

БИОЛОГИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕДИЦИНА

УДК 616.711-089 873-092

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕСТРУКТИВНЫХ И КИСТОЗНЫХ ОПУХОЛЕПОДОБНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОКСИМАЛЬНОМ ОТДЕЛЕ БЕДРА

Н. М. Белокрылов^{1,2}, А. В. Сотин², Ф. А. Демидов², А. Н. Белокрылов^{1,3}*

¹ Городская детская клиническая больница №15,

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

³ Пермская государственная медицинская академия им. ак. Е. А. Вагнера, г. Пермь, Россия

MATHEMATIC MODELING OF DESTRUCTIVE AND CYSTIC TUMOR-LIKE PROCESSES IN PROXIMAL FEMORAL PART

N. M. Belokrylov^{1,2}, A. V. Sotin², F. A. Demidov², A. N. Belokrylov¹*

¹ City Children's Clinical Hospital №15,

² Perm National Research Polytechnic University,

³ Perm State Academy of Medicine named after Academician E. A. Wagner, Perm, Russian Federation

Цель. Создать инструмент для формирования хирургической тактики на основе прогнозирования процессов костной деструкции при асептическом некрозе и опухолеподобных кистозных процессах в костной ткани проксимального отдела бедра с использованием пространственной математической модели тазобедренного сустава.

Материалы и методы. Для изучения патогенетического механизма развития локальных деструктивных и опухолеподобных процессов с образованием кистозных полостей использована созданная авторами пространственная модель тазобедренного сустава. С помощью метода конечных элементов рассчитывали напряженно-деформированное состояние бедренной и тазовой кости с учётом разной локализации и размеров очагов деструкции костной ткани в результате некроза кости и опухолеподобных процессов.

Результаты. Созданную модель индивидуализировали на основе реальных клинико-рентгенологических и анатомических данных. Провели исследование полей напряжений, возникающих в нормальном и «патологически измененном» тазобедренном суставе, характер этих изменений соответствовал постановке клинической задачи. Созданная модель позволила исследовать влияние формы патологически измененного тазобедренного сустава на распределение механических напряжений в костной ткани головки бедренной кости, а при другой постановке задачи – в метафизарном и метадиафизарном отделах бедра. Получена реальная возможность прогнозировать

© Белокрылов Н. М., Сотин А. В., Демидов Ф. А., Белокрылов А. Н., 2013

e-mail: belokrylov1958@mail.ru

тел. 8 (342) 221 76 33

[Белокрылов Н. М. (*контактное лицо) – доктор медицинских наук, профессор кафедры АнЛФК, заведующий отделением детской травматологии-ортопедии; Сотин А. В. – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики; Демидов Ф. А. – аспирант кафедры теоретической механики; Белокрылов А. Н. – аспирант кафедры травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии, врач травматолог-ортопед].

характер патологического перелома, выявлять участки критических напряжений в зависимости от формы кости, локализации очагов, прочностных характеристик, усилий разных мышечных групп и их направления, величины формируемого при доступе дефекта костной стенки и других изучаемых параметров, важных для хирурга-ортопеда.

Вывод. Созданная модель является хорошим инструментом для изучения патогенеза деструктивных и кистозных очагов в костной ткани, формирования хирургической тактики, решения технических задач замещения дефектов, определения степени риска и необходимости применения металлофиксаторов или внешней иммобилизации в реабилитационном периоде.

Ключевые слова. Тазобедренный сустав, пространственная модель тазобедренного сустава, костные кисты, асептический некроз головки бедра, деструкция кости, опухолевые и опухолеподобные процессы в кости, биомеханика, адаптационная перестройка костной ткани, замещение дефектов кости.

Aim. To create the instrument for forming surgical tactics based on predicting the processes of bone destruction in aseptic necrosis and tumor-like cystic processes in the bone tissue of proximal part of the hip using spatial mathematical hip joint model.

Materials and methods. For the purpose of studying the pathogenetic mechanism of developing local destructive and tumor-like processes with formation of cystic cavities, a spatial hip joint model developed by the authors was used. By means of the method of finite elements, deformation mode of femoral and calxal bones was calculated taking into account different localizations and sizes of bone tissue destruction foci as a result of bone tissue necrosis and tumor-like processes.

Results. The developed model was individualized on the basis of real clinicoroentgenological and anatomic data. Stress fields occurring in normal and "pathologically changed" hip joint, character of these changes corresponded to the posed clinical problem. The created model permitted to study the effect of the form of pathologically changed hip joint on distribution of strain in the whirlbone connective tissue and in case of the other problem posed – in metaphyseal and metadiaphyseal parts of the hip. There is a real possibility to prognosticate the character of pathological fracture, to reveal the areas of critical strain depending on the bone form, foci localization, strength characteristics, forces of different muscular groups and their directions, sizes of formed bone wall defect and other parameters important for a surgeon-orthopedist.

Conclusion. The developed model is a good instrument for studying pathogenesis of destructive and cystic foci in the bone tissue, formation of surgical tactics, solving technical problems of defect replacement, determination of risk degree and necessity of using metal pawls or external immobilization in rehabilitation period.

Key words. Hip joint, spatial hip joint model, bone cysts, aseptic femoral head necrosis, bone destruction, tumor and tumor-like bone processes, biomechanics, adaptive reconstruction of bone tissue, bone defects replacement.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из трудных клинических задач является восстановление костной ткани проксимального отдела бедра при её поражении в виде локальных участков некроза или кистозных изменений. Патогенетическая программа развития таких очагов не всегда понятна исследователям, прогнозировать возникающие процессы крайне трудно, поэтому перед клиницистами неизбежно встают вопросы: в каком направлении будут развиваться очаги поражения кости; требуется ли дополнительная фиксация, в частности, ме-

таллоостеосинтез, при заполнении кистозных полостей; где возникают стрессовые, «ненадёжные» зоны в плане патологического разрушения, а где очаги размягчения кости? Клинические способы замещения таких костных полостей успешно применяются ортопедами, появляются новые технологии, но эмпирические решения отстают от теоретического обоснования хирургической тактики и требуют фундаментального изучения [1]. Предпосылки создания математической модели тазобедренного сустава созданы Пермской школой биомеханики буквально в последние десятилетия. Так, разработана модель адаптационной перестройки костной

ткани, учитывающая зависимость активности костных клеток от величины деформационного стимула [7]. Проведены исследования анатомических и геометрических параметров тазобедренного сустава [6] и рассчитаны функциональные нагрузки на сустав [5]. Установлены механические закономерности адаптационных изменений кортикальной костной ткани при снижении и увеличении механической нагрузки на кость [4, 7]. Наконец, создана сама пространственная модель тазобедренного сустава, позволяющая объяснить патогенез протекающих в нём диспластических изменений и прогнозировать результат некоторых реконструктивных операций, связанных с изменением пространственных характеристик сустава [2, 3]. Однако попыток изучить на подобной пространственной модели изменения, возникающие в результате процессов образования костных кист и очагов деструкции в проксимальном отделе бедра, мы в доступной литературе не встречали. Поэтому актуальность этого исследования и сообщения не вызывает сомнений.

Цель исследования – создать инструмент для формирования хирургической тактики на основе прогнозирования процессов костной деструкции при асептическом некрозе и опухолеподобных кистозных процессах в костной ткани проксимального отдела бедра с использованием пространственной математической модели тазобедренного сустава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения патогенетического механизма развития локальных деструктивных и опухолеподобных процессов с образованием кистозных полостей использована созданная математическая модель тазобедренного сустава [2, 3]. Работа проводилась коллективом авторов под руководством профессора Ю. И. Няшина (Пермский национальный исследовательский политехнический универ-

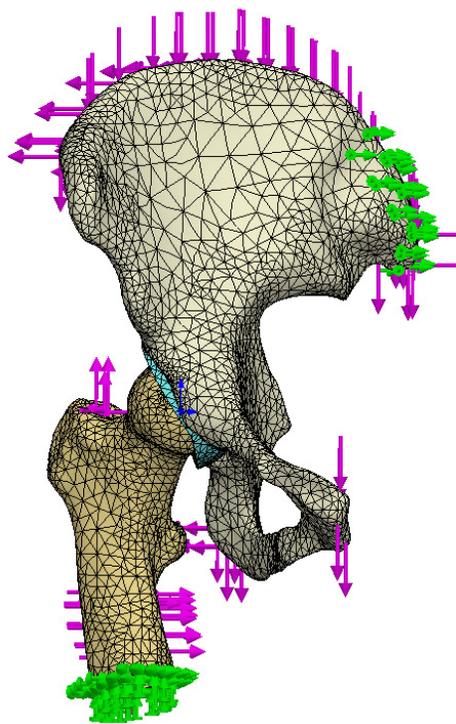


Рис. 1. Конечно-элементная аппроксимация тазобедренного сустава. Стрелками обозначены прилагаемые мышечные усилия и граничные условия

ситет). Построенная пространственная неоднородная анизотропная линейно-упругая конечно-элементная модель тазобедренного сустава (рис. 1) применена для расчета полей напряжений, возникающих в нормальном и «патологически измененном» тазобедренном суставе.

Модель состоит из бедренной, тазовой кости и суставного хряща. Хрящ моделируется однородной изотропной прослойкой сложной геометрической формы толщиной около 4 мм, что соответствует ширине рентгенологической суставной щели. В данной постановке контактное межхрящевое взаимодействие не исследовалось. С помощью метода конечных элементов рассчитано напряженно-деформированное состояние бедренной и тазовой кости. Исследовано влияние формы патологически измененного тазо-

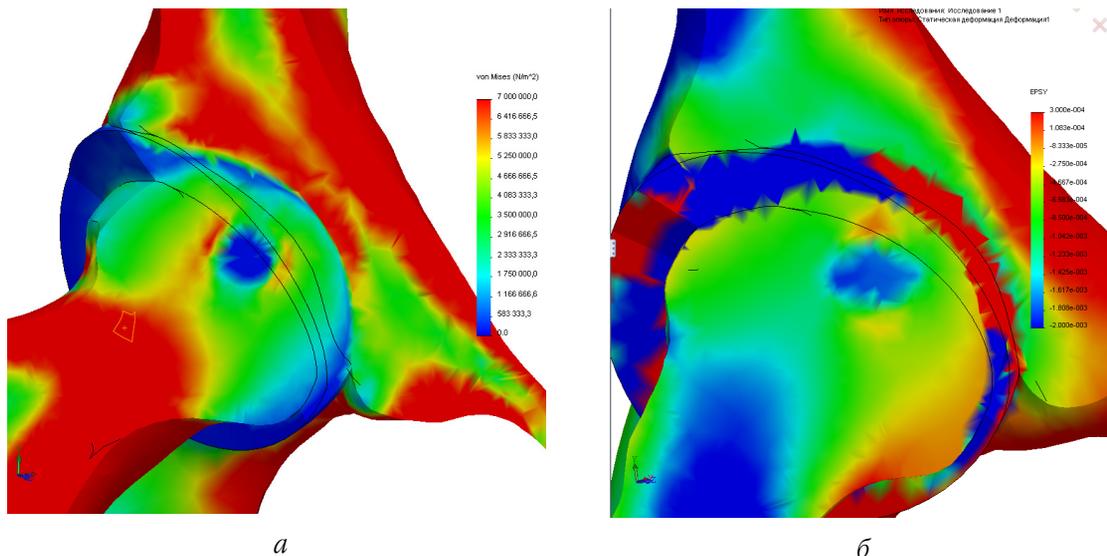


Рис. 2. Поля напряжений и деформаций в тазобедренном суставе при наличии очага деструкции головки бедра: а – распределение напряжений на краях дефекта; б – распределение напряжений в подхрящевой зоне

бедренного сустава на распределение механических напряжений в костной ткани головки бедренной кости, а при другой постановке задачи – в метафизарном и метадиафизарном отделе бедра. Модель сопряжена с клиническими наблюдениями и сформирована на основе рентгенограмм и данных трёхплоскостной компьютерной томографии в норме и при наличии очагов деструкции (рис. 2). Так, очаги деструкции при асептическом или остеомиелитическом некрозе головки бедра развиваются с точки зрения биомеханики по одинаковой схеме.

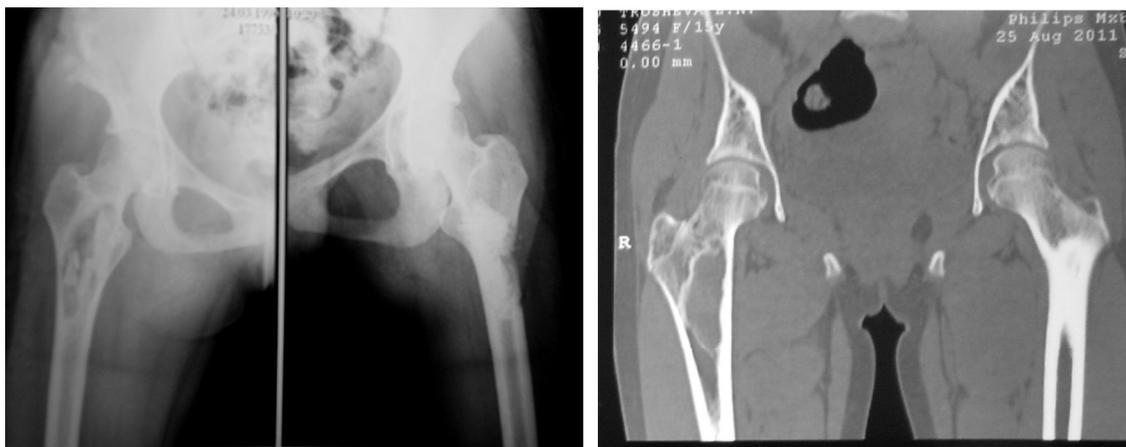
Вокруг очага деструкции головки бедра на рисунке слева видно появление зон «перегруженности» по краям дефекта (параллельные участки по сторонам некротического участка), а на рисунке справа «недонагруженные» участки кости (снизу и сверху очага некроза). Такое перераспределение нагрузки приводит к механическому разрушению кости в зонах «перегруженности» и к адаптивной резорбции кости в участках «недонагруженности» из-за отсутствия естественного стимулирующего деформирующего воздей-

ствия. Всё это в целом имеет следствием расширение очага деструкции головки бедра.

Другой вариант использования математической модели связан с изучением напряженно-деформированного состояния кости в области кистозных полостей. Наглядное представление о построении индивидуальной математической модели на основе рентгенографии и компьютерной томографии представлено на рис. 3.

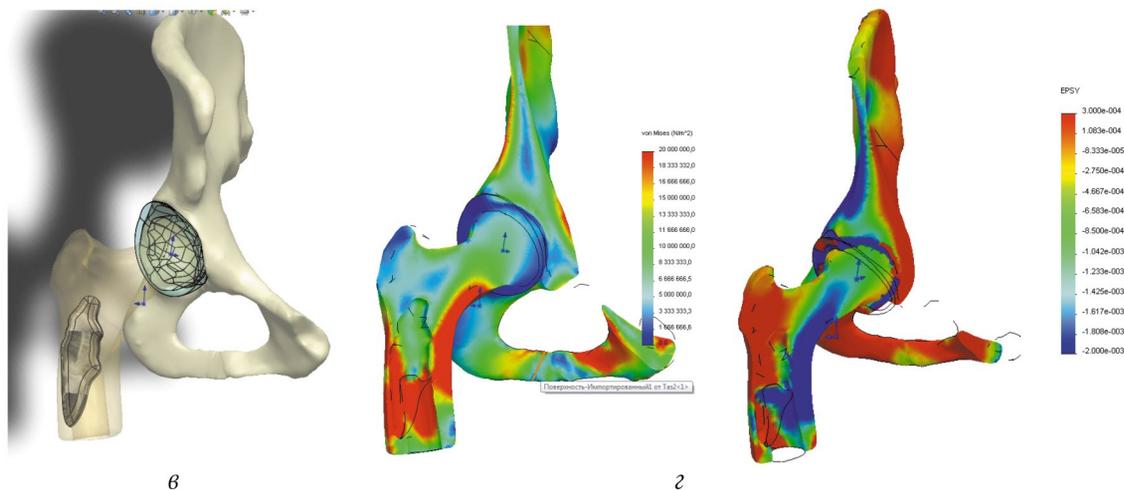
Анализ приведённой в качестве примера модели показывает, что перераспределение напряжений в кортикальной кости метадиафизарной зоны бедра привело к образованию концентраторов напряжений вокруг кисты, а в области основания шейки бедра возникли условия для формирования дистрофических изменений. Поэтому вертельно-шеечная область становится «зоной повышенного риска», и при незначительных локальных нагрузках в этих участках могут возникать патологические переломы.

Таким образом, на вооружении клиницистов-ортопедов появился вполне обоснованный математический инструмент для по-



а

б



в

г

Рис. 3. Данные рентгенологического исследования (а) и спиральной томографии (б); индивидуальная пространственная биомеханическая модель тазобедренного сустава (в); распределение напряжений и деформаций (г) в костной ткани при наличии кисты в метадиафизарной зоне бедра

нимания патогенеза происходящих деструктивных и кистозных процессов. Индивидуальное пространственное моделирование или рассмотрение типичных клинических ситуаций с позиций биомеханики существенно расширяет наше представление о данной патологии. Прогнозирование повышенного риска при кистах разных размеров и локализаций поможет хирургу определиться с техникой замещения костного дефекта, выявить необходимость остеосинтеза или

возможность обойтись без него, оценить риски при консервативном ведении больного и другие особенности реабилитационных мероприятий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментальных работах отечественных и зарубежных авторов показано, что механические нагрузки влияют на активность костных клеток, участвующих в про-

цессах адаптивной перестройки костной ткани. Однако эти закономерности касаются не только здоровых, но и «скомпрометированных» участков кости. Подобные наблюдения впервые проведены Пермской школой исследователей, зародившейся в результате сотрудничества клиницистов и специалистов по теоретической механике и биомеханике, работающих на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета [2, 4, 6]. Проведённые исследования выявили неравномерную структурную организацию кортикальной кости: зафиксировано уменьшение среднего радиуса гаверсова канала по мере удаления от внутренней поверхности бедренной кости. Учитывая, что при изгибных нагрузках внутренний слой стенки бедренной кости испытывает меньшие продольные деформации, чем наружный слой, характер обнаруженной структурной неоднородности позволил предположить, что размер гаверсова канала является основной структурной характеристикой адаптации кортикальной костной ткани к внешним нагрузкам. Изменение размера гаверсова канала происходит в процессе естественной перестройки кортикальной кости за счет изменения баланса между активностью костных клеток, осуществляющих резорбцию (рассасывание) и репарацию (формирование) костной ткани. Таким образом, формирование структуры костной ткани напрямую зависит от прилагаемых нагрузок. По сути дела, эти исследования подвели базу для дальнейших изысканий и соотнесли биомеханические процессы со структурной биологической перестройкой костной ткани.

Поскольку выявлена чёткая зависимость процесса перестройки костной ткани от прилагаемых нагрузок, то, следовательно, и структура кости зависит от величины нагрузки в разных её зонах. С этой точки зрения созданная пространственная конечно-элементная биомеханическая модель тазо-

бедренного сустава [2, 3] является исключительно ценным инструментом для прогнозирования течения деструктивных изменений в кости и формирования хирургической тактики. С позиций биомеханики становится понятен патогенез процессов увеличения кистозной полости и распространения некротических очагов костной ткани.

Выводы

1. Создана математическая пространственная конечно-элементная модель тазобедренного сустава. Эту модель можно изменять в соответствии с поставленными клиническими задачами, которые могут быть индивидуальными, в привязке к различным анатомическим и клинико-рентгенологическим параметрам.

2. Пространственная модель тазобедренного сустава может быть широко использована при изучении деструктивных и кистозных процессов в проксимальном отделе бедра и тазовом сегменте, позволяет прогнозировать результаты лечения и формировать оптимальную хирургическую тактику.

Библиографический список

1. Белокрылов Н. М., Денисов А. С., Белокрылов А. Н., Гонина О. В., Полякова Н. В. Хирургическое лечение поражений проксимального отдела бедра при опухолях и опухолеподобных заболеваниях. Медицинский альманах 2012; 5 (24): 154–157.
2. Белокрылов Н. М., Полякова Н. В., Пекк Н. А., Сотин А. В., Скаковский А. С. Клинико-биомеханические аспекты реконструкции тазобедренного сустава с применением тройной остеотомии таза у детей. Медицинский альманах 2012; 1 (20): 153–156.
3. Белокрылов Н. М., Сотин А. В., Полякова Н. В., Пекк Н. А., Скаковский А. С., Демидов Ф. А. Математическое моделирование в изучении диспластических деформаций тазобедренного сустава у детей. Российский вестник

- детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. Прил. Труды X Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы хирургии детского возраста» в рамках XI Российского конгресса «Инновационные технологии в педиатрии и детской хирургии» 2012; 29.
4. *Akulich Y. V., Denisov A. S., Nyashin Y. I., Podgaets R. M., Scryabin V. L., Sotin A. V., Akulich A. Y.* Studies on the biomechanics of proximal femur. *Russian Journal of Biomechanics* 2001; 5 (2): 39–48.
 5. *Akulich Y. V., Podgaets R. M., Sotin A. V.* The calculation of loads acting on the femur during normal human walking. *Russian Journal of Biomechanics* 2000; 4 (1): 49–61.
 6. *Garyaev P. A., Demcbuk N. D., Sotin A. V.* Experimental investigation of anatomical and geometrical parameters of a human hip. *Russian Journal of Biomechanics* 1999; 3 (3): 82–90.
 7. *Sotin A. V., Akulich Y. V., Podgaets R. M.* Individual and age peculiarities of the cortical bone tissue adaptation process in human femur. *Russian Journal of Biomechanics* 2002; 6 (2): 51–61.

Материал поступил в редакцию 17.12.2013