені у вигляді усних і стендових доповідей, що дозволило провести широку професійну дискусію, уточнити окремі положення та зміцнити науково-практичну аргументацію дисертаційної роботи.

Узагальнений алгоритм диференційованого лікування, отримані статистично достовірні результати порівняльного аналізу та напрацювання щодо післяопераційної реабілітації, результати дисертації впроваджені у роботу ортопедо-травматологічних відділень Київської та Закарпатської області та міста Києва.

Обсяг і структура дисертації

Дисертаційна робота викладена на 114 сторінках машинописного тексту і складається зі вступу, шести розділів, що включають огляд літератури, опис матеріалів та методів дослідження, власні результати, їх аналіз та узагальнення, висновків, практичних рекомендацій, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 10 таблиць, 28 рисунків. Список використаних джерел налічує 121 найменування, з яких 119 — джерела іноземною мовою.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ ПОГЛЯД НА ЛІКУВАННЯ ПЕРЕЛОМІВ ПРОКСИМАЛЬНОГО ВІДДІЛУ ВЕЛИКОГОМІЛКОВОЇ КІСТКИ

1.1 Місце переломів проксимального відділу великогомілкової кістки в загальній структурі переломів колінного суглоба

Переломи проксимального відділу великогомілкової кістки (ППВБК), або ж переломи плато великогомілкової кістки, становлять важливу клінічну проблему в травматології через їхній вплив на функціональну стабільність та конгруентність колінного суглоба [10,11]. Ці переломи відносяться до внутрішньосуглобових ушкоджень і супроводжуються значним ризиком ускладнень – як у ранньому післятравматичному періоді (нестабільність, контрактура, інфекції), так і в довгостроковій перспективі (посттравматичний артроз, порушення вісі нижньої кінцівки) [32].

До травматичних ушкоджень колінного суглоба відносять переломи надколінка, метафізарно-епіфізарні переломи дистального кінця стегнової кістки, переломи проксимального відділу великогомілкової кістки, авульсійні переломи (міжвиросткового підвищення), окремі пошкодження суглобових поверхонь та остеохондральні фрагменти. Серед них ППВБК є одним із найскладніших типів ушкоджень, оскільки одночасно уражають опорну поверхню та мають потенціал порушення вісі й стабільності колінного суглоба [9,11]. Вони складають від 1 % до 2 % усіх переломів скелета і близько 8-10 % переломів нижньої кінцівки [6,7]. У структурі внутрішньосуглобових переломів переломи коліна займають провідне місце за частотою, переважаючи переломи дистального відділу стегна в осіб молодого віку. Частіше зустрічаються у чоловіків віком 30-50 років при травмі високої енергії (ДТП, падіння з висоти), у той же час як у жінок похилого віку мають остеопоротичний характер і виникають при мінімальній травматичній дії (падіння з висоти власного зросту) [67,75].

В основі цих ушкоджень лежить компресійно-ротаційний механізм травми. При падінні або ударі у фронтальній площині відбувається компресія плато великогомілкової кістки, що призводить до вдавлення або розщеплення суглобової поверхні. Нерідко ці переломи супроводжуються пошкодженням менісків (до 70 % випадків), хрестоподібних і колатеральних зв'язок, суглобового хряща, капсульно-зв'язкового апарату [35,44]. Таке поєднання обумовлює складність лікування й тривалість відновлення. Особливу небезпеку становить втрата механічної цілісності колінного суглоба, що може призвести до вторинної нестабільності, деформації вісі (вальгус, варус) та розвитку раннього остеоартрозу [57].

Клініко-соціальне значення цієї категорії переломів полягає:

1. У тривалому відновленні: пацієнти часто потребують тривалої реабілітації, іноді до 6-12 місяців.
 2. У втраті працездатності: після ППВВК виявляють високий відсоток до довготривалого лікування або встановлення непрацездатності, особливо у фізично активних осіб.
 3. Часті ускладнення: повторні оперативні втручання, коригуючі остеотомії, артропластика.
 4. У впливі на якість життя, а саме: обмеження рухливості у колінному суглобі, наявність болю, залежність від допоміжних засобів пересування.
- У контексті військових дій та зростання кількості поліорганних і вибухових травм, частота таких переломів зросла, й вони все частіше поєднуються з відкритими ушкодженнями, дефектами м'яких тканин, інфекціями [Devaney et al., 2022].

Таким чином, переломи ППВВК займають провідне місце серед переломів колінного суглоба та мають значне медико-соціальне значення.

1.1. Діагностика та класифікації

Переломи проксимального відділу великогомілкової кістки (ППВБК) супроводжуються значною морфологічною варіабельністю та мають високу частоту супутніх ушкоджень внутрішньосуглобових структур (менісків, зв'язок, хряща), що обумовлює необхідність ретельної діагностики для визначення тактики лікування та прогнозу функціонального відновлення [17, 28].

Клінічна оцінка складна через виражений біль, деформацію та часто супутню політравму, тому має доповнюватися інструментальними методами [13, 20]. Обов'язковим є проведення рентгенографії, що є доступною, швидко виконується та часто є достатньою для прогнозування результатів лікування [16, 76]. Стандартні знімки в передньо-задній та боковій проєкціях дозволяють ідентифікувати лінії перелому, ступінь зміщення фрагментів, депресію суглобової поверхні, порушення вісі кінцівки. Однак, методика має ряд недоліків: низька чутливість до виявлення депресії плато, ротаційних зміщень і супутніх ушкоджень [56]. Тому важливими є додаткові проєкції, такі, як тангенційна проєкція на міжвиросткову ділянку, похилі знімки (особливо при підозрі на наявність задніх фрагментів), знімки в стресових умовах – для оцінки стабільності (у вибраних випадках) [45].

Комп'ютерна томографія є «золотим стандартом» при візуалізації при ППВБК [33] для оцінки кількості та розташування фрагментів, ступеня депресії плато, інтерартикулярних кісткових уламків, планування хірургічного доступу [72].

Перевагами комп'ютерної томографії є висока просторово-анатомічна роздільність, 3D-реконструкція, обов'язкова для передопераційного планування [39]. Недоліками є відсутність оцінки м'яких тканин і значне променеве навантаження [59].

Kfuri & Schatzker, (2018) пропонують використовувати тристовпну модель при КТ-аналізі для анатомічної стратифікації фрагментів (латеральний, медіальний, задній стовп).

Зростає роль МРТ в той же час у діагностиці внутрішньосуглобових пошкоджень Yacoubian SV et al., (2002), Gardner MJ et al., (2005) та Standard JP et al., (2016). Автори роблять висновок що дослідження МРТ, особливо типів IV, V, і VI за Schatzker, за наявності переломів ППВБК дозволяють отримати більш детальне уявлення щодо супутніх пошкоджень м'яких тканин, як невід'ємної частини цих пошкоджень [36, 102].

Магнітно-резонансна томографія дає унікальну можливість виявити розриви менісків [36], зв'язкові ушкодження (розриви ПХЗ, ЗХЗ, LCL, MCL), стан синовіальної оболонки, суглобового хряща, кісткового мозку (кістковий набряк), вільні хондральні або остеохондральні фрагменти [73]. МРТ також є незамінною при плануванні реконструктивних втручань [56], серед недоліків: висока вартість, обмежена доступність у невідкладних ситуаціях [87]. Тож довгий час МРТ нехтували, як інструментом для оцінки переломів плато великогомілкової кістки. Однак останні дослідження продемонстрували його значення у визначенні механізму ушкодження [117]. Сучасні магнітно-резонансні апарати здатні не тільки надати зображення деталей пошкодження м'яких тканин, але також надавати інформацію про ступінь пошкодження хряща, пов'язане з ним ушкодження кістки. На нашу думку, МРТ є цінним інструментом у передопераційній оцінці пацієнтів зі складними переломами плато великогомілкової кістки. Інформація, яку надає це дослідження, допоможе в детальному передопераційному плануванні, особливо, якщо буде прийнято рішення, при поєднанні операції на зв'язках та кістці. МРТ також важливе для довгострокових проспективних спостережень, що пояснюється впливом пов'язаних пошкоджень м'яких тканин на лікування переломів плато великогомілкової кістки. Таким чином, МРТ, як і КТ, має стати звичайною (протоковою) частиною передопераційного збору інформації [94].

Артроскопія колінного суглоба використовується рідше і як допоміжний або діагностично-терапевтичний метод. Її використання дає змогу підтвердити та усунути ушкодження хряща, менісків, контролювати якість репозиції суглобової поверхні. До переваги артроскопії слід віднести: пряму візуалізацію

внутрішньосуглобових структур, серед недоліків – технічну складність, ризик додаткового травмування [60].

Загальна оцінка інформативності діагностичних методів виглядає наступним чином. При первинній діагностиці використовуємо рентгенологічне дослідження, яке дає добрі результати діагностики при переломах зі зміщенням. У складних випадках і при передопераційному плануванні застосовується КТ, яка дає високу точність при внутрішньосуглобових переломах. При підозрі на ушкодження м'якотканинних структур – МРТ, яка дає високу точність стану внутрішньосуглобових структур.

Таким чином, КТ є «золотим стандартом» при візуалізації ППВВК, а використання МРТ для м'якотканинних ушкоджень обмежено із-за дороговартості й обмеженої доступності. Роль УЗД не визначена.

Існує кілька класифікацій ППВВК, кожна з яких має свої переваги та обмеження. Нижче наведено основні з них.

Класифікація Schatzker (1979) розроблена Schatzker J., McBroom R., Bruce D. (University of Toronto) [95].

Основною ідеєю є морфологічна диференціація переломів латерального, медіального плато, депресії та вибухових переломів.

Розподіл за типами: I (латеральне розщеплення); II (розщеплення + депресія); III (депресія латерального плато); IV (медіальний перелом); V (біколонний перелом); VI (розщеплення метафізу з діафізарним компонентом).

Для більш глибокого осмислення наводимо схему класифікації, представлену на рис.1 в роботі Xiang Yao et al., (2018).

На наш погляд, ця класифікація є найбільш адекватною для визначення стану як кісткової тканини, так і м'яких тканин суглоба.



Рис. 1. Схема розподілу суглобової поверхні (плато) великої гомілкової кістки [112].

а – f – колони, с – горбистість ВГК, і – малогомілкова кістка

Переваги класифікації – проста, клінічно застосована; недоліки – не враховує задній стовп, 3D-орієнтацію, непридатна для складних випадків [19, 20].

Класифікація (Müller, 1990), розроблена АО Foundation, універсальна класифікація для всіх кісток і суглобів.

Розподіл ведеться за категоріями: 41-А (позасуглобові переломи); 41-В (частково суглобові); 41-С (повністю суглобові з розщепленням метафізу). Переваги – детальна, структурована, статистично стандартизована; недоліки – складна в клінічному застосуванні без комп'ютерної томографії [104].

Класифікація Luo (2010) – тристовпна модель, розроблена Luo CF, Shao JS, et al [64].

Принцип базується на КТ, поділ на передньо-латеральний, медіальний та задній стовпи. Передньо-латеральний (частіше у типах I-III Schatzker), медіальний (потенційно нестабільний), задній (важкодоступний, потребує спеціального доступу). Переваги: дозволяє планувати хірургічний доступ і фіксацію. Недоліки: потребує КТ з 3D-реконструкцією, не містить механічної оцінки стабільності [64].

Класифікація Kfuri-Schatzker (2018) [51].

Розширення класичної класифікації шляхом уточнення анатомії фрагментів у 3D-просторі. Переваги: поєднання простоти Schatzker з деталізацією Luo, корисна для 3D-планування.

Таким чином, існуючі класифікації мають свої переваги і недоліки, які в свою чергу потребують додаткових спрямувань, щодо визначень тактики хірургічного лікування.

1.2. Біомеханічні аспекти прогнозування нестабільності кісток суглоба

Переломи проксимального відділу великогомілкової кістки (ППВБК) є одними з найбільш складних внутрішньосуглобових ушкоджень, які не лише порушують цілісність кісткових структур, а й часто супроводжуються пошкодженням зв'язкового апарату та менісків. Така комбінація ушкоджень може

призводити до посттравматичної нестабільності колінного суглоба, що є одним із ключових чинників розвитку вторинного остеоартрозу та функціональної неспроможності суглоба. У клінічній практиці лікар-ортопед часто стикається з труднощами у діагностиці й тактичному плануванні лікування таких пацієнтів, особливо в умовах гострого травматизму, коли пріоритетом є стабілізація кісткових фрагментів. Сучасні методи візуалізації, такі як МРТ та КТ, безсумнівно, є основою для оцінки структурних пошкоджень, однак не завжди дозволяють точно спрогнозувати функціональну неспроможність суглоба в умовах фізіологічного навантаження. Саме тому виникає необхідність у впровадженні об'єктивних, кількісних підходів до оцінки стабільності колінного суглоба після переломів ППВВК.

Одним із таких методів є біомеханічне моделювання, зокрема метод скінченних елементів (МСЕ), який дозволяє відтворити реалістичну анатомію, враховуючи властивості тканин, геометрію суглоба та граничні умови, що відповідають навантаженню в реальному житті. Упродовж останніх десятиліть було опубліковано чимало робіт, що описують застосування МСЕ для вивчення функції колінного суглоба. Зокрема, дослідники аналізували розподіл напружень у меніску, хрестоподібних та колатеральних зв'язках, особливості контактних поверхонь, динаміку руху при ходьбі чи стоянні. Дослідження Zhang J, et al. [2024] продемонструвало зміни розподілу навантаження на медіальний меніск при пошкодженні ПХЗ, а робота Yu C, et al. [2025] була присвячена ролі латерального меніска в стабілізації суглоба після латеральних переломів плато. Попри цінність таких досліджень, багато з них базуються на спрощених або надто ідеалізованих моделях, що не відображають повною мірою анатомо-функціональні особливості ушкодженого коліна. Крім того, лише поодинокі праці включали порівняння отриманих результатів із аналітичними розрахунками, що значно знижує валідність висновків. Водночас, недостатньо вивченими залишаються питання впливу типу перелому (наприклад, за Schatzker або трисегментарною класифікацією) на розподіл напружень у м'якотканинних структурах коліна[51]. Аналіз доступних джерел свідчить про ряд характерних обмежень попередніх

біомеханічних моделей: це обмежена кількість варіантів сіток (як правило, використовувалися 1–2 варіанти без аналізу чутливості), ідеалізована геометрія, яка не враховувала особливості післятравматичних змін, модель будувалася лише для однієї позиції коліна (наприклад, у розгинанні), що не дозволяло оцінити навантаження при функціональній активності, відсутність адекватного обґрунтування вибору граничних умов і характеристик матеріалів. Ці обмеження створюють прогалину між науковими дослідженнями та їх практичним застосуванням у клініці. Отже, існує потреба у створенні більш деталізованих, анатомічно точних й аналітично обґрунтованих моделей [63]. Основні клінічні проблеми при лікуванні ППВВК включають необхідність своєчасного виявлення супутніх ушкоджень ПХЗ, ЗХЗ, менісків, а також вибір обґрунтованої тактики втручання: чи проводити відновлення зв'язок та шов меніска одночасно з металоостеосинтезом, чи відтермінувати реконструкцію до другого етапу лікування [88]. Помилки на цьому етапі призводять до резидуальної нестабільності, збільшення тривалості реабілітації та ризику розвитку остеоартрозу. Врахування біомеханічної інформації при плануванні втручання дозволяє уникнути гіпо- або гіперкорекції та індивідуалізувати лікування для кожного пацієнта.

Отримані результати біомеханічного моделювання дозволяють зробити низку важливих висновків щодо особливостей розподілу навантаження на м'якотканинній структурі колінного суглоба залежно від локалізації перелому. Спостерігається чітка кореляція між ступенем зміщення кісткових фрагментів та напруженням у зв'язковому апараті, особливо при ураженні сегментів передньо-латеральної (AL) та задньо-латеральної (PL) колон, що узгоджується з клінічними спостереженнями щодо нестабільності суглоба після таких переломів.

Порівнюючи отримані дані з попередніми дослідженнями, слід відзначити, що більшість раніше побудованих моделей не включали варіативність сегментарного ураження та аналіз напружень у меніску і зв'язках окремо для кожного з них. У цьому аспекті наша модель є більш деталізованою, з урахуванням анатомічної відповідності та повної механічної взаємодії між елементами

колінного суглоба. Порівняно з моделями, описаними у роботах Zhang J, et al. (2024), Yu C, et al. (2025), наша модель враховує також клінічну інтерпретацію результатів, пропонуючи практичні рекомендації щодо тактики лікування.

Наявність аналітичної валідації забезпечує високу достовірність FEM-розрахунків, чим вигідно вирізняється від багатьох сучасних досліджень, де такі розрахунки проводяться без обґрунтування похибки. Використання моделі з оптимальною кількістю скінченних елементів дозволяє досягти високої точності при помірному ресурсному навантаженні, що підвищує доцільність використання цього підходу в клінічній практиці.

Обмеження нашого дослідження включають спрощення властивостей матеріалів (лінійно-еластична поведінка), а також моделювання в умовах лише одного виду навантаження – вертикального стискання. У подальших дослідженнях доцільно буде включити оцінку скручування, згинання, а також аналіз у динаміці (ходьба, біг). Додатково доцільним є включення більше індивідуалізованих моделей, побудованих на основі МРТ-конструкцій, та аналіз впливу імплантів на стабільність суглоба.

Незважаючи на зазначені обмеження, результати даного дослідження можуть бути безпосередньо інтегровані у клінічний алгоритм оцінки нестабільності після ППВВК. Встановлена кореляція між локалізацією перелому, напруженням у м'якотканинних структурах та рівнем ризику нестабільності дозволяє обґрунтувати вибір тактики втручання – від консервативного ведення до одноетапного оперативного втручання з пластикою зв'язок і швом меніска.

Таким чином, використання біомеханічного аналізу як допоміжного інструменту прийняття рішень у лікуванні ППВВК є перспективним напрямом розвитку персоналізованої ортопедії.

Метод скінченних елементів відкриває нові горизонти для кількісної оцінки стабільності суглоба в умовах різних варіантів навантаження та конфігурацій перелому. За допомогою таких моделей можна вивчати залежність розподілу напружень у меніску та зв'язках від типу перелому, вплив кількості скінченних елементів на точність результатів, варіанти імплантаційної стабілізації та їх

біомеханічну ефективність, імітацію реального стоячого навантаження з можливістю порівняння різних клінічних сценаріїв. Валідація результатів із залученням аналітичного розрахунку дозволяє підвищити надійність моделей та зробити їх корисними не лише для наукового аналізу, а й для клінічного прийняття рішень.

1.3. Принципи лікування пацієнтів з ППВБК

Лікування переломів проксимального відділу великогомілкової кістки є складною клінічною задачею, що вимагає індивідуалізованого підходу з урахуванням анатомо-морфологічних особливостей ушкодження, супутніх структурних змін, загального стану пацієнта, рівня його активності та функціональних очікувань. Загальна мета лікування полягає в досягненні стабільної анатомічної реконструкції плато великогомілкової кістки з відновленням конгруентності суглобової поверхні, забезпеченням стабільності колінного суглоба та мінімізацією ризику розвитку посттравматичного артрозу [51, 74].

Консервативна терапія має обмежені показання і застосовується у випадках незміщених або мінімально зміщених переломів (менше 2-3 мм депресії суглобової поверхні, інтактної структури зв'язкового апарату, високих хірургічних ризиків) у пацієнтів літнього віку, з супутньою патологією або низьким функціональним запитом, пацієнтів із протипоказаннями до анестезії чи хірургічного втручання [32].

Основними принципами консервативного лікування є забезпечення іммобілізації (гіпсова пов'язка або ортез у розширеному положенні колінного суглоба), контрольована фізична активність – дозоване навантаження після 4-6 тижнів, регулярний рентген-контроль для моніторингу вторинного зміщення, фізіотерапія для запобігання контрактурам і м'язовій атрофії [36].

Попри низьку інвазивність, цей підхід асоціюється з ризиком розвитку вторинного зміщення, порушенням конгруентності суглоба, контрактур і артрозу, особливо у випадках депресії плато, що не була виявлена при первинній оцінці [114].

Хірургічне втручання є методом вибору при зміщенні фрагментів >2мм, депресії суглобової поверхні, нестабільності суглоба, поліфрагментарних, вибухових, компресійних переломах, наявності супутніх пошкоджень (меніски, зв'язки, хрящ) [87].

Основними принципами хірургічного втручання є анатомічна репозиція суглобової поверхні, особливо центрального навантаженого сегмента, відновлення механічної вісі нижньої кінцівки (вісьове вирівнювання), стабільна фіксація з метою забезпечення ранньої мобілізації, урахування супутніх ушкоджень м'яких тканин, мінімальна інвазивність при збереженні адекватної візуалізації фрагментів [93].

Методи остеосинтезу, які застосовуються при ППВБК [38].

- Відкрита репозиція з внутрішньою фіксацією (ORIF) – золотий стандарт при двосторонніх та вибухових переломах. Застосовуються анатомічно профільовані LCP-пластини, гвинти з фіксацією кута.
- Малоінвазивний перкутанний остеосинтез (MPO) – при типах Schatzker I-III пацієнтів з добрим станом м'яких тканин, дозволяє зменшити операційну травму.
- Зовнішня фіксація (монолатеральна або кільцева) – при відкритих або у пацієнтів із політравмою, при значному набряку або забрудненні рани; також як етапне лікування (damage control).
- Гібридні методи – комбінація пластин і штифтів або зовнішніх фіксаторів з подальшим переходом до ORIF.
- Артроскопічно-асистований остеосинтез – забезпечує візуальний контроль репозиції, дозволяє одночасне усунення ушкоджень менісків, хряща, зменшує ризик вторинної нестабільності.

Сучасні засоби та інструменти в хірургії ППВБК [48].

- Передопераційне КТ-планування з 3D-реконструкцією – дозволяє створення карт фрагментів (fracture mapping), що покращує вибір хірургічного підходу та імплантатів.

- Навігаційні системи та комп'ютерна візуалізація – забезпечують точність репозиції у складних випадках.
- Індивідуалізовані імпланти, включно з 3D-друком (особливо при багаторазових ревізіях або пухлиноподібних ушкодженнях).
- Біоматеріали для підсилення субхондральної зони – кальційфосфатні цементи, колагенові носії, використовуються при депресії плато.

При супутніх ушкодженнях м'яких тканин застосовується відповідна тактика [73].

Таким чином, потребує удосконалення система діагностики, вивчення та систематизація структурних елементів перелому, для удосконалення диференційованого підходу до лікування та розробка системи реабілітації.

На наш погляд перспективним напрямком у лікуванні ППВБК є:

По-перше, удосконалення алгоритму діагностики. Наш аналіз показав, що обмежене використання МРТ та УЗД суттєво знижує вірогідність виявлення супутніх ушкоджень зв'язок і менісків. Саме тому, подальші дослідження повинні бути спрямовані на створення більш гнучкого та структурованого діагностичного підходу, який враховуватиме тип ушкодження, його локалізацію та клінічну симптоматику. Це дозволить своєчасно виявляти критичні чинники ризику формування нестабільності ще до вибору методу лікування.

Другий напрямок – диференційований підхід до лікування. Ми бачимо потребу в більш чіткому розмежуванні показань до одноетапного чи відстроченого втручання, зокрема у випадках поєднаних ушкоджень. Підхід має враховувати не лише тип перелому за Schatzker чи АО, але й супутні пошкодження м'якотканинних структур, час звернення та загальний стан пацієнта. Це дозволить зменшити кількість функціональних ускладнень у середньо- та довгостроковій перспективі.

Третій напрямок – це персоналізований підхід до реабілітації. Ми підкреслюємо, що відновлення функції колінного суглоба не може базуватись лише на стандартних схемах. Реабілітація повинна будуватися з урахуванням стабільності суглоба після лікування, якості репозиції, віку та рівня фізичної

активності пацієнта. Такий підхід дозволяє адаптувати фізичне навантаження, запобігти повторним травмам і досягти кращих функціональних результатів.

Таким чином, ці три напрямки – діагностика, лікування та реабілітація – мають бути не ізольованими етапами, а єдиною послідовною системою, орієнтованою на конкретного пацієнта і його анатомо-функціональні особливості.

Проведений аналіз джерел інформації свідчить, що підходи до лікування ізольованих ППВВК є досить розробленими. Проте недостатньо розглянута діагностика і тактика хірургічного втручання при супутньому ушкодженні м'якотканинних структур колінного суглоба.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження побудоване як комплексна наукова робота, що поєднує клінічні, інструментальні та біомеханічні методи оцінки переломів проксимального відділу великогомілкової кістки. Така структура дає змогу одночасно охопити як реальні клінічні результати лікування, так і механічні закономірності, що лежать в основі формування посттравматичної нестабільності колінного суглоба.

Дослідження включало два взаємопов'язані, але концептуально різні етапи:

Біомеханічний етап. Створення математичної моделі колінного суглоба та аналіз напружено-деформаційних характеристик методом скінченних елементів (FEM). На цьому етапі вивчали поведінку суглобових структур при різних сегментарних переломах за Луо, їхній вплив на стабільність коліна, а також визначали критичні зони перетину тунелів ПХЗ із лініями перелому.

Метою було встановлення об'єктивних біомеханічних меж, що визначають доцільність одноетапного чи двоетапного лікування.

Клінічний етап. Реалізувався у вигляді проспективно-ретроспективного аналізу результатів лікування двох груп пацієнтів:

- ретроспективної – лікування за традиційною схемою, без урахування біомеханічної класифікації;
- проспективної – лікування згідно розробленого алгоритму, заснованого на FEM.

2.1. Загальна характеристика пацієнтів

В дослідженні приймали участь 87 пацієнтів (ретроспективна вибірка), які проходили лікування за традиційною методикою лікування та 45 пацієнтів

(проспективна група) за пропонованим авторським підходом діагностики та лікування.

Середній вік становив $43,2 \pm 12,7$ років, чоловіків – 57,6 %, жінок – 42,4 %.

Високоенергетичні травми переважали у 80 % випадків (ДТП, падіння з висоти, спортивні ушкодження).

Розподіл переломів за класифікацією Schatzker був подібним у двох групах, що підтверджує тотожність вибірок ($p > 0,05$). Порівняльна характеристика груп наведена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Демографічні та вихідні характеристики пацієнтів

Показник	Ретроспективна (n=87)	Проспективна (n=45)	p
Вік, років (M \pm SD)	44,1 \pm 11,9	42,3 \pm 12,8	0,412
Стать, ч/ж	51 / 36	26 / 19	0,913
Високоенергетична травма, %	78,2	82,2	0,621
Schatzker I–II / III– IV / V–VI, %	24 / 33 / 43	22 / 31 / 47	0,845
ПХЗ або меніск (МРТ підтверджено), %	15,6	24,4	0,182

Серед 132 пацієнтів (87 – ретроспективна, 45 – проспективна група) розподіл переломів за класифікацією Schatzker був таким: II тип – 23,5 %, III тип – 17,2 %, IV тип – 12,9 %, V тип – 22,0 %, VI тип – 24,4 %.

За класифікацією АО/ОТА переважали переломи типу 41–C1 (27 %) і 41–C2 (31 %), тоді як 41–B3 зустрічались у 22 %, а складні 41–C3 – у 20 %.

Відповідно до тривимірної сегментарної класифікації Луо, найчастіше уражались сегменти g (28 %), h (21 %), та їх комбінації (g+h – 19 %, b+f+h – 17 %, g+h+f – 15 %). У більшості випадків (82 %) травма мала високоенергетичний характер, що підтверджує перевагу механізму компресійно–ротаційного навантаження на плато великогомілкової кістки.

У ретроспективній групі виявлено 19,5 % ускладнень.

Критерії включення пацієнтів у дослідження. Вік 18–65 років. Такий віковий діапазон дозволяє аналізувати репаративні процеси без значного впливу вікової остеопорозної перебудови чи геріатричних станів. Наявність переломів плато ВГК за АО/ОТА 41-В або 41-С. Це забезпечує однорідність щодо тяжкості ушкодження та виключає екстремально легкі або надмірно складні варіанти. Наявність КТ із високою роздільною здатністю. Ключова умова, оскільки сегментарний аналіз за Луо базується виключно на КТ, МРТ у проспективній групі. Це дозволяло верифікувати пошкодження зв'язково-меніскового комплексу, що є критичним для визначення тактики. Письмова інформована згода та прогнозоване 12-місячне спостереження.

2.2. Методи обстеження

Всім пацієнтам виконували загальні клініко-інструментальні дослідження.

2.2.1. Методи променевої діагностики

Усім пацієнтам виконували рентгенографію у стандартних проєкціях: передньо-задній і боковій. Рентгенологічне дослідження дозволяло оцінити загальний напрям лінії перелому, висоту та площу депресії, наявність кутових деформацій та ширину міжвиросткової відстані. Рентгенографія була першою ланкою діагностики, однак її можливостей було недостатньо для оптимального вибору хірургічної тактики, адже вона не відображає повною мірою просторову морфологію травматичних пошкоджень. Комп'ютерна томографія стала обов'язковим елементом у всіх випадках, оскільки саме КТ забезпечувала

тривимірну реконструкцію ушкодження. Дослідження проводили на мультиспіральних томографах з тонким зрізом до 1 мм, що давало змогу детально візуалізувати фрагментацію, напрям переломних ліній у трьох площинах та особливо – ідентифікувати сегментарну приналежність перелому за класифікацією Luo. КТ дозволяла встановити форму депресії, її глибину, взаємне розташування уламків, а також визначити можливість доступу для відновлення суглобової поверхні під артроскопічним чи відкритим контролем. Саме комп'ютерна томографія була ключовою для інтеграції даних у FEM-модель, оскільки давала точну геометрію проксимального відділу великогомілкової кістки. Магнітно-резонансна томографія виконувалася у проспективній групі з метою оцінки супутніх ушкоджень м'якотканинних структур. Для МРТ використовували високопольні апарати з протоколами PDW, STIR та T2 із подавленням жиру. Оцінювали цілісність ПХЗ, ЗХЗ, МКЗ, ЛКЗ, стан менісків, у тому числі кореневих прикріплень, та вираженість кісткового набряку. МРТ відігравала вирішальну роль для визначення того, чи потребує пацієнт одномоментної реконструкції зв'язкового апарату, чи цю операцію необхідно відкласти на другий етап, що було принципово важливим в умовах сегментарних переломів.

2.2.2. Класифікації

В роботі для аналізу результатів дослідження використані такі класифікації.

Schatzker – описує морфологію у фронтальній площині, АО/ОТА – універсальна систематизація тяжкості ушкодження. Luo (four-column, nine-segment) – єдина класифікація, що дає тривимірне уявлення про перелом, дозволяє ідентифікувати сегменти b, g, f, h, g+h тощо [51]. Оскільки морфологічна оцінка перелому є основою для визначення хірургічної тактики, у дослідженні застосовували кілька класифікацій. Найпростішою у використанні була класифікація Schatzker, яка відображає тип ушкодження у фронтальній площині та розділяє переломи на шість груп, залежно від наявності депресії, латерального чи медіального компонента, а також від залучення метафізу. Ця класифікація

досить поширена, однак її двовимірність не дозволяє повністю оцінити задній або центральний компонент [63]. Більш деталізовану систематизацію забезпечувала класифікація АО/ОТА, яка дозволяє стандартизувати переломи проксимального відділу гомілки за ступенем складності – від часткових внутрішньосуглобових до багатоуламкових із порушенням континуїтету. Попри це, класифікація АО/ОТА також недостатньо точно описує просторову конфігурацію фрагментів [65].

Основною для даного дослідження слугувала саме сегментарна класифікація ППВБК за Luo, яка розподіляє перелом на чотири колони та дев'ять сегментів. Вона відображає просторову тривимірну характеристику ушкодження, що дозволяє оцінити не лише латеральні та медіальні компоненти, але й задні та центральні. Центральна колона, що є унікальною особливістю Luo, має вирішальне значення для прогнозування стабільності суглобової поверхні та визначення методів репозиції. Дев'ять сегментів Luo – a, b, c (медіальні), d, e, f (центральні), g, h, i (латеральні) – дозволяють надзвичайно точно локалізувати фрагменти перелому. Завдяки цьому стає можливим не лише визначення хірургічного доступу, але й прогнозування ризику перетину лінії перелому з траєкторією тунелів ПХЗ або ЗХЗ при плануванні реконструкції [77]. Саме сегментарна класифікація Luo стала ключовою для визначення хірургічної тактики у проспективній групі. Сегменти g, h та їх комбінації продемонстрували безпечність для одномоментної реконструкції м'якотканинних структур, тоді як медіальні сегменти a та b у поєднанні з центральними фрагментами створювали високий ризик конфлікту тунелів з лінією перелому. Центральні сегменти e та f, згідно з FEM-аналізом, були найбільш чутливими до зміщення та потребували навігаційної або артроскопічної репозиції.

2.2.3. Біомеханічні дослідження

Біомеханічний аналіз методом скінченних елементів (FEM) був ключовим компонентом даного дослідження, оскільки дозволяв об'єктивно, математично обґрунтовано та кількісно оцінити механічну характеристику проксимального відділу великогомілкової кістки при різних варіантах сегментарних переломів.

Цей підхід був включений у структуру роботи не як допоміжний інженерний інструмент, а як фундаментальний елемент, що забезпечував зв'язок між морфологією перелому та вибором хірургічної тактики. FEM-моделювання давало можливість відтворити поведінку кісткових і м'якотканинних елементів у реальних умовах навантаження, визначити зони підвищених напружень, оцінити потенційний ризик вторинного зміщення та проаналізувати взаємодію між лініями перелому й траєкторіями тунелів для реконструкції хрестоподібних зв'язок. Саме ці параметри лежать в основі критеріїв, за якими визначається можливість одномоментної реконструкції ПХЗ або її необхідність переносити на другий етап лікування.

Побудова моделі розпочиналася з отримання високоякісних вихідних даних у вигляді мультиспіральної комп'ютерної томографії із товщиною зрізу 0,6–1,0 мм. DICOM-файли проходили ретельну сегментацію з виділенням кортикального шару, трабекулярної кістки, суглобового хряща, медіального та латерального менісків, а також всіх основних зв'язок колінного суглоба. Сегментація проводилася з використанням автоматичних порогових алгоритмів і ручного коригування, що забезпечувало максимально точне відтворення анатомії. Після сегментації дані експортували у формат STL та переносили у CAD-середовище (SolidWorks), де виконували згладжування поверхонь, усунення артефактів полігональної сітки та адаптацію геометрії до потреб подальшого чисельного аналізу. Наступним етапом було формування тривимірної сітки скінченних елементів у середовищі ANSYS Meshing. Для забезпечення точності розрахунків використовували тетраедральні елементи з локальним ущільненням у субхондральній зоні, задній колоні та центральних сегментах e та f. У результаті були створені три моделі різної щільності: базова із 30 001 елементом, оптимальна із 501 090 елементами та високоточна із 1 006 936 елементами. Саме модель середньої щільності продемонструвала найкращий баланс між точністю та витратою обчислювальних ресурсів, а її використання забезпечувало стабільні, відтворювані результати. Якість сітки підтверджувалася показниками Skewness та Orthogonal Quality, що відповідали загальноприйнятим критеріям валідності.

Матеріальні характеристики кожної структури задавалися відповідно актуальних біомеханічних моделей колінного суглоба. Для кісткової тканини передбачалася лінійно-еластична поведінка, тоді як меніски та зв'язки моделювалися як квазіізотропні або слабкоеластичні структури, що відповідає їхній фізіологічній ролі.

Таблиця 2.2

Матеріальні властивості елементів FEM-моделі

Структура	Модуль Юнга (МПа)	Коєф. Пуассона	Характеристика
Кортикальна кістка	14 800	0,3	лінійно-еластична
Трабекулярна кістка	1 100	0,3	пориста губчаста структура
Меніск	100	0,45	квазіізотропна тканина
Зв'язки	300	0,45	ізотропна апроксимація
Хрящ	10–15	0,46	слабкоеластична структура

Після налаштування матеріальних параметрів у моделі задавали граничні умови. Нижню поверхню великогомілкової кістки фіксували у трьох напрямках, що відтворювало положення опори під час стояння. На стегнову кістку прикладали вертикальну силу в 750 Н, еквівалентну вазі тіла близько 75 кг. Усі суглобові контакти моделювалися як безфрикційні, що відповідало спрощеній фізіологічній моделі. Колінний суглоб аналізували у положенні розгинання (0°), що є найбільш критичним щодо передачі навантаження через плато великогомілкової кістки. У ході моделювання оцінювали максимальні переміщення (Total deformation), розподіл еквівалентних напружень за Мізесом у менісках, зв'язках та субхондральній пластинці, а також деформації у напрямку осі Y як основного вектора стискаючого навантаження. На основі цих параметрів

порівнювали стабільність різних сегментарних конфігурацій перелому (a–i) та визначали, у яких випадках проведення тунелів ПХЗ може призвести до вторинного зміщення фрагментів або перевищення критичних значень напружень. Для перевірки достовірності моделі проводилася аналітична валідація. Створили спрощену фізичну модель у вигляді системи пружин, що моделювали роботу медіального й латерального менісків, хрестоподібних зв'язок і субхондральної опорної пластинки. Різниця між аналітичними та FEM-значеннями деформації не перевищувала 10 %, що відповідає міжнародним вимогам до валідності біомеханічних моделей цього типу. Отримані дані дозволили об'єктивно визначити сегменти, у яких можлива безпечна одномоментна реконструкція зв'язок (переважно латерально-передні та латерально-центрально – g, h), та сегменти, що створювали ризик конфлікту із траєкторією тунелів ПХЗ (медіальні та медіально-центрально – a, b, a+e, b+e+f). Крім того, центральні сегменти e та f були ідентифіковані як особливо чутливі до зміщення навіть при мінімальному навантаженні, що пояснює необхідність навігаційної або артроскопічної репозиції у цих випадках. Таким чином, FEM-аналіз став ключовим методологічним інструментом, що дозволив інтегрувати морфологічні та механічні дані у єдину систему, на основі якої було сформовано диференційований хірургічний підхід. Його роль полягала не лише у моделюванні напружень, але й у створенні науково обґрунтованої платформи для вибору тактики лікування залежно від сегментарної структури перелому.

2.2.4. Структурно-функціональні шкали оцінювання

У дослідженні використовували дві валідовані шкали, рекомендовані для оцінки результатів при ППВБК.

2.2.4.1. Шкала Rasmussen [82]

Шкала Rasmussen (structural + functional)

Шкала включає два модулі (структурний і функціональний). Структурний компонент – наявність та вираженість депресії суглобової поверхні, величина

варусно–вальгусної ангуляції, ступінь розширення епіфіза, якість відновлення конгруентності. Структурні критерії дозволяють визначити якість репозиції та стабільність остеосинтезу. Функціональний компонент – біль, амплітуда рухів, стабільність суглоба, можливість опори, здатність до повсякденної активності. Шкала дозволяє отримати 10–30 балів, де результат розцінюється як – 27–30 відмінний, 20–26 добрий, 10–19 задовільний, що є міжнародним стандартом оцінювання результатів ППВБК.

2.2.4.2. Шкала Honkonen–Järvinen [43]

Шкала включає п'ять позицій – біль, набряк, стабільність, сила *m. Quadriceps*, рухливість та повсякденна функція. Максимальний бал – 100. Результат інтерпретується: ≥ 90 відмінний, 80–89 добрий, 70–79 задовільний, < 70 незадовільний.

Це дозволяє оцінити реальний функціональний стан пацієнта в умовах повсякденної активності.

2.2.5. Оцінювання результатів

Оцінювання результатів лікування пацієнтів із переломами проксимального відділу великогомілкової кістки проводили за уніфікованою, стандартизованою методикою, яка поєднувала клінічні, функціональні та променеві критерії. Метою роботи було отримання максимально об'єктивної, відтворюваної та порівнюваної інформації щодо структурного відновлення суглобової поверхні, стабільності колінного суглоба та функціонального стану кінцівки у різні часові періоди після лікування. Особливістю методики оцінювання було те, що вона дозволяла зіставити результати ретроспективної та проспективної груп, а також аналізувати динаміку відновлення у комплексі з даними морфологічної класифікації та обраної хірургічної тактики. Оцінювання проводили у кількох послідовних часових інтервалах. У проспективній групі пацієнтів спостереження здійснювали

при госпіталізації, після операції, через 3, 6 та 12 місяців. Такий підхід дозволяв визначити темп функціонального відновлення колінного суглоба та оцінити вплив диференційованого підходу на ранні й середньострокові результати. У ретроспективній групі функціональну оцінку виконували одноразово через 12 місяців після оперативного лікування, що забезпечувало можливість коректного порівняння кінцевої ефективності двох підходів. Усі функціональні параметри реєстрували за допомогою двох валідованих міжнародних шкал – Rasmussen та Honkonen–Järvinen. Вибір саме цих шкал обумовлений тим, що вони найбільш часто застосовуються у клінічних дослідженнях, присвячених переломам плато великогомілкової кістки, та дозволяють проводити порівняння з даними світової літератури. Обидві шкали враховували не лише суб'єктивні відчуття пацієнта, але й низку об'єктивних параметрів, що підвищує достовірність оцінювання. Шкала Rasmussen складається зі структурної та функціональної частин. Структурний компонент включає оцінку конгруентності суглобової поверхні, наявності та ступеня депресії, величини варусно-вальгусного відхилення та розширення епіфіза. Ці показники визначалися на основі рентгенографії та, у необхідних випадках, комп'ютерної томографії. Функціональна частина шкали включала оцінку амплітуди рухів, наявності або відсутності болю, суб'єктивну стабільність у колінному суглобі, можливість опори на кінцівку та повернення до повсякденної активності. Оцінювання проводив лікар-травматолог шляхом фізикального обстеження та інтерв'ю з пацієнтом. За сумою балів результат класифікували як відмінний, добрий або задовільний. Шкала Honkonen–Järvinen застосовувалась для детальнішої оцінки клінічної функції та відповідала за аналіз таких параметрів, як біль у спокої і при навантаженні, частота й вираженість набряку, обсяг активних і пасивних рухів, сила квадрицепса та здатність виконувати повсякденні функції. Ця шкала вважається однією з найбільш чутливих до змін, що виникають у процесі реабілітації, та дозволяє кількісно фіксувати прогрес протягом часу. Її результати, як і у шкалі Rasmussen, визначали шляхом очного обстеження пацієнта та опитування.

Поряд із функціональними критеріями важливе місце у методиці оцінювання займав променевий контроль. У проспективній групі рентгенологічне обстеження виконували після операції, через 6 тижнів, 12 тижнів, 6 місяців і 12 місяців. На рентгенограмах аналізували стабільність фіксації, якість відновлення суглобової поверхні, ознаки вторинного зміщення, кутові деформації, стан субхондральної кістки та ступінь ремоделювання кісткової тканини. У випадках одноетапної реконструкції зв'язок додатково контролювали положення трансплантата і результати шву коренів менісків за допомогою МРТ у середньострокові строки спостереження. Важливою частиною методики оцінювання була стандартизація вимірювань. Усі рентгенологічні параметри оцінювали незалежно два досвідчені хірурги, після чого результати звіряли. При розбіжностях більше ніж на 10 % проводили третю незалежну оцінку. Це дозволяло зменшити ймовірність суб'єктивної похибки та підвищити міжекспертну узгодженість даних. Функціональні шкали заповнювались зі слів пацієнта, що забезпечувало правильність інтерпретації питань та стандартизувало отримані дані. Загальна методика оцінювання була побудована таким чином, щоб отримати цілісне уявлення про процес відновлення. У проспективній групі у перші 3–6 місяців можна було простежити темпи покращення рухливості й зменшення больового синдрому, а через 12 місяців – визначити кінцевий рівень функціональної здатності суглоба. Результати ретроспективної групи обмежувалися тільки фінальною точкою в один рік, проте це дозволяло коректно порівняти ефективність двох підходів. Таким чином, методика оцінювання результатів у цьому дослідженні була комплексною, стандартизованою і відтворюваною. Вона дозволяла інтегрувати структурні дані, функціональні характеристики і динаміку відновлення у єдину систему, що робило її оптимальною як для клінічного аналізу, так і для наукового дослідження. Такий багаторівневий підхід забезпечив високу точність порівняння результатів між ретроспективною та проспективною групами і дав змогу достовірно оцінити ефективність запропонованого диференційованого підходу до лікування переломів проксимального відділу великогомілкової кістки.

2.2.6. Статистична обробка

Статистична обробка даних була спрямована на забезпечення достовірності, відтворюваності та коректності отриманих результатів щодо ефективності диференційованого підходу до лікування переломів проксимального відділу великогомілкової кістки. Аналіз проводили з урахуванням особливостей вибірки, різних типів вихідних змінних (категоріальні, кількісні, порядкові, часові) та необхідності порівняння результатів між ретроспективною і проспективною групами. У зв'язку із тим, що дослідження мало комбінований проспективно–ретроспективний характер, тому статистичні методи були підібрані таким чином, щоб коректно порівняти незалежні вибірки різного обсягу, оцінити динаміку змін функціональних показників у проспективній групі, визначити залежність між сегментарним типом перелому та функціональним результатом, перевірити гіпотезу про ефективність запропонованого диференційованого підходу. Для аналізу використовували описову статистику ($M \pm SD$), рівень значущості $p < 0,05$.

Такий підхід дозволив оцінити абсолютні значення функціональних шкал, їхній приріст у часі, міжгрупові відмінності, взаємозв'язок між типом перелому, тактикою лікування та швидкістю реабілітації. Статистичний аналіз проводили у програмному середовищі IBM SPSS Statistics 29.0. Порогове значення статистичної значущості встановлювалося на рівні $p < 0,05$. Порівняння результатів між ретроспективною та проспективною групами виконували на основі незалежних вибірок. Такий аналіз дозволяв визначити, чи справді застосування сегментарної класифікації, FEM-обґрунтованої тактики та одномоментної реконструкції зв'язок у клінічно безпечних сегментах сприяло значному покращенню результатів лікування. Кількісні параметри оцінювали за відповідною вибіркою тестів: для нормальних розподілів – параметричні тести, для ненормальних – непараметричні аналоги. Особливо важливою складовою була оцінка динаміки відновлення у проспективній групі. Оскільки у цих пацієнтів дані збирали у кількох часових точках (після операції, через 3, 6 і 12 місяців), для порівняння змін між цими періодами застосовували тести для залежних вибірок. Завдяки цьому можна було простежити не тільки кінцевий результат, але й

швидкість відновлення функції та стабільності суглоба. Для категоріальних змінних, таких як тип лікування, наявність ускладнень або супутніх ушкоджень зв'язко-меніскового комплексу, використовували χ^2 -критерій Пірсона. Якщо частота подій у будь-якій комірці таблиці була меншою за 5, застосовували точний критерій Фішера. Завдяки цьому аналізу вдалося встановити, чи справді частота ускладнень або повторних втручань значуще зменшувалася після впровадження диференційованого підходу та чи впливає сегментарний тип перелому на ймовірність розвитку ускладнень. Пороговий рівень статистичної значущості для всіх тестів встановлювався на рівні $p < 0,05$, що відповідає загальноприйнятим критеріям медичних досліджень. Значення $p < 0,001$ трактували як високозначущі. Усі статистичні обчислення проводилися в програмному середовищі IBM SPSS Statistics 29.0, тоді як для первинного введення та попередньої структуризації даних використовували Microsoft Excel 365. Для біомеханічного моделювання застосовували програмні комплекси ANSYS та SolidWorks. Таким чином, застосована статистична методологія була всеохоплююча та забезпечувала достовірну оцінку ефективності різних хірургічних підходів. Комбінація параметричних і непараметричних методів, аналізу залежних та незалежних вибірок, кореляційного аналізу, оцінки міжекспертної узгодженості та багатфакторного моделювання створювала надійну основу для інтерпретації результатів і дозволяла об'єктивно оцінити переваги диференційованого підходу в лікуванні переломів проксимального відділу великогомілкової кістки.

РОЗДІЛ 3

РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЛІКУВАННЯ ПАЦІЄНТІВ ІЗ ПЕРЕЛОМАМИ ПРОКСИМАЛЬНОГО ВІДДІЛУ ВЕЛИКОГОМІЛКОВОЇ КІСТКИ

Частота переломів проксимального відділу великогомілкової кістки становить 2-5 %, ускладнень 5,8-28 %, а інвалідність 5,9-9,1 % [51].

Для з'ясування ситуації в Україні нами було проведено ретроспективний аналіз результатів лікування 87 історій хвороб пацієнтів з переломами проксимального відділу великогомілкової кістки, які проходили лікування в ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» у період з 2010 по 2022 роки.

Серед пацієнтів було 32,8 % жінок та 67,2 % чоловіків. Середній вік $34,6 \pm 1,6$ роки.

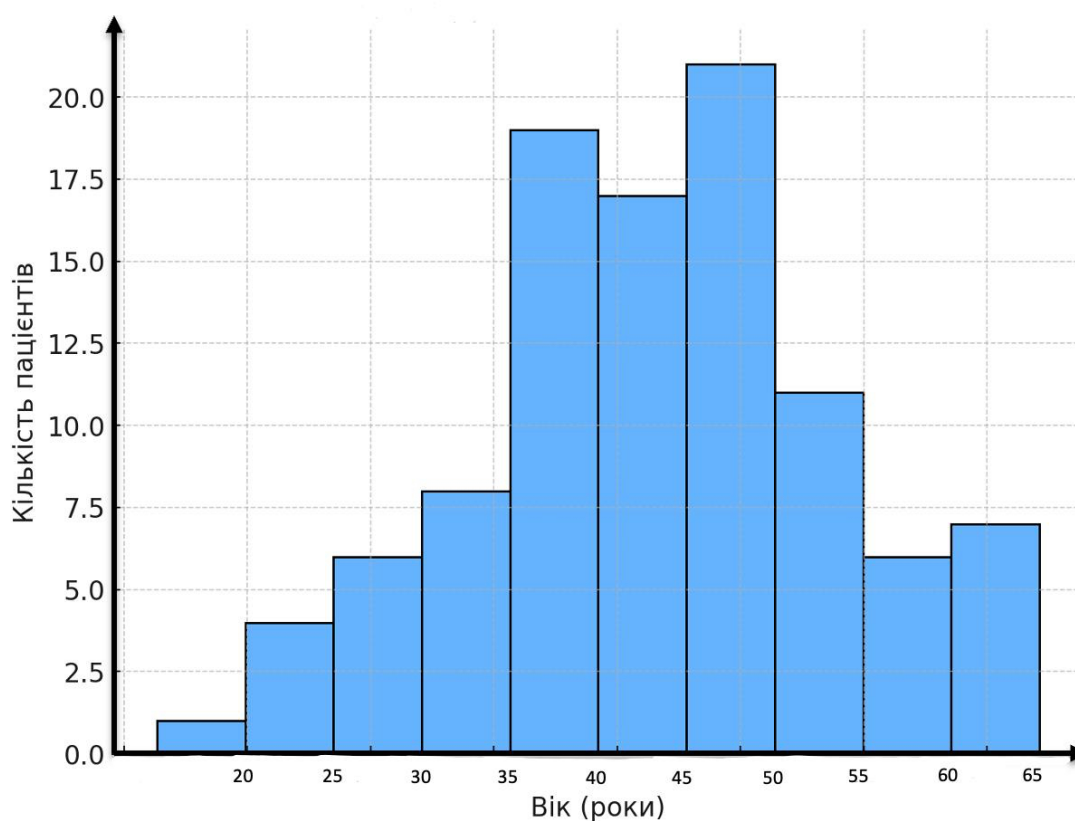


Рис. 3.1. Розподіл пацієнтів за віком

Як видно з рис. 3.1, пацієнти перебували, найбільш часто, у працездатному віці від 35 до 55 років.

Згідно загальноприйнятої (для цих переломів) класифікації Schatzker пацієнти були розподілені наступним чином рис. 3.2.

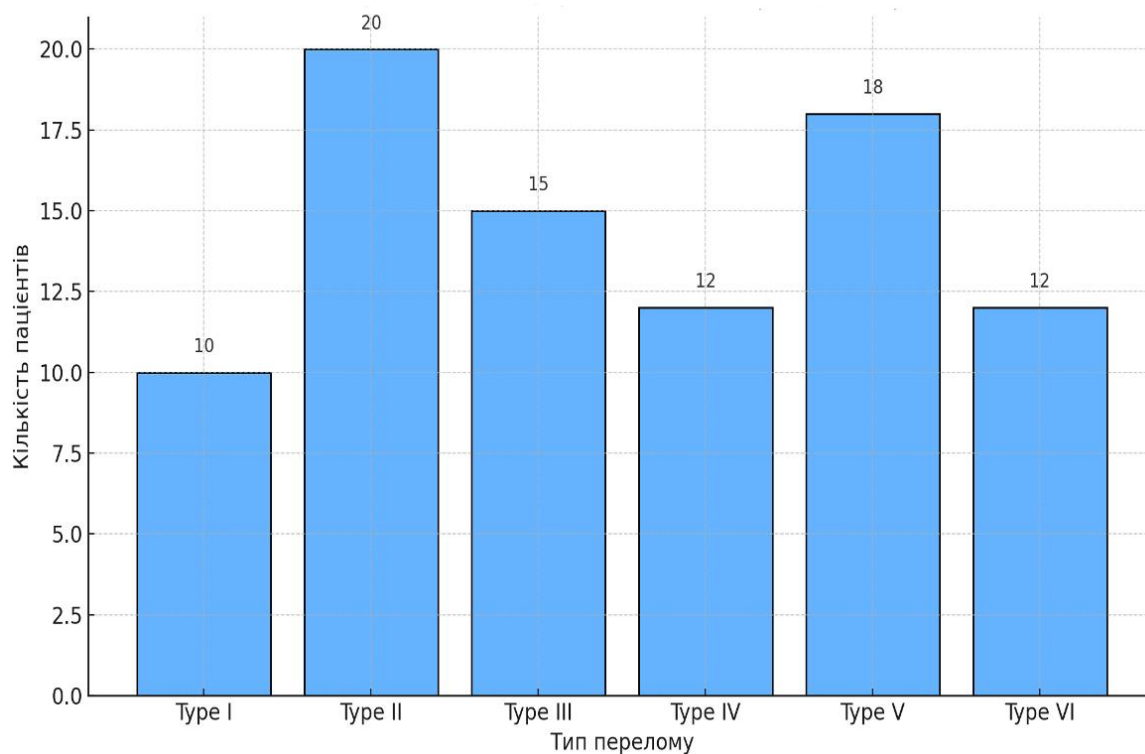


Рис. 3.2. Розподіл пацієнтів за типом переломів за класифікацією Schatzker

Як видно із рис. 3.2, найбільш часто зустрічали переломи другого ($n=20$), п'ятого ($n=18$) і третього ($n=15$) типів.

ТАБЛИЦЯ 3.1 – Сучасний алгоритм лікування переломів ППБВК (Markhardt BK, Gross JM, Monu JU, 2009;
Hall JA, Veerlein MJ, McKee MD 2009)

етап	Дії	Методи лікування
1	2	3
Діагностика та оцінка перелому	Рентгенографія (2 проекції), КТ (3D реконструкція)	Класифікація за Schatzker або АО/ОТА
Консервативне лікування (Schatzker I)	Імобілізація (лонгета/ортез), часткове навантаження 4–6 тижнів	Контрольні рентгенограми через 2, 4, 6 тижнів
Хірургічне лікування (Schatzker II–VI)	Передопераційне планування: оцінка ступеня зміщення, нестабільності, дефектів	Вибір методу остеосинтезу: - Гвинти (канюльовані) - Пластини (LCP, блоковані)- Зовнішня фіксація (апарат Ілізарова, спицево-стрижневий апарат) - Комбіновані
Вибір методу залежно від типу перелому	Schatzker I: консервативно/гвинти; Schatzker II–III – канюльовані гвинти або пластини(LCP); Schatzker IV–VI – Відкрита репозиція та стабільна фіксація (LCP-пластина, АЗФ)	За наявності дефектів: кісткова пластика (аутотрансплантат або синтетичні матеріали)

Продовження табл. 3.1

1	2	3
Післяопераційне ведення	Рання мобілізація (ізометричні вправи), профілактика ускладнень (тромбоз, контрактури) Контрольна рентгенографія через 2, 6, 12 тижнів після операції	Навантаження поступове, залежно від стабільності фіксації (часткове навантаження з 6–8 тижнів) Повне навантаження через 10–14 тижнів (після контролю зрощення)
Реабілітація	Відновлення амплітуди рухів (ранні пасивні рухи з перших днів після операції) Зміцнення м'язів, стабілізація коліна, тренування балансу	Етапи реабілітації: 0–2 тижні: пасивні, активно-асистовані вправи: 2–6 тижнів: активні рухи, часткове навантаження, 6–12 тижнів: повне навантаження, зміцнення м'язів 12–24 тижні: відновлення функціональної активності
Довгострокове спостереження	Контрольні огляди через 3, 6, 12 місяців після травми	Оцінка функції суглоба: IKDC, Lysholm, KOOS, Профілактика артрозу

Були проліковані консервативно 8,7 % хворих і у 91,3 % були виконані хірургічні втручання. Дані представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Методи лікування пацієнтів відповідно типу перелому

Тип перелому за Schatzker	n	%	Метод лікування
Тип I	10	11,5	Консервативне лікування
Тип II	20	23,0	Остеосинтез
Тип III	15	17,2	Остеосинтез
Тип IV	12	13,8	Остеосинтез
Тип V	18	20,7	Зовнішня фіксація/остеосинтез
Тип VI	12	13,8	Складний остеосинтез

Як свідчать дані таблиці 3.2, найбільш часто пацієнтам був застосований остеосинтез. Згідно запропонованого вище підходу нами проведено аналіз результатів лікування 87 хворих із ППВБК.

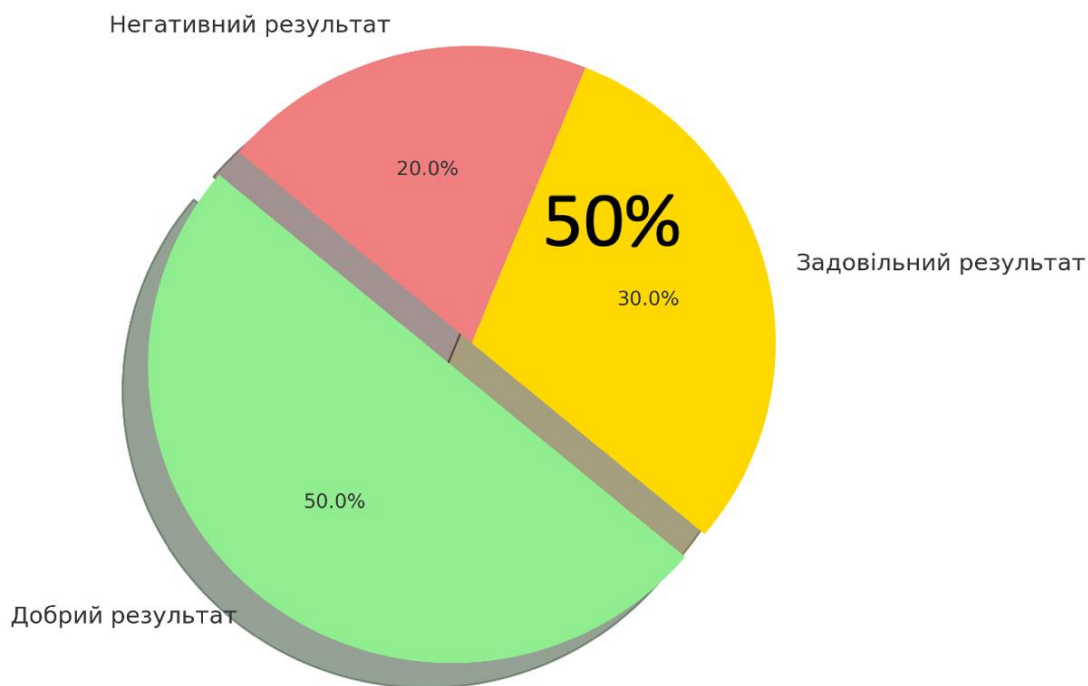


Рис. 3.3. Оцінка результатів лікування пацієнтів з переломами проксимального відділу ВГК.

Оцінку результатів лікування здійснювали за 2 критеріями – зрощення перелому та відновлення функції (рис. 3.3).

«Добрий» результат асоціювали з повною репозицією уламків, відсутністю дегенеративних змін на рентгені та КТ, повним відновленням функції колінного суглоба; «задовільний» результат часто пов'язаний з повним відновленням опорності кінцівки, але із частковим відновленням функції, обмеження рухів, відчуття нестабільності, болі, «кляцання»; «негативний» результат не відновлення або часткове відновлення опорності кінцівки, не відновлення функції.

Як видно із рис. 3.3, «добрі» результати отримані в 50 % випадків, в той же час разом 50 % складали «задовільні» (30 %) та «негативні» (20 %) результати. Це значний відсоток, який потребує вивчення причин такої ситуації і як наслідок, удосконалення методів діагностики і лікування цих переломів. Аналізуючи причини встановили, що найбільший відсоток – 30 % складали технічні помилки (недостатня репозиція), а 70 % – віднесені до діагностичних. Так нестабільність колінного суглоба – 25 %, а інші: 15 % хронічний біль, 10 % інфекційні ускладнення та артрофіброз – 10 %.

Нестабільність колінного суглоба після переломів проксимального відділу великогомілкової кістки виникає внаслідок ускладнень, представлених на рис. 3.4.

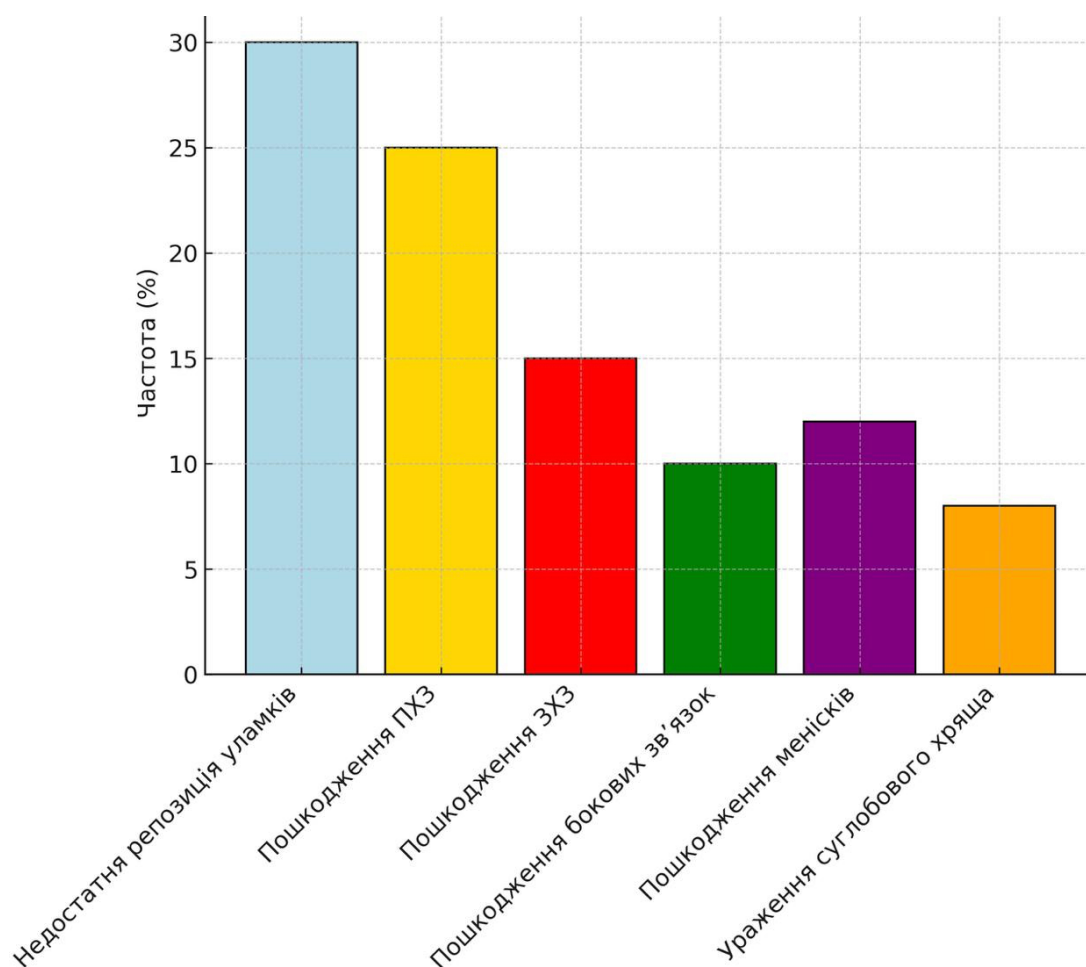


Рис. 3.4. Причини нестабільності колінного суглоба

Як видно із рис. 3.4, на перший план виступає недостатня репозиція уламків (30 %) і пошкодження передньої хрестоподібної зв'язки (25 %). В меншій мірі мають місце пошкодження задньої хрестоподібної зв'язки (15 %), бокових зв'язок (10 %), менісків (13 %) та ураження суглобового хряща (7 %). Всі ці фактори призводять до хронічної нестабільності з порушенням біомеханіки суглоба та розвитку дегенеративних змін.

В подальшій роботі наш науковий інтерес складає група пацієнтів саме з нестабільністю колінного суглоба. Всі ці пацієнти в анамнезі були 100 % обстежені рентгенологічно. У 50 % зроблено КТ і лише у 7 % УЗД і в 1 % МРТ. Тобто акцент зроблено на кістковий компонент перелому.

Як загально відомо, саме останні 2 діагностичні процедури дають нам уявлення про проблеми з м'якотканинними структурами суглоба. Тому вважаємо, що отримані негативні результати лікування можуть бути наслідком недостатньої діагностики.

Таким чином, за даними ретроспективного дослідження, найчастіше зустрічали переломи проксимального відділу великогомілкової кістки I, III та IV типів (>60 %) за класифікацією Schatzker. Хірургічне лікування пройшли 91,3 % пацієнтів і 50 % із них досягли «добрих» результатів. Однією з головних причин негативних результатів була нестабільність колінного суглоба (25 %), яка потребувала додаткових діагностичних заходів.

МРТ та УЗД повинні бути включені до стандартного алгоритму обстеження пацієнтів при підозрі на ушкодження м'якотканинних структур.

За матеріалами розділу опублікована 1 стаття.

Сивак АМ, Калашніков АВ, Літун ЮМ. Переломи плато великогомілкової кістки: ретроспективний аналіз результатів лікування та роль посттравматичної нестабільності колінного суглоба. Психосоматична медицина та загальна практика. 2025;10(2). DOI: 10.26766/pmgrp.v10i2.626

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ БІОМЕХАНІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕЛОМІВ ПРОКСИМАЛЬНОГО ВІДДІЛУ ВЕЛИКОГОМІЛКОВОЇ КІСТКИ

Метою моделювання було дослідити розподіл напружень та деформацій у зв'язках і меніску під дією навантаження, що імітує вертикальне положення тіла людини (статичне навантаження стоячи), в умовах наявності різних типів переломів проксимального відділу великогомілкової кістки.

Для візуалізації клінічної основи моделювання використано дев'ятисегментарну (9-колонну) класифікацію ушкоджень плато великогомілкової кістки, яка дозволяє деталізовано аналізувати вплив локалізації перелому на розподіл навантаження [64] (рис. 4.1).

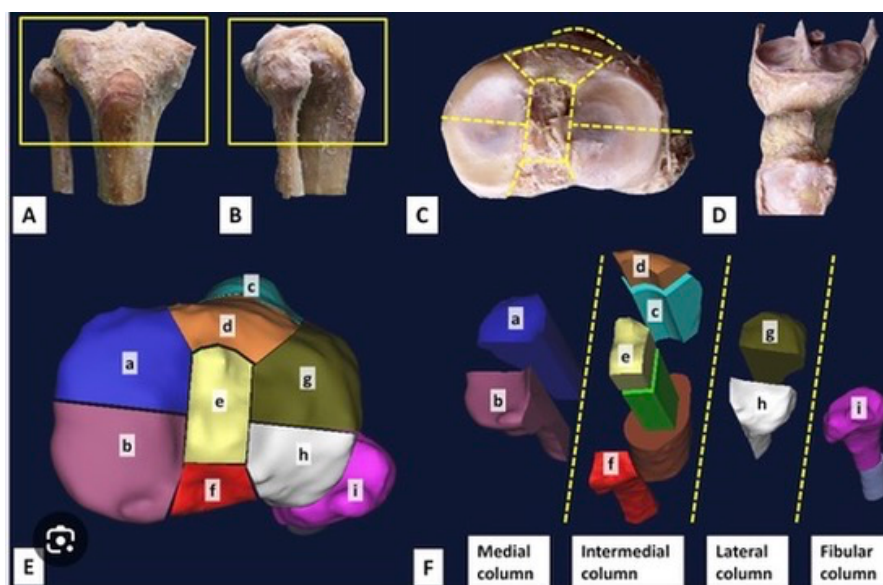


Рис. 4.1. 9-ти колонна класифікація ППВВК

Тривимірну модель колінного суглоба створено у SolidWorks на основі серії зображень комп'ютерної томографії. До моделі включено: стегнову кістку (дистальний епіметафіз), великогомілкову кістку (проксимальний епіметафіз), медіальний та латеральний меніски, передню і задню хрестоподібні зв'язки, а також медіальні та латеральні колатеральні зв'язки. Усі компоненти моделі вважалися ізотропними й такими, що мають лінійно-еластичну поведінку. Фізико-

механічні властивості (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, густина) базувались на літературних джерелах. Значення фізико-механічних властивостей представлено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Фізико-механічні властивості структур

Структура	Модуль Юнга (МПа)	Коефіцієнт Пуассона	Густина (кг/м ³)
Великогомілкова кістка	14 800	0.3	2 000
Стегнова кістка	19 100	0.3	2 100
Меніск	100	0.45	1 400
Зв'язки	300	0.45	1 100

Як видно з таблиці, механічні властивості тканин колінного суглоба істотно відрізняються залежно від їхньої анатомічної функції. Найвищі значення модуля пружності (модуля Юнга) демонструють кісткові структури: стегнова кістка - 19 100 МПа, великогомілкова - 14 800 МПа. Це відповідає їхній головній ролі - забезпечення опорної функції й передавання навантажень[10].

М'якотканинні елементи суглоба, такі як меніск і зв'язки, мають значно нижчі значення модуля Юнга – відповідно 100 МПа і 300 МПа, що відображає їхню здатність до амортизації та стабілізації під час руху. Коефіцієнт Пуассона для м'якотканинних структур становить 0,45, що вказує на їхню високу поперечну деформативність при стисканні. Для кісткових тканин цей коефіцієнт дорівнює 0,3, що є типовим для щільної кістки.

Ці відмінності у механічних характеристиках були враховані при побудові моделі скінченних елементів (FEM), що забезпечує адекватне відтворення фізіологічної поведінки окремих структур колінного суглоба під дією навантаження.

Для чисельного моделювання використано програмне забезпечення ANSYS

(модуль Static Structural). Скінченно-елементне розбиття здійснено із застосуванням тетраедральних об'ємних елементів. Використано функції локального згущення сітки (Body Sizing, Refinement) в зонах контакту та навантаження. Проаналізовано три конфігурації сітки: 30 001, 501 090 та 1 006 936 елементів.

На верхню поверхню стегнової кістки прикладено навантаження 750Н, що відповідає середньому вертикальному навантаженню при стоянні. Нижню частину великогомілкової кістки жорстко зафіксовано (консольне защемлення). Міжкомпонентні взаємодії моделювались як жорстко фіксовані контакти (bonded). У моделі реалізовано обмеження кутових ступенів свободи для забезпечення стабільності.

Якість сітки оцінювали за показниками Skewness (оптимальні значення близькі до 0) та Orthogonal Quality (найкращі значення - близькі до 1). Найкращий баланс між точністю розрахунків і витратами обчислювальних ресурсів виявлено для сітки з 501 090 елементів.

Для верифікації чисельних результатів було проведено аналітичний розрахунок, що ґрунтується на лінійному законі Гука: $F = k * \Delta L$, де $F = 750$ Н, де k – це коефіцієнт жорсткості, а l – це стиснення/видовження пружини. Параметри для розрахунку: середня довжина зв'язок = 0,035 м; площа перерізу зв'язок = 0,00008962 м²; площа перерізу меніска = 0,00184755 м²; довжина меніска = 0,00503м.

Після побудови та валідації тривимірної скінченно-елементної моделі колінного суглоба було проведено серію чисельних розрахунків для різних варіантів конфігурацій переломів, що охоплюють різні сегменти згідно з 9-сегментарною класифікацією. Особливу увагу приділено аналізу напружень у зв'язках, меніску, а також зміщенню фрагментів при прикладеному навантаженні 750 Н, що відповідає середньостатистичному вертикальному навантаженню на нижню кінцівку в положенні стоячи. 1. Медіальна колона (сегмент а):

Спостерігається поступове зростання напруження у медіальній колатеральній зв'язці (МКЗ) зі збільшенням ступеня зміщення, досягаючи

максимуму 23,09 МПа при 4 мм зміщення. Напруження в медіальному меніску відповідно зростає з 6,30 до 9,40 МПа. Клінічно це проявляється як помірний вплив на м'якотканинні структури з середнім ризиком нестабільності.

Альтернативні колони (наприклад, передньо-латеральна, задньо-медіальна та комбіновані варіанти): Дані свідчать про значно вищі пікові напруження у зв'язках, зокрема ПКЗ, у випадках комбінованих ушкоджень (AL+PL), що досягають 35,9 МПа- граничного рівня для клінічно значущої дестабілізації. Напруження в меніску в цих сценаріях перевищують 12 МПа, що є критичним для потенційного розриву або дегенерації. У той час як для зв'язок існують усталені пороги механічної витривалості, для меніска таких меж не встановлено. Однак за результатами біомеханічних досліджень, що аналізували поведінку меніска під дією стискаючих та зсувних сил, критичним значенням напруження вважається діапазон 10–12 МПа, за якого значно зростає ризик виникнення пошкоджень або дегенеративних змін, особливо в біло-червоній зоні.

На рисунку 4.2. представлено залежність напруження у зв'язках від зміщення з поділом по колоні.

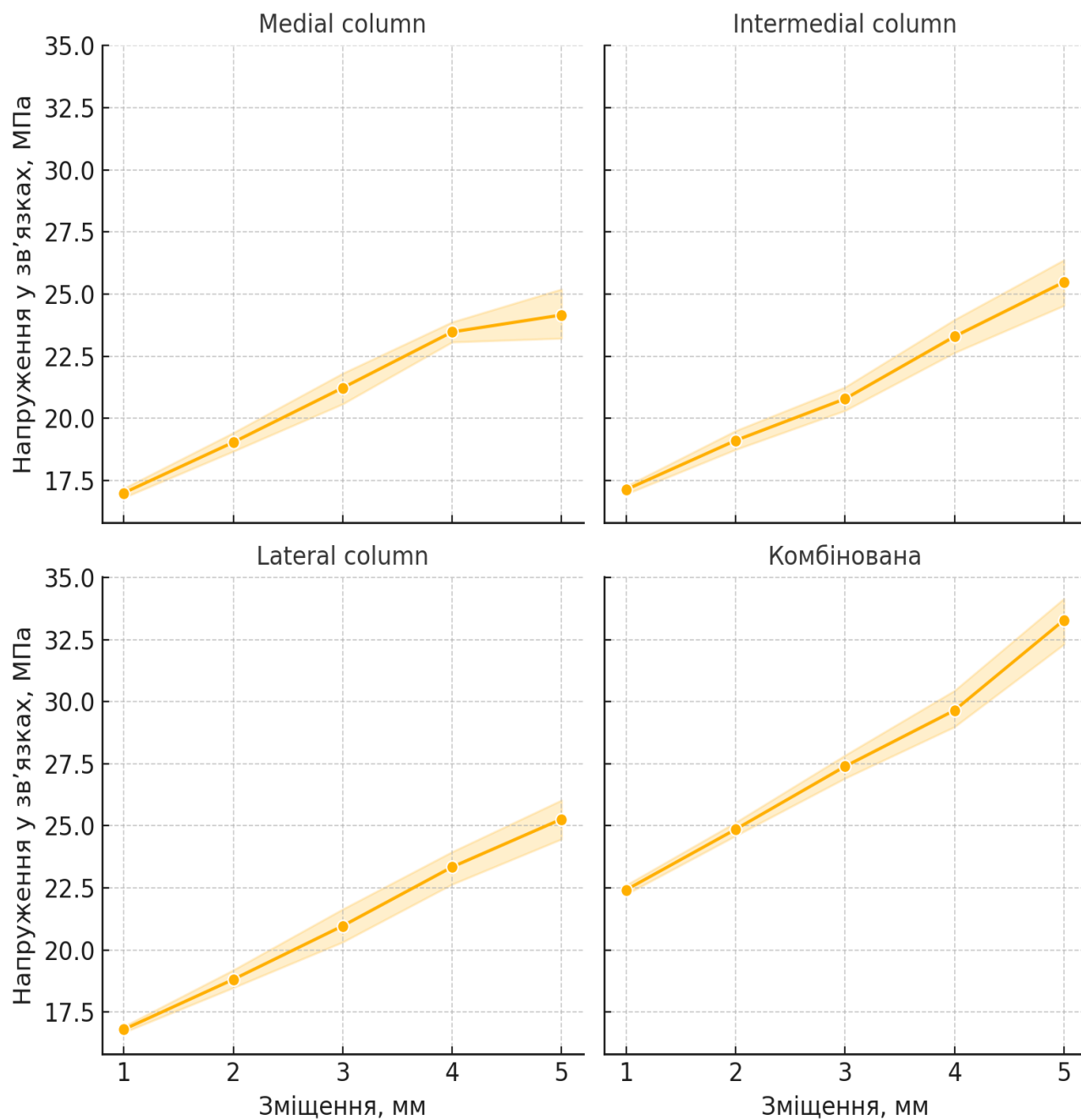


Рис. 4.2. Залежність напруження у зв'язках від зміщення по колонах

На рисунку 4.3 ілюструється напруження в меніску по сегментах.

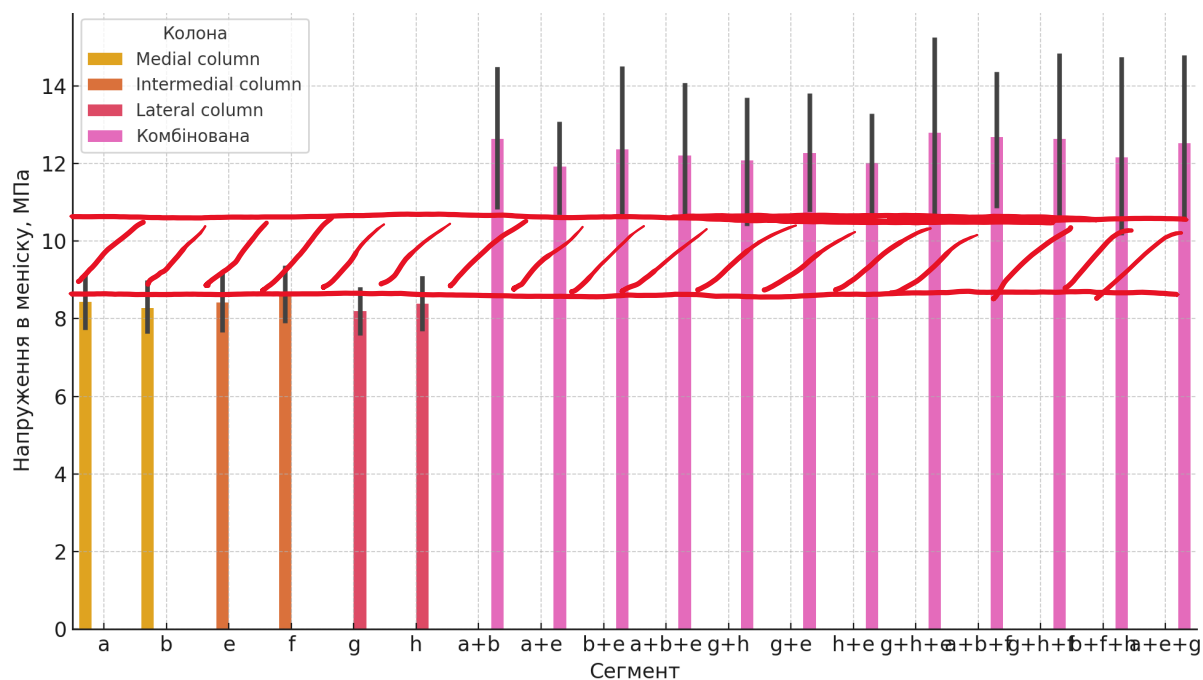


Рис. 4.3. Напруження в менісках по сегментах

На рисунку 4.4 представлено зонування ризику нестабільності залежно від зміщення і напруження.

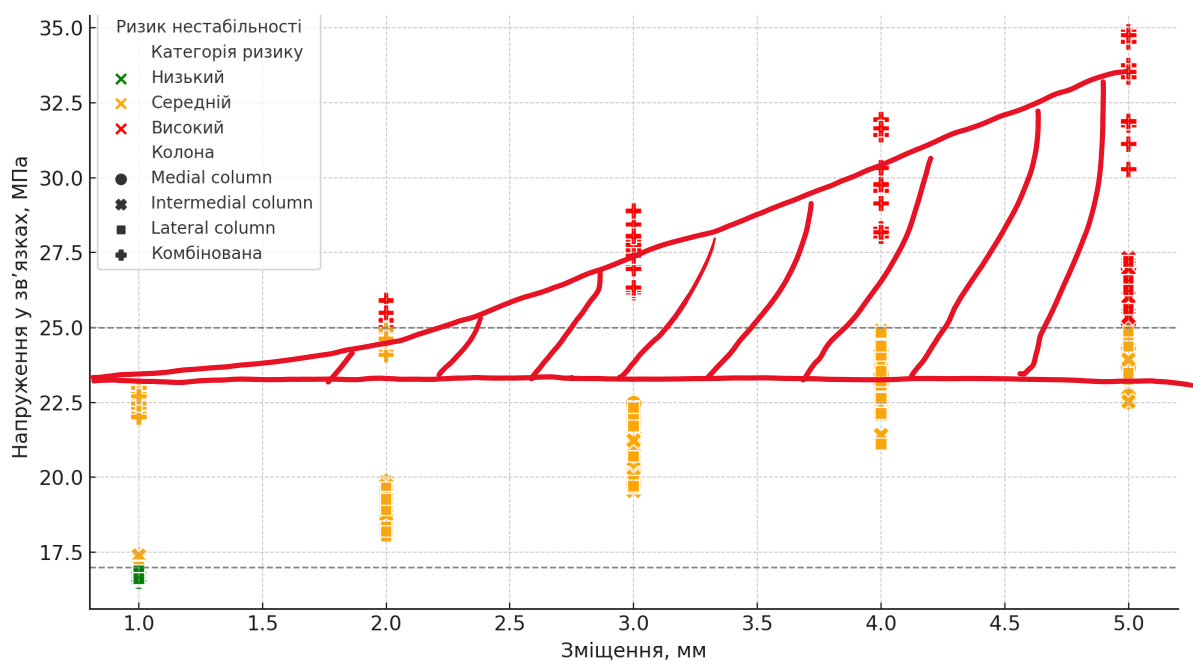


Рис. 4.4. Зонування ризику нестабільності залежно від зміщення та напруження

Порівняльний аналіз сіток

Сітка середньої щільності (501 090 елементів) продемонструвала найкраще співвідношення між точністю результатів (мінімальна похибка щодо аналітичного розрахунку) та обчислювальними витратами – час моделювання склав 6 хв 1 сек. Найгрубіша сітка (30 001 елемент) спричиняла суттєве заниження значень напружень і деформацій. Водночас найдеталізованіша сітка (1 006 936 елементів) не забезпечила значного підвищення точності (відмінність <10 % порівняно із середньою сіткою), проте потребувала майже 28 хвилин обчислень. Таким чином, варіант із 501 090 елементів є оптимальним з точки зору практичного застосування. Розподілені напруження за Мізесом показали локалізацію перевантаження в місцях прикріплення зв'язок та в зоні заднього рогу медіального меніска при переломах h та $h+b$ типу. Найбільше напруження зосереджене на ПХЗ при зміщенні >4 мм у сегментах h , b . На основі комбінованого аналізу напружень, зміщень та структурного навантаження сформовано градації ризику нестабільності: Низький ризик - сегменти з напруженням у зв'язках <17 МПа та зміщенням <2 мм, середній ризик - 17–25 МПа, зміщення 2–4 мм, високий ризик - >25 МПа, зміщення >4 мм. Ця градація дозволяє обґрунтовано підходити до тактики лікування, враховуючи не лише візуалізаційні дані, а й біомеханічний профіль ушкодження. Отримані результати біомеханічного моделювання дозволяють зробити низку важливих висновків щодо особливостей розподілу навантаження на м'якотканинній структурі колінного суглоба залежно від локалізації перелому. Спостерігається чітка кореляція між ступенем зміщення кісткових фрагментів та напруженням у зв'язковому апараті, особливо при ураженні сегментів передньо-латеральної (AL) та задньо-латеральної (PL) колон, що узгоджується з клінічними спостереженнями щодо нестабільності суглоба після таких переломів. Порівнюючи отримані дані

з попередніми дослідженнями, слід відзначити, що більшість раніше побудованих моделей не включали варіативність сегментарного ураження та аналіз напружень у меніску і зв'язках окремо для кожного з них [116]. У цьому аспекті наша модель є більш деталізованою, з урахуванням анатомічної відповідності та повної механічної взаємодії між елементами колінного суглоба. Порівняно з моделями, описаними у роботах Zhang J, et al. (2024), Yu C, et al. (2025), наша модель враховує також клінічну інтерпретацію результатів, пропонуючи практичні рекомендації щодо тактики лікування. Наявність аналітичної валідації забезпечує високу достовірність FEM-розрахунків, чим вигідно вирізняється від багатьох сучасних досліджень, де такі розрахунки проводяться без обґрунтування похибки [63]. Використання моделі з оптимальною кількістю скінченних елементів дозволяє досягти високої точності при помірному ресурсному навантаженні, що підвищує доцільність використання цього підходу у клінічній практиці.

Обмеження нашого дослідження включають спрощення властивостей матеріалів (лінійно-еластична поведінка), а також моделювання в умовах лише одного виду навантаження – вертикального стискання. У подальших дослідженнях доцільно буде включити оцінку скручування, згинання, а також аналіз у динаміці (ходьба, біг). Додатково доцільним є включення більше індивідуалізованих моделей, побудованих на основі МРТ-конструкцій, та аналіз впливу імплантів на стабільність суглоба. Незважаючи на зазначені обмеження, результати даного дослідження можуть бути безпосередньо інтегровані у клінічний алгоритм оцінки нестабільності після ППВБК. Встановлена кореляція між локалізацією перелому, напруженням у м'якотканинних структурах та рівнем ризику нестабільності дозволяє обґрунтувати вибір тактики втручання – від консервативного ведення до одноетапного оперативного втручання з

пластикою зв'язок і швом меніска.

ВИСНОВКИ

1. Побудовано анатомічно точну, верифіковану FEM-модель колінного суглоба з урахуванням основних м'якотканинних структур, яка дозволяє якісно оцінювати розподіл механічного навантаження при переломах проксимального відділу великогомілкової кістки.
2. Встановлено, що найбільше механічне навантаження на зв'язки та меніск виникає при ураженні передньо-латеральної (AL) та задньо-латеральної (PL) колон, що зумовлює високий ризик післятравматичної нестабільності.
3. Сформульовано біомеханічні порогові критерії ризику нестабільності залежно від величини напруження та ступеня зміщення, що може бути використано як об'єктивний інструмент для планування обсягу хірургічного втручання – включно з реконструкцією зв'язок і пластикою меніска.
4. Визначено оптимальну конфігурацію сітки (501 090 скінченних елементів), яка забезпечує баланс між точністю результатів та ефективністю обчислень, що є важливим для інтеграції моделі у клінічну практику.

За матеріалами розділу опубліковано 1 робота

Сивак АМ, Мусієнко ОС. Біомеханічне обґрунтування диференційованого лікування переломів проксимального відділу великогомілкової кістки. Terra Orthopaedica. 2026;1(129):22-29

РОЗДІЛ 5

ЛІКУВАННЯ ПАЦІЄНТІВ З ПЕРЕЛОМАМИ ПРОКСИМАЛЬНОГО ВІДДІЛУ ВЕЛИКОГОМІЛКОВОЇ КІСТКИ

5.1. Хірургічні методи лікування проксимального відділу великогомілкової кістки

Хірургічне лікування хворих із ППВБК було побудовано на принципах анатомічної реконструкції суглобової поверхні, забезпечення стабільності проксимального відділу великогомілкової кістки та відновлення ушкоджених елементів зв'язково-меніскового комплексу. Відмінною рисою запропонованої методики є диференційований вибір хірургічної тактики, який визначався на основі поєднання морфологічних характеристик перелому за сегментарною класифікацією Luo та результатів біомеханічного моделювання FEM-аналізу. Такий підхід дозволив перейти від універсальної схеми «спочатку кістка – потім м'які тканини» до індивідуальної хірургічної стратегії, що враховує: конфігурацію перелому у тривимірному просторі, ступінь зміщення та депресії, взаємне розташування потенційних тунелів реконструкції ПХЗ/ЗХЗ та лінії перелому, стан менісків і коренів, стабільність колон (латеральної, медіальної та задньої).

Цей розділ докладно описує техніку виконання одноетапних, двоетапних та артроскопічно-навігаційних втручань, критерії їх вибору та результати застосування у клінічному дослідженні.

5.1.1 Передопераційне планування

Ефективність хірургічного втручання значною мірою залежала від ретельного передопераційного планування, що включало комп'ютерну томографію з 3D- реконструкцією для визначення точної локалізації суглобових фрагментів у координатах Luo, наявність депресії та її обсяг, інтерпретацію лінії перелому й траєкторії тунелів ПХЗ і ЗХЗ, можливість

використання стандартних або «розширених» доступів. МРТ (у проспективній групі) застосовували для уточнення розривів передньої та задньої хрестоподібних зв'язок, ушкоджень медіального та латерального менісків, ушкоджень коренів менісків, наявності набряку кісткового мозку.

Після отримання результатів FEM нами було інтегровано в практику клініки визначення сегментів, де тунелі не перетинають перелом ($g, h, g+h$), де тунелі перетинають перелом ($a, b, a+e, b+e+f$), сегменти з критичною чутливістю до зміщення (e, f).

Ці дані були ключовими для вибору між одноетапною реконструкцією та відстроченим лікуванням.

5.1.2 Одноетапне лікування (остеосинтез + реконструкція зв'язок і/або меніска)

Одноетапне втручання виконували тоді, коли перелом належав до сегментів, що не вступали в конфлікт із траєкторією тунелів реконструкції ПХЗ/ЗХЗ, медіального та латерального меніску ($g, h, g+h, g+f+h, g+h+f$).

Мета одноетапного лікування – відновлення кісткових структур та стабілізуючих м'яких тканин у межах одного оперативного втручання, що дозволяло уникати повторних операцій, зменшити період реабілітації і покращити кінцевий функціональний результат.

Технічні етапи, технологія одноетапного лікування складається із:

1. Діагностично-лікувальної артроскопії: ревізія суглоба, оцінка ступеня ушкодження менісків і коренів, виявлення остеохондральних фрагментів, виконання шву кореня або стабілізації меніска.
2. Репозиції внутрішньосуглобових кісткових фрагментів: підняття депресованих фрагментів через кортикальні вікна, додаткова внутрішньосуглобова візуалізація для оцінки конгруентності суглобової поверхні.

3. Остеосинтезу, як правило використання пластини з кутовою стабільністю (LCP), або використання субхондральних гвинтів для підтримки піднятих фрагментів.
4. Реконструкції зв'язкового апарату: техніка «transtibial» або «anatomical all-inside» залежно від стану суглоба, аутоотрансплантат із сухожилка semitendinosus ± gracilis.

До переваги одноетапного втручання слід відносити – усунення болю та нестабільності вже на етапі первинної операції, відсутність конфлікту тунелів із лінією переломів (підтверджено FEM), одноразова анестезія, менша кількість маніпуляцій у порожнині колінного суглоба.

5.1.3 Двоетапне лікування (остеосинтез → реконструкція зв'язок через 3–6 місяців)

Двоетапний підхід застосовувався при переломах сегментів a, b, a+e, b+e+f, a+b+f, тобто там, де FEM виявив високу ймовірність перетину тунелів ПХЗ із лінією перелому.

Етап 1. Первинний остеосинтез. Складові виконання: анатомічне відновлення суглобової поверхні, стабілізація медіальної та задньої колони, забезпечення умов для майбутньої реконструкції зв'язок. Використовували: LCP-пластини, із двоколонною фіксацією при складних переломах, та кісткову пластику наявних дефектів.

Етап 2. Реконструкції зв'язок виконувалась через 3–6 місяців після рентгенологічного підтвердження консолідації фрагментів.

Показаннями до цієї операції слугували нестабільність, розриви ПХЗ/ЗХЗ, медіального та/або латерального менісків виявлені на МРТ або під час першого етапу, хронічний біль у разі патології менісків.

Переваги двоетапного підходу – уникнення втрати фіксації через проходження тунелів через лінії перелому, можливість оптимально оцінити стабільність після загоєння, зменшення ризику формування вторинної нестабільності.

5.1.4 Артроскопічна та навігаційна репозиція (центральні сегменти e, f)

У випадках центральних переломів у сегментах «e», «f» за Luo навантаження передається через «вагову платформу» суглоба, тому навіть 1 мм зміщення призводить до порушення біомеханіки. Показання до остеосинтезу були: зміщення кісткових фрагментів >1 мм. Методика виконання: операцію виконували із невеликих пункційних доступів 3–5 мм, із репозицією фрагментів під артроскопічним контролем, та подальшою фіксацією субхондральними гвинтами.

Серед переваг такого втручання можна віднести – мінімальну травматизацію, точне відтворення суглобової поверхні, зменшення ризику розвитку артрозу.

5.1.5 Консервативне лікування

Показами для цього було: зміщення кісткових фрагментів <2 мм, стабільна колона, відсутність ушкоджень менісків і зв'язок за даними МРТ. Пацієнтам призначали функціональний ортез на 4–6 тижнів, поступову мобілізацію, під КТ/рентгенографічним контролем.

5.2 Післяопераційне ведення та реабілітація

Враховуючи різноманітність морфологічних варіантів переломів і різний обсяг хірургічних втручань, у даному дослідженні застосовано диференційовану реабілітаційну програму, яка корелювала з сегментарною класифікацією Luo, FEM-показниками стабільності, типом лікування (одноетапне / двоетапне / артроскопічно-навігаційне) та характером супутніх ушкоджень зв'язково-меніскового комплексу.

Цей підхід дав змогу оптимізувати темпи відновлення, мінімізувати ризик

вторинних змін, уникнути повторних оперативних втручань і забезпечити вищий рівень функціональної результативності.

Післяопераційне лікування базувалося на таких ключових засадах:

1. Захист зони остеосинтезу

Забезпечували за допомогою функціонального ортеза, дозованого навантаження та контролю рухів у безпечних межах, визначених для кожного типу перелому.

2. Контроль болю та набряку – холодіві аплікації, компресія, нестероїдні протизапальні препарати, позиційна терапія, локальна кріотерапія.

3. Рання ізометрична активація м'язів – ізометричні скорочення квадрицепса, активація сідничних м'язів, вправи на пропріоцепцію (мінімальної інтенсивності).

4. Поступове відновлення рухів під контролем реабілітолога, із чітким обмеженням амплітуди, виходячи з біомеханічної стабільності конкретного сегменту.

5. Запобігання ускладненням – профілактика тромбозів, профілактика ригідності, профілактика м'язової атрофії.

З огляду на результати FEM-дослідження та морфологічні особливості переломів, реабілітаційний протокол розподілявся за трьома основними напрямками:

5.3 Методика диференційованого лікування

Розроблений диференційований підхід базується на аналізі біомеханічного моделювання, яке дозволило визначити критичні сегменти ушкодження проксимального відділу великогомілкової кістки, ступінь їхнього впливу на стабільність колінного суглоба та взаємне розташування лінії перелому і зон проведення тунелів для реконструкції зв'язок. Тактика лікування індивідуалізувалася з урахуванням сегментарної локалізації перелому, ступеня зміщення (1–5 мм) та стану зв'язково–меніскового комплексу за даними МРТ або інтраопераційного огляду.

Одноетапне лікування при переломах латеральних та латерально–центрально сегментів. До цієї групи відносили ушкодження сегментів g, h, g+h, b+f+h, g+h+f.

- Виконували анатомічну репозицію та остеосинтез латерального фрагмента пластиною з кутовою стабільністю під контролем рентген – та артроскопії.
- При виявленні ушкоджень передньої хрестоподібної зв'язки (ПХЗ) чи меніска – одночасно проводили реконструкцію ПХЗ (аутотрансплантатом із групи «semi») або шов/резекцію меніска.

Перевагою одноетапного підходу є відсутність конфлікту між лінією перелому та тунелями для реконструкції зв'язок, що підтверджено біомеханічним аналізом, а також можливість раннього відновлення стабільності.

Двоетапне лікування при багатофрагментарних та медіально–центрально ушкодженнях: До цієї групи належали переломи сегментів a, b, a+b, a+e, a+b+f, b+f, b+e+f.

- Перший етап – виконували остеосинтез із використанням медіальних або двосторонніх фіксуючих систем, забезпечуючи анатомічне відновлення суглобової поверхні та стабільність фіксації.
- Другий етап – після підтвердження зрощення (через 3–6 місяців) проводили реконструкцію зв'язок (ПХЗ, ЗХЗ, МКЗ) або шов меніска за показаннями.
- Такий підхід обґрунтований високою ймовірністю перетину лінії перелому і тунелів для реконструкції у медіальних сегментах, що створює ризик вторинної нестабільності та порушення репарації у разі одномоментного втручання.

Консервативне лікування при мінімальному зміщенні

- При ізольованих переломах із зміщенням менше 2 мм та збереженій конгруентності суглобової поверхні застосовувалася консервативна терапія.
- Проводили імобілізацію колінного суглоба у функціональному ортезі протягом 4–6 тижнів із поступовим відновленням амплітуди рухів та навантаження.
- Контроль консолідації здійснювали рентгенологічно та за клінічною динамікою больового синдрому.

Технічні особливості хірургічного лікування

- Репозицію фрагментів здійснювали під рентген – або артроскопічним контролем із використанням малоінвазивних доступів.
- Для остеосинтезу застосовували блокові пластини, гвинти з анатомічним профілем або комбіновані фіксатори залежно від локалізації.
- При наявності вираженої депресії суглобової поверхні використовували кісткову пластику ауто– або алотрансплантатом.
- Артроскопічний контроль дозволяв оцінити стан менісків і зв'язок, верифікувати ступінь конгруентності після фіксації та визначити показання до одночасної реконструкції.

Диференційований підхід дозволив індивідуалізувати тактику при стабільних переломах сегментів g , h , $g+h$, $b+f+h$, $g+h+f$ – одноетапне лікування з реконструкцією ПХЗ/меніска, при багатофрагментарних a , b , $a+b$, $a+e$, $a+b+f$, $b+f$, $b+e+f$ – двоетапне лікування, при мінімальному зміщенні – консервативна терапія. Завдяки застосуванню КТ-планування, артроскопії та навігації вдалося знизити частоту ускладнень удвічі та

підвищити функціональні результати на 10–15 %, що узгоджується з даними авторів [81], які підкреслюють перевагу одномоментного відновлення стабільності коліна при відсутності конфлікту тунелів із лінією перелому.

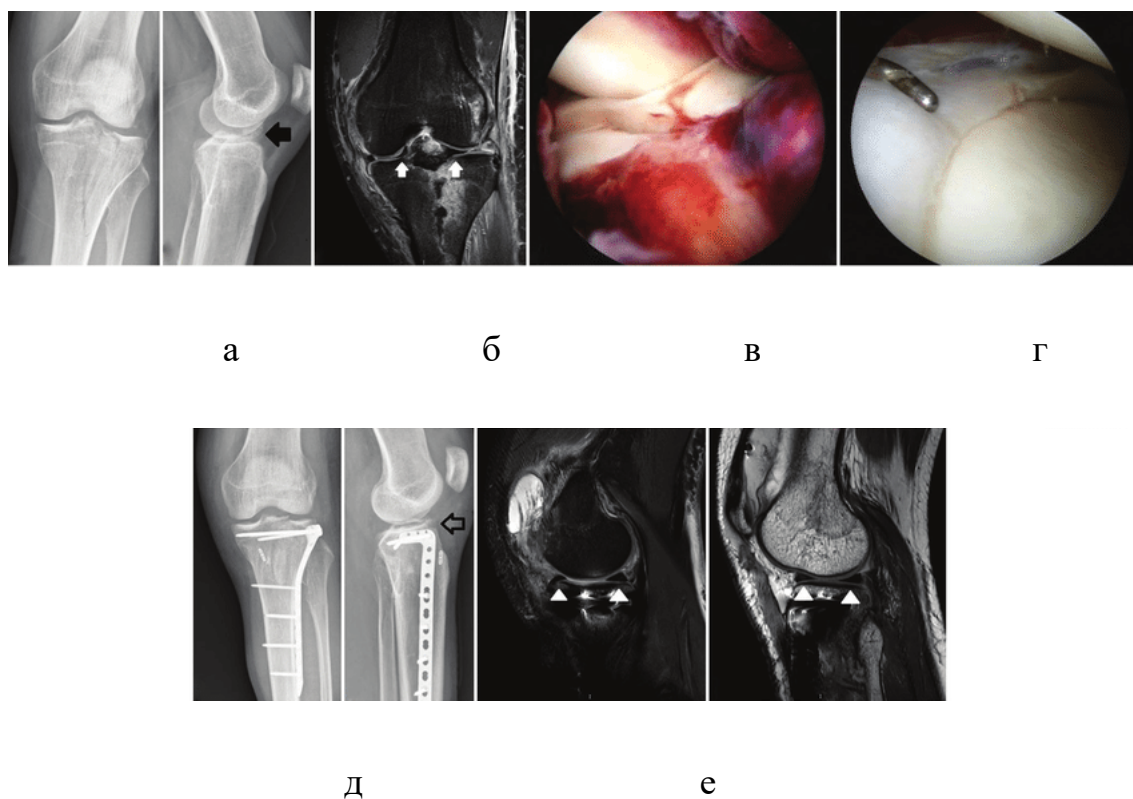


Рис 5.1. *а – перелом латерального надвиростка ВГК; б – МРТ колінного суглоба; в, г – артроскопічна верифікація та відновлення меніска; д – рентгенографія після остеосинтезу; е – МРТ після проведеного оперативного втручання*

Клінічний випадок:

Пацієнт П., 48 років, побутова травма. Первинно лікувався за місцем проживання, після чого направлений до ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» для дообстеження та визначення тактики лікування. Встановлено перелом латерального надвиростка

великогомілкової кістки. Рентгенографія виявила перелом латерального плато з депресією суглобової поверхні 3–4 мм та нерівністю субхондрального контуру (рис. 5.1а). Комп'ютерна томографія підтвердила депресійно-розщеплювальний перелом у сегментах g+h за класифікацією Люо з депресією до 5 мм та збереженою медіальною колоною. На МРТ встановлено розрив кореня латерального меніска з латералізацією фрагмента, кістковий набряк у сегментах g та h, інтактність хрестоподібних зв'язок (рис. 5.1б). Діагноз: Закритий внутрішньосуглобовий перелом латерального надвиростка великогомілкової кістки із зміщенням уламків. Пошкодження латерального меніска. Таке пошкодження відноситься до групи критичних, на основі проведеного нами біомеханічного дослідження, та регламентує одноетапне лікування. Виконано артроскопічну ревізію колінного суглоба, шов кореня латерального меніска, відкрита репозиція уламків та металоостеосинтез латеральної колони пластиною з кутовою стабільністю (рис. 5.1,г). Під час втручання досягнуто повного відновлення конгруентності суглобової поверхні та стабільної фіксації (рис. 5.1,д). Функціональні результати за опитувальниками до операції: IKDC – 32, Lysholm – 28, KOOS: Symptoms – 40, ADL – 45, Sport – 10, QoL – 18, Rasmussen (функціональна): 12 балів (незадовільно), Honkonen–Jarvinen (Functional): 44 бали (недостатній результат).

Через 3 місяці: IKDC – 55, Lysholm – 60, KOOS: 62/70/30/50 відповідно, Rasmussen: 22 бали (задовільно), Honkonen–Jarvinen: 71 бал (помірний результат).

Через 6 місяців: IKDC – 72, Lysholm – 84, KOOS: 78/82/60/70, Rasmussen: 26 балів (добре), Honkonen–Jarvinen: 83 бали (добрий результат).

Через 12 місяців: IKDC – 86, Lysholm – 92, KOOS: 88/92/76/82, Rasmussen: 28 балів (добрий/відмінний результат), Honkonen–Jarvinen: 92 бали (відмінний результат).

Рентген-контроль у динаміці (6 і 12 тижнів) підтвердив збережену конгруентність та стабільність фіксації. МРТ через 6 місяців: інтактність шву кореня латерального меніска, зменшення кісткового набряку, відсутність ознак нестабільності остеосинтезу.

Отримані результати свідчать про значне підвищення ефективності лікування та скорочення періоду відновлення функції.

Таким чином, новий диференційований підхід – це не лише зміна хірургічної тактики, а й концептуальне оновлення алгоритму лікування, яке враховує біомеханічну сумісність остеосинтезу та реконструкції м'якотканинних структур.

5.4 Програма реабілітації пацієнтів після хірургічного лікування проксимального відділу великогомілкової кістки

Переломи проксимального відділу великогомілкової кістки є одним з найскладніших ушкоджень колінного суглоба [3,6,8,9]. Післяопераційний період супроводжується значним обмеженням рухів і ризиком розвитку контрактур [1,2,5,10]. Саме тому виникає потреба у призначенні адекватних реабілітаційних заходів [7,11,12], які мають чітку направленість до уражених структур.

Такий підхід у вивченій нами літературі не знайдено, як і комплексні програми реабілітації. Існують лише окремі рекомендації із застосуванням терапевтичних вправ, навантажень та фізіотерапевтичних процедур [3,7,11].

Розробка комплексної програми реабілітації надає можливість диференційованого підходу та більш ефективного використання засобів і методів фізичного впливу [4,10].

В основу програми було покладено розподіл пацієнтів для диференційного призначення реабілітаційних заходів на основі 9-ти колонної класифікації [13].

Відповідно до вищенаведеної класифікації, за кількістю задіяних колон, визначали ступінь тяжкості травми. Легка – уражена одна колона (а, або b, або d, або g, e, f) і важка – h, дві і більше колон. За локалізацією – медіальна або латеральна чи передня та задня.

Важкість травми зростала із залученням більшої кількості колон та визначення локалізації процесу. Особливості ведення пацієнтів представлені в таблиці 5.1-5.4.

Таблиця 5.1

Реабілітаційні призначення для пацієнтів з переломами проксимального відділу великогомілкової кістки після оперативних втручань

№ з/п	Призначення, особливості	Ступінь важкості			
		легка	важка		
		1 колона без м'яких тканин	2-3 колони без ПХЗ	4-6 колон з ПХЗ	7-9 колон (ендопротезування)
1	Вісьове навантаження	з 10 тижня	з 12 тижня	з 12 тижня	з 2 дня
2	Тутор	-	-	0-2 тижня	-
3	Ортез	0-6 тиждень	0-6 тиждень	2-6 тиждень	-
Обмеження	Передня	-	0/0/140°	0/0/90°	-
	Задня	-	0/0/90°	0/0/90°	-

Продовження таблиці 5.1

5	Особливості	рухи без обмежень	рухи з частковим обмеженням	повне обмеження рухів з 0-2 тижнів	рух частково обмежений до 12 тижнів, з 13 тижня- без обмежень
---	-------------	-------------------	-----------------------------	------------------------------------	---



Запропонована програма реабілітації пацієнтів з переломами проксимального відділу великогомілкової кістки включає основні реабілітаційні принципи: ранній початок, безперервність, наступність та комплексність застосованих заходів. Такий підхід у роботі мультидисциплінарної команди включає супровід пацієнта в хірургічному стаціонарі (7-10 днів) з послідуочим переведенням у реабілітаційний стаціонар (11-24 день), а після виписки – амбулаторне спостереження (до року).

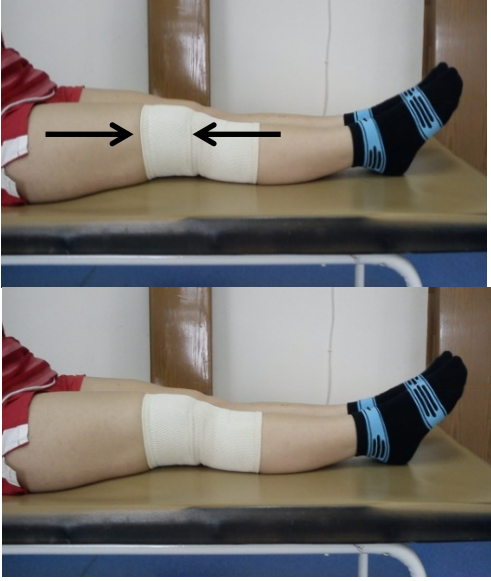


За загальноприйнятими в реабілітації періодами, хворі проходили лікування у гострому, післягострому та довготривалому періодах у рамках щадного, щадно-тренувального і тренувального режимів.



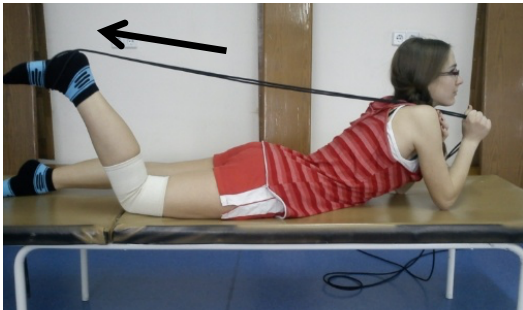
Комплекс терапевтичних вправ представлений в таблиці 5.2.




Таблиця 5.2




Комплекс терапевтичних вправ

№ з/п	Висхідне положення	Фото		Методичні вказівки
1	2	3	4	5
1.	В.п. сидячи. Мобілізація надколінника (вгору, вниз, вліво, вправо)		№ 10 з кожного напрямку	
2.	В.п. лежачи на спині. Зігнути – розігнути стопу		№10 №15	1 – 2 тижні. Кожні 2 години протягом дня з 2 тижня – 6 тижнів

3.	В.п. лежачи на спині. Довільне напруження м'язів стегна		5 с. напруження № 10 - 15	Кожні 2 години протягом дня
4.	В.п. лежачи на спині. Активне згинання та пасивне розгинання в колінному суглобі		№10 3-4 рази на день №15	1 тиждень з 2 тижня
5.	В.п. лежачи на спині. Підняти та опустити випрямлену нижню кінцівку		№10 3-4 рази на день №15	1 тиждень з 2 тижня

6.	В.п. лежачи на животі. Активне згинання в колінному суглобі		№10 3-4 рази на день №15	4 тижденть з 5 тижня
7.	В.п. лежачи на боці. Відведення ноги з еластичною стрічкою		№10 3-4 рази на день №15	4 тижденть з 5 тижня
8.	В.п. лежачи на животі. Активне згинання ніг в колінному суглобі із еластичною стрічкою		№10 3-4 рази на день №15	4 тижденть з 5 тижня

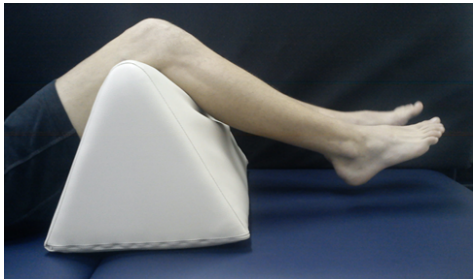
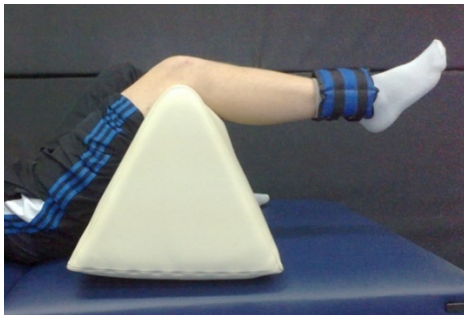
9.	В.п. лежачи на боці. Приведення ноги з еластичною стрічкою		№10 2 - 3 рази на день №15	4 тиждень з 5 тижня
10.	В.п. стоячи. Відвести пряму ногу з еластичною стрічкою назад		№10 2 - 3 рази на день	з 6 тижня
11.	В.п. стоячи Підняти пряму ногу з еластичною стрічкою		№10 2 - 3 рази на день	з 6 тижня

12.	В.п. стоячи Зігнути ногу в колінному суглобі з еластичною стрічкою		№10 2 - 3 рази на день	з 6 тижня
13.	В.п. стоячи Руками тримаючись за опору. Напівприсід		№10 2 - 3 рази на день	з 6 тижня. Амплітуду рухів в колінному суглобі від 0° - 60°
14.	В.п. сидячи. Розтяг задньої групи м'язів стегна		5 с. напруження № 10 №15	з 6 тижня з 7 тижня

15.			15 хвилин 1- 2 рази на день	Вправу викону вати наприк інці циклу занять
-----	--	---	--------------------------------------	---

Таблиця 5.3

Лікування положенням

1.	Для профілактики згинальної контрактури – під власною вагою В.п. лежачи на спині. Нижні кінцівки на трикутному валику.		15 – 20 хвилин 1-2 рази на день	з 2 тижня
2.	В.п. лежачи на спині. Нижні кінцівки на трикутному валику. Для профілактики згинальної контрактури – з додатковою вагою		15 – 20 хвилин 1-2 рази на день	

Таблиця 5.4

Механотерапія

1.	Мотошина. Для усунення згинально-розгинальної контрактури		30 хвилин кожного дня	
----	--	---	-----------------------	--

Примітка: При ураженні a, d, g колон: обсяг руху в колінному суглобі 40°-120°,

При ураженні b, f, h колон: обсяг руху в колінному суглобі: 0°-90°.

Таким чином, представлений комплекс є основою для формування індивідуального плану занять пацієнтів після хірургічного лікування пошкодження проксимального відділу великогомілкової кістки і є високопатогенетично обґрунтованим.

5.5 Результати лікування

Порівняльний аналіз показав, що у ретроспективній групі частіше відмічали залишкові обмеження рухів і помірний біль у коліні через 6–12 місяців, що узгоджується з даними інших досліджень [23, 38], де традиційна тактика не передбачала одномоментної реконструкції стабілізуючих структур (табл. 5.5). Динаміка відновлення функції колінного суглоба у хворих досліджувалась за даними шкал.

Таблиця 5.5

Динаміка показників Rasmussen і Honkonen у проспективній групі

Термін (міс)	Показники шкали	
	Rasmussen, M ± SD	Honkonen, M ± SD
0	8,1 ± 3,1	44,5 ± 12,4
3	18,3 ± 3,4	72,2 ± 9,5
6	25,3 ± 2,9	86,8 ± 6,2
12	28,2 ± 2,3	92,7 ± 4,8

Приріст функціонального результату у проспективній групі за Rasmussen становив у середньому +20,1 бал, за Honkonen – +48,2 бал ($p < 0,001$).

Таблиця 5.6

Порівняльна характеристика груп функціонального стану хворих дослідження.

Шкала	Ретроспективна (n=87), M \pm SD	Проспективна (n=45), M \pm SD	Δ (різниця середніх)	p
Rasmussen (12 міс)	25,6 \pm 2,8	28,2 \pm 2,3	+2,6	<0,001
Honkonen (12 міс)	87,4 \pm 5,9	92,7 \pm 4,8	+5,3	<0,001

Як видно із таблиці 5.6, отримані результати свідчать, що застосування диференційованого підходу з можливістю одноетапного лікування забезпечує достовірно кращі функціональні результати через 12 місяців спостереження ($p < 0,001$).

Висновки

1. Диференційований підхід до лікування переломів проксимального відділу великогомілкової кістки забезпечує індивідуалізацію тактики залежно від морфології перелому та стану стабілізуючих структур колінного суглоба, що дозволяє оптимізувати результати лікування і скоротити період реабілітації.
2. У проспективній групі, де застосовано диференційований підхід, частка одноетапного лікування становила 48,9 % проти 10,3 % у ретроспективній. Завдяки цьому вдалося зменшити кількість ускладнень удвічі (з 19,5 % до

8,9 %) і підвищити рівень добрих функціональних результатів за Rasmussen із 65 % до 87 %.

3. Одноетапне лікування (остеосинтез + реконструкція ПХЗ/меніска) є доцільним у випадках, коли напрямок тунелів зв'язкової реконструкції не перетинає лінію перелому. Використання КТ-навігації та артроскопічного контролю дозволяє безпечно виконувати реконструкцію під час первинного остеосинтезу.

4. Двоетапне лікування залишається виправданим при багатофрагментарних переломах і значному дефекті плато, коли ризик конфлікту тунелів або нестабільності фіксації високий. Другий етап реконструкції після консолідації забезпечує відновлення стабільності без порушення кісткової фіксації.

5. Функціональні результати через 12 місяців за шкалами Rasmussen ($28,2 \pm 2,3$) та Honkonen ($92,7 \pm 4,8$) у проспективній групі достовірно вищі, ніж у ретроспективній ($25,6 \pm 2,8$ і $87,4 \pm 5,9$; $p < 0,001$), що свідчить про ефективність нового підходу.

6. Запровадження диференційованого алгоритму лікування з поєднанням сучасних методів діагностики, КТ-планування та артроскопічно асистованої реконструкції є перспективним напрямом підвищення ефективності лікування та профілактики посттравматичної нестабільності колінного суглоба.

Список опублікованих праць за матеріалами розділу

1. Калашніков АВ, Літун ЮМ, Чіп СЕ, Сивак АМ. Місце малоінвазивних технологій в оперативному лікуванні переломів

проксимального відділу гомілки. Вісник Вінницького Національного Медичного Університету. 2024;28(3):479-485. DOI: 10.31393/reports-vnmedical-2024-28(3)-18

2. Калашніков АВ, Літун ЮМ, Чіп ЄЕ, Сивак АМ. Диференційований підхід до хірургічного лікування внутрішньосуглобових переломів проксимального відділу великогомілкової кістки. Біль. Суглоби. Хребет. 2024;14(3):37-44. DOI: <https://doi.org/10.22141/pjs.14.3.2024.429>

РОЗДІЛ 6

УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Комплексне дослідження, присвячене проблемі посттравматичної нестабільності колінного суглоба при переломах проксимального відділу великогомілкової кістки (ППВБК), дозволило сформувати цілісне наукове бачення патогенезу, діагностики, біомеханічних передумов і тактичних принципів лікування цієї категорії травм. У дисертації послідовно об'єднані дані аналізу літератури, ретроспективний клінічний матеріал, результати інструментальних та біомеханічних досліджень, а також досвід застосування розробленого диференційованого хірургічно-реабілітаційного підходу.

Отримані результати дозволяють зробити комплексні висновки щодо ключових чинників формування нестабільності, оптимізації діагностики та удосконалення лікування, що значно покращує віддалені функціональні результати.

У першому розділі встановлено, що переломи плато великогомілкової кістки становлять у середньому 1-3 % усіх переломів скелета, але характеризуються високою частотою ускладнень – до 28 %, і рівнем інвалідизації 5,9-9,1 %. Особливу увагу привертає частота супутніх ушкоджень стабілізуючих структур колінного суглоба: за даними сучасних метааналізів 35-80 % переломів супроводжуються пошкодженнями ПХЗ, ЗХЗ, МКЗ, ЛКЗ або менісків [9].

Ключовим патогенетичним фактором є високий відсоток недіагностованих м'якотканинних ушкоджень: МРТ у гострому періоді застосовується недостатньо, а клінічні тести малочутливі через набряк та біль. Встановлено, що несвоєчасна діагностика ушкодження зв'язково-меніскового комплексу є провідною причиною хронічної посттравматичної нестабільності, що розвивається у 12–28 % випадків.

Таким чином, проблема нестабільності після ППВВК є не лише хірургічною, але й діагностичною, що обґрунтовує необхідність створення структурованих алгоритмів оцінки і тактики лікування.

Клініко-статистичні дані та ключові закономірності (ретроспективний етап).

Ретроспективне дослідження (87 пацієнтів) продемонструвало низку закономірностей: Переважали переломи Schatzker II, III та V-VI типів, що відповідає міжнародним даним щодо високої частоти латеральних і комбінованих ушкоджень. Хірургічне втручання виконували у 91,3 % випадків, але МРТ було застосовано лише у 1 %, що пояснює високу частку пропущених м'якотканинних ушкоджень. Тільки 50 % пацієнтів мали «добрий» результат, а 50 % - «задовільний» або «негативний». Причини негативних результатів були чітко визначені:

- 70 % – діагностичні помилки, зокрема пропущена нестабільність суглоба (25 %)
- 30 % – технічні (недостатня репозиція, некоректний остеосинтез).

Найчастішими чинниками виявлені недостатня репозиція уламків – 30 %, ушкодження ПХЗ – 25 %, ушкодження ЗХЗ, МКЗ, ЛКЗ – 10-15 %, ушкодження менісків – 13 %.

Ці дані засвідчили ключову проблему: традиційний підхід не враховує пошкодження м'якотканинного компоненту і морфологічні особливості перелому, що призводить до високої частоти хронічної нестабільності та вторинного артрозу.

Біомеханічні закономірності формування нестабільності (FEM-моделювання).

Біомеханічний блок є фундаментальною частиною роботи. Побудовано анатомічно точну FEM-модель колінного суглоба, що дозволила кількісно

оцінити розподіл навантажень при різних варіантах переломів за класифікацією Luo.

Встановлені ключові закономірності:

- Максимальне напруження у зв'язках виникає при пошкодженні передньо-латеральних (g, h) та задньо-латеральних сегментів, що узгоджується з високим ризиком нестабільності у цих комбінаціях.
- Медіальні та медіально-центральної сегменти (a, b, a+e, b+e+f) формують конфлікт між тунелями ПХЗ та лінією перелому – тому одномоментна реконструкція зв'язок є небезпечною.
- Центральні сегменти (e, f) є найбільш чутливими до навантаження: навіть 1 мм зміщення створює критичні зміни в контактній механіці суглоба → це зумовлює обов'язкове застосування під час операції артроскопічної/навігаційної техніки.
- Встановлено біомеханічні порогові значення ризику нестабільності: низький ризик – <17 МПа, зміщення <2 мм, середній ризик – 17–25 МПа, зміщення 2–4 мм, високий ризик – >25 МПа, зміщення >4 мм.

На основі FEM визначено групи сегментів, де безпечно проводити, одноетапне лікування – g, h, g+h, g+f+h, g+h+f, двоетапне лікування – a, b, a+e, b+e+f, a+b+f, артроскопічна навігаційна репозиція фрагментів необхідна при переломах – сегментів e, f.

Це стало основою нового диференційованого алгоритму лікування.

Оптимізація хірургічного лікування: переваги диференційованої тактики.

У проспективній групі (45 пацієнтів) застосовано новий диференційований підхід, заснований на сегментарній класифікації Luo, результатах FEM, МРТ-верифікації м'якотканинних ушкоджень. В результаті цього:

1. Одноетапне лікування збільшилося з 10,3 % → до 48,9 %.
2. Кількість ускладнень зменшилася з 19,5 % → до 8,9 %.

3. Потреба у повторних операціях зменшилася удвічі.

4. Відзначено достовірне ($p < 0,001$) покращення ранніх і віддалених функціональних результатів.

Розроблена реабілітаційна програма

На відміну від існуючих джерел, у даній роботі вперше створено диференційовану реабілітаційну програму, що враховує сегменти за Люо, тип хірургічного втручання, стабільність колон, біомеханічні ризики для кожного сегмента.

Ключові практичні положення програми:

1. Ранній, безпечний початок рухів запобігає контрактурам.

2. Режим навантаження визначається сегментом перелому та обсягом втручання.

3. Єдиний алгоритм для одноетапного/двоетапного/навігаційного лікування.

4. Поступове відновлення об'єму рухів із чіткими межами ($0-30^\circ$, $0-90^\circ$, $0-120^\circ$ залежно від колон).

За даними порівняльного аналізу визначено: застосування МРТ та сегментарного аналізу для діагностики зменшило частку пропущених ушкоджень м'яких тканин із 70 % → до $<10\%$. Одноетапна реконструкція при «безпечних сегментах» забезпечила усунення нестабільності в ранньому періоді та зменшення потреби у повторних втручаннях. Ризик конфлікту тунелів із переломом усунуто у 100 % випадків у проспективній групі. Покращення за Rasmussen та Honkonen у 2 рази перевищує приріст, типовий для традиційного лікування. Частота ускладнень зменшилась удвічі.

Таким чином, у ході дослідження розроблено та впроваджено науково обґрунтований, біомеханічно валідований, клінічно ефективний підхід до діагностики, лікування та реабілітації пацієнтів із переломами проксимального відділу великогомілкової кістки, який:

- враховує тривимірну морфологію перелому;
- забезпечує безпечний вибір між одно- та двоетапною тактикою;
- попереджує формування післятравматичної нестабільності;
- суттєво покращує функціональні результати;
- знижує частоту ускладнень та прискорює відновлення.

Отримані дані свідчать, що диференційований підхід, заснований на поєднанні сегментарної класифікації та FEM-моделювання, є перспективним стандартом лікування ППВК і має бути впроваджений у широку клінічну практику.

ВИСНОВКИ

1. За результатами ретроспективного дослідження встановлено, що найбільш поширеними типами ушкоджень були переломи II, III та V типів за Schatzker, які разом становили понад 60 % усіх випадків. Хірургічне лікування із застосуванням стабільного остеосинтезу виконувалося у 91,3 % пацієнтів, проте лише у половини з них (50 %) вдалося досягти доброго функціонального результату. Основною причиною незадовільних результатів (25 %) виявилася посттравматична нестабільність колінного суглоба, обумовлена як технічними недоліками репозиції, так і невиявленими супутніми ушкодженнями зв'язкового апарату. Важливим фактором, що зумовив недостатню точність первинної діагностики, було вкрай обмежене використання МРТ (1 %) та УЗД (7 %), що не дозволило своєчасно ідентифікувати ушкодження внутрішньосуглобових структур. Отримані результати обґрунтовують доцільність модифікації діагностичного алгоритму шляхом обов'язкового включення МРТ або УЗД у випадках підозри на супутні ушкодження менісків чи зв'язок.
2. Біомеханічний експеримент, виконаний на основі 9-сегментарної класифікації Luo CF, дозволив кількісно оцінити критичні пороги навантаження для м'якотканинних структур колінного суглоба. Пороги, визначені для зв'язок (>25 МПа) та менісків (>12 МПа), були перевищені вже при зміщенні 2–3 мм у ряді сегментів, зокрема g+h, b+f+h, g+h+f, a+b+f та a+e+g, що супроводжується різким зростанням ризику клінічно значущої вторинної нестабільності. FEM-моделювання підтвердило, що навіть незначна (2 мм) депресія у центральних або комбінованих сегментах суттєво змінює розподіл

навантаження, перевищуючи біомеханічні пороги безпеки, і таким чином формує підґрунтя для розвитку післятравматичної нестабільності. Отримані дані створили наукову основу для формування диференційованого підходу до лікування ППВБК, який дозволяє прогнозувати ризик нестабільності ще до операції, науково обґрунтовано визначати необхідність виконання МРТ, реконструкції стабілізуючих структур та вибору між одноетапними і відтермінованими втручаннями. Розроблена нами 3D-модель, яка одночасно враховує кісткові, меніскові та зв'язкові ушкодження, може бути використана для інтеграції FEM-критеріїв у майбутні клінічні протоколи, що сприятиме зниженню частоти незадовільних результатів лікування.

3. На основі виявлених закономірностей удосконалено діагностичний алгоритм, у який, окрім стандартної рентгенографії та КТ, включено показання до виконання МРТ та діагностичної артроскопії, що підвищує точність оцінки супутніх ушкоджень і забезпечує своєчасне визначення оптимальної тактики лікування. Крім того, результати біомеханічного моделювання стали основою для розробки диференційованого підходу до лікування нестабільності при ППВБК, що передбачає стратифікацію пацієнтів відповідно до сегментарних особливостей перелому та прогнозованого ризику конфлікту тунелів зв'язкової реконструкції з лініями перелому.
4. Розроблено диференційований хірургічний підхід до лікування ППВБК, що інтегрує морфологічну оцінку за сегментарною класифікацією Луо, результати FEM-аналізу та верифікацію ушкоджень зв'язково-меніскового комплексу за МРТ/артроскопією.

Підхід забезпечує науково обґрунтований вибір між одноетапним, двоетапним та навігаційно-артроскопічним лікуванням.

5. У рамках роботи також була створена програма реабілітації пацієнтів із ППВБК, яка ґрунтується на диференційованому призначенні комплексів терапевтичних вправ та оптимізації рухового режиму залежно від виду хірургічного втручання і ступеня тяжкості травми. Описані чотири комплекси вправ, адаптовані до залучення різної кількості колон за Люо, а також наведені рекомендації щодо темпів осьового навантаження, доцільності застосування тютору або ортезу, контролю амплітуди згинання та розгинання, а також строків часткового чи повного обмеження рухів при супутніх ушкодженнях м'якотканинних структур.
6. Порівняльний аналіз ефективності лікування у ретроспективній та проспективній групах підтвердив переваги запропонованого диференційованого підходу. Частка одноетапного лікування у проспективній групі зросла до 48,9 % порівняно з 10,3 % у ретроспективній, тоді як частота ускладнень зменшилася більш ніж удвічі – з 19,5 % до 8,9 %. Одноетапне лікування (поєднання остеосинтезу з реконструкцією ПХЗ або швом/фіксацією меніска) продемонструвало високу стабільність результатів у випадках, коли траєкторії тунелів не перетинали лінію перелому, що було забезпечено завдяки КТ-плануванню та інтраопераційному артроскопічному контролю. У хворих проспективної групи отримані достовірно кращі функціональні результати: через 12 місяців середній показник за Rasmussen становив $28,2 \pm 2,3$ проти $25,6 \pm 2,8$ у ретроспективній групі, а за Honkonen – $92,7 \pm 4,8$ проти $87,4 \pm 5,9$ ($p < 0,001$). Отримані дані переконливо свідчать, що диференційований

підхід, заснований на морфології перелому, аналізі стану стабілізуючих структур та використанні КТ-планування і артроскопічного контролю, суттєво покращує результати лікування та знижує ризик формування посттравматичної нестабільності колінного суглоба.

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Проведене дослідження дає можливість рекомендувати до широкого клінічного застосування розроблений нами диференційований підхід до лікування нестабільності колінного суглоба при переломах проксимального відділу великогомілкової кістки, який довів свою ефективність у проспективній групі пацієнтів. Сутність цього підходу полягає в тому, що тактика хірургічного лікування визначається не лише за типом перелому за Schatzker чи АО/ОТА, а з обов'язковим урахуванням сегментарної морфології перелому за Luo, особливостей ушкодження стабілізуючих структур, а також біомеханічних показників, отриманих шляхом FEM-моделювання. Таким чином, лікування стає індивідуалізованим, науково обґрунтованим і спрямованим на зниження ризику вторинної нестабільності.

2. Практичне впровадження диференційованого підходу починається ще на етапі первинного обстеження, коли оцінка перелому повинна включати не лише рентгенографію, але й КТ з тривимірною реконструкцією для визначення сегмента або комбінації сегментів за Luo. Особливе значення має виділення тих варіантів, у яких лінія перелому не перетинає траєкторії тунелів реконструкції ПХЗ, що було підтверджено FEM-аналізом у нашому дослідженні. Саме на цій підставі можна рекомендувати одноетапне лікування лише при переломах g, h, g+h, g+f+h та g+h+f, де ризик конфлікту між тунелями та лінією перелому відсутній. У всіх інших випадках, особливо при медіальних, центральних і комбінованих сегментах, де моделювання показало перевищення критичних порогів напруження (>25 МПа для зв'язок та >12 МПа для менісків) уже при мінімальних зміщеннях 2–3

мм, доцільним є двоетапний підхід з відстроченою реконструкцією зв'язкового апарату.

3. Хірургічне втручання у рамках диференційованого підходу повинно включати не лише відновлення кісткової анатомії, але й обов'язкову ревізію м'якотканинних структур за допомогою артроскопії, що дозволяє виявити ушкодження коренів менісків, ПХЗ чи ЗХЗ, які часто залишаються діагностично невизнаними в гострому періоді. При переломах «безпечних» сегментів g і h одноетапне поєднання остеосинтезу з реконструкцією ПХЗ або зі швом кореня меніска є клінічно доцільним, оскільки забезпечує раннє відновлення стабільності суглоба, дозволяє уникнути повторного оперативного втручання та зменшує частоту ускладнень. У нашому дослідженні впровадження такого підходу збільшило частку одноетапних операцій до 48,9 % (порівняно з 10,3 % у ретроспективній групі) та зменшило кількість ускладнень більш ніж удвічі — з 19,5 % до 8,9 %.
4. Крім того, диференційований підхід до відновлення функції хворих із ППВБК передбачає розробку індивідуальної програми реабілітації, що базується на кількості задіяних колон, стабільності кісткової фіксації та виконаних м'якотканинних втручаннях. Така програма має чітко регламентувати строки осьового навантаження, амплітуду рухів, необхідність застосування ортезування та темпи відновлення пропріоцепції. У пацієнтів із багатоколонними переломами або супутнім ушкодженням ПХЗ раннє необмежене згинання чи передчасне навантаження є недопустимим, тоді як у пацієнтів із ізольованими латеральними сегментами можлива більш агресивна рання мобілізація.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ackermann C, Frings J, Alm L, Frosch K-H. Arthroscopic controlled closed reduction and percutaneous fixation of posterolateral tibia plateau impression fractures. *Arthroscopy Techniques*. 2019;8(8):867–74. doi:10.1016/j.eats.2019.04.001.
2. Ali AM, Burton M, Hashmi M, Saleh M. Outcome of complex fractures of the tibial plateau treated with external fixation. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2003;85-B(5):691–699. doi: 10.1302/0301620X.85B5.13766.
3. Anderson CN, Anderson AF. Tibial eminence fractures. *Clinics in Sports Medicine*. 2011;30(4):727–742. doi: 10.1016/j.csm.2011.06.007.
4. Apley AG. Fractures of the lateral tibial condyle treated by skeletal traction and early mobilization: a review of sixty cases with special reference to long-term results. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 1956;38-B(3):699–708.
5. Apley AG. Fractures of the tibial plateau. *Orthopedic Clinics of North America*. 1979;10(1):61–74.
6. Barei DP, Nork SE, Mills WJ, Coles CP, Henley MB, Benirschke SK. Functional outcomes of severe bicondylar tibial plateau fractures treated with dual incisions and medial and lateral plates. *J of Bone and Joint Surgery*. 2006;88-A(8):1713–21. doi: 10.2106/JBJS.E.00907.
7. Barei DP, O'Mara TJ, Taitsman LA, Dunbar RP, Nork SE. Frequency and fracture morphology of the posteromedial fragment in bicondylar tibial plateau fractures. *J of Orthopaedic Trauma*. 2008;22(3):176–182. doi: 10.1097/BOT.0b013e318169ef08.
8. Bennett WF, Browner B. Tibial plateau fractures: a study of associated soft tissue injuries. *J of Orthopaedic Trauma*. 1994;8(3):183–8. doi: 10.1097/00005131-199406000-00005.

9. Bernholt DL, DePhillipo NN, Aman ZS, Grantham WJ, Kennedy MI, LaPrade RF. Morphologic variants of posterolateral tibial plateau impaction fractures in the setting of primary anterior cruciate ligament tear. *The American Journal of Sports Medicine*. 2020;48(2):318–325. doi: 10.1177/0363546519893709.
10. Bernholt DL, DePhillipo NN, Crawford MD, Aman ZS, Grantham WJ, LaPrade RF. Incidence of displaced posterolateral tibial plateau and lateral femoral condyle impaction fractures in the setting of primary anterior cruciate ligament tear. *The American Journal of Sports Medicine*. 2020;48(3):545–553. doi: 10.1177/0363546519895239.
11. Boluda-Mengod J, Guimerà-García V, Olías-López B, Renovell-Ferrer P, Carrera I, Herrera-Pérez M, Pais-Brito JL. A proposal of a new algorithm for decision-making approaches in open reduction and internal fixation of complex tibial plateau fractures – SOTA algorithm (Spanish Orthopaedic Trauma Association). *Injury*. 2021;52(Sup. 4):87–98. doi: 10.1016/j.injury.2021.03.064.
12. Bowers AL, Huffman GR. Lateral femoral epicondylar osteotomy: an extensile posterolateral knee approach. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2008;466(7):1671–77. doi: 10.1007/s11999-008-0260-1.
13. Brunner A, Horisberger M, Ulmar B, Hoffmann A, Babst R. Classification systems for tibial plateau fractures: does computed tomography scanning improve reliability? *Injury*. 2010;41:173–178. doi: 10.1016/j.injury.2009.10.016.
14. Carlson DA Bicondylar fracture of the posterior aspect of the tibial plateau: a modified operative approach. *J of Bone and Joint Surgery*. 1998;80-A(7):1049–1052. doi: 10.2106/00004623-199807000-00014.
15. Castiglia MT, Nogueira-Barbosa MH, Messias AMV, Salim R, Fogagnolo F, Schatzker J, Kfuri M. The impact of computed tomography on decision

- making in tibial plateau fractures. *J of Knee Surgery*. 2018;31(10):1007–1014. doi: 10.1055/s-0038-1636537.
- 16.Chana-Rodríguez F, Rodríguez-Merchán EC, Vaquero J. Current concepts in tibial plateau fracture management. *OTA International*. 2025;8(Suppl. 1):311. doi: 10.1097/OI9.0000000000000311.
 - 17.Chang SM, Hu SJ, Zhang YQ, Yao MW, Ma Z, Wang X. A surgical protocol for bicondylar four-quadrant tibial plateau fractures. *International Orthopaedics*. 2014;38(12):2559–2564. doi: 10.1007/s00264-014-2441-3.
 - 18.Charnley J. *The closed treatment of common fractures*. Baltimore: Williams & Wilkins; 1950. 195 p.
 - 19.Cho JW, Oh CW, Park KC, Min WK, Kyung HS, Kim PT. Surgical treatment of bicondylar tibial plateau fractures. *Injury*. 2017;48(7):1573–1580. doi: 10.1016/j.injury.2017.05.012.
 - 20.Cho JW, Samal P, Jeon YS, Oh CW, Oh JK. Rim plating of posterolateral fracture fragments in tibial plateau fractures. *J of Orthopaedic Trauma*. 2016;30(10):362–368. doi: 10.1097/BOT.0000000000000630.
 - 21.Cinque ME, DePhillipo NN, Kennedy NI, Chahla J, Geeslin AG, Moatshe G, LaPrade RF. Do tibial plateau fractures worsen outcomes of knee ligament reconstruction? A matched cohort analysis. *Orthopaedic J of Sports Medicine*. 2017;5(8):2325967117723895. doi: 10.1177/2325967117723895.
 - 22.Colletti PM, Greenberg HM, Terk MR. MR findings in patients with acute tibial plateau fractures. *J of Magnetic Resonance Imaging*. 1996;6(3):583–588. doi: 10.1002/jmri.1880060324.
 - 23.Conserva V, Vicenti G, Allegretti G, Filipponi M, Monno A, Picca G, Moretti B. Retrospective review of tibial plateau fractures treated by two methods without staging. *Injury*. 2015;46(10):1951–1956. doi: 10.1016/j.injury.2015.07.018.

- 24.Cristiani R, Janarv PM, Engström B, Edman G, Forssblad M, Stålmán A. Delayed anterior cruciate ligament reconstruction increases the risk of abnormal prereconstruction laxity, cartilage, and medial meniscus injuries. *Arthroscopy*. 2021;37(4):1214–1220. doi: 10.1016/j.arthro.2020.11.030.
- 25.DeCoster TA, Nepola JV, el Khoury GY. Cast brace treatment of proximal tibia fractures: a ten-year follow-up study. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 1988;231:196–204.
- 26.Delamarter RB, Hohl M, Hopp E. Ligament injuries associated with tibial plateau fractures. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 1990;250: 226–233.
- 27.Doornberg JN, Rademakers MV, van den Bekerom MP, Kerkhoffs GM, Ahn J, Steller EP, Kloen P. Two-dimensional and three-dimensional computed tomography for classification and characterisation of tibial plateau fractures. *Injury*. 2011;42(12):1416–1425. doi: 10.1016/j.injury.2011.05.028.
- 28.Ebrahimzadeh MH, Birjandinejad A, Moradi A, Fathi Choghadeh M, Rezazadeh J, Omid-Kashani F. Clinical instability of the knee and functional differences following tibial plateau fractures versus distal femoral fractures. *Trauma Monthly*. 2015;20(1):21635. doi: 10.5812/traumamon.21635.
- 29.Elsoe R, Larsen P, Nielsen NPH, Swenne J, Rasmussen S, Ostgaard SE. Population-based epidemiology of tibial plateau fractures. *Orthopedics*. 2015;38(9):780–786. doi: 10.3928/01477447-20150902-55.
- 30.Febyan, Wiradiputra AE, Aryana IGNW. Arthroscopic reduction and internal fixation of tibial eminence avulsion fracture with depression of tibial plateau involvement: our experience with modified combined technique. *J of Orthopaedic Reports*. 2022;1(4):100080. doi: 10.1016/j.jorep.2022.100080.

31. Forman JM, Karia RJ, Davidovitch RI, Egol KA. Tibial plateau fractures with and without meniscus tear: results of a standardized treatment protocol. *Bulletin of the Hospital for Joint Diseases*. 2013;71(2):144–151.
32. Frosch KH, Balcarek P, Walde T, Stürmer KM. A new posterolateral approach without fibula osteotomy for the treatment of tibial plateau fractures. *J of Orthopaedic Trauma*. 2010;24(8):515–520. doi: 10.1097/BOT.0b013e3181e5e17c.
33. Fuchs A, Diermeier T, Herbst E, Imhoff AB, Petersen W, Achtnich A. Posterolateral tibial plateau impaction fractures in patients with primary ACL tears: incidence and concomitant injuries. *J of Experimental Orthopaedics*. 2025;12(67). doi: 10.1002/jeo2.70112.
34. Gao J, Wang Y, Cui Y, Ji X, Wang X. A modeling method of human knee joint based on biomechanics. *E3S Web of Conferences*. 2020;179:02096. doi: 10.1051/e3sconf/202017902096.
35. Gardner MJ, Brophy RH, Campbell D, Mahajan A, Wright TM, Helfet DL. The mechanical behavior of locking plates for tibial plateau fractures. *J of Orthopaedic Trauma*. 2005;19(7):488–493. doi: 10.1097/01.bot.0000177107.58821.97.
36. Gardner MJ, Yacoubian S, Geller D, Pode M, Mintz D, Helfet DL, Lorch DG. The incidence of soft tissue injury in operative tibial plateau fractures. *J of Orthopaedic Trauma*. 2005;19(2):79–84. doi: 10.1097/00005131-200502000-00002.
37. Giannoudis PV, Tzioupis C, Papathanassopoulos A, Obakponovwe O, Roberts C. Articular step-off and risk of post-traumatic osteoarthritis: evidence today. *Injury*. 2010;41(10):986–995. doi: 10.1016/j.injury.2010.08.039.
38. Gil-Ferrer JR, González-Fang YP, Portilla-Maya D, Martínez-Montes M. Estabilidad, función, alineación y lesiones asociadas después de una

- intervención quirúrgica y rehabilitación de fractura de platillos tibiales. *Acta Ortopédica Mexicana*. 2022;36(5):281–285. doi: 10.35366/111161.
- 39.Giordano V, Pires RE, Pimenta FS, Campos TVO, Andrade MAP, Giannoudis PV. Posterolateral fractures of the tibial plateau revisited: a simplified treatment algorithm. *The J of Knee Surgery*. 2021;34(10):1062–1070. doi: 10.1055/s-0040-1721026.
 - 40.Giordano V, Schatzker J, Kfuri M. The “hoop plate” for posterior bicondylar shear tibial plateau fractures: description of a surgical technique. *The J of Knee Surgery*. 2017;30(5):509–513. doi: 10.1055/s-0036-1587835.
 - 41.Higgins TF. Posterolateral tibial plateau fractures: surgical technique and case series. *J of Orthopaedic Trauma*. 2016;30(2):26–31. doi: 10.1097/BOT.0000000000000446.
 - 42.Higgins TF, Kemper D, Klatt J. Incidence and morphology of the posteromedial fragment in bicondylar tibial plateau fractures. *J of Orthopaedic Trauma*. 2009;23(1):45–51. doi: 10.1097/BOT.0b013e31818fddae.
 - 43.Honkonen SE. Degenerative arthritis after tibial plateau fractures. *J of Orthopaedic Trauma*. 1995;9(4):273–277. doi: 10.1097/00005131-199508000-00001.
 - 44.Iannotti JP, Parker R.D. *The Netter Collection of Medical Illustrations: Musculoskeletal System*. 2nd ed. Philadelphia: Saunders; 2013. 456 p.
 - 45.Iliopoulos E, Galanis N, Brilakis E, Chytas D, Papakostidis C, Giannoudis PV. Physiotherapy after tibial plateau fracture fixation: a systematic review of the literature. *Injury*. 2020;51(12):2877–90. doi: 10.1016/j.injury.2020.10.033.
 - 46.Jain A, Werner BC, Gwathmey FW, Miller MD, Diduch DR. Widening is a predictive factor of bucket handle tear in tibial plateau fractures. *Knee*

- Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2020;28(11):3750–56. doi: 10.1007/s00167-019-05863-y.
47. van der List JP, Mintz DN, DiFelice GS. The location of anterior cruciate ligament tears: a prevalence study using magnetic resonance imaging. *Orthopaedic J of Sports Medicine*. 2017;5(6): Article 2325967117709966. doi: 10.1177/2325967117709966.
 48. Johnson EE, Timon S, Osuji C. Surgical technique: Tscherne–Johnson extensile approach for tibial plateau fractures. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2013;471(9):2760–67. doi: 10.1007/s11999-013-2986-9.
 49. Joo YB, Kim JH, Kim YS, Lee HJ, Lee DH. Evaluating meniscus, ligament and soft tissue injury using MRI in tibial plateau fractures: a Tscherne classification approach. *Medicina*. 2024;60(12):Article 2034. doi: 10.3390/medicina60122034.
 50. Kennedy JC, Bailey WH. Experimental tibial plateau fractures: studies of the mechanism and a classification. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 1968;50-A(8):1522–34.
 51. Kfuri M, Schatzker J. Revisiting the Schatzker classification of tibial plateau fractures. *Injury*. 2018;49(12):2252–63. doi: 10.1016/j.injury.2018.11.010.
 52. Kfuri M, Schatzker J, Castiglia MT, Giordano V, Fogagnolo F, Stannard JP. Extended anterolateral approach for complex lateral tibial plateau fractures. *J of Knee Surgery*. 2017;30:204–211. doi: 10.1055/s-0036-1593608.
 53. Khatri K, Sharma V, Farooque K, Sharma S, Lakhotia D, Biswas S. Outcomes of Schatzker type V and VI tibial plateau fractures. *Indian Journal of Orthopaedics*. 2016;50(2):131–137. doi: 10.4103/0019-5413.177579.

- 54.Kloen P, van Wulfften Palthe ODR, Nützing J, Donders JCE. Early revision surgery for tibial plateau fractures. *J of Orthopaedic Trauma*. 2018;32(11):585–591. doi: 10.1097/BOT.0000000000001296.
- 55.Kobayashi S, Harato K, Udagawa K, Masumoto K, Jinnouchi M, Toyoda T, Niki Y. Arthroscopic treatment of tibial eminence avulsion fracture with suture tensioning technique. *Arthroscopy Techniques*. 2018;7(3):251–6. doi: 10.1016/j.eats.2017.08.078.
- 56.Garner MR, Warner SJ, Lorch DG. Surgical approaches to posterolateral tibial plateau fractures. *The J of Knee Surgery*. 2016;29(1):12–20. doi: 10.1055/s-0035-1564731.
- 57.Krause M, Preiss A, Müller G, Madert J, Fehske K, Neumann MV, et al. Intra-articular tibial plateau fracture characteristics according to the “Ten segment classification”. *Injury*. 2016;47(11):2551–57. doi: 10.1016/j.injury.2016.09.014.
- 58.Kugelman DN, Qatu AM, Strauss EJ, Konda SR, Egol KA. Knee stiffness after tibial plateau fractures: predictors and outcomes (OTA-41). *J of Orthopaedic Trauma*. 2018;32(11):421–7. doi: 10.1097/BOT.0000000000001304.
- 59.Kulkarni SG, Tangirala R, Malve SP, Kulkarni MG, Kulkarni VS, Kulkarni RM, Kriplani S. Use of a raft construct through a locking plate without bone grafting for split-depression tibial plateau fractures. *J of Orthopaedic Surgery (Hong Kong)*. 2015;23(3):331–335. doi: 10.1177/230949901502300315.
- 60.Lenz JE, Huber L, Straub J, Bäuml W, Alt V, Weber J. The tibial plateau fracture-current incidence and treatment in Germany. *PLOS One*. 2025;20(5):0323443. doi: 10.1371/journal.pone.0323443.
- 61.Liu Z, Wang S, Tian X, Peng A. The relationship between the injury mechanism and the incidence of ACL avulsions in Schatzker type IV tibial plateau fractures: a 3D quantitative analysis based on Mimics software.

- The Journal of Knee Surgery*. 2023;36(6):644–651. doi: 10.1055/s-0041-1740929.
62. Lobenhoffer P. Intra-articular osteotomy for malunion of the tibial plateau. *Operative Orthopädie und Traumatologie*. 2020;32(4):367–384. doi: 10.1007/s00064-020-00671-x.
 63. Lu Y, Bai H, Wang Q, Ren C, Li M, Li Z, Zhang K, Huang Q, Ma T. The study of biomechanics and finite element analysis on a novel plate for tibial plateau fractures via anterolateral supra-fibular-head approach. *Scientific Reports*. 2023;13:13516. doi: 10.1038/s41598-023-40842-x.
 64. Luo CF, Sun H, Zhang B, Zeng BF. Three-column fixation for complex tibial plateau fractures. *J of Orthopaedic Trauma*. 2010;24(11):683–692. doi: 10.1097/BOT.0b013e3181d436f3.
 65. Madeti BK, Chalamalasetti SR, Bollapragada SKSSR. Biomechanics of knee joint – A review. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2014;9(3):214–225. doi: 10.1007/s11465-014-0308-3.
 66. Manidakis N, Dosani A, Dimitriou R, Stengel D, Matthews S, Giannoudis PV. Tibial plateau fractures: functional outcome and incidence of osteoarthritis in 125 cases. *International Orthopaedics*. 2010;34(4):565–570. doi: 10.1007/s00264-009-0790-5.
 67. Markhardt BK, Gross JM, Monu JUV. Schatzker classification of tibial plateau fractures: use of CT and MR imaging improves assessment. *Radiographics*. 2009;29(2):585–597. doi: 10.1148/rg.292085078.
 68. Marsh JL, Buckwalter J, Gelberman R, Dirschl D, Olson S, Brown T, Llinias A. Articular fractures: does an anatomic reduction really change the result? *The J of Bone and Joint Surgery*. 2002;84-A(7):1259–71.
 69. McNamara IR, Smith TO, Shepherd KL, Clark AB, Nielsen DM, Donell S, Hing CB. Surgical fixation methods for tibial plateau fractures. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2015;Is.9:CD009679. doi: 10.1002/14651858.CD009679.pub2.

- 70.Mehin R, O'Brien P, Broekhuysen H, Blachut P, Guy P. Endstage arthritis following tibia plateau fractures: average 10-year follow-up. *Canadian Journal of Surgery*. 2012;55(2):87–94. doi: 10.1503/cjs.003111.
- 71.Menzdorf L, Drenck T, Akoto R, Hartel M, Krause M, Guttowski D, et al. Clinical results after surgical treatment of posterolateral tibial plateau fractures (“apple bite fracture”) in combination with ACL injuries. *European J of Trauma and Emergency Surgery*. 2020;46(6):1239–48. doi: 10.1007/s00068-020-01509-8.
- 72.Molenaars RJ, Mellema JJ, Doornberg JN, Kloen P. Tibial plateau fracture characteristics: computed tomography mapping of lateral, medial, and bicondylar fractures. *The J of Bone and Joint Surgery*. 2015;97-A(18):1512–20. doi: 10.2106/JBJS.N.00866.
- 73.Molenaars RJ, Solomon LB, Doornberg JN. Articular coronal fracture angle of posteromedial tibial plateau fragments: a computed tomography fracture mapping study. *Injury*. 2019;50(2):489–496. doi: 10.1016/j.injury.2018.10.029.
- 74.Moore TM. Fracture-dislocation of the knee. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 1981;156:128–140.
- 75.Moore TM, Patzakis MJ, Harvey JP. Tibial plateau fractures: definition, demographics, treatment rationale, and long-term results of closed traction management or operative reduction. *J of Orthopaedic Trauma*. 1987;1(2):97–119.
- 76.Müller ME, Allgöwer M, Schneider R, Willenegger H. *Manual of Internal Fixation: Techniques Recommended by the AO Group*. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1979. 409 p.
- 77.Naruse K, Takegami Y, Tokutake K, Shimizu K, Sudo Y, Shinohara T, Imagama S. What is the radiographic factor associated with meniscus injury in tibial plateau fractures? Multicenter retrospective (TRON) study.

- Indian Journal of Orthopaedics*. 2023;57(7):1076–82. doi: 10.1007/s43465-023-00888-5.
78. Palmer I. Fractures of the upper end of the tibia. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 1951;33-B(2):160–166.
 79. Papagelopoulos PJ, Partsinevelos AA, Themistocleous GS, Mavrogenis AF, Korres DS, Soucacos PN. Complications after tibia plateau fracture surgery. *Injury*. 2006;37(6):475–484. doi: 10.1016/j.injury.2005.06.035.
 80. Porrino J, Richardson ML, Hovis K, Twaddle B, Gee A. Association of tibial plateau fracture morphology with ligament disruption in the context of multiligament knee injury. *Current Problems in Diagnostic Radiology*. 2018;47(6):410–416. doi: 10.1067/j.cpradiol.2017.09.001.
 81. Prat-Fabregat S, Camacho-Carrasco P. Treatment strategy for tibial plateau fractures: an update. *EFORT Open Reviews*. 2016;1(5):225–232. doi: 10.1302/2058-5241.1.000031.
 82. Rasmussen PS. Tibial condylar fractures. Impairment of knee joint stability as an indication for surgical treatment. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 1973;55-A(7):1331–50.
 83. Ren D, Liu Y, Chen Y, Yang L, Zhou H, Ao Y. A novel design of a plate for posterolateral tibial plateau fractures. *Scientific Reports*. 2018;8:16087. doi: 10.1038/s41598-018-34818-5
 84. Risitano S, Giustra F, Bosco F, Rea A, Cacciola G, Rizzolo R, et al. Tibial plateau fractures are associated with ligamentous and meniscal injuries. Preoperative evaluation of magnetic resonance imaging influences surgical treatment. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*. 2024;50(5):2367–74. doi: 10.1007/s00068-024-02581-0.
 85. Robertson GAJ, Wong SJ, Wood AM. Return to sport following tibial plateau fractures: a systematic review. *World Journal of Orthopedics*. 2017;8(7):574–587. doi: 10.5312/wjo.v8.i7.574.

- 86.Rudran B, Little C, Wiik A, Logishetty K. Tibial plateau fracture: anatomy, diagnosis and management. *British Journal of Hospital Medicine (London)*. 2020;81(10):1–9. doi: 10.12968/hmed.2020.0339.
- 87.Ruffolo MR, Gettys FK, Montijo HE, Seymour RB, Karunakar MA. Complications of high-energy bicondylar tibial plateau fractures treated with dual plating through 2 incisions. *J of Orthopaedic Trauma*. 2015;29(2):85–90. doi: 10.1097/BOT.0000000000000203.
- 88.Ruiz-Ibán MA, Díaz-Heredia J, Garcia-Navarro X, Gomez-Cáceres A, Cañadell J. Repair of meniscal tears associated with tibial plateau fractures: a review of 15 cases. *The American Journal of Sports Medicine*. 2012;40(10):2289–95. doi: 10.1177/0363546512458573.
- 89.Ruiz-Ruvalcaba JJ, Cuevas-Mora CA, Zarate-Ayup ZA. Inestabilidad ligamentaria de rodilla en pacientes postoperados de fractura de meseta tibial Schatzker II-VI. *Orthotips*. 2021;17(3):143–147. doi: 10.35366/100623.
- 90.Sabesan VJ, Danielsky PJ, Childs A, Valikodath T. Multiligament knee injuries with associated tibial plateau fractures: a report of two cases. *World Journal of Orthopedics*. 2015;6(3):363–368. doi: 10.5312/wjo.v6.i3.363.
- 91.Salari P, Busel G, Watson JT. A radiographic zone-based approach to predict meniscus injury in lateral tibial plateau fracture. *Injury*. 2021;52(6):1539–1543. doi: 10.1016/j.injury.2020.10.022.
- 92.Salvato D, Green DW, Accadbled F, Tuca M. Tibial spine fractures: state of the art. *Journal of ISAKOS: Joint Disorders & Orthopaedic Sports Medicine*. 2023;8(6):404–411. doi: 10.1016/j.jisako.2023.06.001.
- 93.Schatzker J. Compression in the surgical treatment of fractures of the tibia. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 1974;105:220–239.
- 94.Schatzker J, Kfuri M. Revisiting the management of tibial plateau fractures. *Injury*. 2022;53(6):2207–18. doi: 10.1016/j.injury.2022.04.006.

- 95.Schatzker J, McBroom R, Bruce D. The tibial plateau fracture: the Toronto experience 1968–1975. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 1979;138:94–104.
- 96.Selvaraj V, Devadoss S, Jayakumar S, Gururagavendra P, Devadoss A. Column specific fixation for complex tibial plateau fractures – Midterm prospective study in South-Indian population. *Injury*. 2020;51(2):497–504. doi: 10.1016/j.injury.2019.10.069.
- 97.Selçuk E, Erem M, Çopuroğlu C, Özcan M, Çiftçdemir M. Comparison of AO, Schatzker, and three-column classification systems in tibial plateau fractures: impact on functional outcomes. *Joint Diseases and Related Surgery*. 2024;35(1):112–120. doi: 10.52312/jdrs.2023.1256.
- 98.Shen X, Liu T, Xu S, Chen B, Tang X, Xiao J, Qin Y. Optimal timing of anterior cruciate ligament reconstruction in patients with anterior cruciate ligament tear: a systematic review and meta-analysis. *JAMA Network Open*. 2022;5(11):2242742. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2022.42742.
- 99.Shires PR. Tibial condylar fractures: the late results of conservative treatment. *Postgraduate Medical Journal*. 1964;40(467):543–548. doi: 10.1136/pgmj.40.467.543.
100. Singleton N, Sahakian V, Muir D. Outcome after tibial plateau fracture: how important is restoration of articular congruity. *Journal of Orthopaedic Trauma*. 2017;31(3):158–163. doi: 10.1097/BOT.0000000000000762.
101. Stahl D, Serrano-Riera R, Collin K, Griffing R, Defenbaugh B, Sagi HC. Operatively treated meniscal tears associated with tibial plateau fractures: a report on 661 patients. *Journal of Orthopaedic Trauma*. 2015;29(7):322–324. doi: 10.1097/BOT.0000000000000290.
102. Gardner MJ, Yacoubian S, Geller D, Suk M, Mintz D, Potter H, Helfet DL, Lorich DG. The incidence of soft tissue injury in operative tibial plateau fractures: a magnetic resonance imaging analysis of 103 patients.

- Journal of Orthopaedic Trauma*. 2005;19(2):79–84. doi: 10.1097/00005131-200502000-00002.
103. Stevenson I, McMillan TE, Baliga S, Schemitsch EH. Primary and secondary total knee arthroplasty for tibial plateau fractures. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*. 2018;26(11):386–395. doi: 10.5435/JAAOS-D-16-00565.
 104. Thürig G, Krause M, Frosch KH, Akoto R. The value of magnetic resonance imaging in the preoperative diagnosis of soft-tissue injuries associated with tibial plateau fractures: a systematic review. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*. 2023;49(3):1311–22. doi: 10.1007/s00068-022-02127-2.
 105. Trumble T, Allan CH, Miyano J, Clark JM, Ott S, Jones DE, et al. A preliminary study of joint surface changes after an intraarticular fracture: a sheep model of a tibia fracture with weight bearing after internal fixation. *Journal of Orthopaedic Trauma*. 2001;15(5):326–332. doi: 10.1097/00005131-200106000-00004.
 106. Ugawa S, Hiyama S, Takahashi T, Yamaguchi N, Yamanaka T, Matsumura T, Takeshita K. Anterior cruciate ligament reconstruction with retained internal fixation hardware for treating Schatzker type V tibial plateau fracture: two case reports. *Trauma Case Reports*. 2023;46:(100845). doi: 10.1016/j.tcr.2023.100845.
 107. Volpin G, Dowd G, Stein H, Bentley G. Degenerative arthritis after tibial plateau fractures. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 1990;72-B(4):634–638.
 108. Wahlquist M, Iagguilli N, Ebraheim N, Levine J. Medial tibial plateau fractures: a new classification system. *Journal of Trauma*. 2007;63(6):1418–21. doi: 10.1097/TA.0b013e3181469df5.

109. Wang LJ, Zeng N, Yan ZP, Li JT, Ni GX. Post-traumatic osteoarthritis following anterior cruciate ligament injury. *Arthritis Research & Therapy*. 2020;22(1):57. doi: 10.1186/s13075-020-02156-5.
110. Warner SJ, Garner MR, Schottel PC, Fabricant PD, Thacher RR, Loftus ML, et al. The effect of soft tissue injuries on clinical outcomes after tibial plateau fracture fixation. *Journal of Orthopaedic Trauma*. 2018;32(3):141–7. doi: 10.1097/BOT.0000000000001042.
111. Wasserstein D, Henry P, Paterson JM, Kreder HJ, Jenkinson R. Risk of total knee arthroplasty after operatively treated tibial plateau fracture: a matched population-based cohort study. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2014;96-A(2):144–150. doi: 10.2106/JBJS.L.01691.
112. Xie X, Zhan Y, Wang Y, Lucas JF, Zhang Y, Luo C. Comparative analysis of mechanism-associated 3-dimensional tibial plateau fracture patterns. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2020;102-A(5):410–418. doi: 10.2106/JBJS.19.00485.
113. Yan B, Sun J, Yin W. The prevalence of soft tissue injuries in operative Schatzker type IV tibial plateau fractures. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2021;141(8):1269–75. doi: 10.1007/s00402-020-03533-0.
114. Yao X, Xu Y, Yuan J, Wang L, Fu X, Lv B, et al. Classification of tibial plateau fracture according to the “four-column and nine-segment” classification. *Injury*. 2018;49(12):2275–83. doi: 10.1016/j.injury.2018.09.031.
115. Young MJ, Barrack RL. Complications of internal fixation of tibial plateau fractures. *Orthopaedic Review*. 1994;23(2):149–154.
116. Yu C, Duan X, Gou Y, Liu K, Zhao W, Gao X, et al. A review of finite element modeling and surgical simulation of meniscal tear in knee joint: progress and challenges. *Frontiers in Medicine*. 2025;12:1661943. doi: 10.3389/fmed.2025.1661943.

117. Zhang J, Chen B, Chen B, Wang H, Han Q, Tang X, Qin Y. Clinical application of finite element analysis in meniscus diseases: a comprehensive review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2025. doi: 10.1007/s11831-025-10265-0.
118. Zhang Y, Wang R, Hu J, Qin X, Chen A, Li X. Magnetic resonance imaging (MRI) and computed tomography (CT) analysis of Schatzker type IV tibial plateau fracture revealed possible mechanisms of injury beyond varus deforming force. *Injury*. 2022;53(2):683–690. doi: 10.1016/j.injury.2021.09.041.
119. Zhu Y, Yang G, Luo CF, Smith WR, Hu CF, Gao H, et al. Computed tomography-based three-column classification in tibial plateau fractures: introduction of its utility and assessment of its reproducibility. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*. 2012;73(3):731–737. doi: 10.1097/TA.0b013e31825c17e7.
120. Бур'янов ОА, Кваша ВП, Скобенко ЄО. Оптимізація лікування переломів проксимального епіметафізу великогомілкової кістки. *Літопис травматології та ортопедії*. 2012;1–2:152–156.
121. Кваша ВП, Гліба ГГ. Сучасні принципи хірургічного лікування переломів проксимального епіметафізу великогомілкової кістки. *Травма*. 2025;26(1):64–70. doi: 10.22141/1608-1706.1.26.2025.999.