

Актуальные проблемы при решении задач диагностики и лечения опорно-двигательного аппарата с использованием биомеханики

Аннотация

Представлены сведения о современных подходах к решению задач диагностики, коррекции и лечения опорно-двигательного аппарата с использованием методов биомеханики, а также о ряде нерешенных актуальных проблем с учетом материалов докладов XV Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2022».

Введение

Здоровье граждан является важнейшим приоритетом концепции национальной безопасности России. Основные направления практической реализации этой важной задачи предусматривают в первую очередь дальнейшее развитие методов профилактики и диагностики с обеспечением доступности высокотехнологичной медицинской помощи, а также создание инновационных здоровьесберегающих технологий. Их разработка для травматологии, ортопедии, челюстно-лицевой хирургии является не только актуальной медицинской, социально-экономической, но и многоплановой научной проблемой, требующей для эффективного решения привлечения специалистов как медико-биологического профиля, так и ряда смежных наук [1]. Данные статистики подтверждают рост количества заболеваний костно-суставной системы, случаев травматизма и посттравматических последствий [2], требующих оперативного восстановления органотипической структуры и физиологической функции костей скелета [1].

Значительную роль в решении рассматриваемой проблемы играют успешно осуществляемые в последние десятилетия научные разработки в инженерной и медицинской биомеханике [1], [3]-[6], базирующиеся на научно-методических подходах к проведению подобных исследований в области механики материалов, биоматериаловедения [7]. Использование биомеханического подхода в сочетании с морфологическим анализом костной ткани с учетом уровней ее структурной организации позволяет получить информативные данные о морфофункциональных закономерностях рассматриваемого природного биокомпозита в норме, при патологических состояниях и при действии различных физико-химических факторов [1], [4], [5]. В связи с этим представляет интерес обобщение имеющихся в отечественной литературе сведений о роли биомеханического подхода к решению рассматриваемой проблемы, установлению актуальных задач и эффективных способов их практического решения, что нашло отражение в тематике, содержании докладов и обсуждений на XV Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2022» и определило цель настоящего обзора.

Материалы и методы

Материалом исследования явились результаты многолетних исследований авторов по данному вопросу [1], [3]-[5], [8], [9], немногочисленные сведения из научно-практических разработок других авторов [6], [10], включая данные, представленные в материалах XV Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в экологии и медицине – ФРЭМЭ'2022» [11]-[13].

Анализ и обобщение собственных экспериментальных данных и имеющихся в литературе сведений об использовании биомеханического анализа в решении задач диагностики и лечения опорно-двигательного аппарата [1], [3]-[5], [8]-[10] свидетельствуют о наличии ряда нерешенных актуальных задач. В качестве одной из приоритетных задач в рамках рассматриваемого направления следует выделить задачу совершенство-

вания методологии биомеханических исследований. Это обусловлено отсутствием общепринятых стандартизированных научно-методических подходов к проведению механических исследований образцов костной ткани в зависимости от их реального физико-химического состояния, недостаточным учетом влияния биологических и методических факторов при проведении испытаний, что не позволяет корректно осуществлять сравнение количественных показателей ввиду значительной вариабельности экспериментальных данных различных авторов.

В настоящее время в инженерной биомеханике используются костные макрообразцы для механических испытаний на растяжение, сжатие, изгиб, а также микрообразцы для изучения упруго-пластических свойств (показателя микротвердости) костной ткани. В качестве одного из современных подходов к изготовлению образцов для механических испытаний (пробоподготовке) предложен способ выделения их из кости с использованием полых цилиндрических фрез с последующей резкой дисковыми фрезами на образцы заданной высоты [1]. Такая технология позволяет атравматично осуществлять изготовление костных образцов с учетом анизотропии структуры и механических свойств исследуемой кости. Этот высокотехнологичный метод имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционно применяемыми – точением, фрезерованием, механическим разделением с использованием специальных ножовок: возможность изготовления образцов при наличии ограниченного количества материала с учетом фактора анизотропии и обеспечением высокого качества поверхностного слоя [14], [15] без изменения его структурно-функциональных характеристик.

Экспериментальная апробация указанной технологии при исследовании костей человека, а также домашних и лабораторных животных [1], [16], позволила значительно расширить существовавшие ранее в остеологии сведения об интегральных и дифференциальных характеристиках костной ткани как композита [1] и объекта биотехнологических разработок [17]. Такие исследования стали возможными благодаря использованию технологии селективного выделения из кости органической или минеральной фаз, сохраняющих после физико-химических воздействий сплошность и непрерывность. Это открывает перспективы проведения объективного структурного, биомеханического, композиционного и элементного анализа основных компонентов кости в норме и при наличии различных патологических процессов. Результаты указанных исследований являются базовыми для установления пределов изменений свойств и характеристик костной ткани под действием многочисленных факторов эндогенной и экзогенной природы, разработки медико-технических требований для создания ее синтетических аналогов [18], эффективных костно-пластических материалов с учетом их биомеханической совместимости при замещении костных дефектов, решения вопросов, связанных с протезированием [19]-[23]. Такие сведения представляют особый интерес при создании инструментария для резки кости, выполнения отверстий при distractionном остеосинтезе и др.

Привлечение новых методов структурно-функционального анализа, таких как акустическая микроскопия [24], расши-

рывает возможности изучения закономерностей изменения структуры костной ткани, ее искусственных аналогов, нарушений их композиционного состава. Этот неинвазивный метод, основанный на оценке взаимодействия упругой акустической волны с веществом, обеспечивает возможность изучения топографии поверхности, микроструктуры и механических свойств ткани. При этом осуществляется не косвенная, а прямая оценка распределения в объекте механических характеристик на микроскопическом уровне, что в настоящее время не может быть реализовано ни одним другим методом. Наличие корреляции акустических и физико-механических характеристик позволяет установить пространственное распределение механических показателей с одновременным анализом микроструктуры биологических тканей. Изучение в динамике морфологических особенностей одних и тех же образцов (зон кости), подвергнутых различным физико-химическим воздействиям, дает возможность проследить по акустическим изображениям изменения микроструктуры, плотности, акустических и физико-механических параметров. Установленные при этом закономерности используются при интерпретации акустических изображений, создают предпосылки для разработки неразрушающих методов диагностики морфо-механического состояния тканей опорно-двигательного аппарата на ранних стадиях функциональных и патологических нарушений.

При создании новых видов имплантационных материалов необходимо использовать результаты композиционного и элементного анализа, достижения перспективного научного направления – биоэлементологии [1], [4]. Согласно положениям об основных закономерностях функционирования системы микроэлементов как особого аппарата обеспечения микроэлементного гомеостаза и поддержания элементного состава живых организмов, важно исключить превышение допустимых норм содержания микроэлементов, способных стать причиной различных заболеваний. Известно, что имплантируемые материалы, применяемые в клинической практике, из-за длительного контакта с тканями организма могут оказывать вредное воздействие. При решении вопроса о потенциальной опасности новых материалов медицинского назначения необходимо принимать во внимание накопленные в токсикологии сведения об уже известных элементах и химических соединениях, их допустимых концентрациях в различных средах.

Сведения о композиционном составе костной ткани человека, домашних и лабораторных животных представляют интерес при создании новых видов костно-пластического материала, современных лекарственных средств, оценке их эффективности в ходе доклинических исследований [25] при лечении заболеваний костно-суставной системы различной этиологии, оценке качества донорского материала, установлении физиологического статуса пациента, а также при персонализированном подборе имплантатов для оптимизации репаративного остеогенеза.

Заслуживает внимания открытие в области биомеханики ученых МВТУ им. Н.Э. Баумана и хирургов. Ими впервые установлено наличие в костях человека и животных сложных полей собственных напряжений первого рода [26], уравниваемых в макрообъемах. Их величина зависит от возрастных, региональных особенностей костей и выполняемых ими функций в скелете.

Создание современных приборов и высокотехнологичных методов исследования, в частности атомно-силовой микроскопии, расширило возможности изучения структуры костной ткани, ее органического матрикса на субмикроскопическом уровне, оценки влияния патологических процессов на состояние структурных элементов костной ткани [27]. Применение этого метода позволило выявить наличие внутренних напряжений в костном веществе на субмикроскопическом уровне, что свидетельствует о возможности регистрации рассматриваемого явления независимо от уровней структурной организации кости. Открытие собственных напряжений расширило известные ранее представления о несущей способности костей скелета, не только подвергаемых воздействию внешних сил,

но и испытывающих внутреннее напряжение. Установление новых закономерностей этого явления позволит обеспечить использование полученных результатов для прогнозирования формирования костей с учетом полей собственных напряжений. Однако уже в настоящее время отмеченные особенности структуры костей в норме [1] и при остеопорозе [11] важно учитывать на практике при лечении костных переломов для снижения риска достижения предельных деформаций кости и ее разрушения при изменении полей собственных напряжений.

Заслуживают внимания исследования ученых Владимирского государственного университета (ВГУ), посвященные разработке роботизированных вспомогательных систем, конструктивно повторяющих антропологические особенности человека [12]. В частности, это выполненные в форме конечности, похожей на человеческую руку, манипуляторы для переноса грузов, способные выполнять тяжелую работу под контролем оператора.

Другим важным направлением научно-практической деятельности ученых ВГУ являются разработки мехатронных приводов (актуаторов) для медицинских приложений [13]. Они имеют широкое применение (подъемники и перекладчики пациентов, инвалидные коляски с электроприводом, реабилитационные тренажеры, медицинские койки, массажные кресла и т. д.). Учитывая высокие требования к их надежности, плавности, уровню шума, точности позиционирования штока для обеспечения необходимого пространственного расположения отдельных элементов систем, авторами [13] был разработан алгоритм синтеза мехатронных приводов. В его основу положен модульный принцип конструирования, заключающийся в комбинировании различных вариантов отдельных узлов механизма вплоть до достижения оптимального решения для конкретной задачи.

Следует подчеркнуть, что во всех перечисленных примерах в ходе исследований, технологических и конструкторских разработок большое внимание уделяется биомеханическим вопросам, учету прочностных свойств и биосовместимости используемых конструкций и материалов, в том числе и в условиях осуществления современной стратегии перехода на технологии цифровой медицины [28]. Эти исследования продолжают и развивают актуальное направление научно-технологических разработок в рамках научного направления «Биомеханика, проблемы коррекции и лечения опорно-двигательного аппарата», которое неизменно находится в центре внимания участников международных конференций «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ» [3], [8], [9], [11]-[13], [28].

Заключение

Приведенные сведения дают общее представление о современном состоянии и роли биомеханического анализа в решении задач диагностики и лечения опорно-двигательного аппарата. Вместе с тем они позволили выявить ряд актуальных проблем, определить приоритетные направления дальнейших исследований, результаты которых позволят повысить эффективность лечения на основе их использования не только в практике моделирования и научного прогнозирования, но и при создании современных здоровьесберегающих технологий.

Публикация подготовлена в рамках государственного задания (регистрационный номер темы 122022600100-2) и при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

Список литературы:

1. Денисов-Никольский Ю.И., Миронов С.П., Омельяненко Н.П. и др. Актуальные проблемы теоретической и клинической остеологии. – М.: ОАО «Типография «Новости», 2005. 336 с.
2. Кобобушкин Г.В. Отчет о международной конференции «Травма 2020: мультидисциплинарный подход» // Политравма. 2020. № 4. С. 78-80.
3. Розанов В.В., Матвейчук И.В. Биомеханика, проблемы коррекции и лечения опорно-двигательного аппарата: состоя-

- ние и перспективы исследований // Медицинская техника. 2021. Т. 55. № 1. С. 6-8.
4. *Денисов-Никольский Ю.И., Матвейчук И.В., Розанов В.В.* Инновационные подходы к структурно-функциональному анализу костной ткани для решения фундаментальных и прикладных задач в биоимплантологии и биоматериаловедении // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2012. № 1. С. 223-228.
 5. *Матвейчук И.В., Розанов В.В., Литвинов Ю.Ю.* Изучение биофизических свойств костной ткани для медико-биологических приложений // Альманах клинической медицины. 2016. Т. 44. № 2. С. 193-202.
 6. *Пинчук П.В., Левандровская И.А.* Прочностные свойства биологических тканей: современное состояние вопроса // Судбно-медицинская экспертиза. 2017. Т. 60. № 5. С. 49-52.
 7. *Лысенко Л.Н.* Биоматериаловедение: вклад в прогресс современных медицинских технологий // Клеточная трансплантология и тканевая инженерия. 2005. № 2. С. 56-61.
 8. *Матвейчук И.В., Розанов В.В., Шутеев С.А.* Современные биомеханические подходы к повышению эффективности диагностики и лечения опорно-двигательного аппарата / В кн.: Сборник докладов «XIV Междуна. научн. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ’2020». Владимир-Суздаль, 1-3 июля 2020 г. Кн. 1. С. 201-206.
 9. *Матвейчук И.В., Розанов В.В.* Биомеханический анализ в решении задач диагностики и лечения опорно-двигательного аппарата: актуальные проблемы / В кн.: XV Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ’2022». Владимир-Суздаль, 2022. Доклады. С. 156-160.
 10. *Ромакина Н.А., Федонников А.С., Киреев С.И. и др.* Использование методов биомеханики в оценке состояния и коррекции патологии опорно-двигательной системы (обзор) // Саратовский научно-медицинский журнал. 2015. Т. 11. № 3. С. 310-316.
 11. *Абдулхабилов М.А., Борисова А.В., Катков А.А.* Повышение эффективности остеointegrации костнозамещающих материалов при лечении пациентов с остеопорозом / В кн.: XV Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ’2022». Владимир-Суздаль, 2022. Доклады. С. 198-204.
 12. *Жданов А.В., Довбыш Н.С.* Прогнозирование прочностных характеристик электромеханического модуля для медицинских систем / В кн.: XV Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ’2022». Владимир-Суздаль, 2022. Доклады. С. 214-217.
 13. *Жданов А.В., Митрофанов А.Н.* Разработка модульных мехатронных приводов медицинского назначения / В кн.: XV Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ’2022». Владимир-Суздаль, 2022. Доклады. С. 218-220.
 14. *Денисов-Никольский Ю.И., Матвейчук И.В., Розанов В.В. и др.* Критерии оценки состояния поверхностей костных имплантатов / Матер. IV Всерос. симп. с междунар. участ. «Актуальные вопросы тканевой и клеточной трансплантологии». С.-Петербург, 21-24 апреля 2010 года. С. 63-64.
 15. *Матвейчук И.В., Розанов В.В., Краснов С.А.* Анализ роли качества образованных костных поверхностей в решении задач биоимплантологии и биоматериаловедения / В сб.: Научно-техн. конф. «Медико-технические технологии на страже здоровья», 22-29 сентября 2019 года. Москва. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 73-75.
 16. *Матвейчук И.В., Розанов В.В., Денисов-Никольский Ю.И.* Сравнительная структурно-функциональная характеристика костных алло- и ксеноимплантатов // Технологии живых систем. 2013. Т. 10. № 8. С. 25-30.
 17. *Розанов В.В., Матвейчук И.В., Денисов-Никольский Ю.И. и др.* Костная ткань как объект биотехнологических исследований и разработок // Технологии живых систем. 2016. Т. 12. № 1. С. 25-35.
 18. *Матвейчук И.В.* Биомеханические подходы к изучению морфофункциональных особенностей кости с целью создания ее синтетического аналога / В кн.: Биомедицинские технологии. Сб. научн. труд. НПО «Биомедицинские технологии». – М., 1996. Вып. 5. С. 15-22.
 19. *Сергеева Н.С., Франк Г.А., Свиридова И.К. и др.* Роль аутогенных мультипотентных мезенхимальных стромальных клеток в тканеинженерных конструкциях на основе натуральных кораллов и синтетических биоматериалов при замещении костных дефектов у животных // Клеточная трансплантология и тканевая инженерия. 2009. Т. IV. № 4. С. 56-64.
 20. *Резник Л.Б., Ерофеев С.А., Стасенко И.В. и др.* Морфологическая оценка остеointegrации различных имплантов при замещении дефектов длинных костей (экспериментальное исследование) // Гений ортопедии. 2019. Т. 25. № 3. С. 318-323.
 21. *Деев Р.В., Дробышев А.Ю., Бозо И.Я. и др.* Создание и оценка биологического действия ген-активированного остеопластического материала, несущего ген VEGF человека // Клеточная трансплантология и тканевая инженерия. 2013. Т. VIII. № 3. С. 78-85.
 22. *Боков А.Е., Млявях С.Г., Широкова Н.Ю. и др.* Современные перспективы разработки материалов для стабилизирующих вмешательств на позвоночнике с применением спондилодеза (обзор) // Современные технологии в медицине. 2018. Т. 10. № 4. С. 203-219.
 23. *Колмогоров Ю.Н., Успенский И.В., Маслов А.Н. и др.* Костнозамещающие имплантаты из материала «Рекост-М» на основе 3D-моделирования // Современные технологии в медицине. 2018. Т. 10. № 3. С. 95-103.
 24. *Денисова Л.А., Маев Р.Г., Матвейчук И.В. и др.* Закономерности изменения акустических свойств костной ткани при нарушении ее композиционного состава / Сб. научн. труд. НИЦ БМТ «Биомедицинские технологии (репродукция тканей и биопротезирование)». – М., 2002. Вып. 18. Ч. I. Деминерализация. С. 95-104. Ч. II. Деорганификация. С. 105-110. Ч. III. Дегидратация. С. 111-115.
 25. *Панин В.П., Матвейчук И.В., Розанов В.В.* Актуальные вопросы создания современных моделей доклинических исследований костных имплантатов / Сб. трудов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Морфология в XXI веке: теория, методология, практика». – М.: МГАВМиБ им. К.И. Скрябина, 2021. С. 149-152.
 26. *Лоцилов В.И., Николаев Г.А., Бабаев Э.П.* Явление возникновения собственных напряжений в костях человека и животных // Научное открытие. 1970. № 181.
 27. *Шестель И.Л.* Субмикроскопическая структура и собственное напряжение кости при дисплазии соединительной ткани // Избранные вопросы судебно-медицинской экспертизы. 2019. № 18. С. 206-210.
 28. *Смирнова Л.М., Фогт Е.В., Синегуб А.В. и др.* Матричная модель для создания логических фильтров электронного каталога протезных модулей при персонифицированном синтезе протеза // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25. № 1. С. 54-63.

Игорь Васильевич Матвейчук,
д-р биол. наук, профессор, гл. научный сотрудник,
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
лекарственных и ароматических растений»,
Владимир Викторович Розанов,
д-р биол. наук, профессор, ведущ. научный сотрудник,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова»,
гл. научный сотрудник,
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
лекарственных и ароматических растений»,
г. Москва,
e-mail: mivilar@mail.ru