



DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-2-14

УДК [514.1+602]:616.7

О. В. Залевська<sup>1</sup>, канд. техн. наук ORCID: 0000-0002-3163-1695В. М. Можаровський<sup>1</sup>, канд. техн. наук ORCID: 0009-0002-0884-4876Л. В. Суворов<sup>2</sup>, зав. лабораторією ORCID: 0000-0002-3163-1695А. С. Половий<sup>2</sup> ORCID: 0009-0007-9849-8968К. Д. Оленєва<sup>1</sup>, асистент ORCID: 0000-0002-5576-4601<sup>1</sup> Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

<sup>2</sup> Державна Установа "Інститут травматології та ортопедії

Національної Академії Медичних Наук України"

e-mail: o.zalevska@kpi.ua, тел.: +380975154221

## МОДЕЛЮВАННЯ КОЛІННОГО СУГЛОБА З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ФРАКТАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРІЇ НА ОСНОВІ ДАНИХ З МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНОЇ ТЕРАПІЇ

*Анотація.* У даній статті розглядається підхід до створення тривимірних моделей колінного суглоба, який базується на використанні геометричного моделювання та принципів фрактальної геометрії. Основою для моделювання слугують дані, отримані з магнітно-резонансної томографії (МРТ). Це дозволяє з високою точністю відтворити анатомічну структуру колінного суглоба, включаючи кісткові елементи, хрящову тканину та зв'язки. Проаналізовано методи геометричного моделювання, які застосовуються для створення точних тривимірних моделей на основі двовимірних зображень МРТ. Досліджено застосування фрактального аналізу для визначення складних структур, які важко описати за допомогою традиційних геометричних методів. Окрема увага приділяється алгоритмам обробки зображень, які дозволяють виокремити об'єкти інтересу з МРТ-зображень та автоматизувати процес сегментації. Результати дослідження демонструють, що використання комбінованого підходу, який об'єднує геометричне моделювання та фрактальну геометрію, що значно підвищить якість та точність тривимірних моделей колінного суглоба та дозволить проводити більш якісний аналіз медичних досліджень, діагностики та планування лікувальних заходів, особливо в ортопедії та травматології. Також наведено порівняльний аналіз наведеного підходу з традиційними методами моделювання, аналіз переваг та недоліків запропонованого підходу, а також рекомендації щодо його практичного застосування

*Ключові слова:* медичні дані, тривимірна модель, колінний суглоб, візуалізація, фрактальна геометрія, геометричне моделювання, програмне забезпечення.

*Постановка проблеми.* Колінний суглоб є одним з найбільш складних та навантажених суглобів людського організму. Це



призводить до травм та захворювань, таких як остеоартрит. Точне розуміння анатомії колінного суглоба є важливим для діагностики, планування лікування та реабілітації пацієнтів. Магнітно-резонансна томографія (МРТ) надає детальні зображення анатомічних структур, але потребує перетворення двовимірних зображень на тривимірні моделі.

Незважаючи на розвиток галузі медичного зображення та комп'ютерного моделювання, існують певні обмеження при створенні тривимірних моделей колінного суглоба. До таких обмежень належить обмежена точність, відсутність деталізації, складність інтеграції даних.

Метою даного дослідження є розробка та валідація методології для створення тривимірних моделей колінного суглоба на основі геометричного моделювання та фрактальної геометрії. Це дозволить уникнути деяких обмежень та покращити точність та деталізацію анатомічних моделей для підвищення ефективності діагностики, планування лікування та реабілітаційних заходів.

*Аналіз останніх досліджень.* Геометричне моделювання колінного суглоба використовується для створення тривимірної візуалізації анатомічних структур. Важливість цього підходу підкреслюється в роботах, таких як [1]. В цій роботі автори демонструють, як МРТ-дані можуть бути використані для створення детальних 3D моделей колінного суглоба.

В [2-3] досліджується застосування передових методів геометричного моделювання для аналізу біомеханіки колінного суглоба. Акцент зроблено на вдосконалення розуміння зв'язку між анатомічною структурою та функціональними характеристиками. У роботі [4] автори викладають методики геометричного моделювання, що дозволяють точно відтворювати механіку колінного суглоба. Такі методики спрямовані на покращення діагностичних та лікувальних стратегій.

Фрактальна геометрія надає нові можливості для моделювання складних, самоподібних структур анатомії людини. В [5] розглядається застосування фрактальних алгоритмів для аналізу та моделювання медичних зображень, включаючи зображення колінного суглоба.

Стаття [6] пропонує розглядати моделювання колінного суглоба через призму фрактальної геометрії. В ній показано, як фрактальні характеристики можуть використовуватися для опису складних анатомічних структур.

Роботи [7-8] зосереджені на фрактальній геометрії у багатомасштабному моделюванні колінного суглоба, висвітлюючи, як можна використовувати фрактальні метрики для мосту між мікро- та



макро-масштабними моделями. Ці дослідження фрактальної природи поверхонь колінного суглоба дозволяють підвищити точність моделювання та покращити розуміння взаємозв'язків у суглобових поверхнях.

Поєднання геометричного моделювання та фрактальної геометрії пропонує новий підхід до створення більш точних та інформативних моделей колінного суглоба. Дослідження [9] показує, як ця інтеграція може покращити якість моделювання, зокрема для вивчення біомеханічних властивостей суглоба. В статті [10] обговорюються методи використання цих моделей для планування хірургічного втручання та реабілітації пацієнтів.

*Формулювання мети статті.* Колінний суглоб є одним з найбільш складних та навантажених суглобів людського організму, що потребує поєднання різних методів дослідження. Традиційні методи геометричного моделювання можуть не враховувати всю складність та унікальність анатомічних структур колінного суглоба, особливо на мікро- та макрорівнях. Деякі аспекти анатомії колінного суглоба, такі як фрактальна природа хрящової тканини, можуть бути недостатньо представлені в моделях, що впливає на точність діагностики та ефективність лікування. Поєднання даних МРТ з методами геометричного та фрактального моделювання дозволить створити більш якісні моделі.

*Основна частина.* Використання геометричного моделювання та фрактальної геометрії для покращення точності тривимірних моделей колінного суглоба покращують медичну діагностику та лікування. Наведемо можливості геометричного моделювання та фрактальної геометрії при візуалізації колінного суглобу.

1. Геометричне моделювання дозволяє створювати точні тривимірні репрезентації анатомічних структур колінного суглоба, включаючи кістки, хрящі, зв'язки та суглобову рідину [11]. Це полегшує розуміння їх взаєморозташування та взаємодії, які впливають на діагностику та планування лікування.

2. Застосування методів геометричного моделювання дозволяє точно відтворювати деформації, які відбуваються в колінному суглобі під час руху або навантаження [12]. Це дозволить розробити методи, що полегшають реабілітацію після військової травми, сприяють розумінню механіки суглоба та його зношування.

3. Фрактальна геометрія ефективна для моделювання складних, самоподібних структур, як-от хрящова тканина [13]. Вона дозволяє відтворити їх з високою точністю, що важливо для розуміння стану та функціонування суглоба [14].

4. Застосування фрактального аналізу до МРТ-зображень може допомогти визначити текстуру та пористість хрящів та інших тканин



колінного суглоба. Це може виявити ранні ознаки дегенеративних змін, що не завжди видно при традиційному аналізі зображень [15].

5. Поєднання геометричного моделювання та фрактальної геометрії може значно підвищити точність тривимірних моделей, оскільки кожен метод компенсує обмеження іншого. Геометричне моделювання ефективно відтворює загальну форму та розміри структур, тоді як фрактальна геометрія дозволяє детально змоделювати їхню складну внутрішню структуру [16-17].

6. Інтегровані моделі можуть бути використані для планування хірургічних втручань з високою точністю, для розробки індивідуальних імплантатів та ортезів, а також для створення віртуальних симуляцій, які допомагають пацієнтам зрозуміти свої захворювання та лікування [18-19].

Поєднання геометричного моделювання та фрактальної геометрії для створення тривимірних моделей колінного суглоба може бути реалізовано за допомогою наступного алгоритму:

*Крок 1: Збір та підготовка даних*

1. Збір даних МРТ. Необхідно зробити відвір високоякісних МРТ-зображень колінного суглоба, забезпечуючи достатню роздільну здатність для ідентифікації всіх анатомічних структур.

2. Підготовка даних. Включає в себе попередню обробку зображень для видалення шуму, корекції контрасту та підвищення якості даних.

*Крок 2: Сегментація*

1. Автоматична сегментація, дозволяє використовувати алгоритми машинного навчання або глибокого навчання для автоматичної сегментації анатомічних структур колінного суглоба на МРТ-зображеннях.

2. Ручна корекція основана на аналізі сегментованих даних та за потреби забезпечує підвищення точності сегментації.

*Крок 3: Геометричне Моделювання*

1. На основі сегментованих даних створюється геометрична модель анатомічних структур, використовуючи CAD (Computer-Aided Design) програмне забезпечення або спеціалізовані інструменти для медичного моделювання.

2. Застосовуємо геометричне моделювання для відтворення форми, розміру та взаєморозташування анатомічних структур.

*Крок 4: Фрактальне Моделювання*

1. Використовуємо фрактальний аналіз для визначення фрактальних характеристик анатомічних структур, таких як хрящова тканина, на основі МРТ-даних.

2. Інтегруємо фрактальні характеристики в геометричні моделі для додавання деталізації та текстури, особливо для складних структур.

### Крок 5: Інтеграція та Валідація

1. Візуалізуємо геометричну модель з фрактальними характеристиками, забезпечуючи збереження всіх анатомічних деталей та характеристик.

2. Проводимо валідацію створеної моделі за допомогою порівняння з анатомічними даними, отриманими з літератури, або через клінічні випробування.

### Крок 6: Використання Моделі

1. Побудовану тривимірну модель можна використовувати для діагностики, планування лікування, хірургічного втручання та освітніх цілей.

2. Використовувати модель як основу для подальших досліджень у галузі біомеханіки колінного суглоба та розробки нових методів лікування.

Цей алгоритм є загальним і може бути адаптований або модифікований в залежності від специфічних цілей дослідження,

Наведемо приклади побудови тривимірної моделі за наведеним алгоритмом.

Модель, зображена на рисунку 1, а, детально показує кістки, хрящі, зв'язки та навколишні тканини, що робить її ідеальною для медичних освітніх цілей. Вона демонструє складність та витонченість структур колінного суглоба, з чітким розрізненням між різними типами тканин, що підкреслює їх взаємовідношення та розташування всередині коліна. Ця модель слугує інструментом для кращого розуміння анатомії та біомеханіки колінного суглоба.

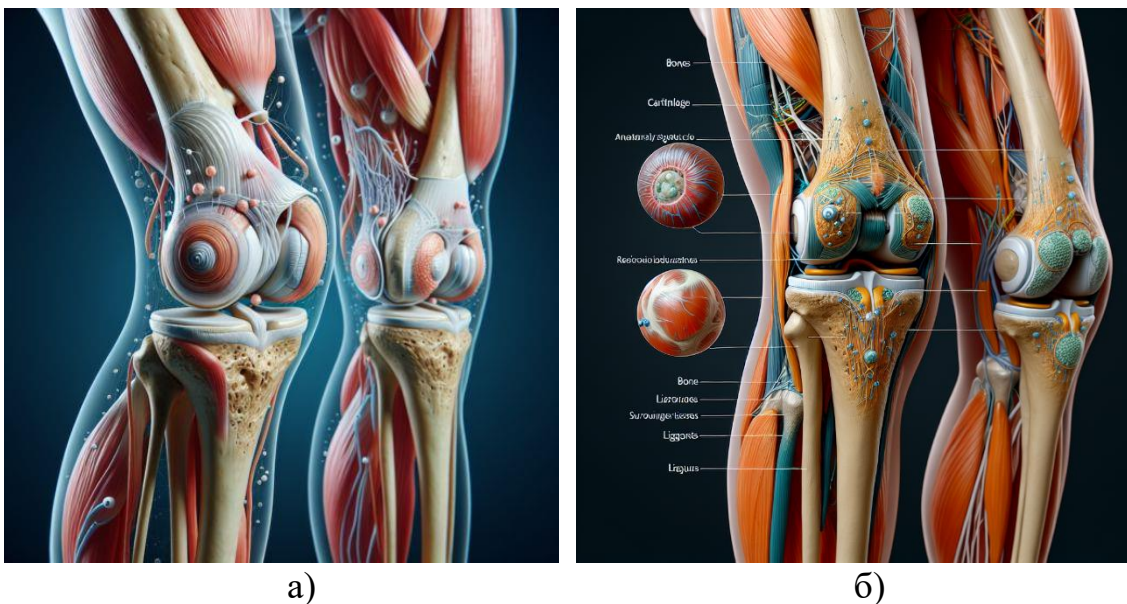


Рис. 1. Тривимірна модель колінного суглобу побудована на основі геометричного та фрактального моделювання: а – складна модель взаємозв'язків; б – модель для освітніх цілей



Модель зображена на рисунку 1, б створена для медичних освітніх цілей. Ця модель показує кістки, хрящі, зв'язки та навколишні тканини, наголошуючи на складність та витонченість структур колінного суглоба. Вона допомагає краще зрозуміти анатомію та біомеханіку колінного суглоба, чітко розрізняючи між різними типами тканин та підкреслюючи їх взаємовідношення та розміщення.

Порівняємо традиційні підходи до моделювання [20-25] з наведеним підходом. Дані занесемо до таблиці 1.

Традиційні методи моделювання, як правило, зосереджуються на використанні або чисто геометричних підходів, або прямому використанні медичних зображень (наприклад, МРТ) для створення моделей. Інтеграція геометричного моделювання та фрактальної геометрії пропонує новий підхід до створення тривимірних моделей, який використовує переваги обох методів.

Таблиця 1

Переваги та недоліки традиційних методів та запропонованого підходу.

	Переваги методу	Недоліки
Традиційні методи	-Простота у використанні та розумінні. -Широко доступні інструменти та програмне забезпечення. -Ефективність для моделювання великих анатомічних структур.	-Обмежена здатність відтворювати складні анатомічні деталі. -Відсутність глибокого аналізу текстурних характеристик тканин. -Може не враховувати унікальність індивідуальної анатомії.
Геометричне моделювання + Фрактальна геометрія	-Підвищена точність та деталізація моделей, особливо для складних анатомічних структур. -Здатність моделювати текстурні та фрактальні характеристики тканин, що покращує розуміння їх біологічних властивостей. -Гнучкість у моделюванні індивідуальних анатомічних особливостей.	-Вимагає спеціалізованих знань та навичок у галузі математики та комп'ютерного моделювання. -Може бути часомістким через необхідність детальної обробки та аналізу даних. - Потребує доступу до високопродуктивних обчислювальних ресурсів для обробки складних моделей



Рекомендації щодо практичного застосування.

1. Залучення фахівців з відповідною освітою та навчанням для роботи з інтегрованими моделями.

2. Розробка стандартизованих протоколів для створення та аналізу моделей, щоб забезпечити їх відтворюваність та надійність.

3. Співпраця з клінічними фахівцями для забезпечення клінічної релевантності та точності моделей.

4. Інвестиції в необхідне програмне забезпечення та обчислювальні ресурси для ефективної роботи з інтегрованими моделями.

Застосування такого підходу може покращити якість тривимірних моделей колінного суглоба, забезпечуючи кращі можливості для діагностики, планування лікування та досліджень у галузі медицини.

*Висновки.* Поєднання геометричне моделювання та фрактальної геометрії для створення тривимірних моделей колінного суглоба, представляє значний прогрес у медичному моделюванні. Цей підхід не тільки підвищує точність та деталізацію моделей, але й розширює розуміння наше розуміння складних анатомічних структур і їх функцій. Розвиток обчислювальних технологій та алгоритмів машинного навчання може спростити процес створення інтегрованих моделей, зменшити витрати та зробити їх доступнішими для широкого кола дослідників та клініцистів. Розроблені моделі можуть знайти застосування у ширшому спектрі медичних галузей, включаючи ортопедію, кардіологію та нейрохірургію, серед інших.

#### *Список використаних джерел*

1. Carrier J. F., Archambault L., Beaulieu L., Roy R. Validation of GEANT4, an object-oriented Monte Carlo toolkit, for simulations in medical physics. *Med Phys.* 2004. Vol. 31(3). P. 484-492. <https://doi.org/10.1118/1.1644532>. PMID:15070244.

2. Blackley H. R., Howell G. E., Rorabeck C. H. Planning and management of the difficult primary hip replacement: preoperative planning and technical considerations. *Instr Course Lect.* 2000. Vol. 49. P. 3–11.

3. Schiffers N., Schkommodau E., Portheine F., Radermacher K., Staudte H. W. [Planning and performance of orthopedic surgery with the help of individual templates]. *Orthopade.* 2000. Vol. 29. P. 636–640 [in German].

4. Eggl S., Pisan M., Muller M. E. The value of preoperative planning for total hip arthroplasty. *J Bone Joint Surg Br.* 1998. Vol. 80(3). P. 382–390. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.80B3.0800382>.



5. Goldstein W. M., Gordon A., Branson J. J. Leg length inequality in total hip arthroplasty. *Orthopedics*. 2005. Vol. 28(9). P. 1037–1040. <https://doi.org/10.3928/0147-7447-20050902-06>.
6. Haddad F. S., Masri B. A., Garbuz D. S., Duncan C. P. The prevention of periprosthetic fractures in total hip and knee arthroplasty. *Orthop Clin North Am*. 1999. Vol. 30(2). P. 191–207. [https://doi.org/10.1016/S0030-5898\(05\)70074-2](https://doi.org/10.1016/S0030-5898(05)70074-2).
7. Schiffers N., Schkommodau E., Portheine F., Radermacher K., Staudte H. W. Planning and performance of orthopedic surgery with the help of individual templates. *Orthopade*. 2000. Vol. 29. P. 636–640.
8. Hendrikus J. A., Laumen M., Van Pul C., Van Mourik J. A New Digital Preoperative Planning Method for Total Hip Arthroplasties. *Clin Orthop Relat Res*. 2009. Vol. 467. P. 909–916. <https://doi.org/10.1007/s11999-008-0486-y>.
9. Carter L. W., Stovall D. O., Young T. R. Determination of accuracy of preoperative templating of noncemented femoral prosthesis. *J Arthroplasty*. 1995. Vol. 10(4). P. 507–513. [https://doi.org/10.1016/S0883-5403\(05\)80153-6](https://doi.org/10.1016/S0883-5403(05)80153-6).
10. Knight J. L., Atwater R. D. Preoperative planning for total hip arthroplasty: quantitating its utility and precision. *J Arthroplasty*. 1992. Vol. 7. P. 403–409. [https://doi.org/10.1016/S0883-5403\(07\)80031-3](https://doi.org/10.1016/S0883-5403(07)80031-3).
11. Diercks R. B., van Ooijen P., van Horn J. R. Comparison of analog and digital preoperative planning in total hip and knee arthroplasty. *Acta Orthop*. 2005. Vol. 76(1). P. 78–84. <https://doi.org/10.1080/00016470510030364>.
12. Viceconti M., Chiarini A., Testi D., Taddei F., Bordini B., Traina F., Toni A. New aspects and approaches in pre-operative planning of hip reconstruction: a computer simulation. *Langenbecks Arch Surg*. 2004. Vol. 389(5). P. 400–404. <https://doi.org/10.1007/s00423-003-0446-7>.
13. Petretta R., Strelzow J., Ohly N. E., Misur P., Masri B. A. Acetate templating on digital images is more accurate than computer-based templating for total hip arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res*. 2015. Vol. 473(12). P. 3752–9. <https://doi.org/10.1007/s11999-015-4321-y>.
14. Sears Z., Young F. *Física Universitaria*. 11a ed.. 2004. 964 p.
15. Chotas H. G., Iii J. T. D., Ravin C. E. Review principles of digital radiography with large-area , electronically readable detectors . *A review of the basics radiology*. 1999. Is. 5. P. 595–599.
16. Franken M., Grimm B., Heyligers I. A comparison of four systems for calibration when templating for total hip replacement with digital radiography. *J Bone Joint Surg. Br*. 2010. Vol. 92(1). P. 136–141. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.92B1.22257>.
17. Kulkarni A., Partington P., Kelly D., Muller S. Disc calibration for digital templating in hip replacement. *J Bone Joint Surg Br*. 2008.





Vol. 90(12). P. 1623–1626. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.90B12.20238>.

18. Залевська О., Фіногенов О., Демиденко О., Олійник Ю. & Ільєнко Р. Бінарна класифікація медичних зображень з використанням нейронної мережі. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 23. С. 81-89.

19. Ванін В., Залевська О., Воробйов О. & Лазарчук-Воробйова Ю. (2022). Переваги та недоліки існуючих програмних застосунків для обробки графічних зображень *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 23. С. 38-48.

20. Залевська О., Мірошниченко І., Смаковський Д., Гагарін О. & Паламар І. Удосконалення методу кластеризації зображення. *Сучасні проблеми моделювання*. 2023. Вип. 24. С. 79-86.

21. Rotondi M.A., Donner A. A confidence interval approach to sample size estimation for interobserver agreement studies with multiple raters and outcomes. *J Clin Epidemiol*. 2012. Vol. 65(7). P. 778–784. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2011.10.019>.

22. Cortés-Reyes É., Rubio-Romero J., Gaitán-Duarte H. Métodos estadísticos de evaluación de la concordancia y la reproducibilidad de pruebas diagnósticas. *Rev Colomb Obstet Ginecol*. 2010. Vol. 61(3). P. 247–255. <https://doi.org/10.18597/rcog.271>.

23. Gamble P., de Beer J., Petruccelli D., Winemaker M. The accuracy of digital templating in uncemented total hip arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2010. Vol. 25(4). P. 529–532. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2009.04.011>.

24. Oddy M. J., Jones M. J., Pendegrass C. J., Pilling J. R., Wimhurst J. A. Assessment of reproducibility and accuracy in templating hybrid total hip arthroplasty using digital radiographs. *J Bone Joint Surg Br*. 2006. Vol. 88. P. 581–585. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.88B5.17184>.

25. Wang Q., Xiao J., Zhu L., Zhao X., Liu Z., Wang J., Qin Y. Acetate templating on calibrated standing digital radiograph improves accuracy of preoperative templating for total hip arthroplasty. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2017. Vol. 103(3). P. 341–347. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2016.12.022>.

*Стаття надійшла до редакції 03.04.2024 р.*



O. Zalevska<sup>1</sup>, V. Mozharovsky<sup>1</sup>, I. Suvorov<sup>2</sup>, A. Polovyi<sup>2</sup>, K. Oleneva<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"  
<sup>2</sup>State Institution "Institute of Traumatology and Orthopedics  
of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine"

**MODELING OF KNEE JOINT USING GEOMETRIC MODELING  
AND FRACTAL GEOMETRY METHODS BASED  
ON MAGNETIC RESONANCE THERAPY DATA**

*Summary*

This article discusses an approach to the creation of three-dimensional models of the knee joint based on the use of geometric modeling and the principles of fractal geometry. The modeling is based on data obtained from magnetic resonance imaging (MRI). This allows us to reproduce the anatomical structure of the knee joint, including bone elements, cartilage, and ligaments, with high accuracy.

Geometric modeling methods used to create accurate three-dimensional models based on two-dimensional MRI images are analyzed. The use of fractal analysis to identify complex structures that are difficult to describe using traditional geometric methods is investigated. Particular attention is paid to image processing algorithms that allow to extract objects of interest from MRI images and automate the segmentation process.

The results of the study demonstrate that the use of a combined approach that combines geometric modeling and fractal geometry is more effective. This approach significantly improves the quality and accuracy of three-dimensional models of the knee joint. This will allow for better analysis of medical research, diagnostics, and treatment planning, especially in orthopedics and traumatology.

A comparative analysis of the proposed approach with traditional modeling methods, an analysis of the advantages and disadvantages of the proposed approach, and recommendations for its practical application are also presented.

The combination of geometric modeling and fractal geometry to create three-dimensional models of the knee joint represents a significant advance in medical modeling. This approach not only improves the accuracy and detail of the models, but also expands our understanding of complex anatomical structures and their functions. The development of computing technologies and machine learning algorithms can simplify the process of creating integrated models, reduce costs, and make them more accessible to a wide range of researchers and clinicians. The developed models can be used in a wide range of medical fields, including orthopedics, cardiology, and neurosurgery, among others.

**Keywords:** medical data, three-dimensional model, knee joint, visualization, fractal geometry, geometric modeling, software.