БИОТРИБОЛОГИЯ В ТРАВМАТОЛОГИИ, ОРТОПЕДИИ И ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИИ
(Обзор литературы)

Маматкулов О.Х.
PhD, заведующий кафедрой травматологии и ортопедии
Самаркандский государственный медицинский университет;
директор Самаркандского филиала Республиканского научно-практического медицинского центра травматологии и ортопедии
Бабакулова Г.К.
заведующая кафедрой «Сестринский уход в педиатрии»
Самаркандский техникум общественного здравоохранения имени Абу Али ибн Сино
Холикова С.О.
Самарканд, Узбекистан.

Аннотация. Биотрибология изучает трение, износ и смазку в живых организмах и при контакте тканей с искусственными материалами. Её главная практическая задача — продлить срок службы имплантатов и эндопротезов, чтобы человеку не требовалась повторная тяжёлая операция. В статье изложены понятие и классификация биотрибологических систем, режимы трения и механизмы износа, эволюция материалов пар трения, области применения в медицине, нормативная база Российской Федерации и направления развития.

Биотрибология — раздел трибологии (науки о трении и износе), который изучает трение, износ и смазку в биологических системах и при их взаимодействии с искусственными материалами. Она объединяет медицину, биомеханику, инженерию и материаловедение. Главная задача — долговечность и биосовместимость медицинских изделий: для суставных протезов цель — 20–25 лет службы и более без ревизионного эндопротезирования.

Биотрибологическая система — это структура, в которой взаимодействуют четыре части:

1. Биологические ткани — кости, хрящи, кожа, сосуды, зубы;
2. Искусственные поверхности — протезы, импланты, эндопротезы;
3. Смазочная среда — синовиальная жидкость, слюна, кровь, медицинские гели;
4. Нагрузки и динамика движений — внешние и внутренние силы.

Здоровый сустав — эталон такой системы: роль идеального подшипника играет хрящ, роль смазки — синовиальная жидкость, а коэффициент трения настолько мал, что сустав скользит лучше льда по льду. Инженеры пытаются воспроизвести это в протезах.

Классификация биотрибологических систем. Системы делят по типу взаимодействующих элементов и по функции. **Таблица-1.**

Вид	Пример	Особенности
Естественные	Суставные поверхности, кожа, роговица	Саморегуляция смазки, биологическая адаптация
Искусственные	Протезы, эндопротезы, импланты	Требуют подбора смазок и улучшения материалов
Комбинированные	Живые ткани в контакте с протезными элементами	Максимальные требования к биосовместимости

По функциональному назначению выделяют пять групп:

1. Ортопедические — суставные импланты, эндопротезы;
2. Кардиологические — клапаны сердца, сосудистые шунты;
3. Стоматологические — зубные протезы, брекеты, импланты;
4. Офтальмологические — контактные линзы, искусственная роговица;
5. Хирургические — катетеры, стенты, скобочные системы.

Трение, износ и смазка. В биологических условиях различают три режима трения; от режима зависит, насколько быстро изнашиваются поверхности. **Таблица-2.**

Режим	Описание	Пример
Сухое трение	Контакт поверхностей без смазки	Трение зуба о пищу
Граничное трение	Контакт покрыт тонкой плёнкой смазки	Работа суставов при низкой нагрузке
Гидродинамическое трение	Поверхности разделены жидкостью	Движение коленного сустава при ходьбе

Износ возникает по четырём причинам:

1. абразивное воздействие частиц;
2. усталостное разрушение материалов;
3. коррозионные процессы;
4. деградация смазочной среды.

Смазка. В здоровом суставе смазку даёт синовиальная жидкость. Для протезов имеются два пути: подбирать текстуру и геометрию поверхностей так, чтобы между ними удерживалась биологическая жидкость, и делать полимеры гидрофильными, чтобы на поверхности всегда оставалась защитная водная микроплёнка. **Таблица-3.**

Смазка	Пример	Функция
Естественная	Синовиальная жидкость, слюна	Снижение трения
Искусственная	Медицинские гели, полимерные растворы	Повышение долговечности имплантов
Комбинированная	Протезные смазки в сочетании с биологическими жидкостями	Снижение износа и воспалений

Материалы пар трения и остеолиз.

Главная проблема эндопротезов — микроскопические частицы износа. Когда полимер или металл истираются, миллионы наночастиц попадают в окружающие ткани, и организм воспринимает их как инородные тела. Макрофаги пытаются «переварить» частицы и выделяют ферменты, которые разрушают кость, удерживающую имплант. Это остеолиз («мусорная болезнь»), и он приводит к расшатыванию сустава. Поэтому материалы подбирают по минимуму частиц износа. **Таблица-4.**

Пара трения	Что известно
Металл по полиэтилену	Исторический стандарт; обычный полиэтилен быстро изнашивался; высокосшитый полиэтилен (XLPE, облучённый радиацией) снизил износ на 80–90 %
Керамика по керамике	Самая долговечная пара сегодня: оксид алюминия или циркония, высокая гладкость и твёрдость, частицы почти не вызывают воспаления
Керамика по пластику	Оптимальный баланс прочности, долговечности и стоимости

Износ эндопротеза тазобедренного сустава — это постепенное разрушение материалов протеза из-за трения, которое приводит к образованию микрочастиц (детрита), повреждению костной ткани и расшатыванию конструкции.

Сроки службы и факторы износа. Около 85–90% современных эндопротезов тазобедренного сустава успешно функционируют через 15–20 лет после установки, а новейшие керамические модели могут служить более 30 лет. **Пары трения и их качество:**

1. *Металл + полиэтилен:* бюджетный вариант, более подвержен износу.
2. *Металл + металл:* обладает высокой токсичностью продуктов трения (в современной практике почти не используется).
3. *Керамика + полиэтилен:* считается оптимальным выбором.
4. *Керамика + керамика:* высокая износостойкость.
5. *Керамика +металл:* худшая качество (в современной практике не используется).

Типы эндопротезов тазобедренного сустава: Рис.1.



А) Б) В) Г) Д)

Рисунок-2. Используемые материалы тотальных эндопротезов: А) Метал + полимер. Б) Метал + метал. В) Керамика+ полимер. Г) Керамика+керамика. Д) Керамика+метал.

Применение в медицине. Таблица-5.

Область	Что делают
Ортопедия и травматология	Эндопротезы тазобедренного и коленного суставов; наноструктурированные покрытия; керамические пары трения; шарниры аппаратов внешней фиксации
Кардиохирургия	Искусственные клапаны сердца; покрытия стентов; гидрофобные материалы, снижающие риск тромбоза
Стоматология	Импланты и коронки с высокой износостойкостью; снижение трения между ортодонтическими дугами и брекетами
Офтальмология	Контактные линзы с улучшенной смазкой; искусственная роговица с минимальным трением

Отдельный пример из травматологии — аппарат внешней фиксации. По описанию патента РФ № 2845100, одноосные цилиндрические шарниры из двух кронштейнов и болта не держат заданный угол: площади поверхностей трения недостаточны для сопротивления моменту сил. Предложенный в патенте узел удерживает угол жёстким упором трёх гаек в грани вилки и работает в четырёх положениях (0°, 30°, 60°, 90°).

Судебно-экспертная практика. Биотрибологические системы могут стать предметом спора: иски о некачественных эндопротезах, экспертиза материалов, установление причин разрушения изделий, анализ отказов пар трения. Эксперты проверяют соответствие материалов стандартам, наличие конструктивных дефектов и допустимые нагрузки. Проблемы и перспективы.

Проблемы: высокая стоимость материалов и протезов, нехватка отечественных производителей, риск отторжения имплантов, недостаток клинических испытаний. **Перспективы:**

1. Наноматериалы — керамические и графеновые покрытия;
2. Биосовместимые полимеры, улучшающие контакт импланта с тканями;
3. 3D-печать протезов — индивидуализация систем под пациента;
4. «Умные» импланты с датчиками, контролирующими трение и износ в реальном времени;
5. Моделирование процессов трения с помощью искусственного интеллекта.

Биотрибология в педиатрии — это научно-практическое направление, изучающее процессы трения, износа и смазки в живых системах и медицинских устройствах, адаптированное под особенности растущего детского организма. В отличие от взрослой медицины, педиатрическая биотрибология напрямую связана с процессами **непрерывного роста, формирования скелета и высокой эластичности тканей** ребенка (рис.1).

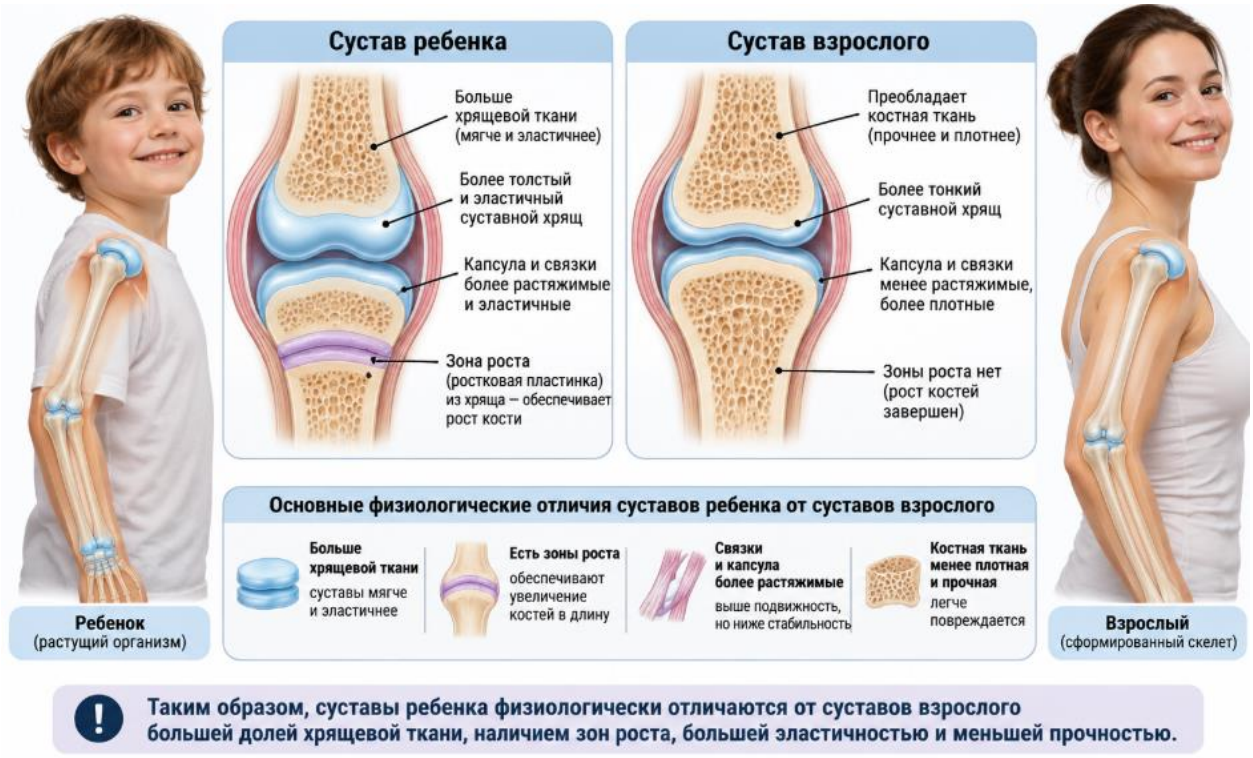

Рисунок-1. Суставы ребенка физиологически отличаются от суставов взрослого.

Ключевые области применения в педиатрии:

1. Биотрибология синовиальных суставов.

- **Особенности смазки:** Синовиальная жидкость и структура суставного хряща у детей обеспечивают минимальный коэффициент трения для защиты зон роста (эпифизарных пластинок).
- **Детские патологии:** при таких заболеваниях, как ювенильный идиопатический артрит (ЮИА) или дисплазия тазобедренного сустава, нарушается естественная «трибосистема» сустава. Биотрибологические исследования помогают понять, как деградация смазочных свойств

синовиальной жидкости приводит к преждевременному износу хряща у детей.

2. Педиатрическая травматология и ортопедические имплантаты

Внедрение фиксаторов и протезов детям требует совершенно иных трибологических решений, чем взрослым:

- **Биодеградируемые имплантаты:** чтобы избежать повторных операций по удалению металлических пластин и винтов, травмирующих психику и ткани ребенка, в педиатрии активно применяются биодеградируемые материалы (полилактиды, магниевые сплавы). Биотрибология изучает, как эти материалы изнашиваются и растворяются в организме, сохраняя стабильность трения во время движения ребенка.
- **Проектирование с учетом роста:** Имплантаты не должны вызывать механического блокирования зон роста (эффект «тетеринга»), что требует точного расчета сил трения на границе кость-имплантат.

3. Биотрибология кожи и неонатология

Кожа ребенка, особенно недоношенного, имеет тонкий защитный слой себума и повышенную чувствительность к внешнему трению.

- **Профилактика повреждений:** Трибология кожи исследует взаимодействие эпидермиса младенца с материалами подгузников, постельного белья и медицинских датчиков в отделениях интенсивной терапии.
- **Разработка средств ухода:** на основе трибологических тестов (оценка скольжения и трения) создаются безопасные детские присыпки, кремы и смазки, снижающие риск образования опрелостей и механического дерматита.

4. Оральная трибология в педиатрии

Изучает процессы, происходящие в ротовой полости ребенка при глотании, сосании и прорезывании зубов.

- **Детское питание и лекарства:** Оральная биотрибология помогает оценивать текстуру («чувство во рту») жидких детских лекарств и смесей, снижая их липкость и облегчая проглатывание.
- **Стоматология:** Изучение износа молочных зубов, а также трения ортодонтических конструкций (брекет-систем, пластин), используемых для коррекции прикуса у подростков.

Сравнительный анализ: Педиатрическая и взрослая биотрибология

Параметр	В педиатрии	У взрослых
Главная цель	Защита **зон роста** и биосовместимость при развитии.	Максимальная **долговечность** протезов при высоких нагрузках.
Материалы имплантатов	Приоритет за **растворимыми/растущими** конструкциями.	Постоянные **металлы, керамика, высокопрочные пластики**.
Состояние тканей	Высокая эластичность, быстрая регенерация.	Возрастная дегенерация хряща, остеоартриты.
Оральная среда	Смена прикуса, адаптация к разным типам пищи.	Постоянный прикус, проблемы стираемости эмали.

Заключение. Биотрибологическая система — это ткани, искусственные поверхности, смазка и нагрузка, взятые вместе. Долговечность импланта зависит от того, насколько часто износ даёт частицы и насколько надёжно смазка разделяет поверхности. Биотрибология в педиатрии позволяет создавать медицинские технологии, которые «растут» вместе с ребенком, минимизируя операционные риски и поддерживая естественную биомеханику развивающегося организма. Дальнейшее развитие области связано не только новыми материалами, индивидуальными изделиями и датчиками контроля, но и сотрудничество между врачами и инженерами, которые принесут наилучшие достижение в науке и лечение пациентов.

Литература

1. Епифанов В. А. Лечебная физическая культура и массаж: учебник. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2013. — 528 с. — ISBN 978-5-9704-2645-6.
2. Лечебная физическая культура: учебное пособие / под ред. ведущих специалистов. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2017. — 656 с. — ISBN 978-5-9704-4257-9.
3. Реабилитация при повреждениях локтевого сустава и их последствиях: клинические рекомендации. — 2015 [Электронный ресурс]. — URL: https://diseases.medelement.com/disease/15364 (дата обращения: 14.10.2026).
4. Чичинадзе А. В. (ред.) Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2001. — 664 с. — ISBN 5-217-02981-X.
5. Биотрибология суставного хряща: обзор современных представлений [Электронный ресурс]. — Дата обращения: 14.10.2026.