

Персонализированная биомеханическая модель коленного сустава пациента с заболеванием гонартроз

Тягунова А.И. (Сеченовский унив.),
Юрова А.С. (ИВМ РАН).

Гонартроз

Хроническое дегенеративно-дистрофическое заболевание, характеризующееся:

- Прогрессирующим разрушением гиалинового хряща;
- Изменениями субхондральной кости;
- Развитием воспалительных процессов в синовиальной оболочке.

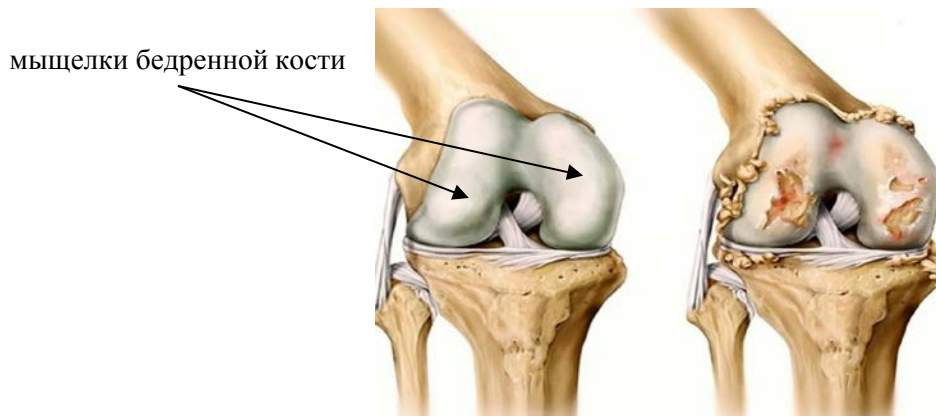


Рис. 1: Гонартроз коленного сустава

Варусная и вальгусная деформация

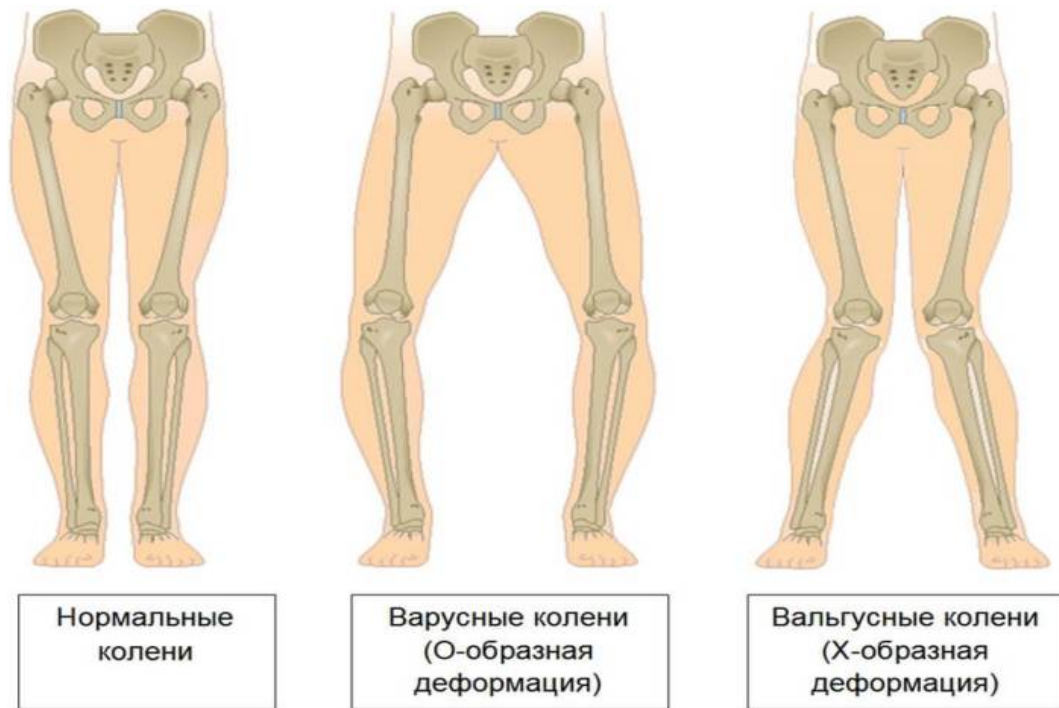


Рис. 2: Варусная и вальгусная деформация коленных суставов

Биомеханическая модель коленного сустава

- Твердые тела (бедренная кость (femur), надколенник (patella), берцовый кости (tibia, fibula));
- Суставы (пателло-фemorальный, тibiо-фemorальный);
- Силы (контактные поверхности, связочный аппарат, мышцы, амортизационные силы);
- Ограничивающие тела.

Костная структура модели

- Бедренная кость (femur);
- Надколенник (patella) – коленная чашечка;
- Берцовые кости (tibia, fibula).

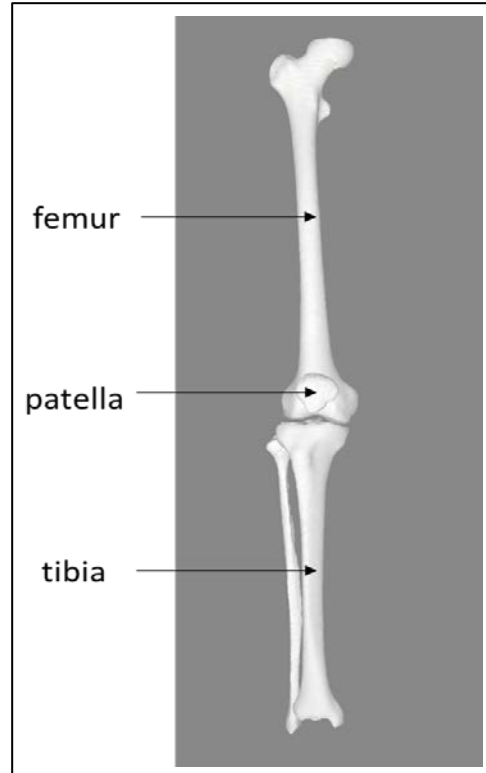


Рис. 3: Костная структура

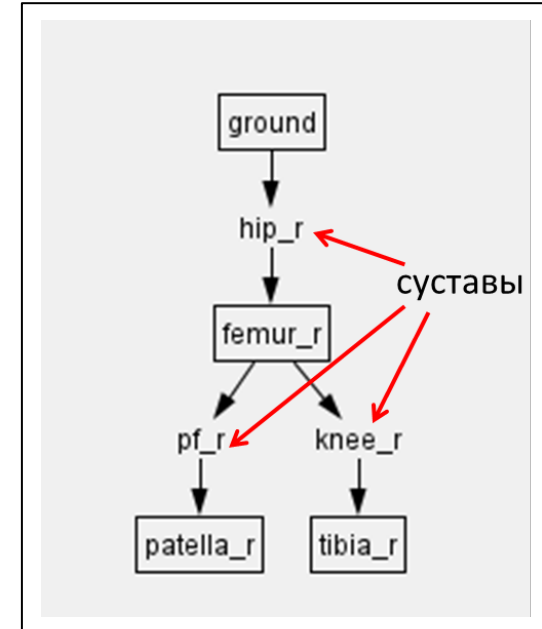


Рис. 4: Суставы

Построение персонализированной модели. Костная структура

1. Сегментация (ITK-SNAP);
2. Построение сеток (ITK-SNAP);
3. Изменение параметров сеток (Paraview, GMSH, MeshLab);
4. Внедрение сеток в модель коленного сустава в качестве поверхностей твердых тел.

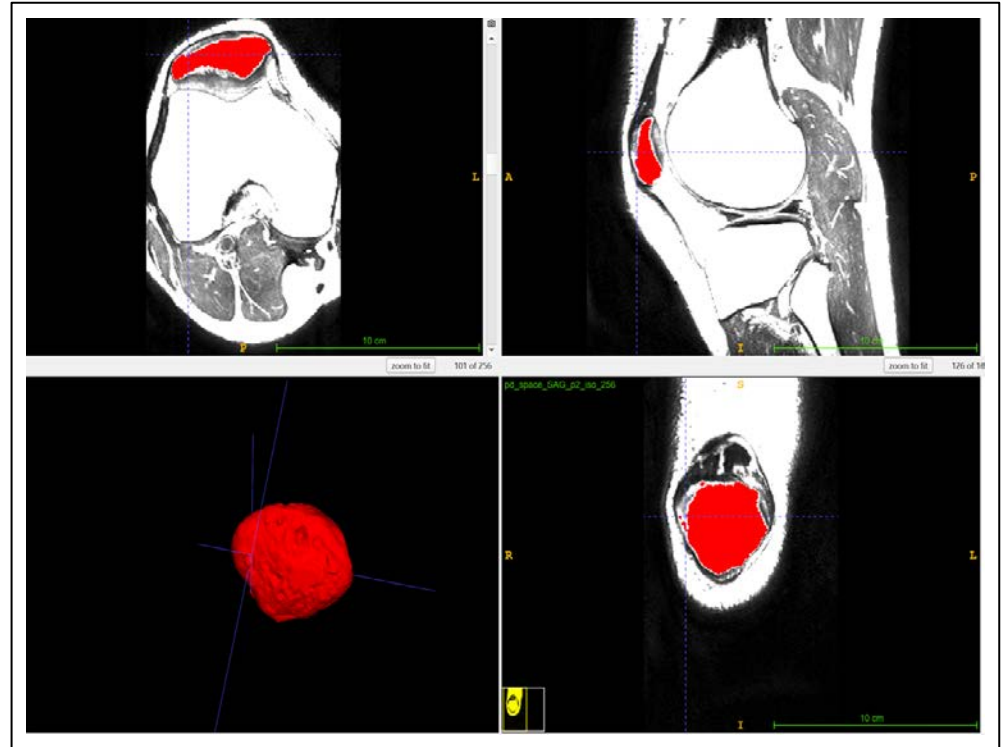


Рис. 5: Сегментация надколенника

Связочный аппарат

Связки – один из видов сил доступных в OpenSim, представлены как тонкие нити с двумя точками крепления.

В модели 24 связки:

- ACL (2),
- PCL (2),
- MCL (5),
- LCL (1),
- PFL (1),
- posterior capsule (4),
- patellar tendon (3) ,
- MPFL,
- MPTL,
- retinaculum (4) .

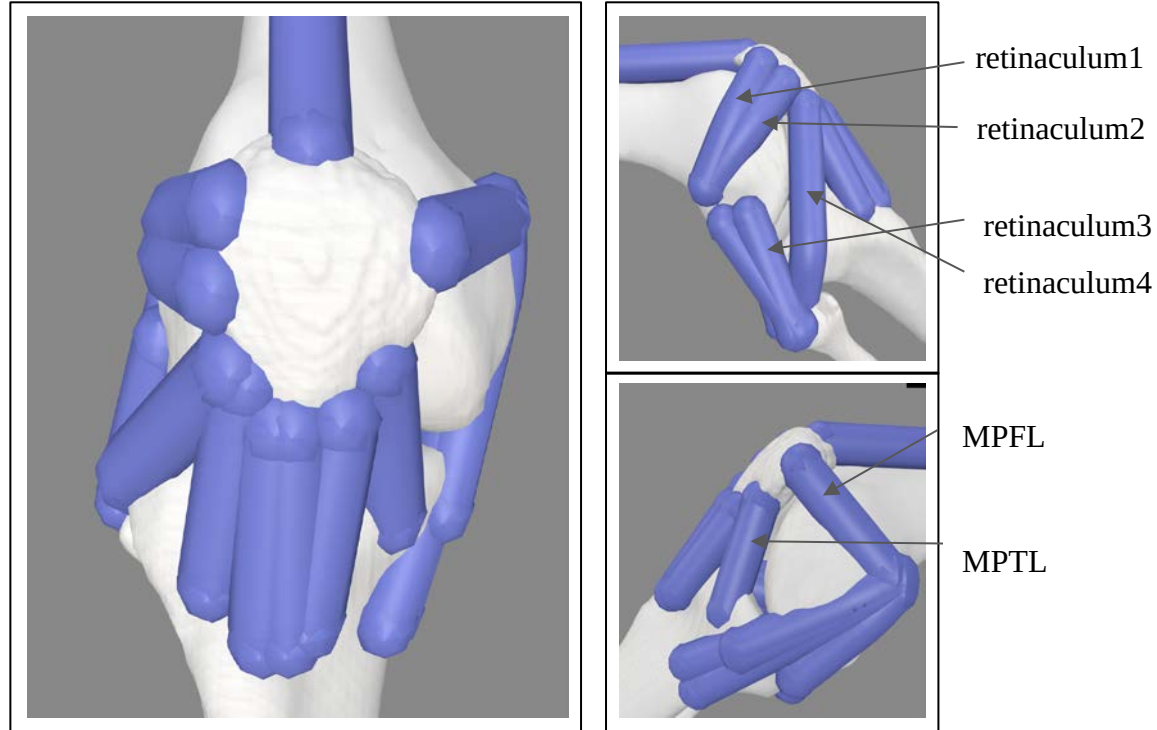


Рис. 6: Связочный аппарат модели

Мышца

В модель включена промежуточная широкая мышца бедра (musculus vastus intermedius).

Эта мышца участвует в разгибании коленного сустава и соединяет бедренную кость с вершиной надколенника.

В модели мышца пассивна и является стабилизатором надколенника.

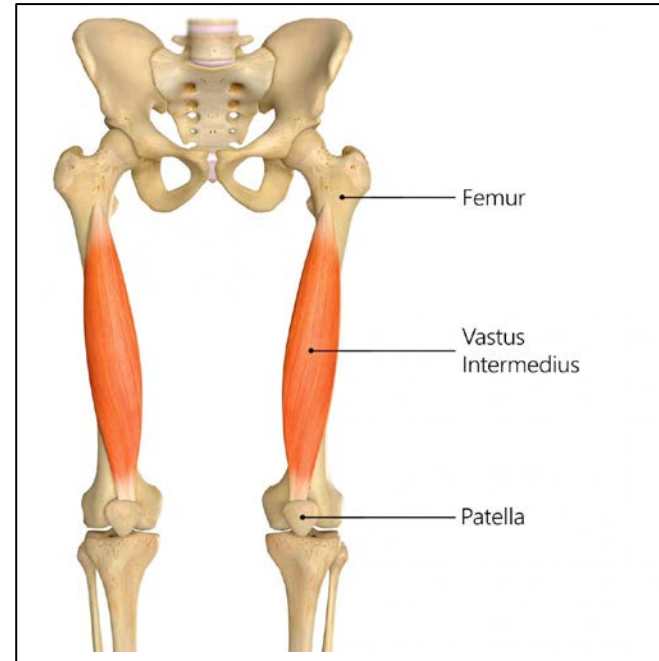


Рис. 7: Промежуточная широкая мышца бедра

Ограничивающие тела

Необходимы для предотвращения прохождения связок через костные структуры.

- Сфера в латеральном мыщелке бедренной кости;
- Сфера в медиальном мыщелке бедренной кости;
- Сфера в латеральной мыщелке берцовой кости;
- Цилиндр для изгиба мышцы.

ограничивающее тело
в мыщелке берцовой кости

ограничивающие тела в
мышцелках бедренной кости

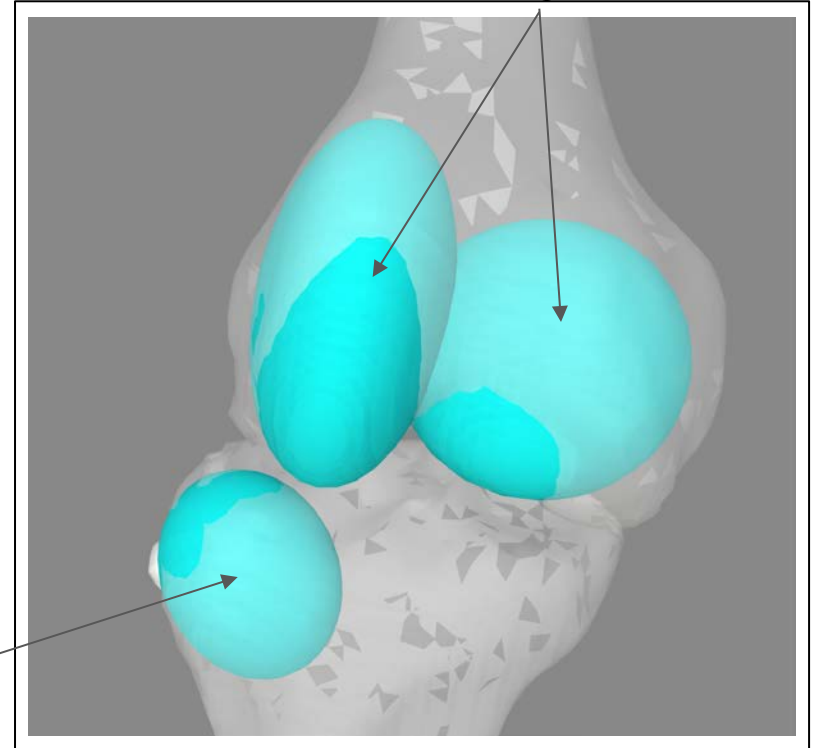


Рис. 8: Ограничивающие тела в модели

Контактные поверхности

Модель пациента в гонартрозом:

- на мыщелках бедренной кости (16);
- на внутренней стороне надколенника;
- на мыщелке берцовой кости (2).

Модель физиологической нормы:

- на мыщелках бедренной кости (2);
- на внутренней стороне надколенника;
- мениски (8);
- на мыщелке берцовой кости (2).

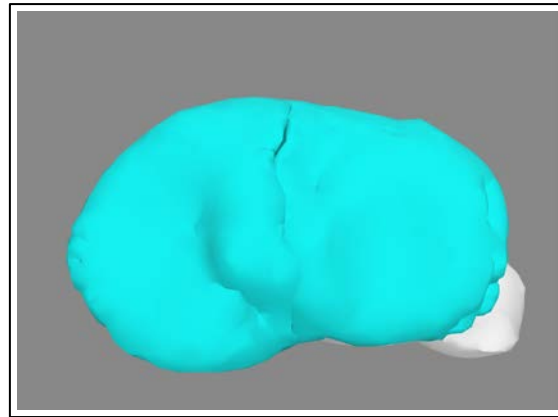


Рис. 9: Контактные поверхности на берцовой кости

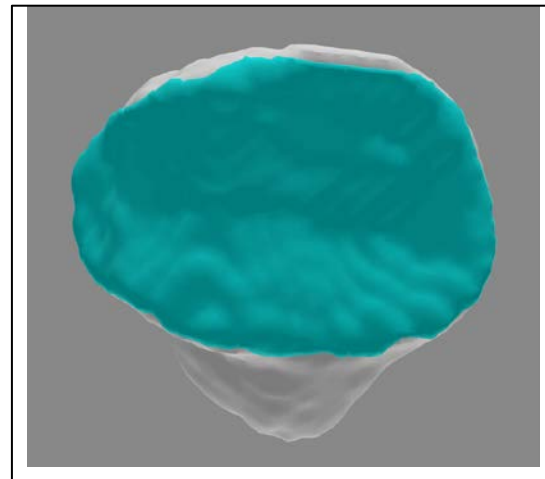


Рис. 10: Контактная поверхность на надколеннике

Мениски в модели физиологической нормы

Резекция мениска – мениск разделен на 4 части.

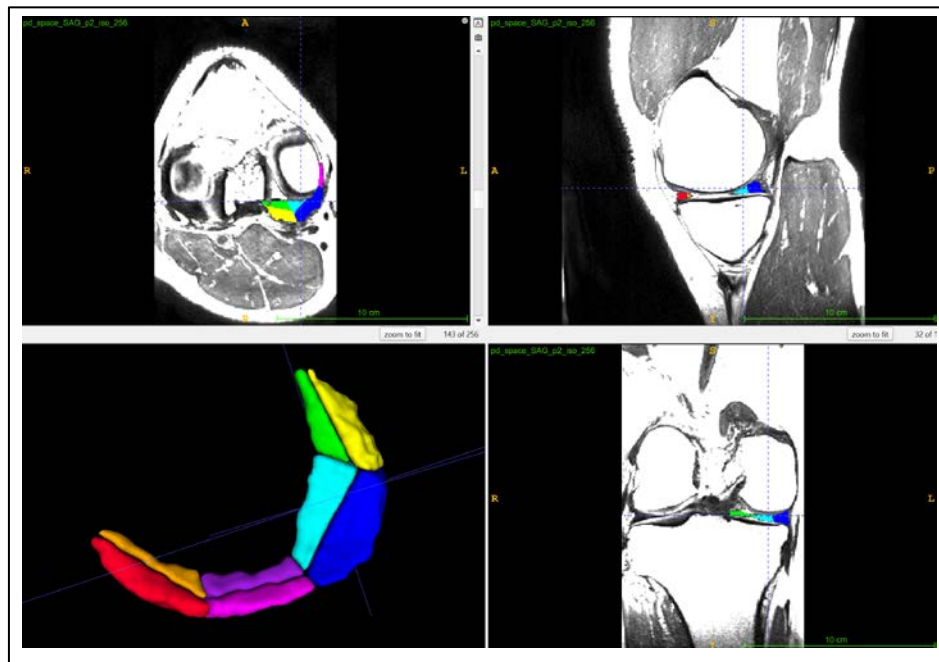


Рис. 11: Резекция мениска

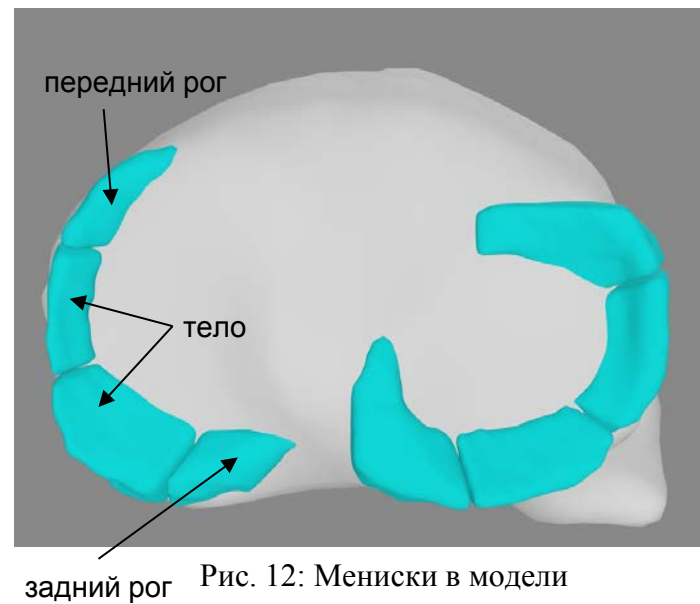


Рис. 12: Мениски в модели

Сетки контактных поверхностей

1. Выделение поверхности (Paraview);
2. Построения надстроек (GMSH);
3. Изменение параметров сеток (Paraview, MeshLab);
4. Внедрение сетки в модель коленного сустава в качестве контактных поверхностей.

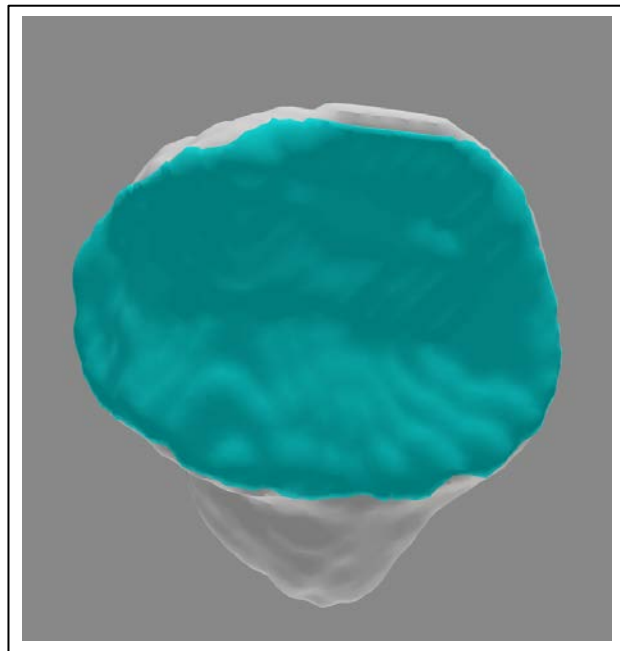


Рис. 13: Контактные поверхности в модели

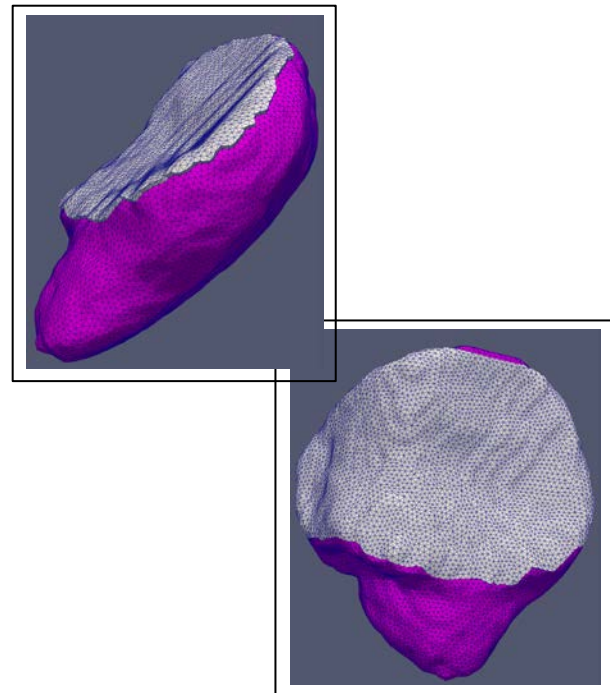
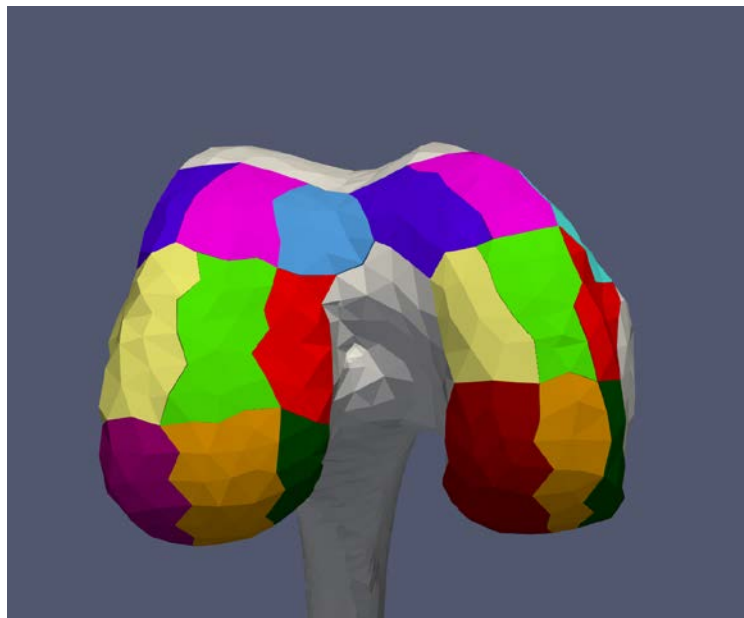


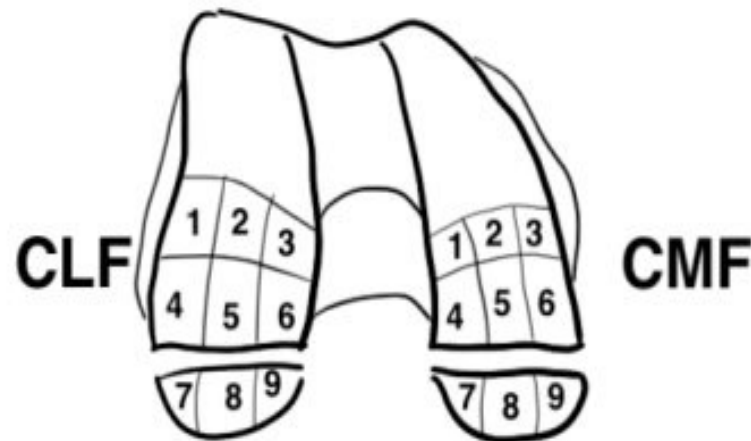
Рис. 14: Сетка контактной поверхности на надколеннике

Контактные поверхности на бедренной кости



латеральная
(внешняя) сторона

медиальная (внутренняя)
сторона



латеральная
(внешняя) сторона

медиальная (внутренняя)
сторона

Рис. 15: Пятна контакта

ElasticFoundationForce

ElasticFoundationForce –
модель контактного
взаимодействия.

Модель реализует контакт
по модели упругого
основания.

Сила реакции
пропорциональна глубине
проникновения.

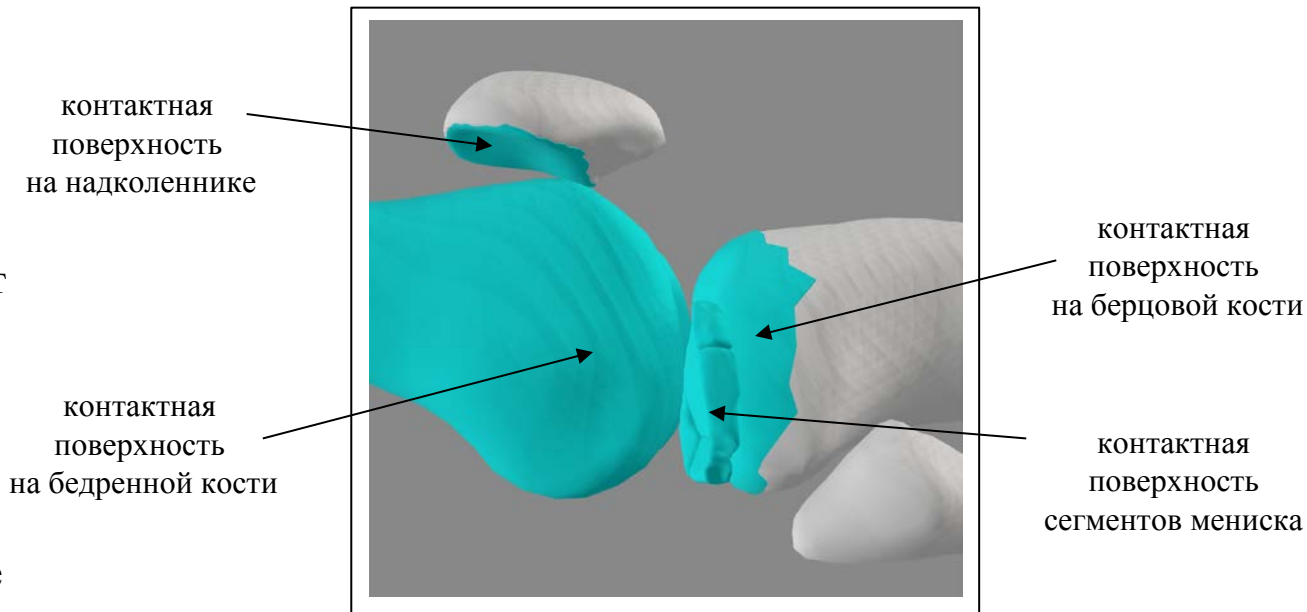


Рис. 16: Контактные
поверхности
в модели

Персонализированная модель коленного сустава в физиологической норме

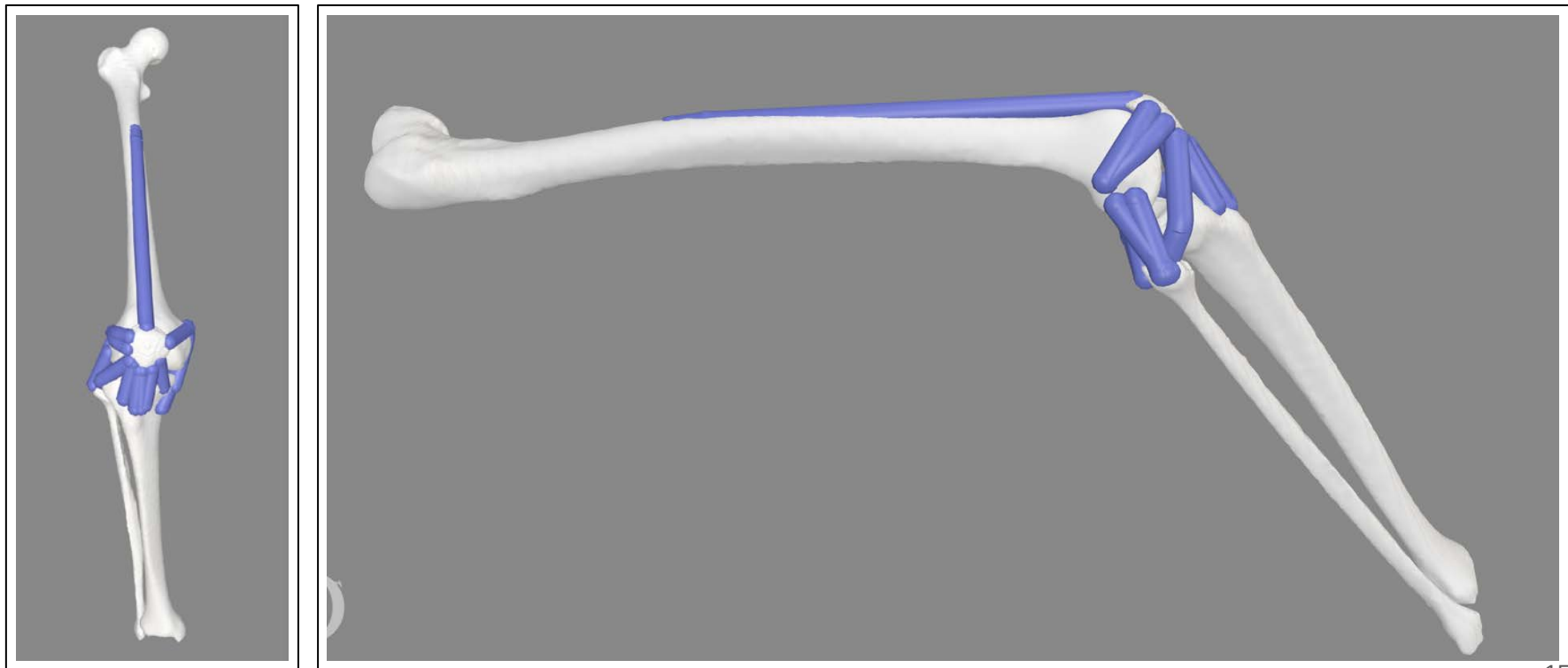


Рис. 17: Модель коленного сустава

Forward Dynamics

Forward Dynamics — инструмент OpenSim, позволяющий анализировать, как изменяются обобщенные координаты и скорости под действием сил и моментов. Он используется в биомеханическом моделировании, в том числе для расчета нагрузки на бедренную кость и мениски при пассивном сгибании колена.

Основу метода составляет второй закон Ньютона, представленный в виде уравнения:

$$\ddot{\bar{q}} = [M(\bar{q})]^{-1} * \{\tau + C(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) + G(\bar{q}) + F\}$$

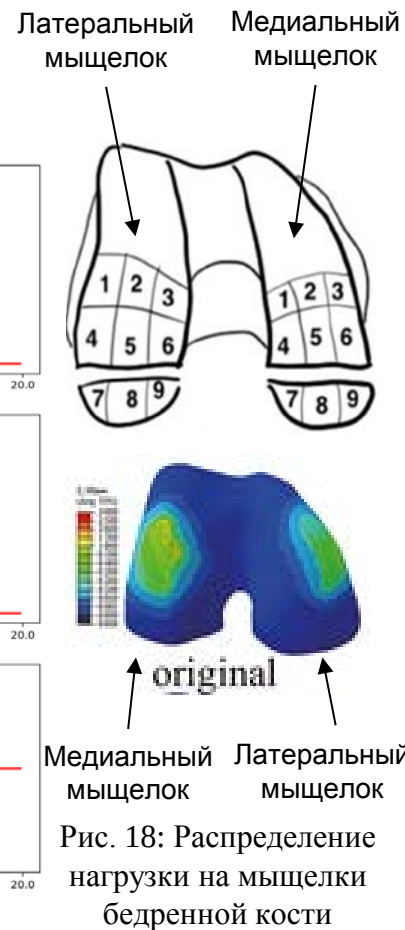
где:

- $\bar{q}, \dot{\bar{q}}, \ddot{\bar{q}}$ — векторы обобщенных координат, скоростей и ускорений;
- $M(\bar{q})$ — матрица масс системы;
- $C(\bar{q}, \dot{\bar{q}})$ — вектор Кориолисовых и центробежных сил;
- $G(\bar{q})$ — вектор гравитационных сил;
- τ — крутящий момент;
- F — дополнительные силы (например, упругость связок, контактные взаимодействия).

Модель пациента с диагнозом гонартроз



График 1: Контактные силы между большеберцовой костью
и медиальным мышцелком бедренной кости



Модель пациента с диагнозом гонартроз

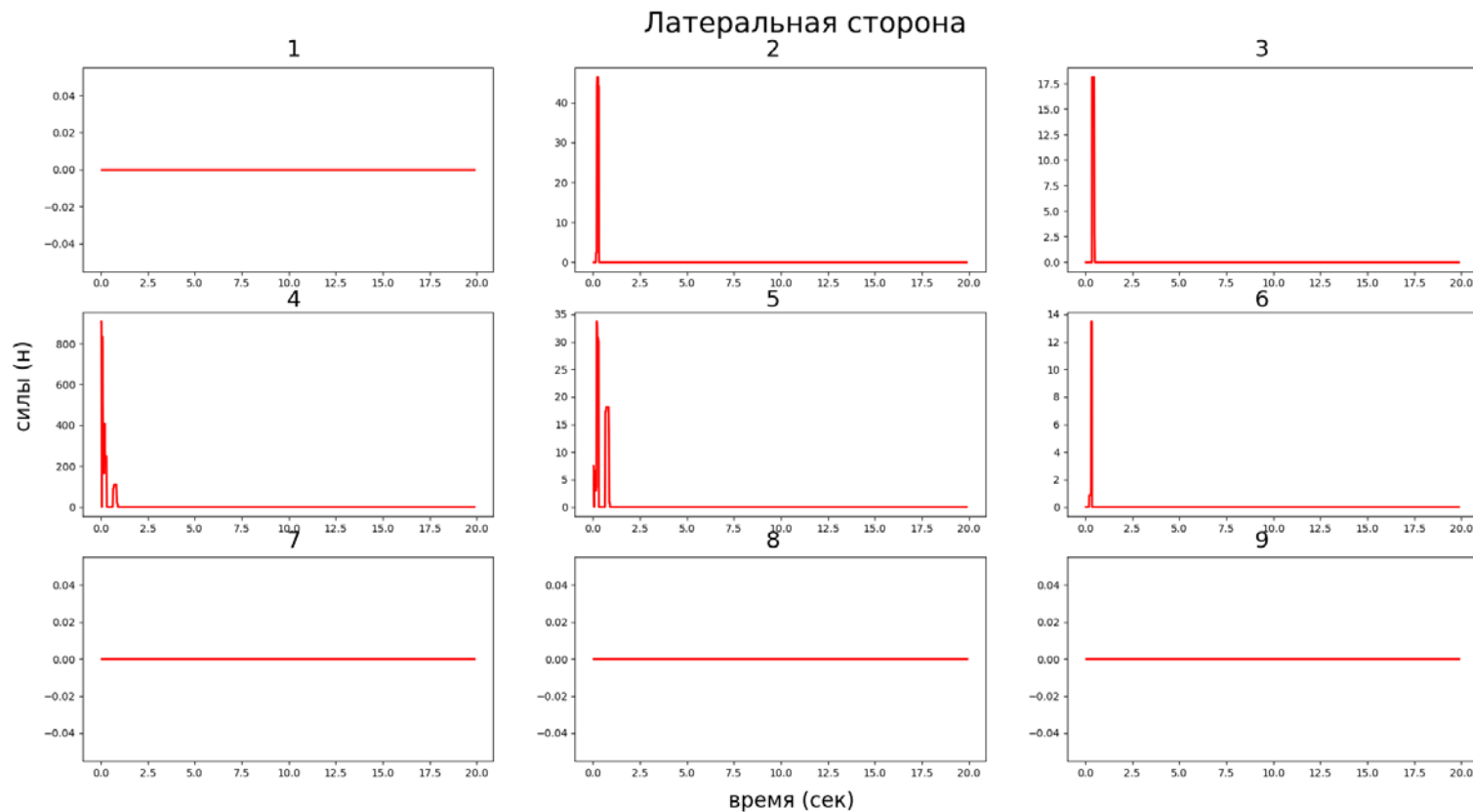
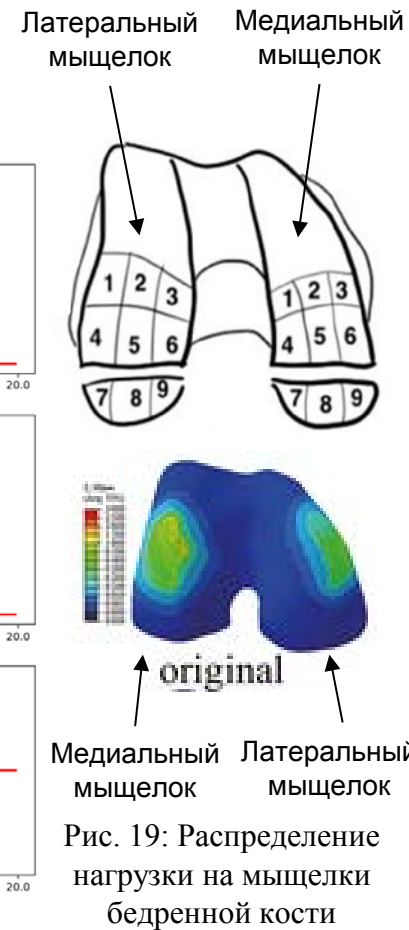


График 2: Контактные силы между большеберцовой костью
и латеральным мышцелком бедренной кости



Вывод: модель пациента с диагнозом гонартроз

- Наибольшая нагрузка приходится на контактные поверхности большеберцовой и бедренной костей, расположенные на латеральной и внутренней части медиального мыщелка.
- Контакт латерального мыщелка бедренной кости с большеберцовой костью минимален.
- Полученные при помощи моделирования результаты совпадают с клиническими наблюдениями и данными публикаций.

Модели вальгусной и варусной деформации

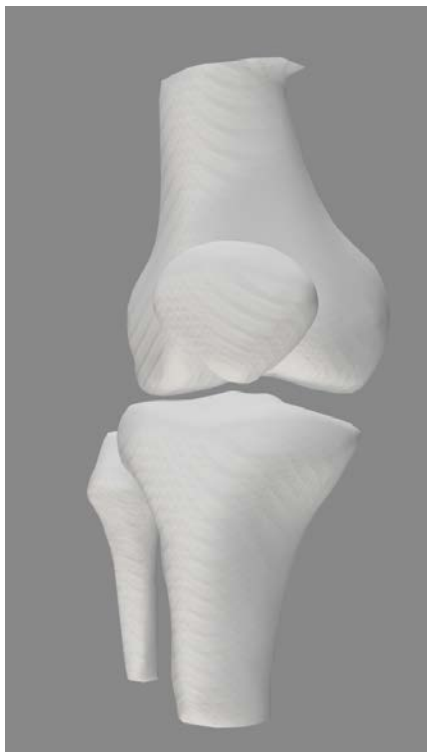


Рис. 20: Модель вальгусной деформации
с углом отклонения 8 градусов



Рис. 21: Модель варусной деформации
с углом отклонения 4 градуса

Модель варусная деформация, 2 градуса

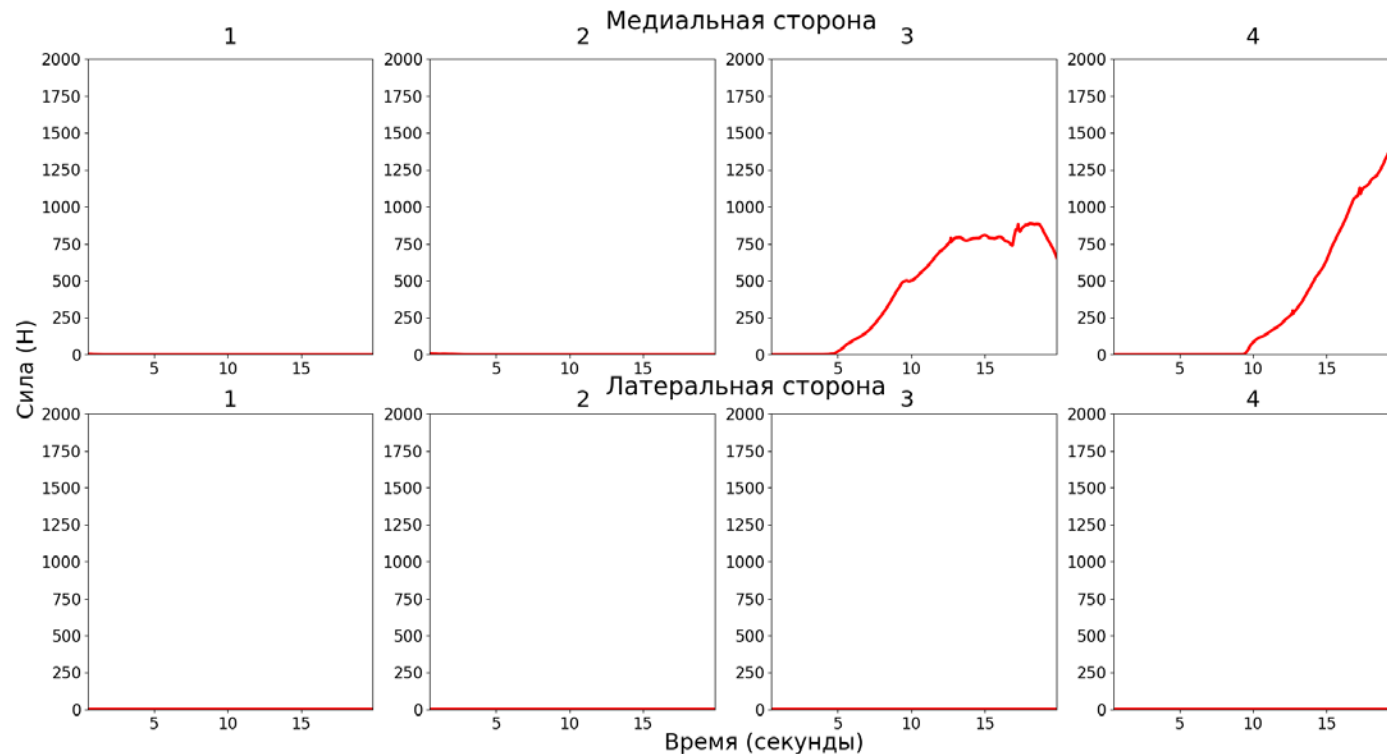


График 3: Контактные силы между сегментами менисков и бедренной костью

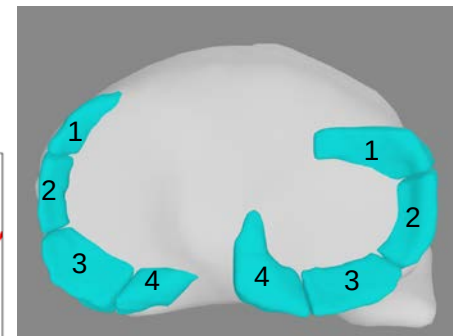
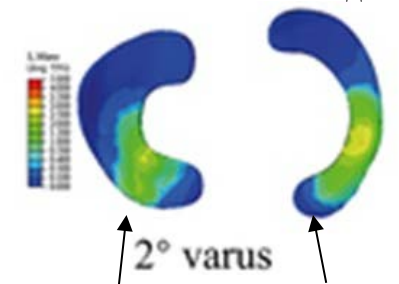


Рис. 24: Мениски в модели



Латеральный мениск Медиальный мениск

Рис. 22: Распределение нагрузки на мениски, варусная деформация 2 градуса

Модель варусная деформация, 4 градуса

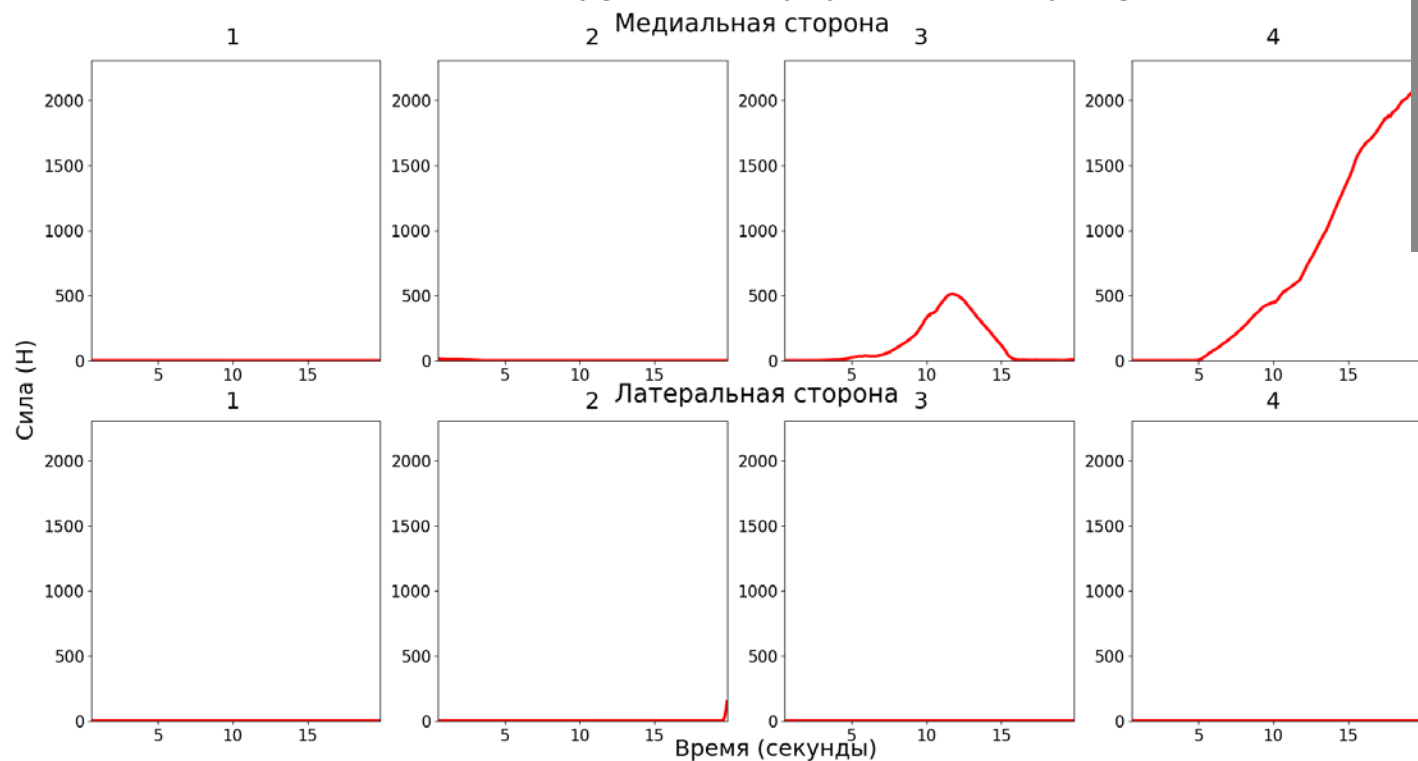


График 4: Контактные силы между сегментами менисков и бедренной костью

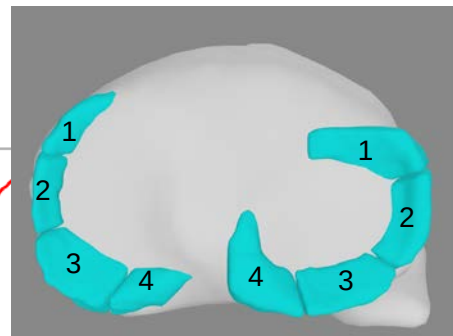
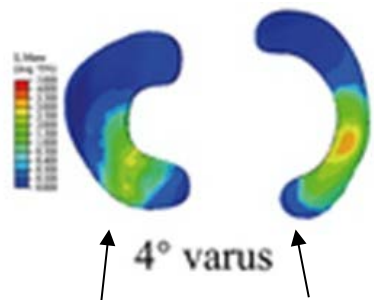


Рис. 24: Мениски в модели



Латеральный мениск Медиальный мениск

Рис. 23: Распределение нагрузки на мениски, варусная деформация 4 градуса

Вывод: модель варусной деформации

При увеличении угла варусной деформации:

- Давление на задний рог медиального мениска увеличивается.
- Давление на тело медиального мениска уменьшается.
- Давление на латеральный мениска отсутствует.
- Полученные при помощи моделирования результаты совпадают с клиническими наблюдениями и данными публикаций.

Модель вальгусная деформация, 2 градуса

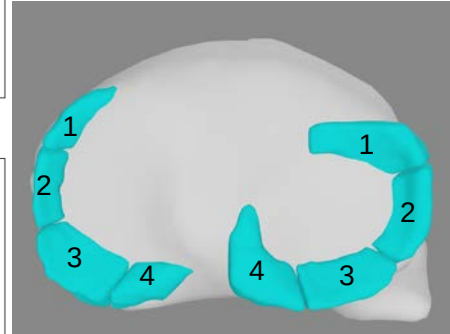
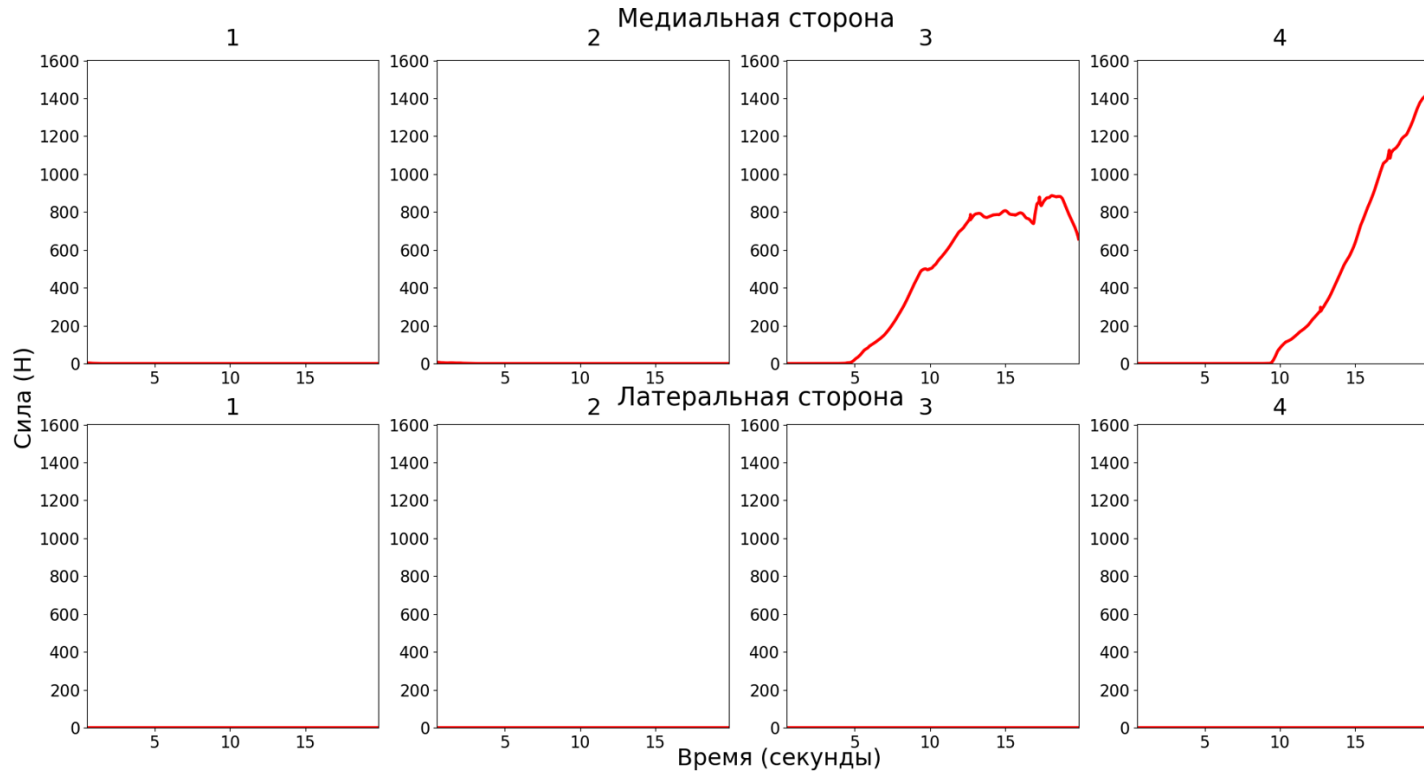


Рис. 24: Мениски в модели

График 5: Контактные силы между сегментами
менисков и бедренной костью

Модель вальгусная деформация, 4 градуса

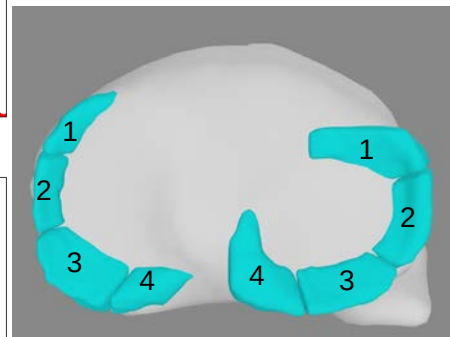
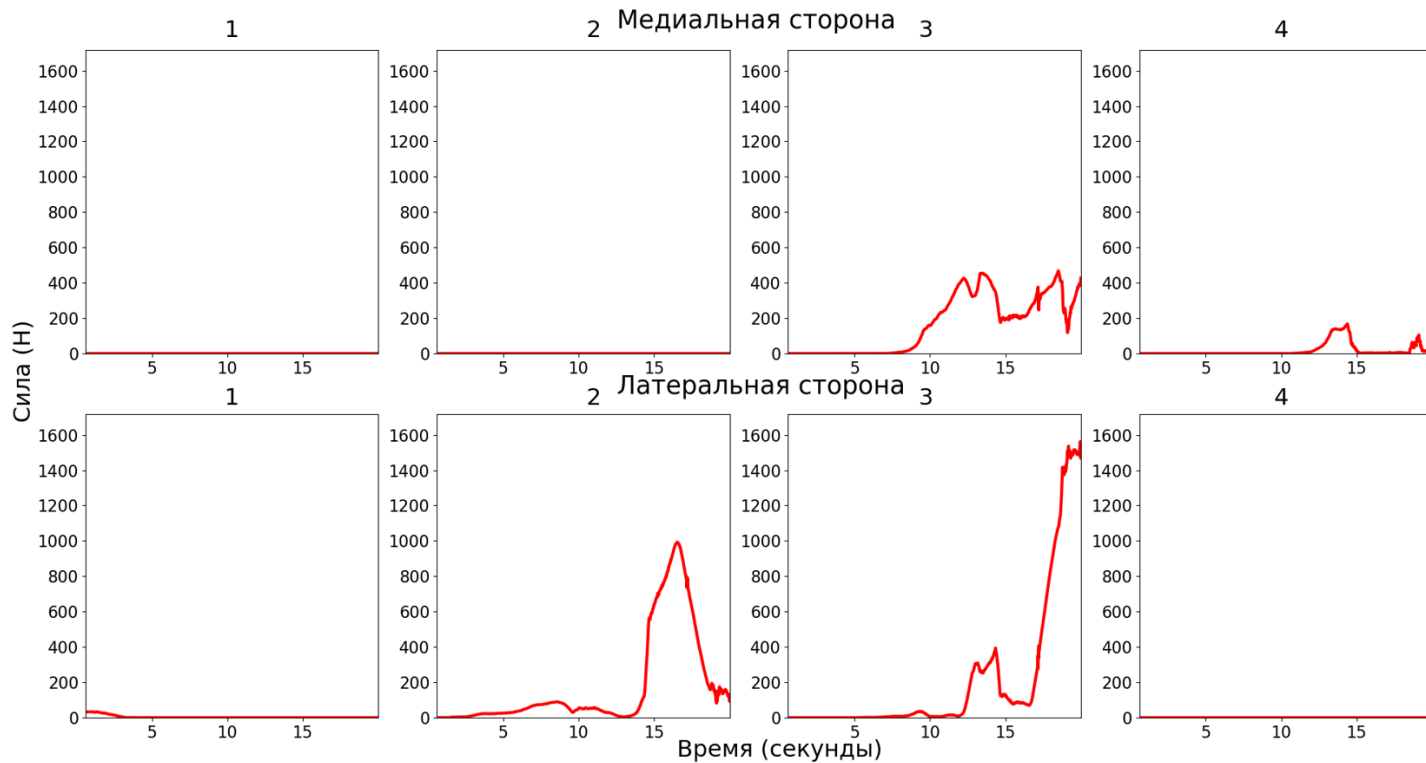


Рис. 25: Мениски в модели

График 6: Контактные силы между сегментами
менисков и бедренной костью

Модель вальгусная деформация, 6 градусов

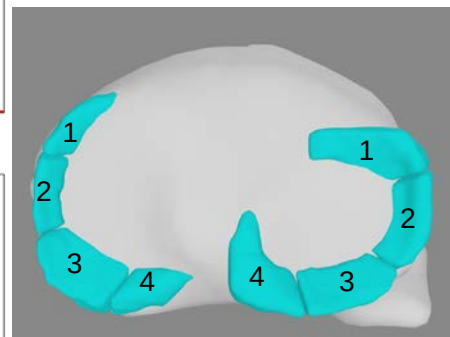
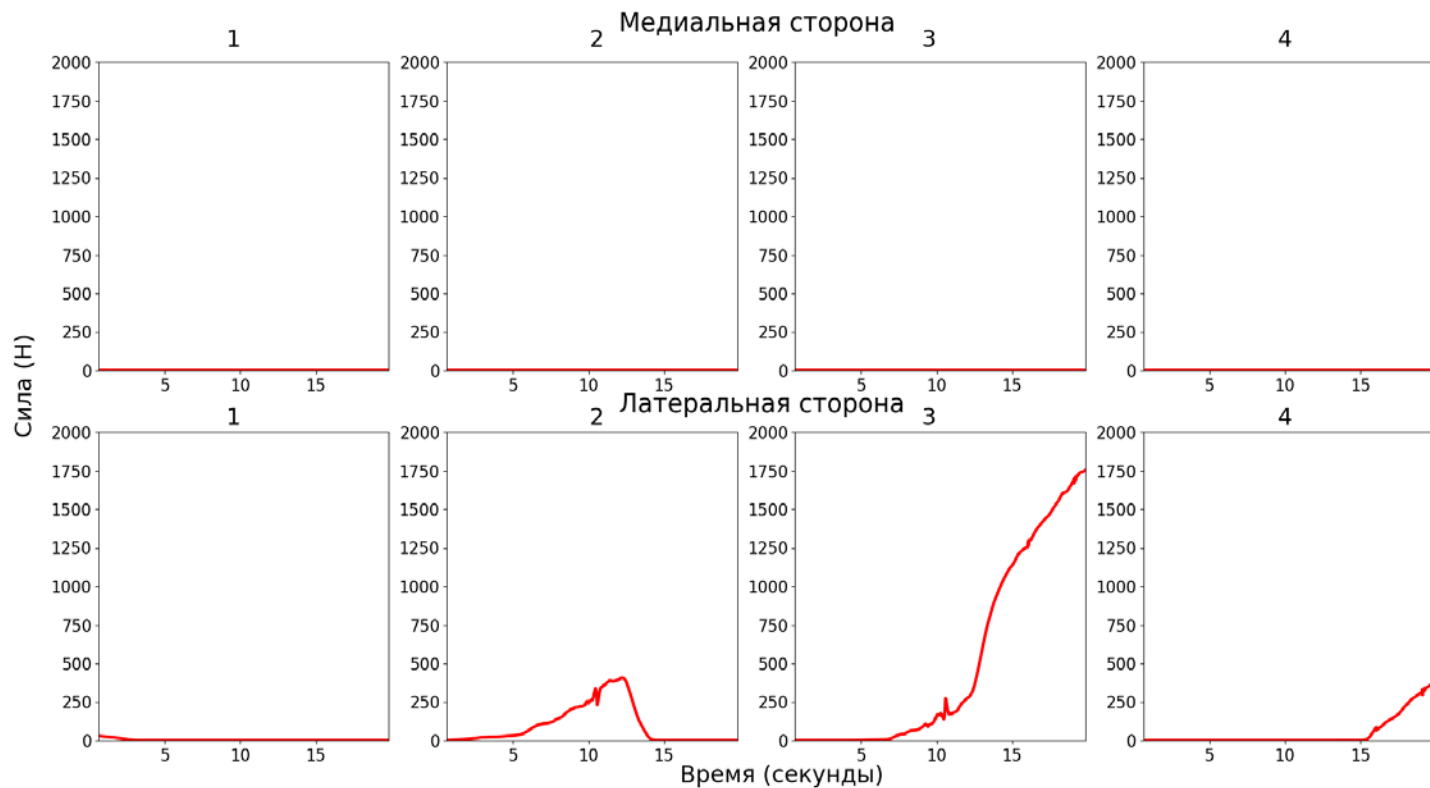


Рис. 26: Мениски в модели

График 7: Контактные силы между сегментами
менисков и бедренной костью

Модель вальгусная деформация, 8 градусов

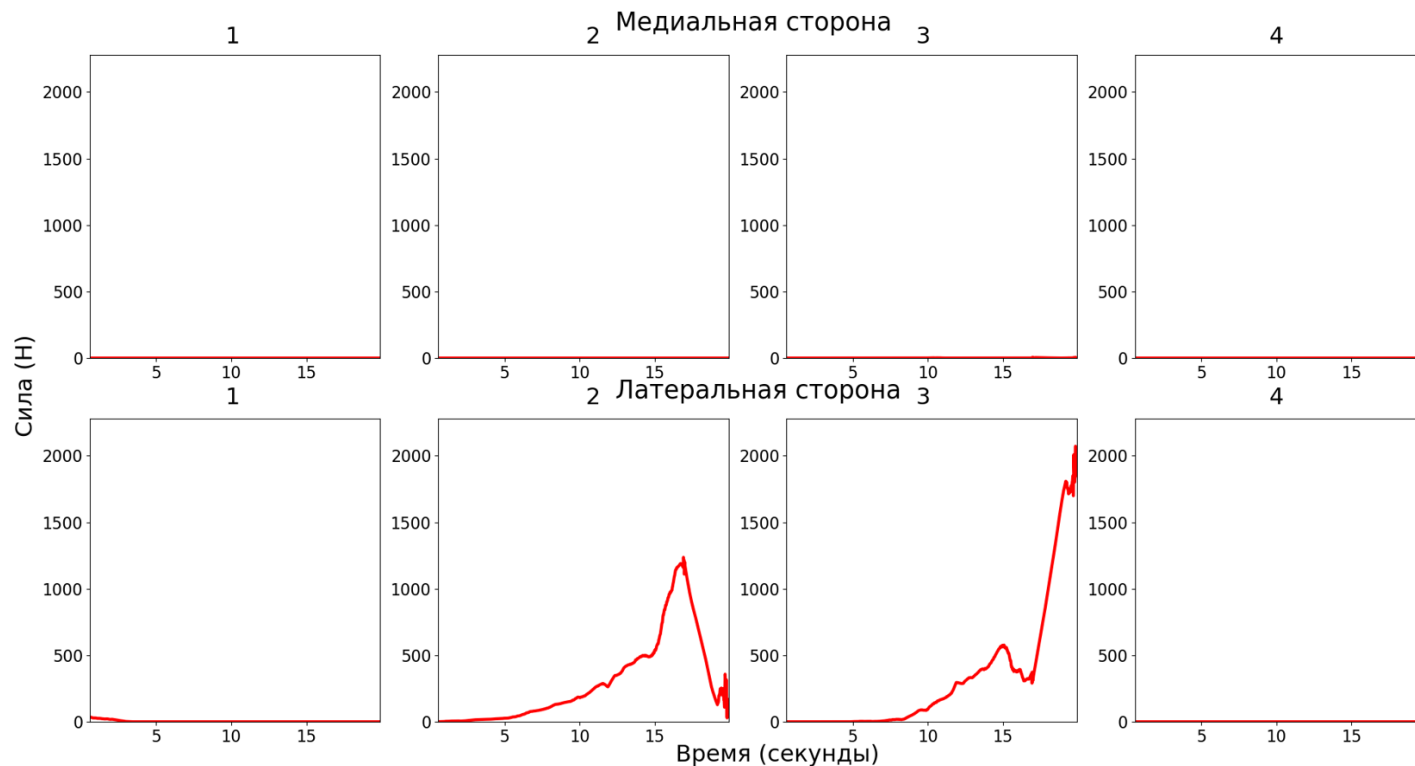


График 8: Контактные силы между сегментами менисков и бедренной костью

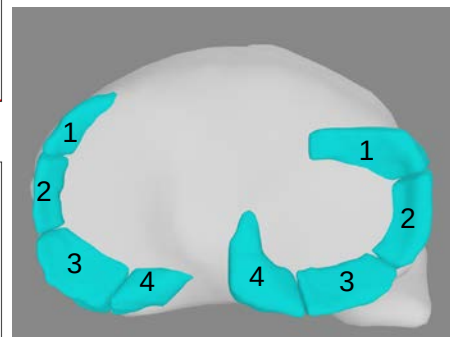


Рис. 27: Мениски в модели

Вывод: модель вальгусной деформации

При увеличении угла вальгусной деформации:

- Давление на тело латерального мениска увеличивается,
- Давление на медиальный мениск пропадает.
- Полученные при помощи моделирования результаты совпадают с клиническими наблюдениями и данными публикаций.

Результаты

- Построена персонализированная модель пациента с диагнозом гонартроз (модель не включает мениски).
- Построена персонализированная модель пациента с коленным суставом в физиологической норме (модель включает мениск), модифицирована для воспроизведения различных степеней варусной и вальгусной деформаций коленного сустава.
- Проведена валидация моделей.

Результаты валидации

- На основе биомеханической модели пациента с диагнозом гонартроз было выявлено, что наибольшая нагрузка приходится на контактные поверхности большеберцовой и бедренной костей, расположенные на латеральной и внутренней части медиального мыщелка. Контакт латерального мыщелка бедренной кости с большеберцовой костью минимален.
- При увеличении угла варусной деформации давление перераспределяется таким образом, что наибольшая нагрузка приходится на задний рог медиального мениска.
- При увеличении угла вальгусной деформации давление на тело латерального мениска увеличивается, а нагрузка на медиальный мениск пропадает.

Forward Dynamics

В данной работе расчет производился через дифференциально-алгебраические уравнения, которые описывают, как силы влияют на движение тела: начальные условия - положение тела и силы; расчет через численный метод Runge-Kutta 5 порядка, повтор расчета каждую 0.001 секунду.

Ограничения инструмента:

- Чувствительность к начальным условиям (неверное задание параметров связок, контактных сил);
- Медленный расчет при усложнении моделей.