Роль модельных подходов в развитии технологий стерилизации палеонтологических объектов

Friday 4 July 2025 11:40 (20 minutes)

Костные останки древних животных служат важным источником новых знаний в палеонтологии, биологии, микробиологии и других областях науки. Обеспечение их долговременной и безопасной сохранности играет ключевую роль при их изучении. Костные останки извлекаются из вечномёрзлых грунтов и могут сопровождаться древними бактериями и вирусами [1]. Одним из перспективных методов стерилизации костной ткани является технология комбинированной радиационной стерилизации, при которой перед облучением применяется обработка озоном [2]. Такой подход позволяет снизить дозу облучения и сохранить структуру кости, что крайне важно для хрупких древних костных останков. На первом этапе комбинированной стерилизации необходимо обеспечить проникновение озона во внутреннюю пористую структуру кости. Математическое моделирование может служить важным инструментом в оптимизации этой процедуры. Моделирование позволяет выявить важнейшие параметры обработки озоном и наиболее оптимальные условия. Более того, математическое моделирование позволяет нам избежать проведения множества реальных экспериментов, что сокращает временные затраты и сохраняет образцы костей. В данной работе рассматривается процесс инфильтрации озона в костную ткань. Математическая модель описывается связанной системой уравнений потока и транспорта. Из-за многомасштабной природы пористой структуры кости численное моделирование процесса инфильтрации представляет вычислительные трудности. Поэтому предлагается подход мультиконтинуального моделирования, основанный на методе мультиконтинуальной гомогенизации. Решаются задачи ячеек ограничений в областях с избыточной выборкой для уравнений потока и транспорта. Решая задачи ячеек, получаем мультиконтинуальные разложения и выводим соответствующие мультиконтинуальные уравнения. Для проверки полученной мультиконтинуальной модели проводим численные эксперименты в различных многомасштабных пористых структурах. Численные результаты демонстрируют высокую точность нашего мультиконтинуального подхода. Однако математическое моделирование инфильтрации озона в костную ткань является вычислительно сложной задачей. Основная сложность заключается в пористой структуре костных тканей, характеризующейся высокой неоднородностью и многомасштабными особенностями [3]. Кость характеризуется наличием развитой системы внутрикостных пространств. Для точного моделирования инфильтрации озона необходимо использовать мелкие вычислительные сетки, что значительно увеличивает вычислительные затраты. Учитывая, что процесс инфильтрации газа обычно описывается математическими моделями сопряженного потока и транспорта, затраты могут стать еще выше.

В работе получены новые оценочные результаты изменений коллагеновых структур в мамонтовой кости при различных воздействиях. Математическая модель описывает изменения межмолекулярных взаимодействий коллагена при воздействии радиации. Проведенные расчеты показывают, что при увеличении радиационного воздействия увеличиваются расстояния между волокнами коллагена, что может рассматриваться как один из возможных физических механизмов деградации коллагена с ростом дозовой нагрузки, что согласуется с данными других авторов. Модельные расчеты хорошо коррелируются с результатами, полученными с помощью атомной силовой микроскопии.

Ключевые слова: костная ткань, система внутрикостных пространств, перфорированные среды, высокий контраст, связанный поток и транспорт, мультиконтинуум, гомогенизация, коллаген, радиация, мамонт, радиационная стерилизация.

Список использованных источников и литературы

1. Janet K Jansson and Neslihan Tas. The microbial ecology of permafrost. *Nature Reviews Microbiology*, 12(6):414–425, 2014.
2. Nadezhda Nikolaeva, Vladimir Rozanov, Alexander Chernyaev, Igor Matveychuk, and Milena Makarova. The influence of combined sterilization factors on the structural and functional characteristics of bone implants. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(19):14426, 2023.
3. Pedro Goncalves Coelho, Paulo Rui Fernandes, and Helder Carriço Rodrigues. Multiscale modeling of bone tissue with surface and permeability control. *Journal of Biomechanics*, 44(2):321–329, 2011.

Primary authors: РОЗАНОВ, Владимир (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия); НИКОЛАЕВА, Надежда (СВФУ имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия)

Co-authors: ЧЕРНЯЕВ, Александр (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия); МАМАЕВА, Саргылана (СВФУ имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия)

Presenter: НИКОЛАЕВА, Надежда (СВФУ имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия)

Session Classification: 8. Nuclear physics methods in application to the study of cultural heritage

Track Classification: Section 8. Nuclear physics methods in application to the study of cultural heritage.