

Гайко Г.В., Галузинський О.А., Бурбурська С.В.
ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна

Використання 3D-моделювання з виготовленням пластикового прототипу в травматології та ортопедії (клінічні приклади)

Резюме. Проведено аналіз ефективності та оцінку діагностичної цінності використання адитивних технологій при доопераційній підготовці хворих із ортопедо-травматологічною патологією. Матеріалом дослідження було 3D-моделювання та виготовлення пластикових прототипів у лабораторії медичного 3D-друку ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» в 45 пацієнтів відповідного медичного профілю. Визначено високу діагностичну цінність 3D-моделювання та прототипування в доопераційній підготовці хворих із різною ортопедо-травматологічною патологією. Використання адитивних технологій дало можливість досягти добрих і відмінних функціональних результатів у всіх 45 обстежених хворих у ранньому післяопераційному періоді, що доводить високу ефективність 3D-моделювання та прототипування й може бути рекомендовано як незамінний метод при підготовці до складних реконструктивних ортопедо-травматологічних втручань.

Ключові слова: комп'ютерне 3D-моделювання; пластикові прототипи; діагностична цінність; доопераційна підготовка хворих; ортопедо-травматологічна патологія

Вступ

Сьогодні розвиток медичної науки в цілому і зокрема травматології та ортопедії характеризується інтеграцією, технічними інноваціями з метою підвищення точності, ефективності лікувально-діагностичного процесу, а також оптимізації роботи системи охорони здоров'я [3]. Одним із досягнень сучасної науки в галузі програмного забезпечення є автоматизовані комп'ютерні системи, що досить успішно впроваджуються в аерокосмічній галузі та багатьох інших видах надточного виробництва. Система автоматизованого проектування у наш час активно застосовується в різних сферах економічної діяльності [1, 2].

3D-друк в охороні здоров'я — поки відносно невеликий ринок: у 2014 році його обсяг становив, за оцінкою компанії Visiongain, \$825 млн. Але до 2019 року він зростає майже вчетверо — до \$2,9 млрд [7]. Інша аналітична компанія, Industy ARC, вважає, що в 2014-му обсяг ринку дорівнював \$487 млн, і ця цифра була рекордною, а до 2020-го вона буде збільшуватися на 18,3 % щорічно з одночасним зниженням ціни тех-

нології і матеріалів. Найактивніше розвиватимуться технології 3D-друку для виготовлення ортопедичних, черепних і щелепно-лицьових імплантів, як очікують аналітики Visiongain [7].

Натепер адитивні (3D) технології активно впроваджуються у повсякденну медичну практику. 3D-моделювання та прототипування застосовуються в різних галузях хірургії при плануванні та виконанні оперативних втручань. В ортопедії ця технологія з'явилася в 1990 році, коли при ендопротезуванні колінного суглоба був використаний виготовлений методом 3D-друку індивідуальний шаблон з орієнтирами для проведення гвинтів [5, 10, 11]. Відтоді у зарубіжній літературі все частіше згадується про застосування індивідуальних шаблонів для навігації при хірургічних втручаннях на різних кістках скелета. У наш час в ортопедії та травматології перспективними є такі напрямки адитивних технологій [4]:

- 3D-моделювання з виготовленням пластикового прототипу;
- індивідуальне ортезування та протезування на основі 3D-сканування частин тіла;

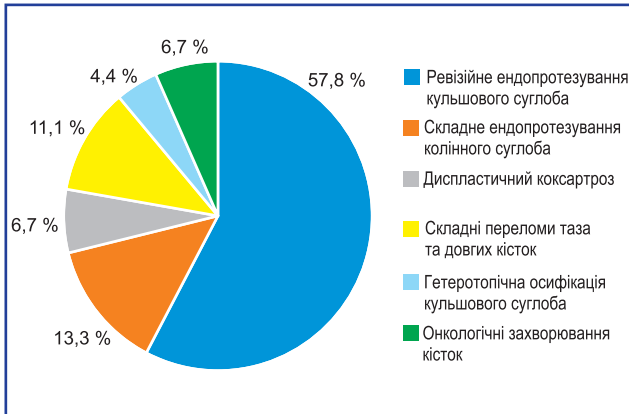


Рисунок 1. Спектр ортопедо-травматологічної патології хворих, в яких у доопераційному періоді застосовували адитивні технології

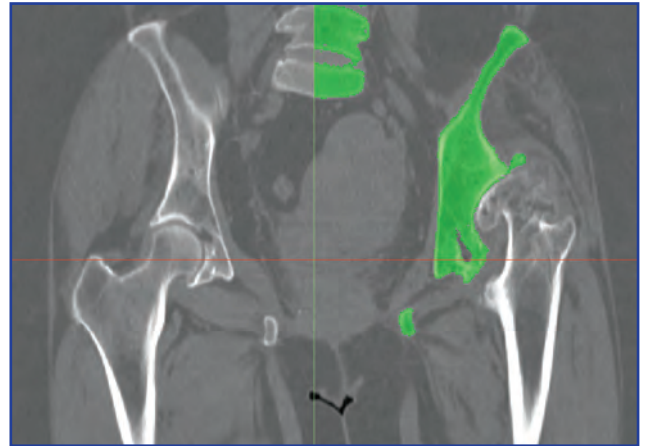


Рисунок 2. Вигляд зображення комп'ютерної томографії лівого кульшового суглоба після обробки на першому етапі

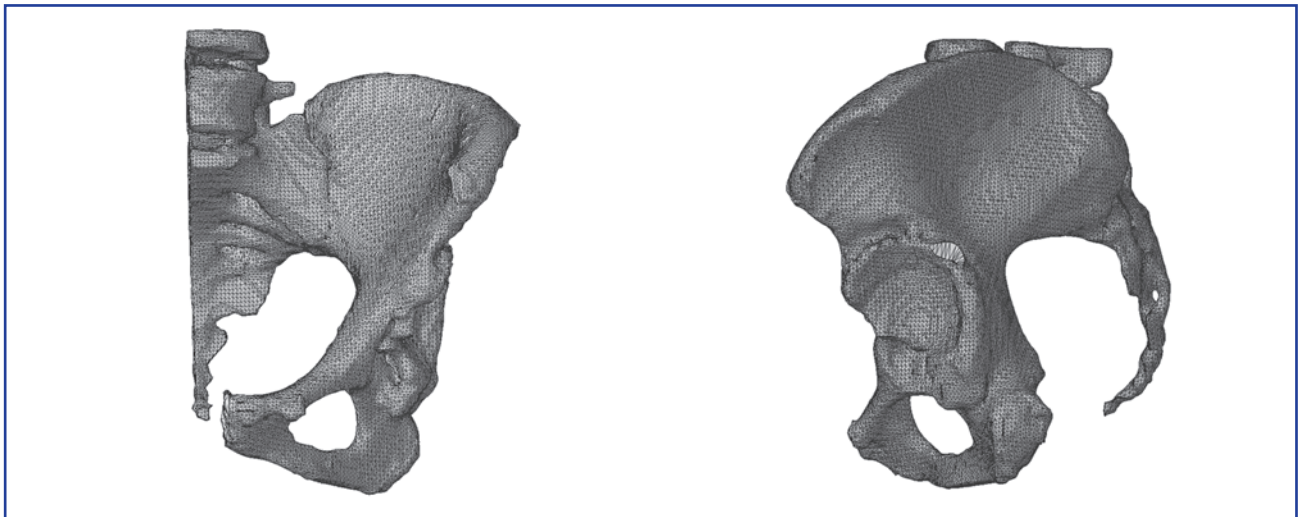


Рисунок 3. Вигляд 3D-моделі лівого кульшового суглоба в форматі STL

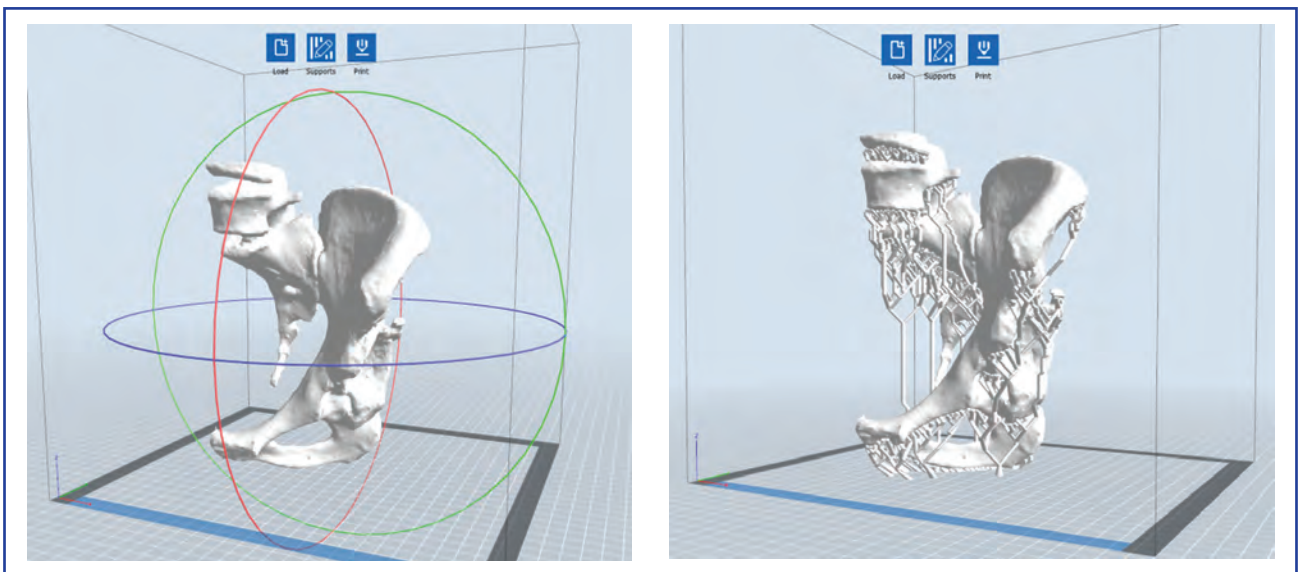


Рисунок 4. Вигляд 3D-моделі лівого кульшового суглоба в програмі Autodesk NetFabb

— виготовлення індивідуальних металофіксаторів і кастомних ендопротезів (3D-друк титаном);

— біопринтинг — вирощування тканин та органів із застосуванням стовбурових клітин.

Отже, розробка нових і впровадження відомих методик 3D-моделювання та прототипування в комплексі діагностичних заходів при травматологічній та ортопедичній патології — перспективний напрямок, що є цікавим як з наукової, так і з практичної точки зору. В лабораторії 3D-друку ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» широко використовують технологію виготовлення пластикових прототипів при різній ортопедичній і травматологічній патології. Викликав інтерес аналіз досвіду роботи даної лабораторії з визначенням діагностичної цінності використання адитивних технологій у доопераційній підготовці хворих ортопедично-травматологічного профілю.

Мета роботи — визначити діагностичну цінність використання адитивних технологій при доопераційній підготовці хворих із ортопедо-травматологічною патологією.

Матеріали та методи

Протягом 2018 року в лабораторії медичного 3D-друку ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» виконано 3D-моделювання та виготовлення пластикових прототипів у 45 пацієнтів. Спектр ортопедо-травматологічної патології, де були застосовані адитивні технології, поданий на рис. 1. Найчастіше 3D-моделювання використовували у випадках складного ревізіяного ендопротезування кульшового суглоба (57,8 %). 3D-моделювання знайшло своє місце в комплексній доопераційній підготовці хворих при складному ендопротезуванні колінного суглоба (13,3 %), складних переломах таза та довгих кісток (11,1 %), диспластичному коксартрозі, онкологічних захворюваннях кісток — по 6,7 %, гетеротопічній осифікації кульшового суглоба — 4,4 %.

Усім категоріям хворих у доопераційному періоді було виконано стандартні рентгенограми та комп'ютерну томографію уражених сегментів з метою побудови тривимірної моделі та пластикового прототипу ураженого сегмента.

Першим етапом створення фізичної 3D-моделі є обробка двовимірних зображень КТ- та МРТ-сканування (рис. 2). Аналіз, очищення артефактів відбувається на кожному зрізі та в трьох площинах конкретного дослідження, отриманого за допомогою променевої діагностики, що зумовлює додатковий аналіз кожного зрізу спеціалістом ортопедом-травматологом та високу точність у побудові тривимірної моделі зображення. Для забезпечення високої точності кінцевого прототипу необхідно мати якісні вхідні дані КТ- та МРТ-зображень.

Для обробки двовимірних зображень використовується спеціалізоване програмне забезпечення. Найбільш поширеним форматом введення даних

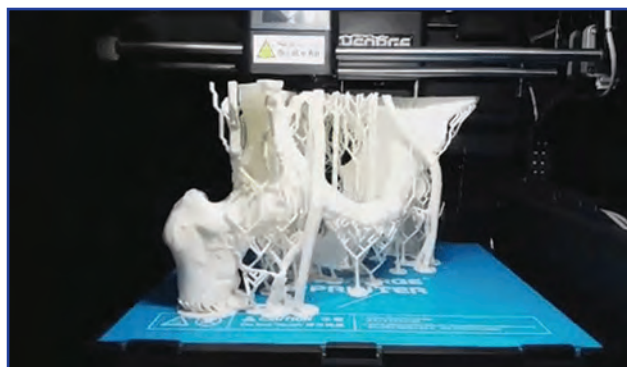


Рисунок 5. Процес 3D-друку кісток таза

для цих програм є DICOM, але також підтримуються інші формати зображень, такі як TIFF, JPEG, BMP і RAW. Оброблене зображення зберігається в будь-якому з форматів вихідних файлів залежно від подальшого застосування: STL, VRML, PLY і DXF. Основний формат файлів для тривимірного друку (далі 3D-друк) — STL (рис. 3).

Другим етапом є експорт збереженого файлу в форматі STL у програму Autodesk NetFabb (рис. 4), в якій проводиться автоматичне й ручне виправлення та редагування 3D-моделі. Поверхня об'єктів у цьому форматі являє собою сукупність полігонів (Polygon mesh). Інтелектуальні скрипти можуть автоматично аналізувати поверхні, виправляти помилки сіток, покращувати точність моделей шляхом повторної триангуляції, усувати просторові колізії та інші помилки. Програма дає можливість спрогнозувати можливі спотворення, що виникають у виробництві. На підставі цього інженер може скорегувати вихідний дизайн таким чином, щоб уникнути помилок під час 3D-друку.

Третім етапом є переведення готової 3D-моделі у програму «слайсер», яка безпосередньо підходить до самого 3D-принтера, в нашому випадку Flash Print. Flash Print — це програма для перетворення тривимірної моделі в зрозумілий принтеру набір команд, званий g-code. На цьому етапі встановлюються кінцеві дані для 3D-друку, а саме: задають положення деталі під час друку, розраховується тип та кількість підтримок, задають щільність заповнення моделі, обирають оптимальну швидкість та температуру для друку.

Принтер друкує пластиковий прототип кістки в натуральну величину. Процес триває від кількох годин до однієї доби. Даний вид пластику легко обробляється фрезами та іншими хірургічними інструментами, що дає змогу примірити вибрану імплантатну систему.

Друк прототипу виконувався на 3D-принтері Flash Forge Guider II з ABS-пластику (рис. 5).

У 3 хворих (онкологічні захворювання кісток), за вимогою оперуючих хірургів, виконано друк ураженого сегмента кістки разом із судинами, після їх попереднього контрастування при виконанні КТ.

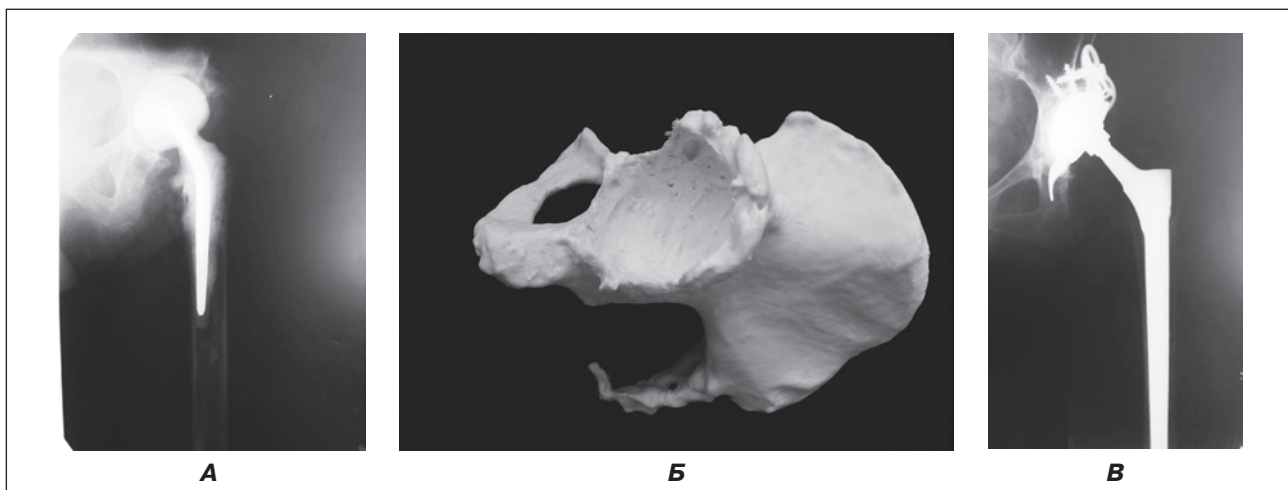


Рисунок 6. Рентгенограма лівого кульшового суглоба хворої В. із дефектами головки та шийки лівої стегнової кістки станом після ФНЕ лівого кульшового суглоба та установки спейсера (А); пластиковий прототип кульшової западини: виявлено дефекти ІІВ за W.G. Paprosky [9] (Б); рентгенографія після оперативного втручання: видалення спейсера, ревізійне ендопротезування лівого кульшового суглоба протезом Zimmer Burchnaimer dual/Wagner. Кісткова алопластика дефектів западини та проксимального відділу стегнової кістки (В)

З метою визначення ефективності виконання оперативних втручань хворі з нестабільністю компонентів ендопротезу кульшового суглоба, диспластичними коксартрозами, гетеротопічною осифікацією кульшового суглоба, яким у доопераційному періоді виконувалось 3D-моделювання та друк пластикового прототипу, були обстежені в доопераційному та ранньому післяопераційному періоді клінічно за класифікацією W.H. Harris [6]. У всіх пацієнтів цієї категорії відзначали негативний результат цієї оцінки (діапазон 46–56 балів) у доопераційному періоді. Ознаками ефективності хірургічного лікування у хворих із складними переломами таза та довгих кісток були

наявність консолидації переломів, відновлення опороздатності та функції уражених кінцівок. У хворих, яким виконувалось складне ендопротезування колінного суглоба, для оцінки ефективності використовували альгофункційний індекс стану колінного суглоба за M.G. Lequesne [8]. У всіх пацієнтів цієї групи відмічали негативний результат цієї оцінки (діапазон 8–11 балів) у доопераційному періоді. У хворих із онкологічними захворюваннями кісток критеріями ефективності оперативного лікування вважали відсутність інтраопераційних (порушення іннервації й ушкодження судин) і ранніх післяопераційних ускладнень, відновлення опороздатності та функції уражених кінцівок.

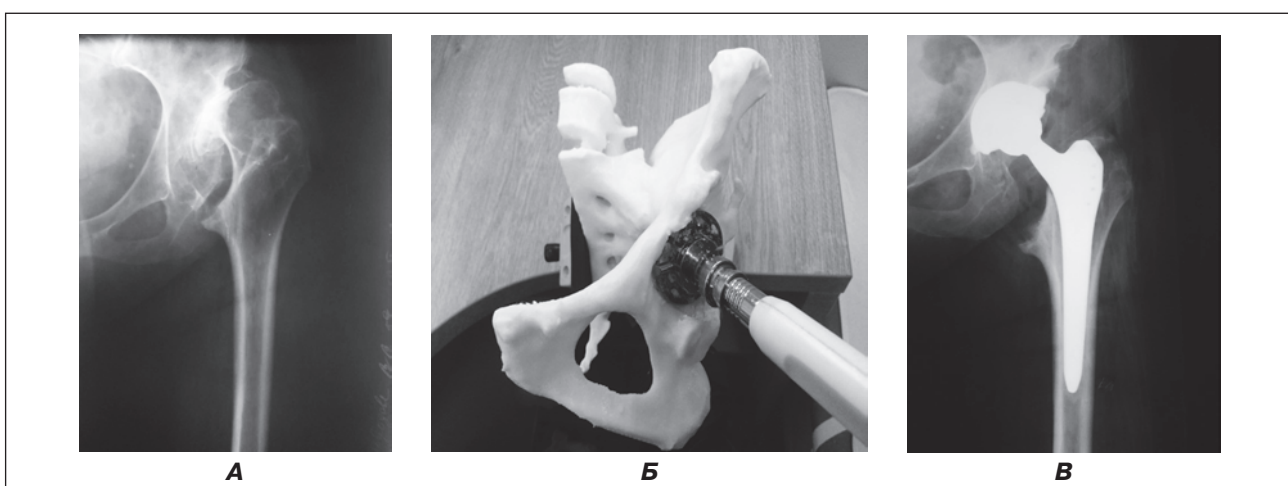


Рисунок 7. Рентгенограма лівого кульшового суглоба хворої Н. з диспластичним коксартрозом ІV ст. (А); пластиковий прототип кульшової западини: виявлено дефекти ІІА за W.G. Paprosky [9], виконана передопераційна примірка фрезами (Б); рентгенографія після оперативного втручання: тотальне ендопротезування лівого кульшового суглоба протезом Biomet Mellory head/Zimmer Alloclassic (В)

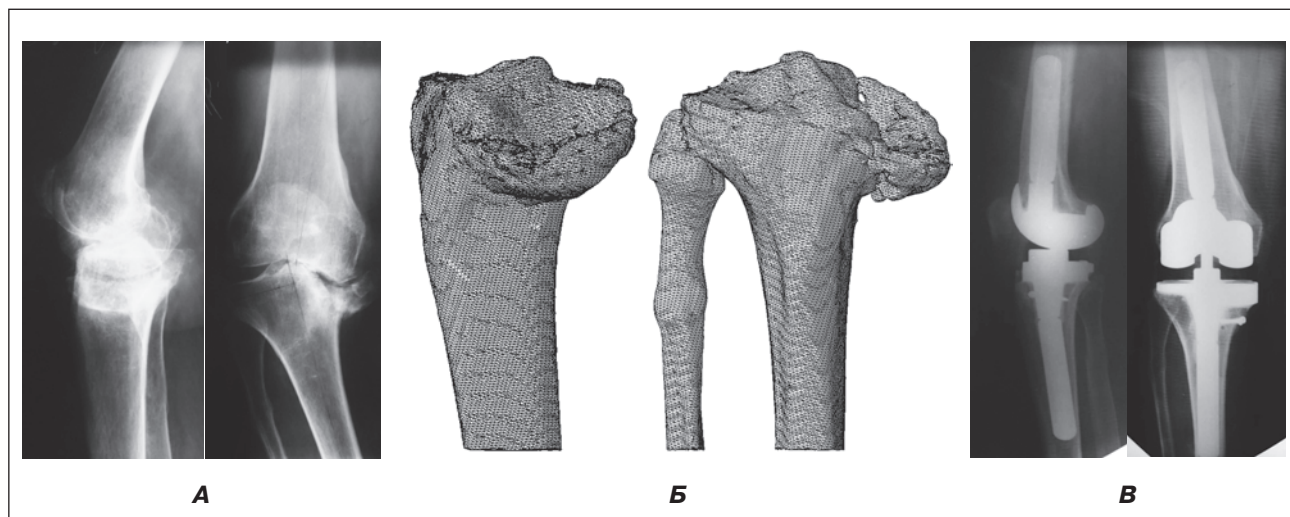


Рисунок 8. Рентгенограма правого колінного суглоба хворої М. з посттравматичним гонартрозом IV ст., варусною деформацією колінного суглоба (А); 3D-модель ураженого сегмента, визначений рівень потрібної резекції (Б); рентгенографія після оперативного втручання: тотальне ендопротезування правого колінного суглоба протезом Zimmer LCSK, використаний аугмент медіального виростка великогомілкової кістки (В)

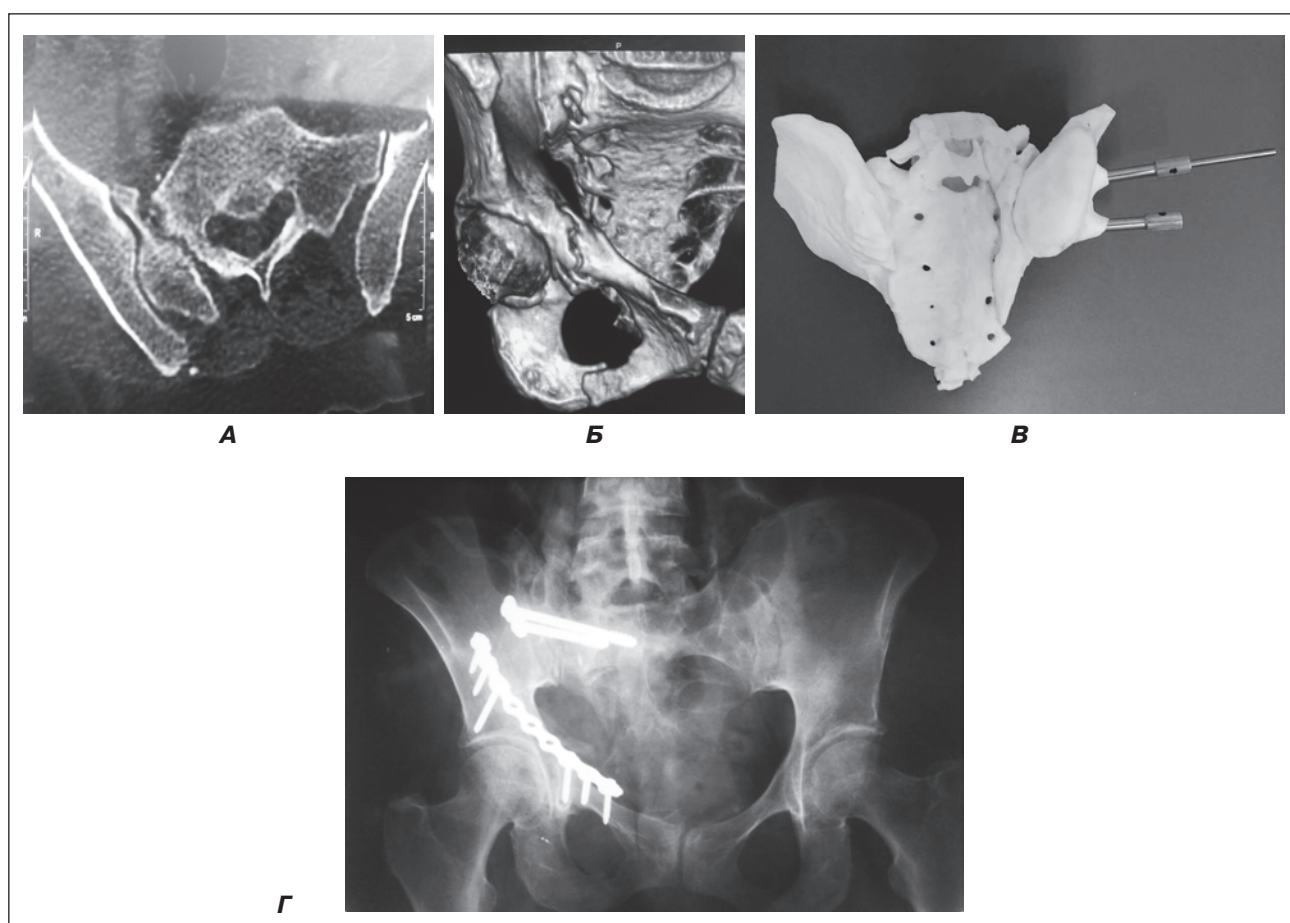


Рисунок 9. Комп'ютерна томографія (А) та 3D-реконструкція (Б) застарілого перелому бокової маси крижової кістки, переломів лонної та сідничної кісток хворого Л.; пластиковий прототип з індивідуальною навігаційною системою для остеосинтезу крижової кістки гвинтами (В); рентгенографія після оперативного втручання: МОС бокової маси крижової кістки гвинтами, лонної кістки пластиною з гвинтами (Г)

Результати та обговорення

Найчастіше пластикові моделі застосовувались у процесі передопераційної підготовки до складного та ревізійного ендопротезування кульшового суглоба (рис. 6). Ця технологія дає можливість оцінити розміри дефектів, точно підібрати ревізійну систему, визначити доцільність використання аугментів або кісткової пластики.

Пластик моделі можна обробляти фрезами. У разі необхідності його можна простерилізувати та взяти в операційну. На рис. 7 подано рентгенографію хворої до оперативного втручання (А), підготовку макета кульшової западини при диспластичному коксартрозі (Б) та результат ендопротезування кульшового суглоба (В).

Використання з метою визначення характеристик (локалізація, величина) дефектів кульшової западини чи проксимального відділу стегнової кістки та можливість примірки імплантаційної системи в передопераційному періоді хворих із нестабільністю компонентів ендопротезу кульшового суглоба, диспластичними коксартрозами, гетеротопічною осифікацією кульшового суглоба пластикового прототипу

дозволило зменшити час оперативного втручання, інтраопераційну крововтрату та добитися добрих функціональних результатів. У післяопераційному періоді показники бальної оцінки за W.H. Harris [6] у 20 пацієнтів відмінні, в 11 — добрі. Строк спостереження становив 1 рік.

Приклад складного ендопротезування колінного суглоба подано на рис. 8. У доопераційному періоді визначено рівень потрібної резекції тібіального плато та необхідність застосування аугменту медіального виростка великогомілкової кістки.

Проведення в доопераційному періоді ретельного обстеження суглоба з використанням адитивних технологій у хворих, які готувалися до складного ендопротезування колінного суглоба, дозволило досягти добрих функціональних результатів у ранньому післяопераційному періоді. Показники альгофункціонального індексу за M.G. Lequesne [8] у цієї категорії хворих були в діапазоні 2–3 балів. Строк спостереження — 1 рік.

Ще одним важливим сегментом застосування 3D-моделювання та прототипування є його вико-

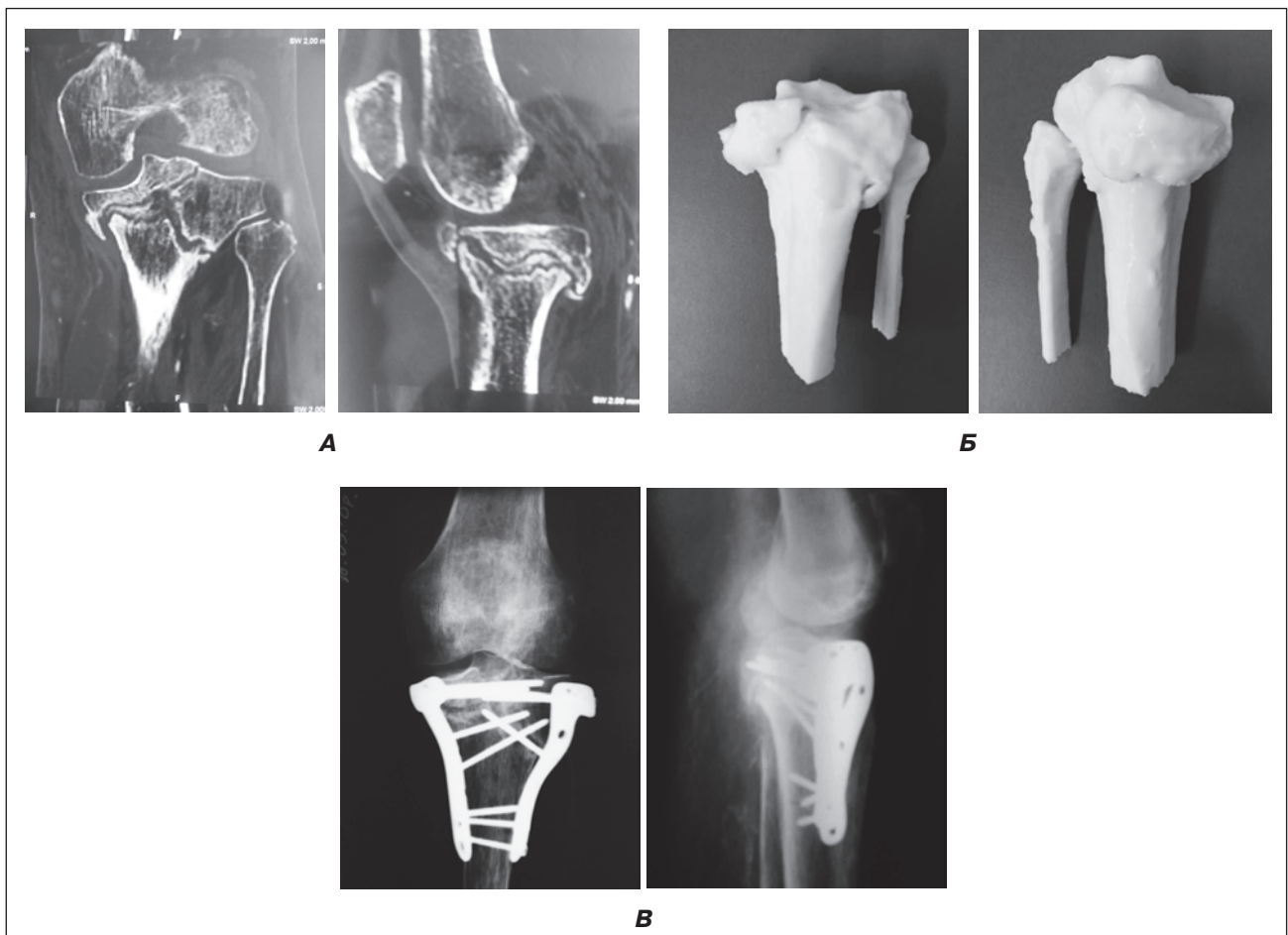


Рисунок 10. Рентгенограми хворої С. із застарілим уламковим переломом проксимального епіметафіза лівої великогомілкової кістки зі зміщенням уламків (А); пластиковий прототип ураженого сегмента (Б); рентгенографія після оперативного втручання: відкрита репозиція, МОС проксимального відділу лівої великогомілкової кістки пластинами, гвинтами. Кісткова автопластика (В)

ристання при складних внутрішньосуглобових переломах кісток (рис. 9, 10). Пластиковий прототип дозволяє максимально точно оцінити характер перелому та спланувати оперативне втручання. Пластик добре обробляється інструментами. Ми можемо ідеально підібрати фіксатори, вигнути їх, ніби виконати операцію до операції. Це значно скорочує час оперативного втручання та зменшує кількість можливих ускладнень. Прикладом цього може бути рис. 9: у хворого із застарілим переломом бокової маси крижової кістки, переломом лонної та сідничної кісток (А) ми виготовили з термопластика та застосували в операційній індивідуальну навігаційну систему для остеосинтезу крижової кістки гвинтами (Б). Із звичайним інтраопераційним ЕОПом досягти коректного введення гвинтів в умовах спотвореної анатомії було б досить складним завданням.

Використання сучасних адитивних технологій дозволило в 100 % (3 випадки — переломи кісток таза та 2 випадки — внутрішньосуглобові переломи дов-

гих кісток) досягти консолідації переломів із відновленням опороздатності та функції ураженого сегмента.

Існує можливість друкувати кістки разом із судинами, після їх попереднього контрастування при виконанні КТ.

В онкології 3D-друк дозволяє визначити рівень резекції пухлини та оцінити можливість ушкодження судин під час операції. На рис. 11 подано прототип плечової кістки, ураженої метастазом раку нирки. На прохання хірургів візуалізовано плечову артерію.

Використання адитивних технологій з методикою друку судин після їх попереднього контрастування у хворих з онкологічними захворюваннями кісток (3 випадки) дозволило запобігти судинним і неврологічним ускладненням під час оперативного втручання, відновити опороздатність та функцію ураженої кінцівки всіх прооперованих хворих. Строк спостереження — 6 місяців.

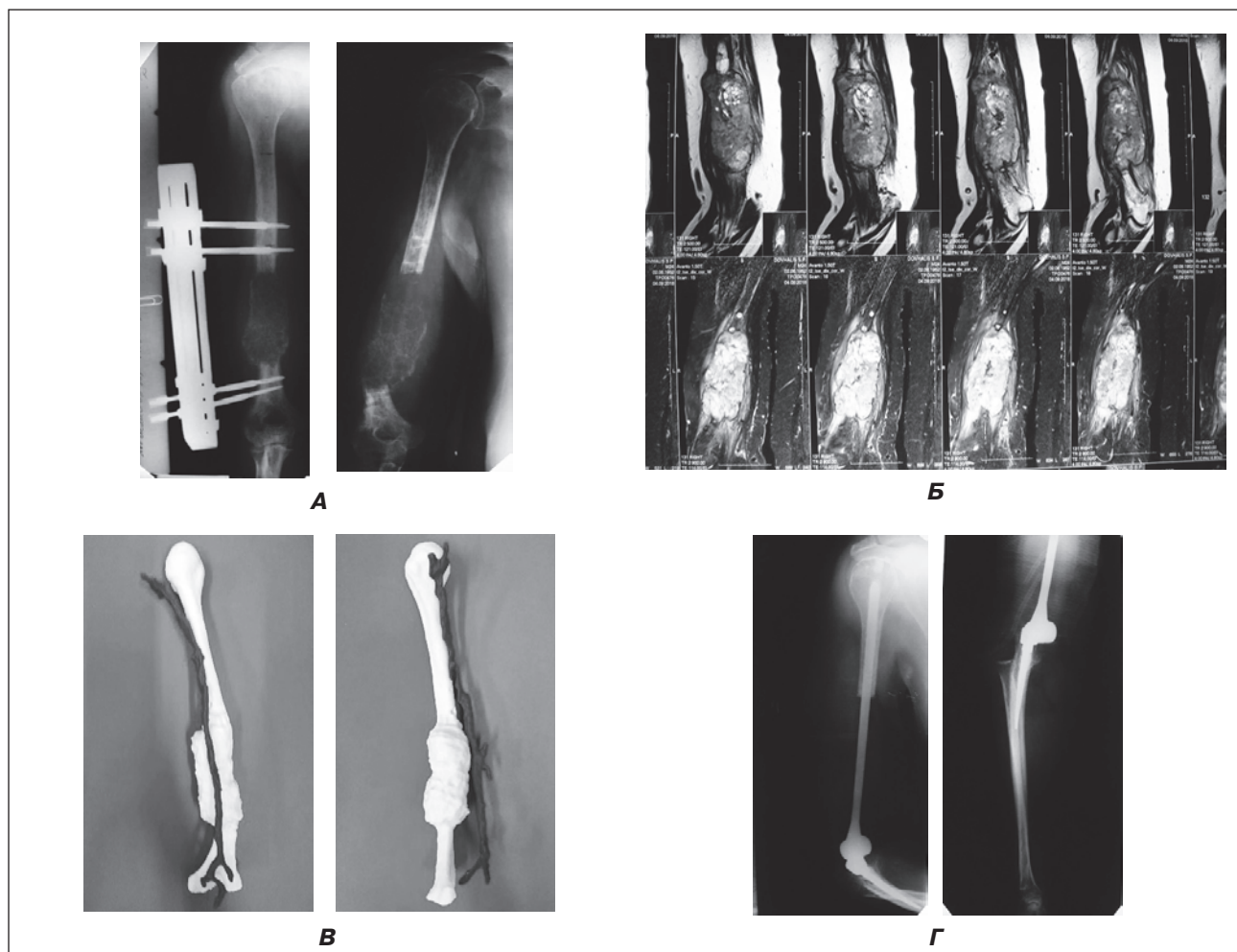


Рисунок 11. Рентгенограми (А) та комп'ютерна томографія (Б) хворої Н. з метастазом с-г нирки (нефректомія в 2004 р.) у праву плечову кістку, патологічним переломом, 2 кл. гр., станом після МОС АЗФ, хіміопроменевої терапії; пластиковий прототип правої плечової кістки з виділеною плечовою артерією (В); рентгенографія після оперативного втручання: резекція н/3 плечової кістки, індивідуальне тотальне цементне ендопротезування правого ліктьового суглоба протезом Beznoska (Г)

Отже, наше дослідження доводить високу діагностичну цінність 3D-моделювання та прототипування в доопераційній підготовці хворих із різною ортопедо-травматологічною патологією. Використання адитивних технологій дозволило досягти добрих і відмінних функціональних результатів у всіх 45 обстежених хворих у ранньому післяопераційному періоді, що доводить його високу ефективність та може бути рекомендовано як незамінний метод при підготовці до складних реконструктивних ортопедо-травматологічних втручань.

Щодо перспектив відносно розширення спектра ортопедичної патології, де застосовуються адитивні технології, вже сьогодні нагальною потребою вважаємо виготовлення пластикових прототипів при ранніх стадіях асептичного некрозу головки стегнової кістки та підготовці до її тунелізації, багатоплощинних деформаціях кінцівок, при підготовці до остеотомій тощо.

Висновки

1. Проведене дослідження визначило високу діагностичну цінність використання адитивних технологій при доопераційній підготовці хворих із різною ортопедо-травматологічною патологією.

2. 3D-моделювання та виготовлення пластикового прототипу дозволяє підібрати оптимальну конструкцію імплантів та визначити їх правильне просторове розташування під час підготовки до оперативного втручання, скоротити час оперативного втручання, зменшити кількість інтраопераційних ускладнень.

3. Ця технологія може бути рекомендована до впровадження в центри, які займаються ревізійним і складним ендопротезуванням, остеосинтезом та онкоортопедією.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів при підготовці даної статті.

Список літератури

1. Боев В.Д. Компьютерное моделирование / В.Д. Боев, П.П. Сытченко. — М.: ИНТУИТ. РУ, 2010. — 349 с.
2. Королев А.Л. Компьютерное моделирование / А.Л. Королев. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010. — 232 с.
3. 3D-Printed Biopolymers for Tissue Engineering Application / Xiaoming LI., Rongrong C., Lianwen S. et al. // *International Journal of Polymer Science*. — 2014. — Article: ID 829145.
4. Application of the polystyrene model made by 3D-printing rapid prototyping technology for operation planning in revision lumbar discectomy / Li C., Yang M., Xie Y. et al. // *J. Orthop. Sci.* — 2015. — № 20. — P. 475-480.
5. Docquier P.L. Surgical navigation in paediatric orthopaedics / P.L. Docquier, L. Paul, V. Tran Duy // *EFORT Open Rev.* — 2016. — № 1. — P. 152-159.
6. Harris W.H. Traumatic arthritis of the hip after dislocation and acetabular fractures treatment by mold arthroplasty. An end result study using a new method of result evaluation / W.H. Harris // *J. Bone Jt. Surg.* — 1969. — Vol. 51-A. — P. 737-743.
7. https://www.rbc.ru/own_business/24/12/2015/567a88529a794778d2f8bae4
8. Indexes of severity for osteoarthritis of the hip and knee. Validation-value in comparison with other assessment tests / Lequesne M.G., Mery C., Samson M., Gerard P. // *Scand. J. Rheumatol. Suppl.* — 1987. — Vol. 65. — P. 85-89.
9. Paprosky W. Acetabular defect classification and surgical reconstruction in revision arthroplasty: a 6-year follow-up evaluation / W. Paprosky, P. Perona, J. Lawrence // *J. Arthroplasty.* — 1994. — Vol. 9. — P. 33-44.
10. The current status and future prospects of computer-assisted hip surgery / Inaba Y., Kobayashi N., Ike H. et al. // *Journal of Orthopaedic Science.* — 2016. — Vol. 21, № 2. — P. 107-115.
11. Userguided 3D-active contour segmentation of anatomical structures: significantly improved efficiency and reliability / Yushkevich P.A., Piven J., Hazlett H.C. et al. // *Neuroimage.* — 2006. — Vol. 31, № 31. — P. 116-1117.

Отримано 30.11.2018 ■

Гайко Г.В., Галузинский О.А., Бурбурская С.В.
ГУ «Институт травматологии и ортопедии НАМН Украины», г. Киев, Украина

Использование 3D-моделирования с изготовлением пластиковых прототипов в травматологии и ортопедии (клинические примеры)

Резюме. Проведены анализ эффективности и оценка диагностической ценности использования адитивных технологий при дооперационной подготовке больных с ортопедо-травматологической патологией. Материалом исследования было 3D-моделирование и изготовление пластиковых прототипов в лаборатории медицинской 3D-печати ГУ «Институт травматологии и ортопедии НАМН Украины» у 45 пациентов соответствующего медицинского профиля. Определена высокая диагностическая ценность 3D-моделирования и прототипирования в дооперационной подготовке больных с различной ортопедо-травматологической патологи-

ей. Использование адитивных технологий позволило достичь хороших и отличных функциональных результатов у всех 45 обследованных больных в раннем послеоперационном периоде, что доказывает высокую эффективность 3D-моделирования и прототипирования, а методика может быть рекомендована как незаменимый метод при подготовке к сложным реконструктивным ортопедо-травматологическим вмешательствам.

Ключевые слова: компьютерное 3D-моделирование; пластиковые прототипы; диагностическая ценность; дооперационная подготовка больных; ортопедо-травматологическая патология

H.V. Haiko, O.A. Haluzynskyi, S.V. Burburska

State Institution "Institute of Traumatology and Orthopaedics of the NAMS of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Using 3D modeling with the manufacture of plastic prototypes in traumatology and orthopedics (clinical examples)

Abstract. Background. The analysis of the effectiveness and evaluation of the diagnostic value of the use of additive technologies in the preoperative preparation of patients with orthopedic and trauma pathology were carried out. **Materials and methods.** The research material was 3D modeling and production of plastic prototypes in the laboratory of medical 3D printing of the Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine in 45 patients of the corresponding medical profile. **Results.** The conducted research proves the high diagnostic value of 3D modeling and prototyping in the surgical preparation of patients with different orthopedic and traumatic pathology. The use of additive technologies has allowed achieving good and excellent functional results in all 45 patients in the early postoperative period, which proves its high efficiency and can be recommended as an indispensable method in preparing for complex reconstructive orthopedic and traumatic interventions. With regard to the prospects for the expansion of the spectrum of orthopedic pathology, where additive

technologies are used, the urgent need is the production of plastic prototypes in the early stages of aseptic necrosis of the femoral head and the preparation for its tunneling, multiplane deformations of the limbs in preparation for osteotomy, etc. **Conclusions.** The conducted research has determined the high diagnostic value of the use of additive technologies in the surgical preparation of patients with different orthopedic and traumatic pathology. 3D simulation and manufacturing of a plastic prototype allows you to choose the optimal design of implants and determine their correct spatial location during the preparation for surgical intervention, reduce the time of surgical intervention, reduce the number of intraoperative complications. This technology can be recommended for implementation in the centers involved in revision and complex endoprosthetics, osteosynthesis and oncorthopedics.

Keywords: computer 3D modeling; plastic prototypes; diagnostic value; preoperative training of patients; orthopedic and traumatic pathology