

Модифицированная техника периацетабулярной остеотомии с использованием системы навигационных устройств, изготовленных с применением аддитивных технологий

Д.Г. Плиев¹, В.С. Черкасов², А.Н. Коваленко¹, Г.А. Айрапетов^{2,3,4}

¹Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена, Санкт-Петербург

²Городская клиническая больница № 31 им. акад. Г.М. Савельевой, Москва

³Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва

⁴Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии

Modified periacetabular osteotomy technique utilizing a system of navigation devices fabricated using additive manufacturing

D. Pliev¹, V. Cherkasov², A. Kovalenko¹, G. Ayrapetov^{2,3,4}

¹R.R. Vreden National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, St. Petersburg

²City Clinical Hospital No. 31 named after acad. G.M. Savelyev, Moscow

³Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow

⁴St. Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology

© Коллектив авторов, 2025 г.

Резюме

Введение. Успех при проведении периацетабулярной остеотомии (ПАО) тесно связан с навыками хирурга и необходимостью интраоперационного рентген-контроля, что увеличивает риск ошибок и лучевую нагрузку, особенно в ходе освоения хирургом данной методики. Аддитивные технологии предлагают потенциал для повышения точности, но их применение при ПАО ранее не изучалось. **Цель:** оценить точность коррекции вертлужной впадины и частоту осложнений после проведения ПАО, модифицированной использованием системы индивидуальных навигационных устройств. **Материалы и методы.** В проспективное исследование включено 39 пациентов (40 тазобедренных суставов)

моложе 45 лет с симптоматической дисплазией (значение угла Wiberg менее 25°, значение угла Tonnis более 10°, значение индекса экструзии головки бедренной кости более 30% или индекса ретроверсии более 30%). На этапе предоперационного планирования создавались 3D-модели костей таза пациентов, проектировались два индивидуальных устройства для остеотомии и позиционирования ацетабулярного фрагмента. Операции выполнялись без интраоперационного использования рентгенологического оборудования. Периоперационная оценка включала КТ и рентгенографию, где проводилось измерение углов (Wiberg, AcetAV и др.), а также проводился анализ периоперационных осложнений. **Результаты исследования.**

Расхождение послеоперационных значений углов Wiberg и AcetAV с планируемыми составило $2,3^\circ$ (IQR: 1,2–4,0) и $1,7^\circ$ (IQR: 0,5–4,4) соответственно. Частота осложнений — 27,5%, самое частое осложнение — нейропатия латерального кожного нерва бедра — 22,5%. Ошибки коррекции отмечены в 7,5% случаев (гиперкоррекция). Длительность операции — 60 мин (IQR: 60–90), кровопотеря — 350 мл (IQR: 250–400). **Заключение.** Модифицированная техника ПАО с применением системы индивидуальных навигационных устройств обеспечивает высокую точность коррекции, сокращает время операции и лучевую нагрузку на пациента и медицинский персонал. Метод снижает зависимость от «человеческого фактора», но требует оптимизации техники остеотомии седалищной кости. Долгосрочные функциональные результаты нуждаются в дальнейшем изучении.

Ключевые слова: периацетабулярная остеотомия, фемороацетабулярный импиджмент, органосохраняющая хирургия, аддитивные технологии

Summary

Introduction. The success of periacetabular osteotomy (PAO) is closely linked to the surgeon's expertise and the necessity for intraoperative radiographic control, which increases the risk of errors and radiation exposure. Additive manufacturing technologies offer the potential to improve accuracy; however, their application in PAO has not been previously studied. Objective. To evaluate the accuracy of acetabular correction and

the complication rate following PAO modified by the use of a patientspecific navigation system. **Materials and methods.** A prospective study included 39 patients (40 hip joints) with stage I–II dysplasia (Crowe/Hartofilakidis). During preoperative planning, 3D models of the patients' pelvic bones were created, and two patient-specific devices were designed: one for osteotomy and one for acetabular fragment positioning. Surgeries were performed without intraoperative radiographic guidance. Postoperative assessment included CT and X-ray imaging to measure angles (Wiberg, AcetAV, etc.), along with an analysis of perioperative complications. **Results.** The deviation of the postoperative Wiberg and AcetAV angles from the planned values was 2.3° (IQR: 1.2–4.0) and 1.7° (IQR: 0.5–4.4), respectively. The overall complication rate was 27.5%, with the most common being lateral femoral cutaneous nerve neuropathy (22.5%). Correction errors (overcorrection) were observed in 7.5% of cases. The mean duration of surgery was 60 minutes (IQR: 60–90), and mean blood loss was 350 mL (IQR: 250–400). **Conclusion.** The modified PAO technique utilizing a patient-specific navigation system provides high correction accuracy, reduces operative time and radiation exposure for both patients and medical staff. This method decreases reliance on the «human factor» but requires optimization of the ischial osteotomy technique. Long-term functional outcomes require further investigation.

Keywords: periacetabular osteotomy, femoroacetabular impingement, hip preservation surgery

Введение

Аддитивные технологии в настоящее время активно изменяют травматологию и ортопедию, позволяя создавать решения, которые еще несколько лет назад считались технически неосуществимыми. Потенциал персонализированной медицины, которая тесно связана с аддитивными технологиями, огромен [1–4].

Так, с применением технологий 3D-печати изготавливаются ортопедические имплантаты, точно повторяющие анатомию пациента и позволяющие компенсировать обширные костные дефекты при выполнении тяжелых ревизионных вмешательств на суставах [5–7]. Более того, индивидуально разработанные направлятели для различных видов остеотомий костей конечностей позволяют оперирующему хирургу ориентироваться во время вмешательства с прецизионной точностью согласно предоперационному плану [8–10].

Несмотря на широкий интерес к использованию 3D-печати в ортопедии, работ, сообщающих о приме-

нении в реальной хирургической практике аддитивных технологий при проведении периацетабулярной остеотомии, как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе не существует.

Периацетабулярная остеотомия как метод лечения молодых физически активных пациентов с патологией вертлужной впадины доказала свою высокую эффективность в сочетании с низким уровнем тяжелых осложнений [11–13]. Однако с момента разработки данного вида оперативного вмешательства, его техника не претерпевала серьезных изменений, поэтому до сих пор успешность периацетабулярной остеотомии очень сильно определяется «человеческим фактором». Так, ход инструментов при выполнении остеотомий костей таза, а также ориентирование вертлужной впадины при выполнении данной операции задается оперирующим хирургом методом «свободной руки» с постоянным интраоперационным рентген-контролем [14, 15]. Степень соответствия плоскостей остеотомий и положения ацетабулярного фрагмента, содержащего

вертлужную впадину, предоперационному плану и общепризнанным значениям сильно зависит от квалификации хирурга. Более того, необходимость в постоянном применении рентгенологического оборудования при проведении периацетабулярной остеотомии значительно повышает лучевую нагрузку на пациента и медицинский персонал в операционной, а также увеличивает длительность оперативного вмешательства.

Авторами данной статьи предлагается модификация техники выполнения периацетабулярной остеотомии путем применения системы индивидуально изготовленных с применением 3D-печати навигационных устройств.

Цель исследования

Провести оценку корректности позиционирования вертлужной впадины при выполнении периацетабулярной остеотомии, модифицированной использованием аддитивных технологий, и определить частоту осложнений, связанных с данной методикой указанной операции.

Материалы и методы исследования

В данное проспективное сплошное когортное одноцентровое исследование было включено 39 пациентов (40 тазобедренных суставов), которым выполнялась периацетабулярная остеотомия модифицированным способом с использованием аддитивных технологий в период с 2022 по 2025 г. на базе ФГБУ «НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена» Минздрава России. Максимальный период наблюдения данных пациентов составил 3 года, минимальный — 6 мес.

Критериями включения являлись: наличие симптоматической дисплазии тазобедренного сустава (значение угла Wiberg менее 25°, значение угла Tonnis более 10°, значение индекса экстррузии головки бедренной кости более 30%) или значение индекса ретроверсии более 30%, возраст до 45 лет.

Критерии исключения: наличие симптоматической дисплазии тазобедренного сустава с выраженным подвывихом и вывихом головки бедренной кости, а также признаки остеоартрита тазобедренного сустава II–III степени, наличие выраженных дефектов суставного хряща тазобедренного сустава по данным МРТ, возраст старше 45 лет, наличие ранее перенесенных оперативных вмешательств на том же тазобедренном суставе в анамнезе.

Предоперационное планирование

Накануне операции всем пациентам выполнялись КТ и обзорная рентгенография костей таза с целью диагностики патологии тазобедренного сустава; кроме того, на дооперационном этапе проводилась МРТ

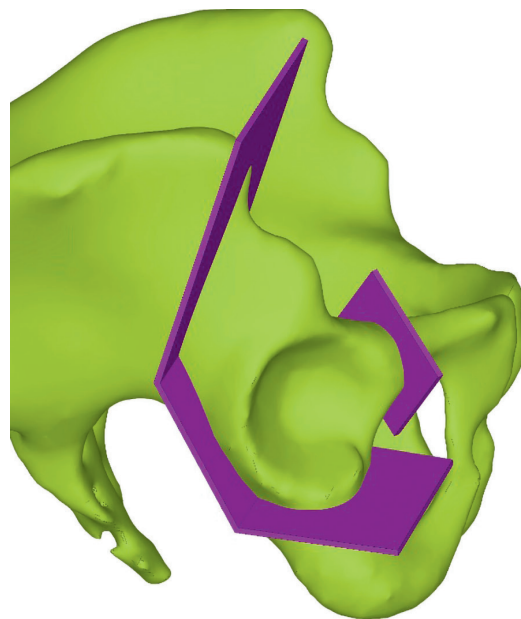


Рис. 1. Моделирование положения плоскостей остеотомий с использованием виртуальной 3D-модели

(не ниже 3 Т) с целью оценки состояния хряща тазобедренного сустава. С использованием ранее полученных данных КТ в компьютерной программе Materialise Medical Software® моделировалась точная компьютерная 3D-копия таза (рис. 1) оперируемого пациента.

На основании полученной модели осуществлялось ориентирование плоскостей остеотомий лонной, подвздошной и седалищной костей, а также рассчитывалось корректное положение вертлужной впадины, которое соответствует общепризнанным нормальным значениям углов Wiberg и AcetAV (рис. 2) [16, 17].

Далее проектировались два индивидуальных устройства для проведения периацетабулярной остеотомии, которые точно повторяют собой форму костей таза пациента: первого устройства для выполнения ориентирования остеотомий лонной, подвздошной и седалищной костей, которое позволяет задать правильное направление хода инструмента при выполнении остеотомий указанных выше костей и сформировать ацетабулярный костный фрагмент, содержащий в себе вертлужную впадину, которому точно соответствует второе навигационное устройство, при применении которого происходит позиционирование данного ацетабулярного фрагмента в корректном положении. Данные устройства изготавливались на 3D-принтере Ultimaker 2® (рис. 3) из полилактида (PLA) или акрилонитрилбутадиенстирола (ABS).

Техника операции

Все оперативные вмешательства были выполнены одним хирургом без интраоперационного использования рентгенологического оборудования.

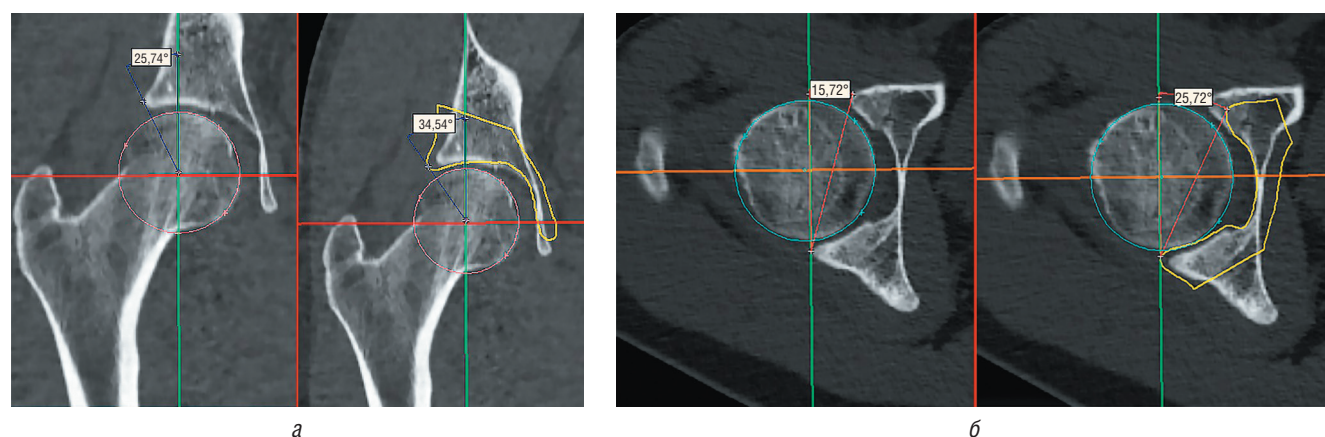


Рис. 2. Определение корректного положения вертлужной впадины на основании данных компьютерной томографии, выполненной на дооперационном этапе: *а* — предоперационные (справа) и планируемые (слева) значения угла Wiberg; *б* — предоперационные (слева) и планируемые (справа) значения угла AcetAV. На представленных КТ-срезах: контур желтого цвета соответствует планируемому положению вертлужной впадины

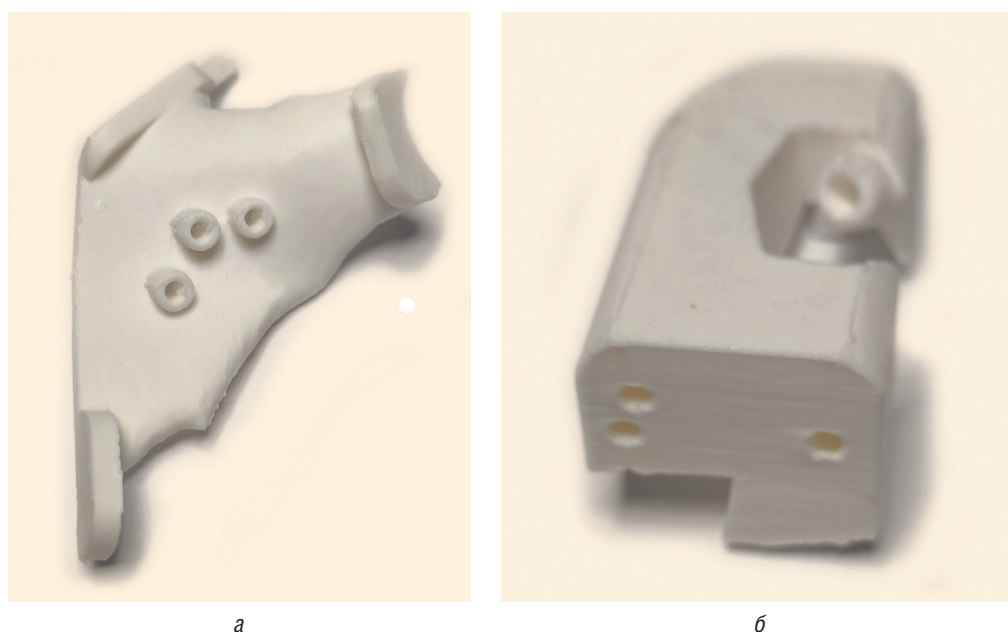


Рис. 3. Внешний вид устройств: *а* — устройство для выполнения ориентирования остеотомий лонной, подвздошной и седалищной костей; *б* — устройство для позиционирования ацетабулярного фрагмента

В положении пациента на спине на операционном столе осуществляется передний доступ в модификации Smith-Petersen. Фасция над напрягателем широкой фасции бедра (*m. tensor fascia lata*) рассекается, чтобы обнажить медиальный край указанной мышцы до места ее прикрепления к тазу. Широкая фасция и напрягатель широкой фасции (*m. tensor fascia lata*) отводятся латерально. Мобилизуется передняя порция напрягателя широкой фасции бедра (*m. tensor fascia lata*), и проксимально апоневроз косых мышц живота субпериостально отделяется от крыла подвздошной кости до визуализации передней верхней ости с прикрепляющимся к ней сухожилием портняжной мышцы

(*m. sartorius*). Далее выполняется остеотомия передней верхней ости таким образом, чтобы толщина полученного костного фрагмента составляла 0,5–1 см. Данный костный фрагмент с прикрепленным к нему сухожилием портняжной мышцы (*m. sartorius*) смещается медиально. На этом этапе осуществляется сгибание ноги в тазобедренном суставе до 45° для расслабления сухожилия прямой мышцы бедра (*m. rectus femoris*), которая отделяется от передненижней ости таза. Подвздошная кость и квадрилатеральная пластинка таза обнажаются поднадкостнично. В большую седалищную вырезку устанавливается тупой ретрактор Hohman. Волокна подвздошно-поясничной мышцы, которые вплетаются

в передний отдел капсулы тазобедренного сустава, отделяются от нее. Диссекция в пространстве между подвздошно-поясничной мышцей и нижней частью капсулы тазобедренного сустава. Поднадкостничное выделение верхней ветви лонной кости последний этап в осуществлении доступа.

Первым этапом подвздошно-поясничная мышца и запирающий нерв, которые лежат непосредственно в области верхней ветви лонной кости, защищаются с использованием двух тупых ретракторов. Направляющее устройство для выполнения остеотомии лонной, подвздошной и седалищной костей таза конгруэнтной контактной поверхностью располагается на обнаженной поверхности подвздошной и лонной костей от медиальной границы подвздошно-пахового возвышения до проекционной линии, проходящей от нижней границы передневерхней ости таза перпендикулярно

дугообразной линии таза до большой седалищной вырезки, и надежно фиксируется спицами (рис. 4).

Остеотомом пересекается лонная кость вдоль плоской грани лонного выступа данного направлятеля, которая соответствует плоскости остеотомии (под прямым углом к верхней ветви лонной кости) — рис. 5.

Вторым этапом в указанный ранее промежуток между нижней частью капсулы сустава и подвздошно-поясничной мышцей к передней части тела седалищной кости устанавливается специальный направлятель, который разработан авторами оригинальной методики выполнения периацетабулярной остеотомии. По данному направлятелю заводится изогнутый остеотом с шипом. Шип опирается на медиальный кортикал, а режущий край долота на передний край седалищной кости. Выступающий шип позволяет точно позиционировать остеотом для выполнения

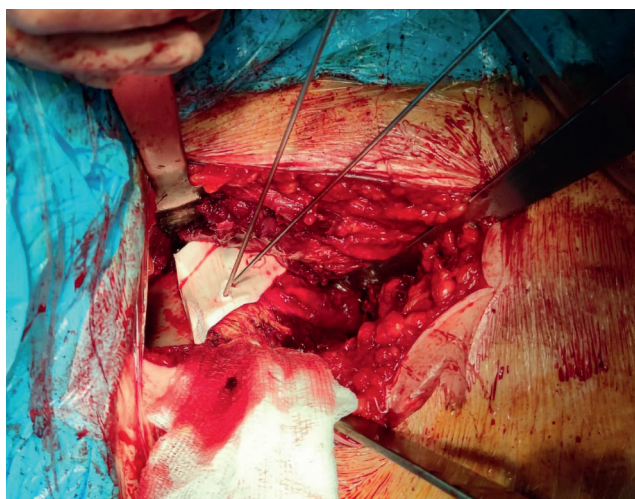


Рис. 4. Позиционирование устройства для выполнения ориентирования остеотомий лонной, подвздошной и седалищной костей

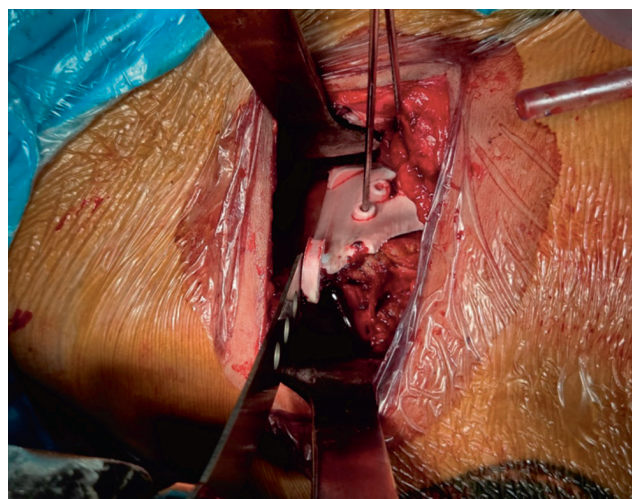


Рис. 5. Остеотомия лонной кости

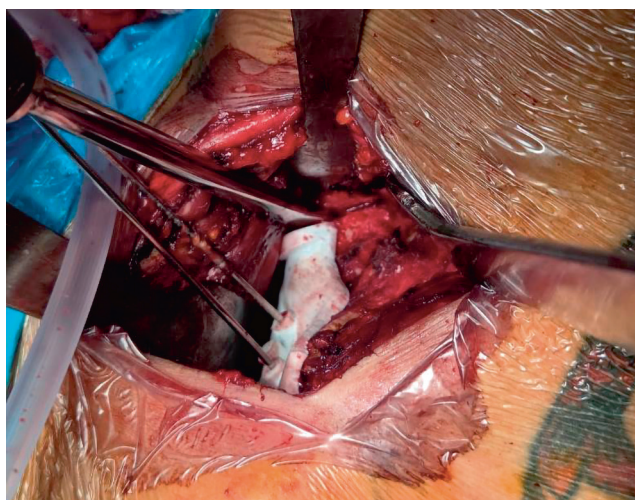


Рис. 6. Остеотомия подвздошной кости

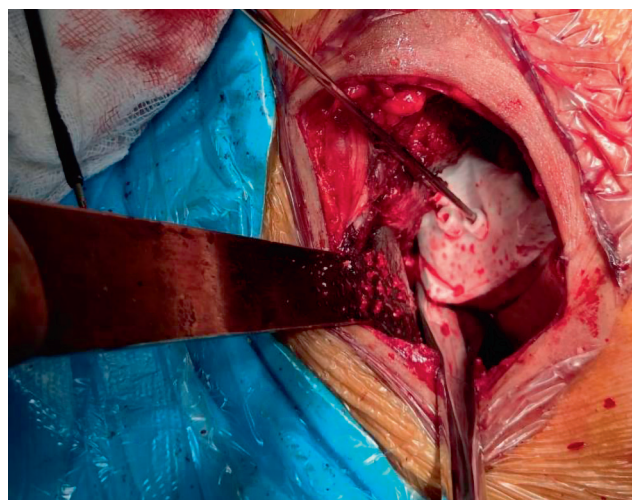


Рис. 7. Остеотомия в области задней колонны таза

остеотомии медиального кортикала. Плоскость остеотомии седалищной кости в данном случае направлена до соединения под углом 90° с плоскостью остеотомии задней колонны таза вдоль инфракотилоидной борозды, расположенной под вертлужной впадиной.

Третьим этапом большой ретрактор Hohman устанавливается в большую седалищную вырезку. Прямой ретрактор располагается с внутренней стороны малого таза. Осциллирующей пилой производится остеотомия подвздошной кости (рис. 6) в направлении от нижней границы передней верхней ости таза перпендикулярно дугообразной линии таза, не доходя до большой седалищной вырезки 1–1,5 см и используя как направитель плоскую грань подвздошного выступа направляющего устройства.

Четвертым этапом остеотомом выполняется остеотомия задней колонны таза (рис. 7), которая представляет собой область седалищной и подвздошной костей между тазобедренным суставом и большой седалищной вырезкой. Выполнение остеотомии данного анатомического образования осуществляется вдоль и в середине его при использовании в качестве ориентира плоской грани выступа устройства таким образом, чтобы угол между плоскостью остеотомии подвздошной кости и задней колонны таза составлял 110° – 120° . После чего направляющее устройство для выполнения остеотомий лонной, подвздошной и седалищной костей таза удаляется.

Шестым этапом для управления ацетабулярным фрагментом в него в качестве «джойстика» устанавливается винт Шанца. Производится оценка мобильности вертлужного фрагмента. На этом этапе направляющее устройство для позиционирования ацетабулярного фрагмента контактной нижней поверхностью располагается конгруэнтно внутренней поверхности подвздошной кости и надежно фиксируется спицами или

винтами (рис. 8). Свободный ацетабулярный фрагмент, содержащий в себе вертлужную впадину, фиксируют его внутренней поверхностью к указанному направляющему устройству спицами или винтами. В результате, вертлужная впадина принимает положение, заранее рассчитанное при проведении предоперационного планирования с использованием компьютерной 3D-модели таза пациента. Ацетабулярный фрагмент в заданном корректном положении фиксируется 3–4 кортикальными винтами. Устройство удаляется. Рану закрывают общепринятым способом без оставления дренажа.

Послеоперационный период

Стандартно активизация пациентов производится на 2-е сутки после операции. В течение 6–8 нед пациенты передвигаются с дозированной нагрузкой на оперированную конечность, используя костыли.

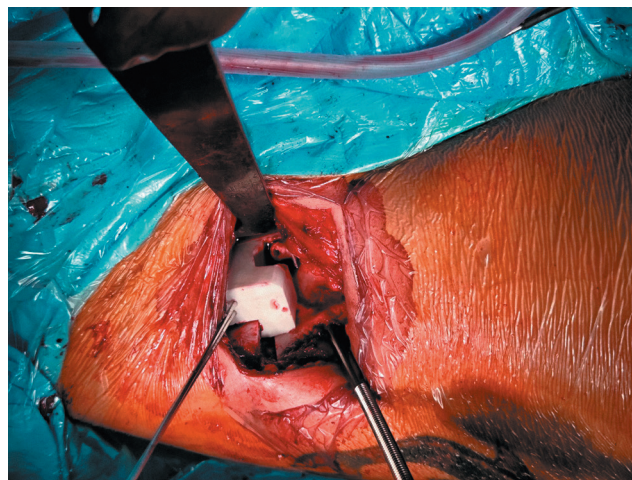
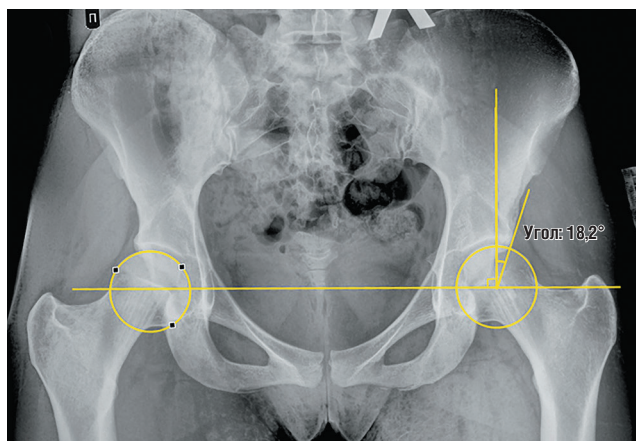
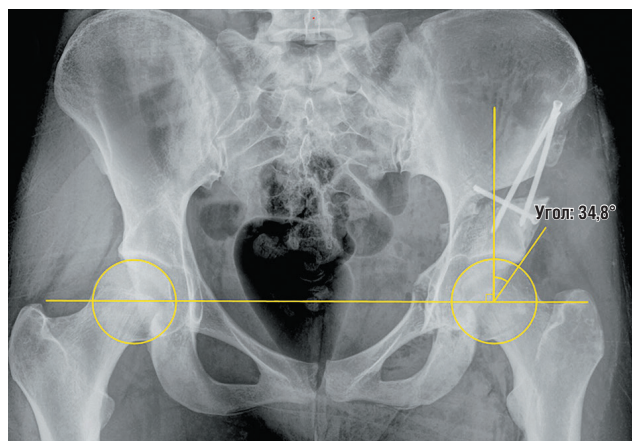


Рис. 8. Позиционирование ацетабулярного фрагмента при помощи навигационного устройства



а



б

Рис. 9. Обзорные рентгенограммы костей таза пациентки С., 19 лет, которой периацетабулярная остеотомия выполнялась модифицированным способом: а — рентгенограмма до операции; б — рентгенограмма после операции

Дополнительная опора применяется на протяжении 8–12 нед. В первые 4 нед разрешается сгибание в тазобедренном суставе до 90° при отсутствии дискомфорта. Обезболивающие препараты пациент принимает в течение 4–6 нед при возникновении выраженного болевого синдрома. Полная реабилитация занимает от 6 до 8 мес.

Оценка результатов

Производилась оценка обзорных рентгенограмм костей таза, выполненных в 1-е сутки после проведения периацетабулярной остеотомии (рис. 9), а также КТ костей таза спустя минимум 6 мес после операции (максимальный период 3 года).

На рентгенограммах измерялись значения следующих показателей, согласно общепризнанным методикам: угол Wiberg, угол Tonnis, угол вертикального наклона вертлужной впадины, индекс экстррузии головки бедренной кости, индекс сферичности головки бедренной кости и индекс ретроверсии. При оценке компьютерно-томографических исследований костей таза производилась оценка степени сращения костных фрагментов после их остеотомии, а также дополнительно измерялись значения углов: AASA (anterior acetabular sector angle), PASA (posterior acetabular sector angle), HASA (horizontal acetabular sector angle) и AcetAV, согласно общепризнанным методикам измерения данных углов (рис. 10), оценивалось наличие переломов костей таза.

О наличии синдрома фемороацетабулярного импиджмента (ФАИ) типа pincer судили в том случае, если показатели угла Wiberg были более 35° , угол Tonnis принимал отрицательные значения, а индекс экстррузии головки бедра был менее 15%. Недокоррекция положения вертлужной впадины учитывалась в случаях, если значения угла Wiberg составляли менее 25° , пока-

затели угла Tonnis были более 10° , а индекс экстррузии головки бедра был более 25%.

Учитывалось также количество койко-дней, объем интраоперационной кровопотери, длительность оперативного вмешательства, а также необходимость в проведении тотального эндопротезирования или артроскопии тазобедренного сустава, наличие неврологических и инфекционных осложнений после выполненной периацетабулярной остеотомии модифицированным способом.

Оценка функции тазобедренного сустава не проводилась нами в связи с тем, что большинство прооперированных пациентов проживают в других регионах и отсутствует возможность явки для проведения очного осмотра и оценки функции тазобедренного сустава в соответствии с различными шкалами в периоде 1 мес, 6 мес и 1 год. Дистанционная оценка путем самостоятельного заполнения анкет пациентами, на наш взгляд, имеет низкую достоверность и исследовательскую значимость. Также стоит отметить, что мы не анализировали отдаленные результаты выполнения периацетабулярной остеотомии модифицированным методом.

В основном в данном исследовании мы сконцентрировали внимание на оценке корректности положения костных фрагментов, поскольку данный фактор оказывает значимое влияние на выживаемость тазобедренного сустава в дальнейшем.

Статистический анализ

Материалы исследования были подвергнуты статистической обработке с использованием методов параметрического и непараметрического анализа. С целью определения возможности применения методов параметрического анализа, каждая из сравниваемых переменных оценивалась на предмет ее соответствия закону нормального распределения, для этого использовался критерий Колмогорова–Смирнова,

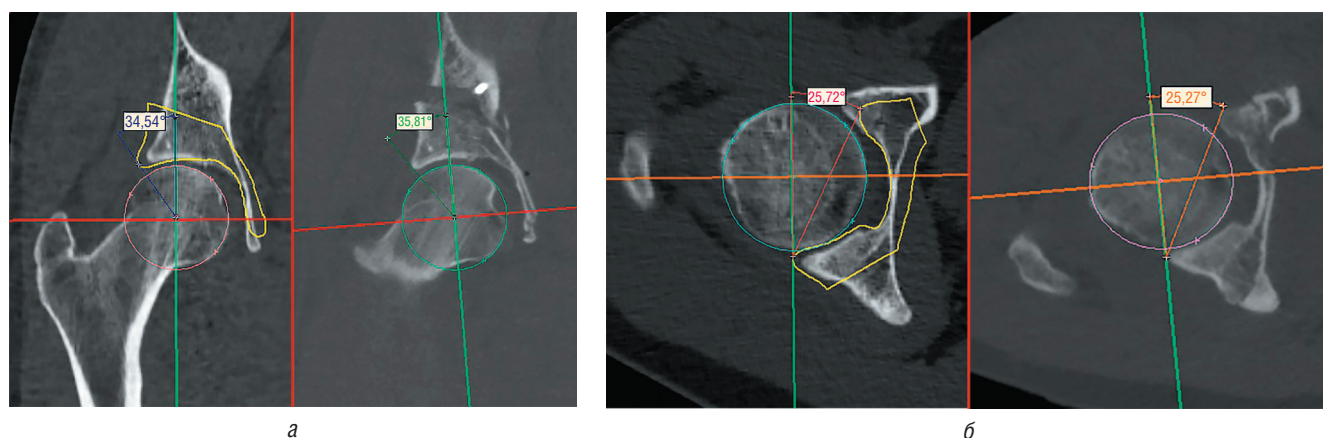


Рис. 10. Оценка степени соответствия послеоперационного положения вертлужной впадины планируемым значениям: а — планируемые (справа) и послеоперационные (слева) значения угла Wiberg; б — планируемые (слева) и послеоперационные (справа) значения угла AcetAV. На представленных КТ-срезах: контур желтого цвета соответствует планируемому положению вертлужной впадины

рекомендуемый при числе исследуемых более 50, а также применялся критерий Шапиро–Уилка при числе исследуемых ниже 50. Кроме того, рассчитывался F-критерий Фишера, позволяющий оценить гомоскедастичность дисперсий сравниваемых совокупностей, также являющуюся одним из условий применимости методов параметрического анализа. При нормальном распределении показателей количественной переменной рассчитывалось ее среднее значение (M) с определением стандартного отклонения и границ доверительного интервала. В случаях наличия распределения данных отличного от нормального, оцениваемые количественные переменные выражались через значения медианы (Me) и оценки интерквартильного размаха. Анализ номинальных переменных проводился путем сравнения групп по категориальному признаку с применением метода χ^2 Пирсона при значениях минимально предполагаемого числа более 10 или использования точного критерия Фишера, если минимально предполагаемое число менее 10. Также производилась оценка риска путем расчета отношения шансов и относительного риска для данных номинальных переменных с оценкой силы связи путем интерпретации значений V Крамера. Связь между сравниваемыми переменными принималась статистически значимой при $p \leq 0,05$.

Анализ полученных данных производился с применением программы IBM SPSS Statistics 27.0.

Результаты статистического анализа

Средний возраст пациентов составил $30,40 \pm 6,58^\circ$ (95% ДИ 27,32–33,48°). В нашем исследовании приняли участие 10 (25,64%) мужчин, 29 (74,36%) женщин. Во всех случаях у больных степень дисплазии тазобедренного сустава соответствовала I согласно классификации Crowe и A согласно классификации Hartofilakidis. Средний койко-день составил $9,25 \pm 3,02$ (95% ДИ 7,83–10,67). Медианное значение кровопотери составило 350 мл (IQR: 250–400). Кровопотеря средней степени (до 1500 мл) была в 14 (35%) случаях, легкой степени (до 1000 мл) — отмечена в 26 (65%) случаях, и ни в одном случае не было отмечено кровопотери тяжелой степени (до 2000 мл) и массивной кровопотери (более 2000 мл). Медианное значение длительности оперативного вмешательства — 60 мин (IQR: 60–90).

Значения различных углов и индексов, позволяющих оценить пространственное ориентирование вертлужной впадины до и после операции, отображены в табл. 1.

Медианные значения углов Wiberg и AcetAV заданных при планировании оперативного вмешательства составили $33,00^\circ$ (IQR: 31,00–35,00) и $25,00^\circ$ (IQR: 21,00–25,00) соответственно. Расхождение

Таблица 1

Значения показателей, характеризующих положение вертлужной впадины до и после операции, а также значения разницы этих показателей

Показатель	Дооперационное значение	Послеоперационное значение	Разница до и после операционных значений
Угол Wiberg, град. (M $\pm$ SD)	$18,74 \pm 7,87$ (95% ДИ 15,05–22,42)	$34,23 \pm 5,38$ (95% ДИ 31,70–36,75)	$15,49 \pm 7,35$ (95% ДИ 12,05–18,94), $p < 0,001$
Угол Tonnis, град. (M $\pm$ SD)	$15,47 \pm 6,32$ (95% ДИ 12,51–18,44)	$3,42 \pm 5,23$ (95% ДИ 0,97–5,87)	$12,05 \pm 7,38$ (95% ДИ 8,60–12,05), $p < 0,001$
Индекс экструсии головки бедренной кости, %	$26,33 \pm 7,09$ (95% ДИ 23,02–29,66)	(Me) 14,37 (IQR 10,87–16,03)	(Me) 9,82 (IQR 6,55–20,36), $p < 0,001$
Угол наклона вертлужной впадины, град. (M $\pm$ SD)	$43,88 \pm 5,37$ (95% ДИ 41,37–46,39)	$35,56 \pm 2,79$ (95% ДИ 34,26–36,87)	$8,31 \pm 5,25$ (95% ДИ 5,86–10,77), $p < 0,001$
Индекс сферичности головки бедренной кости, % (M $\pm$ SD)	$43,45 \pm 3,29$ (95% ДИ 41,91–44,99)	$43,63 \pm 3,04$ (95% ДИ 42,20–45,06)	$1,10 \pm 0,60$ (95% ДИ 0,82–1,38), $p = 0,523$
Индекс ретроверсии вертлужной впадины, % (M $\pm$ SD)	$12,45 \pm 18,82$ (95% ДИ 3,65–21,26)	Во всех случаях = 0	$12,45 \pm 18,82$ (95% ДИ 3,65–21,26), $p = 0,008$
Угол AASA, град. (M $\pm$ SD)	$47,44 \pm 7,63$ (95% ДИ 42,31–52,56)	$43,92 \pm 5,48$ (95% ДИ 40,24–47,60)	$3,52 \pm 7,57$ (95% ДИ 1,56–8,60), $p = 0,154$
Угол PASA, град. (M $\pm$ SD)	$91,60 \pm 6,66$ (95% ДИ 87,13–96,02°)	$96,45 \pm 8,98$ (95% ДИ 90,42–102,49)	(Me) 2,00 (IQR 0,60–3,00), $p = 0,328$
Угол HASA, град. (M $\pm$ SD)	$139,04 \pm 6,57$ (95% ДИ 134,63–143,46)	$140,05 \pm 6,47$ (95% ДИ 135,71–144,40)	$1,00 \pm 9,24$ (95% ДИ 5,20–7,22), $p = 0,725$
Угол AcetAV, град. (M $\pm$ SD)	$21,18^\circ \pm 4,41$ (95% ДИ 18,22–24,14)	(Me) 25,00 (IQR: 23,10–27,75)	$6,41 \pm 9,33$ (95% ДИ 0,14–12,68), $p = 0,021$

послеоперационных значений углов Wiberg и AcetAV с планируемыми значениями составило 2,30° (IQR: 1,20–4,00) и 1,70° (IQR: 0,50–4,40) соответственно.

Осложнения были отмечены в 11 (27,5%) случаях, причем количество случаев, где отмечено сочетание нескольких осложнений (два и более), составило 9 (22,5%). Переломы костей таза отмечены в 2 (5%) случаях, во всех двух случаях был выявлен перелом задней колонны таза. Неврологические нарушения обнаружены в 9 (22,5%) случаях, все неврологические нарушения были представлены нейропатией латерального кожного нерва бедра. Повреждения седалищного, бедренного или запирательного нервов в послеоперационном периоде у пациентов отмечено не было. Признаков инфекционных осложнений у исследуемой группы пациентов в послеоперационном периоде также выявлено не было.

Среди осложнений, связанных с ошибками коррекции, были обнаружены признаки гиперкоррекции в 3 (7,5%) случаях, признаки недостаточной коррекции положения вертлужной впадины у исследуемой группы пациентов отмечены не были. Повторные оперативные вмешательства (в том числе артроскопия и тотальное эндопротезирование тазобедренного сустава, а также удаление фиксирующих винтов) данным пациентам на момент проведения исследования не выполнялись.

Обсуждение результатов

Полученные результаты демонстрируют, что модифицированная техника периацетабулярной остеотомии с применением системы индивидуально изготовленных навигационных устройств позволяет достичь

высокой точности коррекции положения вертлужной впадины. Об этом можно судить, оценив незначительную степень расхождения между планируемыми и полученными послеоперационными значениями углов Wiberg и AcetAV, что указывает на высокую воспроизводимость предоперационного плана. Это согласуется с данными, полученными в исследованиях, где оценивалась степень вариабельности при проведении остеотомий верхних и нижних конечностей с использованием индивидуально изготовленных направителей [18, 19].

Сравнив средние и медианные послеоперационные значения углов Wiberg, Tonnis, Sharp и AcetAV у пациентов, которым мы проводили периацетабулярную остеотомию по стандартной технике [20], с аналогичными показателями у пациентов, которым ПАО выполнялась нами модифицированным способом, мы не смогли выявить статистически значимых различий. Однако стоит отметить, что разброс полученных значений углов меньше при выполнении периацетабулярной остеотомии модифицированной методикой (рис. 11), что косвенно подтверждает наше утверждение, что использование системы индивидуальных направителей позволяет повысить точность позиционирования вертлужной впадины.

Высокая точность предложенных нами устройств достигается за счет абсолютной конгруэнтности их анатомии пациента, что минимизирует шансы на смещение положения данных направителей при осуществлении остеотомий и позиционирования ацетабулярного фрагмента. Кроме того, данные устройства минимизируют зависимость от субъективных навыков хирурга и снижают необходимость интраоперационного

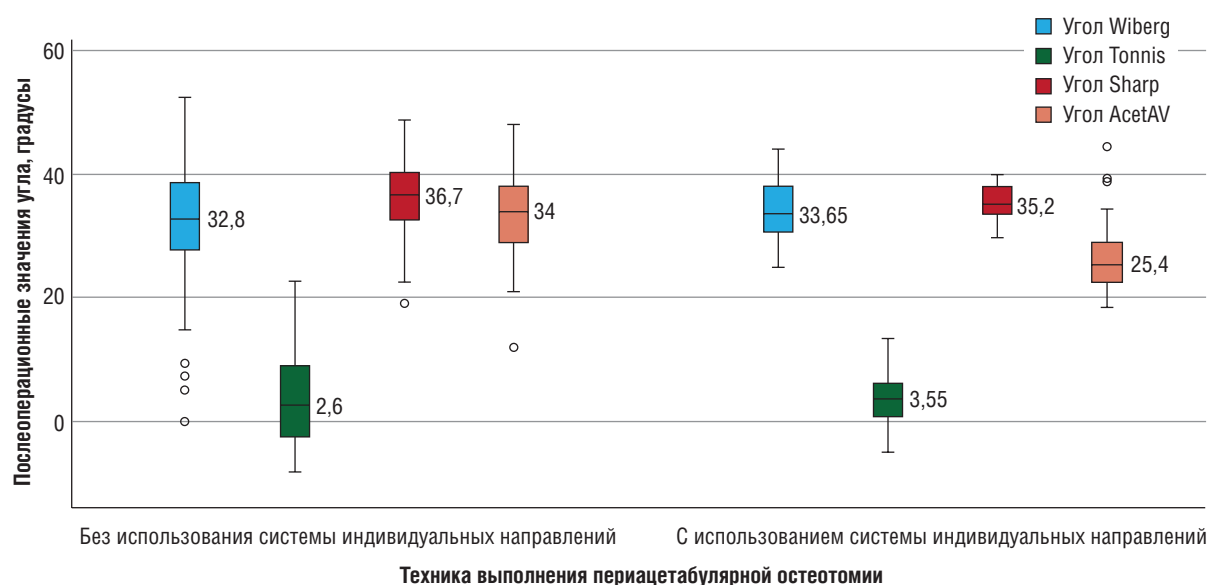


Рис. 11. Диаграмма, показывающая степень разброса послеоперационных значений углов Wiberg, Tonnis, Sharp и AcetAV при выполнении периацетабулярной остеотомии стандартной [20] и модифицированной техникой

рентген-контроля. Последнее, в свою очередь, объясняет сокращение длительности операции и отсутствие массивной кровопотери, что выгодно отличает методику от традиционных подходов, где время вмешательства часто превышает 90–120 мин и сопровождается большим объемом кровопотери [20, 21].

Частота осложнений в исследовании (27,5%) соответствует или ниже показателей, описанных в литературе для стандартной техники [22, 23]. При этом стоит учитывать, что наиболее распространенным осложнением в оцениваемой группе пациентов выступила нейропатия латерального кожного нерва бедра, что является характерным осложнением при осуществлении переднего доступа по Smith-Petersen [24, 25]. Данное осложнение не относится в категории тяжелых, выраженно снижающих качество жизни пациентов. В то же время отсутствие повреждений седалищного, бедренного или запирательного нервов, а также инфекционных осложнений подтверждает безопасность методики.

Также стоит отметить, что ошибки позиционирования вертлужной впадины (гиперкоррекция в 7,5%, отсутствовала недокоррекция) встречались значительно реже, чем при классической технике (ошибки коррекции в 22% случаев) [26, 27]. Это связано с точным расчетом углов на этапе 3D-моделирования и жесткой фиксацией навигационного устройства к костям таза при осуществлении позиционирования вертлужной впадины, что значительно снижает частоту случайных отклонений.

Основная проблема, которая обнаруживается даже при выполнении периацетабулярной остеотомии модифицированным способом, заключается в наличии у части пациентов переломов задней колонны. Решением данной ситуации мы видим в создании инструмента с ограничителем степени погружения лезвия остеотома или в применении ЭОП во время выполнения указанного этапа периацетабулярной остеотомии.

Несмотря на видимые преимущества модифицированной техники периацетабулярной остеотомии, основная проблема данного способа лечения низкая степень контролируемости выполнения остеотомии седалищной кости. И несмотря на то, что переломы в данной группе пациентов встречались с такой же частотой (5%), как и в прочих исследованиях, где оценивалась стандартная методика периацетабулярной остеотомии (3,1–7,8%) [27, 28], мы считаем, что решить данную проблему стоит путем интраоперационного использования рентгенологического оборудования во время выполнения данного этапа, либо созданием нового устройства, имеющим ограничитель глубины погружения остеотома в тело седалищной кости.

Заключение

Предложенная модификация техники периацетабулярной остеотомии с использованием аддитивных технологий подтверждает свой потенциал как точный и воспроизводимый метод. Снижение зависимости от «человеческого фактора», сокращение времени операции и минимизация лучевой нагрузки делают ее перспективной альтернативой традиционным подходам, особенно для молодых пациентов с пограничной дисплазией. Однако стоит отметить, что существует необходимость в улучшении техники проведения остеотомии седалищной кости и в проведении дальнейших многоцентровых исследований с длительным периодом наблюдения для оценки долгосрочных функциональных результатов и выживаемости тазобедренного сустава.

Источник финансирования. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Список литературы

1. Zöller T., Schmal H., Ahlhelm M., Mayr H.O., Seidenstuecker M. Conventional Manufacturing by Pouring Versus Additive Manufacturing Technology of β -Tricalcium Phosphate Bone Substitute Implants. *Biomedicines*. 2024 Aug 8; 12 (8): 1800. doi: 10.3390/biomedicines12081800.
2. Zhang Y., Li C., Zhang W., Deng J., Nie Y., Du X., Qin L., Lai Y. 3D-printed NIR-responsive shape memory polyurethane/magnesium scaffolds with tight-contact for robust bone regeneration. *Bioact Mater*. 2021 Dec 31; 16: 218–231. doi: 10.1016/j.bioactmat.2021.12.032. PMID: 35415289; PMCID: PMC8965852.
3. Zhang X., Li K., Wang C., Rao Y., Tuan R.S., Wang D.M., Ker D.F.E. Facile and rapid fabrication of a novel 3D-printable, visible light-crosslinkable and bioactive polythiourethane for large-to-massive rotator cuff tendon repair. *Bioact Mater*. 2024 Apr 25; 37: 439–458. doi: 10.1016/j.bioactmat.2024.03.036. PMID: 38698918; PMCID: PMC11063952.
4. Zaborovskii N., Masevkin S., Smekalenkov O., Murakhovsky V., Ptashnikov D. Patient-specific 3D-Printed PEEK implants for spinal tumor surgery. *J. Orthop*. 2024 Oct 18; 62: 99–105. doi: 10.1016/j.jor.2024.10.024. PMID: 39512487; PMCID: PMC11539085.
5. Zanasi S., Zmerly H. Customised three-dimensional printed revision acetabular implant for large defect after failed triflange revision cup. *BMJ Case Rep*. 2020 May 25; 13 (5): e233965. doi: 10.1136/bcr-2019-233965. PMID: 32457031; PMCID: PMC7253004.
6. Vitiello R., Matrangola M.R., El Motassime A., Perna A., Cianni L., Maccauro G., Ziranu A. Three-Dimension-Printed Custom-Made Prosthetic Reconstructions in Bone Tumors: A Single Center Experience. *Curr. Oncol*. 2022 Jun 28; 29 (7): 4566–4577. doi: 10.3390/curroncol29070361. PMID: 35877221; PMCID: PMC9322169.

7. Trikoupi I.G., Mavrodontis I.I., Papadopoulos D.V., Goumenos S.D., Georgoulis D.A., Gavriil P., Melissaridou D., Savvidou O.D., Kontogeorgakos V.A., Papagelopoulos P.J. 3D-printed glenoid implant reconstruction, after partial scapulectomy for malignant tumors: a case series. *Eur. J. Orthop Surg. Traumatol.* 2024 Apr; 34 (3): 1557–1562. doi: 10.1007/s00590-024-03839-4. Epub 2024 Jan 27. PMID: 38280074; PMCID: PMC10980628.
8. Walker J., Wang Yu., Green N., Erbulut D., Alttahir M., Tetsworth K. Contemporary Use of 3D Printed Jigs and Guides for Osteotomies Around the Knee: A Systematic Review. *Traumatology and Orthopedics of Russia.* 2024; 30 (3): 132–147.
9. Zamri M.F., Ng B.W., Jamil K., Abd Rashid A.H., Abd Rasid A.F. Office Three-Dimensional Printed Osteotomy Guide for Corrective Osteotomy in Fibrous Dysplasia. *Cureus.* 2023 Mar 20; 15 (3): e36384. doi: 10.7759/cureus.36384. PMID: 37090315; PMCID: PMC10115740.
10. Zhong H., Ma S., Cen Y., Ma L., Li D., Liang B., Chen J., Zhang Y. A case report of early unilateral external fixation by 3D printing and computer-assisted and secondary bone graft internal fixation in pseudarthrosis of the tibia surgery. *J. Int Med. Res.* 2020 Sep; 48 (9): 300060520945518. doi: 10.1177/0300060520945518. PMID: 32972273; PMCID: PMC7522843.
11. Ganz R., Leunig M. Bernese periacetabular osteotomy (PAO): from its local inception to its worldwide adoption. *J. Orthop. Traumatol.* 2023 Nov 2; 24 (1): 55. doi: 10.1186/s10195-023-00734-2.
12. Steppacher S.D., Tannast M., Ganz R., Siebenrock K.A. Mean 20-year follow-up of bernese periacetabular osteotomy. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2008; 466: 1633–1644. doi: 10.1007/s11999-008-0242-3.
13. Lerch T.D., Steppacher S.D., Liechti E.F., Siebenrock K.A., Tannast M. Bernese periacetabular osteotomy: indications, technique, and results 30 years after first description. *Orthopäde* 2016; 45: 687–694. doi: 10.1007/s00132-016-3265-6.
14. Tibor L.M., Sink E.L. Periacetabular osteotomy for hip preservation. *Orthop. Clin. North Am.* 2012 Jul; 43 (3): 343–357. doi: 10.1016/j.ocl.2012.05.011.
15. Kamath A.F. Bernese periacetabular osteotomy for hip dysplasia: Surgical technique and indications. *World J. Orthop.* 2016 May 18; 7 (5): 280–286. doi: 10.5312/wjo.v7.i5.280.
16. Welton K.L., Jesse M.K., Kraeutler M.J., Garabekyan T., Mei-Dan O. The Anteroposterior Pelvic Radiograph: Acetabular and Femoral Measurements and Relation to Hip Pathologies. *J. Bone Joint Surg. Am.* 2018 Jan 3; 100 (1): 76–85. doi: 10.2106/JBJS.17.00500.
17. Direito-Santos B., França G., Nunes J., Costa A., Rodrigues E.B., Silva A.P., Varanda P. Acetabular retroversion: Diagnosis and treatment. *EFORT Open Rev.* 2018 Nov 12; 3 (11): 595–603. doi: 10.1302/2058-5241.3.180015.
18. Zaffagnini S., Dal Fabbro G., Belvedere C., Leardini A., Caravelli S., Lucidi G.A., Agostinone P., Mosca M., Neri M.P., Grassi A. Custom-Made Devices Represent a Promising Tool to Increase Correction Accuracy of High Tibial Osteotomy: A Systematic Review of the Literature and Presentation of Pilot Cases with a New 3D-Printed System. *J. Clin. Med.* 2022 Sep 27; 11 (19): 5717. doi: 10.3390/jcm11195717.
19. Yang C., Zhang C., Wu J., Xu X., Zhang Y., Zhang S. Three-Dimensional Printed Customized Surgical Guides for the Precise Correction of Complex Midfacial Post-Traumatic Deformities. *J. Craniofac Surg.* 2022 Jun 1; 33 (4): 1150–1153. doi: 10.1097/SCS.00000000000008329.
20. Плиев Д.Г., Черкасов В.С., Коваленко А.Н. Анализ осложнений, связанных с выполнением периацетабулярной остеотомии, у взрослых пациентов молодого возраста. *Травматология и ортопедия России* 2025; 31 (2): 57–66 [Pliev D.G., Cherkasov V.S., Kovalenko A.N. Evaluation of Complications Associated with Periacetabular Osteotomy in Young Adult Patients. *Travmatologija i ortopedija Rossii* 2025; 31 (2): 57–66 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/2311-2905-17683>.
21. Корыткин А.А., Новикова Я.С., Эль Мудни Ю.М., Ковалдов К.А., Герасимов С.А., Губина Е.В. Периацетабулярная остеотомия таза при лечении пациентов с дисплазией тазобедренного сустава. *Травматология и ортопедия России* 2021; 27 (1): 131–142. [Korytkin A.A., Novikova Ya.S., El moudni Yu.M., Kovaldov K.A., Gerasimov S.A., Gubina E.V. Periacetabular Pelvic Osteotomy in Treatment of Patients with Developmental Dysplasia of the Hip. *Travmatologija i ortopedija Rossii* 2021; 27 (1): 131–142 (In Russ.)]. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-1-131-142.
22. Ali M., Malviya A. Complications and outcome after periacetabular osteotomy — influence of surgical approach. *Hip Int.* 2020 Jan; 30 (1): 4–15. doi: 10.1177/1120700019871195.
23. Ziran N., Varcadipane J., Kadri O., Ussef N., Kanim L., Foster A., Matta J. Ten- and 20-year Survivorship of the Hip After Periacetabular Osteotomy for Acetabular Dysplasia. *J. Am. Acad. Orthop. Surg.* 2019. Apr 1; 27 (7): 247–255. doi: 10.5435/JAAOS-D-17-00810.
24. Kiyama T., Naito M., Shiramizu K., Shinoda T., Maeyama A. Ischemia of the lateral femoral cutaneous nerve during periacetabular osteotomy using Smith-Petersen approach. *J. Orthop. Traumatol.* 2009. Sep; 10 (3): 123–126. doi: 10.1007/s10195-009-0055-5.
25. Homma Y., Baba T., Sano K., Ochi H., Matsumoto M., Kobayashi H., Yuasa T., Maruyama Y., Kaneko K. Lateral femoral cutaneous nerve injury with the direct anterior approach for total hip arthroplasty. *Int. Orthop.* 2016 Aug; 40 (8): 1587–1593. doi: 10.1007/s00264-015-2942-0.
26. Novais E.N., Duncan S., Nepple J., Pashos G., Schoenecker P.L., Clohisy J.C. Do Radiographic Parameters of Dysplasia Improve to Normal Ranges After Bernese Periacetabular Osteotomy? *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2017 Apr; 475 (4): 1120–1127. doi: 10.1007/s11999-016-5077-8.
27. Nonnenmacher L., Zimmerer A., Hofer A., Bohorc M., Matziolis G., Wassilew G. Komplikationen und deren Behandlung nach PAO [Complication management after periacetabular osteotomy]. *Orthopädie (Heidelb).* 2023 Apr; 52 (4): 272–281. German. doi: 10.1007/s00132-023-04359-5.
28. Khan O.H., Malviya A., Subramanian P., Agolley D., Witt J.D. Minimally invasive periacetabular osteotomy using a modified Smith-Petersen approach: technique and early outcomes. *Bone Joint J.* 2017 Jan; 99-B (1): 22–28. doi: 10.1302/0301-620X.99B1. BJJ-2016-0439.R1.

Поступила в редакцию 23.06.2025 г.

Сведения об авторах:

Плиев Давид Гивиевич — кандидат медицинских наук, заведующий травматолого-ортопедическим отделением № 19 ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава России, заведующий научным отделением патологии тазобедренного сустава, врач травматолог-ортопед ФГБУ «Национальный

медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава России; 195427, Санкт-Петербург, ул. Академика Байкова, д. 8; e-mail dgpliev@rniito.ru; ORCID 0000-0002-1130-040X; SPIN-код 7019-6511;

Черкасов Виталий Сергеевич — врач травматолог-ортопед отделения ортопедии ГБУЗ «Городская клиническая больница № 31 им. акад. Г.М. Савельевой» ДЗМ; 119415, Москва, ул. Лобачевского, д. 42, стр. 2; e-mail: cherkasov.ortho@yandex.ru; ORCID 0009-0007-2847-9745; SPIN-код 4518-9544;

Коваленко Антон Николаевич — кандидат медицинских наук, врач травматолог-ортопед травматолого-ортопедического отделения № 19 ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава России, научный сотрудник научного отделения патологии тазобедренного сустава ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава России; 195427, Санкт-Петербург, ул. Академика Байкова, д. 8; e-mail: dr.ankovalenko@ya.ru; ORCID 0000-0003-4536-6834; SPIN-код 9354-1878;

Айрапетов Георгий Александрович — доктор медицинских наук, заместитель главного врача по травматологии и ортопедии ГБУЗ «Городская клиническая больница № 31 им. акад. Г.М. Савельевой» ДЗМ; 119415, Москва, ул. Лобачевского, д. 42, стр. 2; профессор кафедры травматологии и ортопедии ФГБОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы»; 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; главный внештатный специалист травматолог-ортопед г. Москвы, ведущий научный сотрудник ФГБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Минздрава России; 191036, Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 2-4; e-mail: airapetovga@yandex.ru; ORCID 0000-0001-7507-7772; SPIN-код 7333-6640.



ТЫ МОЖЕШЬ!

1 СТАТЬ УМНЕЕ

У некурящих людей лучше работает мозг, развиты память и логическое мышление.

2 ОБРЕСТИ СВОБОДУ

Никотиновая зависимость – это добровольное рабство, которое забирает здоровье, деньги и будущее.

3 БЫТЬ ЗДОРОВЫМ И ИМЕТЬ ЗДОРОВЫХ ДЕТЕЙ



**БЕСПЛАТНАЯ
ПОМОЩЬ**

в отказе от курения

8 800 200 0 200

УЗНАЙ БОЛЬШЕ
КАК БЫТЬ ЗДОРОВЫМ
www.takzdorovo.ru