



DOI: <https://doi.org/10.15688/jvolsu11.2018.1.4>

UDC 57.0: 611

LBC 28.07

ALGORITHMS OF THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION FOR BUILDING A MODEL OF SPATIAL DISTRIBUTION OF TISSUE PROPERTIES (ON THE EXAMPLE OF ARTICULAR CARTILAGE)¹

Mariya V. Grunina

Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

Valeriy V. Novochadov

Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

Abstract. The paper demonstrates relationship between morphological characteristics of articular cartilage and its functional properties in osteoarthritis. An automated analysis of the sections of the rat articular cartilage has revealed these mutual dependences. An algorithm for assessing the functional properties of cartilage by certain characteristics of its tissue in a natural full-color reconstruction is proposed.

Key words: three-dimensional reconstruction, three-dimensional images, knee joint, morphology, osteoarthritis, articular cartilage, rats.

УДК 57.0: 611

ББК 28.07

АЛГОРИТМЫ ТРЕХМЕРНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ТКАНИ (НА ПРИМЕРЕ СУСТАВНОГО ХРЯЦА)¹

Мария Викторовна Грунина

Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация

Валерий Валерьевич Новочадов

Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Изучена взаимосвязь морфологических признаков хрящевой ткани при остеоартрозе с ее свойствами. Проведен автоматизированный анализ срезов суставного хряща крысы. Предложен алгоритм для оценки функциональных свойств хряща по определенным характеристикам его ткани в натуральной полноцветной реконструкции.

Ключевые слова: трехмерная реконструкция, трехмерные изображения, коленный сустав, морфология, остеоартроз, суставной хрящ, крысы.

Современная восстановительная медицина костей и суставов является передовой отраслью, которая включает в себя малоинвазивные, микрохирургические, клеточные, молекулярные и генные технологии. Это объясняет и то, что прогресс в выстраивании

трехмерных моделей биосистем во многом связан с созданием виртуальных инструментов для исследования и работы с элементами опорно-двигательного аппарата [2; 4; 6; 12].

Исследователи сталкиваются с объективными трудностями в интерпретации дан-

ных, полученных при компьютерной томографии, при сопоставлении их с результатами прямых анатомических исследований [5; 8; 9; 11].

Один из основных методов для создания трехмерных реконструкций основан на получении серийных гистологических срезов [1; 3; 10]. Однако данный подход требует весьма трудоемких и ресурсоемких затрат. Для моделирования объекта, который имеет даже небольшой размер (например, $5 \times 5 \times 10$ см) необходимо изготовить и провести оцифровку порядка 20 000 микропрепаратов, что занимает огромное количество времени. Составленный в процессе исследования алгоритм позволяет сделать заключение о свойствах хряща по характеристикам его ткани с минимальной затратой времени.

Цель исследования – разработка алгоритма, с помощью которого станет возможной оценка функциональных свойств хряща по определенным характеристикам его ткани в натуральной полноцветной реконструкции.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили 4 гистологических изображения суставного хряща крысы линии Wistar в окраске гематоксилином и эозином (1 гистологическое изображение суставного хряща контрольной группы и 3 – с остеоартрозом) и 6 срезов суставных хрящей крыс, (3 среза хряща крыс контрольной группы, 3 – с остеоартрозом), полученных методом послойного высокоточного сошлифовывания в натуральной полноцветной реконструкции. Анализ полученных срезов проводили с помощью программы свободного доступа ImageJ.

Результаты и их обсуждение

Разработка алгоритма, который позволит оценивать свойства хрящей по определенным характеристикам ткани, предполагает, что по клеткам данных хрящей можно отследить некие закономерности. Для поиска таких закономерностей были проанализированы гистологические изображения суставного хряща крысы контрольной группы и крыс, имеющих остеоартроз, в окраске гематоксилином и эозином (рис. 1).

Далее путем анализа микроскопических картин гистологических срезов была проведена проверка корреляции морфологических признаков ткани с ее свойствами. Определили, что большей степени остеоартроза соответствует большее нарушение геномной программы дифференцировки хрящевых клеток, возврат их к более ранним механизмам хондрогенеза, о чем свидетельствует большое количество гипертрофированных хондроцитов на срезах хрящей с остеоартрозом.

Далее с помощью программы ImageJ был проведен анализ 6 срезов суставных хрящей крыс, полученных методом послойного высокоточного сошлифовывания в натуральной полноцветной реконструкции. Для построения цветовых пространств было проведено преобразование исходного RGB-формата в отдельные профили по каждому цветовому каналу. Для этого проводили сечение на 3D-реконструкции по хрящу. Параметры длины сечения соотнесли с продолжительностью жизни хондроцитов. С учетом того, что средняя продолжительность жизни хондроцита составляет 3 месяца [7], представили на диаграммах построения профиля распределения ткани по каждому цветовому компоненту RGB в 6 срезах. Пример представлен на диаграмме.

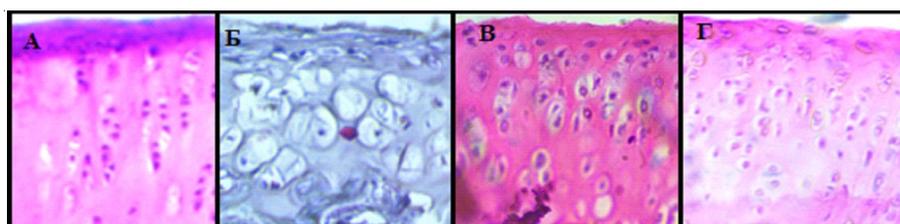


Рис. 1. Микропрепараты суставного хряща крысы в окраске гематоксилином и эозином: А – контрольная группа, Б – остеоартроз 3 недели, В – остеоартроз 6 недель, Г – остеоартроз 12 недель

Затем составили диаграммы по усредненным значениям пикселей в хрящах контрольной группы и с остеоартрозом. Анализируя параметры полученных диаграмм, отметили, что общая кривая любого цветового компонента как бы делится на три отдельные, которые располагаются соответственно каждому из трех периодов жизни хондроцитов (0–1 мес., 1–2 мес., 2–3 мес.). Далее для удобства решили каждый из этих периодов воспринимать как отдельную возрастную зону хондроцитов, поэтому период 0–1 мес. – приняли как зону молодого хряща, период 1–2 мес. – как зону зрелого хряща, период 2–3 мес. – как зону старого хряща.

Во избежание построения третьей оси координат для сопоставления ранее упомянутых закономерностей взаимосвязи свойств хряща с его возрастом и распределения цветовых компонентов RGB, свойства хряща соотнесли с его зонами по возрасту хондроцитов на одной панели после чего свойства ткани соотнесли с ее цветовым пространством.

Заключение

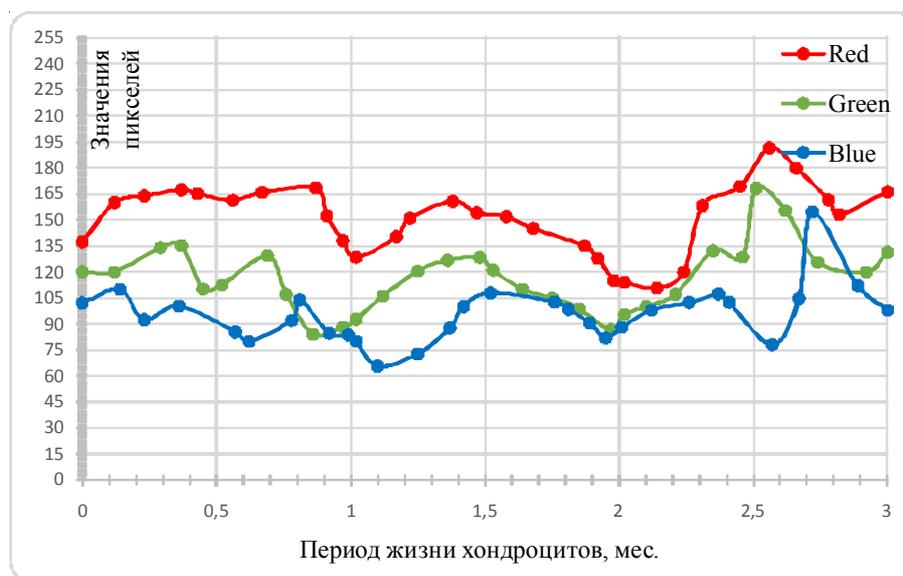
Полученные диаграммы указали на выраженную цветовую неоднородность различных по возрасту хондроцитов зон хряща, которым сопоставлены свойства тка-

ни, причем цветовые показатели одинаковых зон в хряще контрольной группы и в хряще с остеоартрозом также различны. Это говорит о том, что экспериментальный алгоритм, использованный в настоящей работе, подтверждает фенотипическую неоднородность хондроцитов, а также гетерогенность всего суставного хряща в целом. Результаты дальнейшего изучения взаимосвязей данного свойства (гетерогенности хряща) с цветовыми компонентами и последующие преобразования реконструкции и алгоритма позволят использовать его в практической восстановительной медицине в виде виртуальных атласов и прототипов для 3D-принтинга.

Общие этапы данного алгоритма выражаются следующей последовательностью действий:

- поиск закономерностей по клеткам ткани, а также взаимосвязи интересующих свойств ткани с ее возрастом;
- автоматизированный анализ биологического изображения: преобразование исходного RGB-формата в отдельные профили по каждому цветовому каналу;
- проведение сечения на трехмерной реконструкции;
- систематизация данных о значениях пикселей каждого цветового компонента;

Профиль распределения цветовых компонентов RGB в срезе хряща № 1 контрольной группы



- выбор осей координат для построения диаграмм;
- построение диаграмм;
- сопоставление свойств ткани с данными диаграмм, согласно сведениям, полученным при выполнении первого действия данного алгоритма;
- анализ и обобщение полученных результатов.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Рекомендовано к публикации оргкомитетом Всероссийской научной конференции с международным участием «ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИВЫХ СИСТЕМ В ПОСТГЕНОМНУЮ ЭРУ» (Волгоград, 15–18 мая 2018 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возможности полноцветной трехмерной реконструкции биологических объектов методом послойного наложения: коленный сустав крысы / А. А. Терпиловский [и др.] // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11: Естественные науки. – 2015. – № 4 (14). – С. 6–14. – DOI: 10.15688/jvolsu11.2015.4.1.
2. Инновационные технологии в восстановлении коленного сустава при его повреждениях и заболеваниях / Д. А. Маланин [и др.] // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. – 2009. – № 2. – С. 7–13.
3. Многомерный анализ изображений в медицине и биологии / И. А. Беляев [и др.] // Энциклопедия инженера-химика. – 2011. – № 2. – С. 13–23.
4. 3D biofabrication strategies for tissue engineering and regenerative medicine / P. Bajaj [et al.] // *Ann. Rev. Biomed. Eng.* – 2014. – Vol. 16. – P. 247–276.
5. Comparison of optical coherence tomography and histopathology in quantitative assessment of goat talus articular cartilage / P. Cernohorsky [et al.] // *Acta Orthop.* – 2015. – Vol. 86, № 2. – P. 257–263.
6. Development and validation of a computational model of the knee joint for the evaluation of surgical treatments for osteoarthritis / R. Mootanah [et al.] // *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.* – 2014. – Vol. 17, № 13. – P. 1502–1517.
7. Goldring, M. B. Chondrogenesis, chondrocyte differentiation, and articular cartilage metabolism in health and osteoarthritis / M. B. Goldring // *Ther. Adv. Musculoskelet. Dis.* – 2012. – Vol. 4, № 4. – P. 269–285.
8. Imaging of cartilage and bone: promises and pitfalls in clinical trials of osteoarthritis / F. Eckstein

[et al.] // *Osteoarthritis Cartil.* – 2014. – Vol. 22, № 10. – P. 1516–1532.

9. Imaging strategies for assessing cartilage composition in osteoarthritis / S. J. Matzat [et al.] // *Curr. Rheumatol. Rep.* – 2014. – Vol. 16, № 11. – P. 462.
10. Software for full-color 3d reconstruction of the biological tissues internal structure / A. V. Khoperskov [et al.] // *Lecture Notes in Computer Science.* – 2017. – Iss. 10594 LNCS. – P. 1–10.
11. Systematic review of cadaveric studies on anatomic posterior cruciate ligament reconstruction: the landmarks in anatomic posterior cruciate ligament reconstruction / D. Y. Lee [et al.] // *Knee Surg Relat Res.* – 2014. – Vol. 26, № 4. – P. 191–198.
12. Ventola, C. L. Medical applications for 3D printing: current and projected uses / C. L. Ventola // *PT.* – 2014. – Vol. 39, № 10. – P. 704–711.

REFERENCES

1. Terpilovskiy A.A., Tiras K.P., Khoperskov A.V., Novochadov V.V. *Vozmozhnosti polnotsvetnoy trekhmernoy rekonstruktsii biologicheskikh obyektov metodom posloynogo nalozheniya: kolennyi sustav krysy* [Possibilities of Full-Color Three-Dimensional Reconstruction of Biological Objects by the Method of Layer-by-Layer Overlapping: Knee Joint of a Rat]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 11, Estestvennye nauki* [Science Journal of Volgograd State University. Natural Sciences], 2015, no. 4, pp. 6-14.
2. Malanin D.A., Novochadov V.V., Samusev S.R., Teterin O.G., Suchilin I.A., Zhulikov A.L. *Innovatsionnye tekhnologii v vosstanovlenii kolennogo sustava pri ego povrezhdeniyakh i zabollevaniyakh* [Innovative Technologies in Restoration of Damaged or Diseased Knee Joint]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta*, 2009, vol. 2, pp. 7-13.
3. Belyaev I.A., Kucheryavskiy S.V., Rodionova O.E., Pomerantsev A.L. *Mnogomernyy analiz izobrazheniy v meditsine i biologii* [Multidimensional Image Analysis in Medicine and Biology]. *Entsiklopediya inzhenera-khimika*, 2011, vol. 2, pp. 13-23.
4. Bajaj P., et al. 3D biofabrication strategies for tissue engineering and regenerative medicine. *Ann. Rev. Biomed. Eng.*, 2014, vol. 16, pp. 247-276.
5. Cernohorsky P., et al. Comparison of optical coherence tomography and histopathology in quantitative assessment of goat talus articular cartilage. *Acta Orthop.*, 2015, vol. 86, no. 2, pp. 257-263.
6. Mootanah R., et al. Development and validation of a computational model of the knee joint for the evaluation of surgical treatments for osteoarthritis. *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, 2014, vol. 17, no. 13, pp. 1502-1517.

7. Goldring M. B. Chondrogenesis, chondrocyte differentiation, and articular cartilage metabolism in health and osteoarthritis. *Ther. Adv. Musculoskelet. Dis.*, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 269-285.

8. Eckstein F., et al. Imaging of cartilage and bone: promises and pitfalls in clinical trials of osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartil.*, 2014, vol. 22, no. 10, pp. 1516-1532.

9. Matzat S.J., et al. Imaging strategies for assessing cartilage composition in osteoarthritis. *Curr. Rheumatol. Rep.*, 2014, vol. 16, no. 11, p. 462.

10. Khoperskov A.V., et al. Software for full-color 3d reconstruction of the biological tissues internal structure. *Lecture Notes in Computer Science*, 2017, iss. 10594, pp. 1-10.

11. Lee D.Y., et al. Systematic review of cadaveric studies on anatomic posterior cruciate ligament reconstruction: the landmarks in anatomic posterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Relat Res.*, 2014, vol. 26, no. 4, pp. 191-198.

12. Ventola C.L. Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *PT*, 2014, vol. 39, no. 10, pp. 704-711.

Information about the Authors

Mariya V. Grunina, Senior Student, Institute of Natural Sciences, Volgograd State University Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation, biobio@volsu.ru.

Valeriy V. Novochadov, Doctor of Sciences (Medicine), Professor, Director of the Institute of Natural Sciences, Volgograd State University, Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation, novochadov.valeriy@volsu.ru.

Информация об авторах

Мария Викторовна Грунина, студентка 4-го курса института естественных наук, Волгоградский государственный университет, просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация, biobio@volsu.ru.

Валерий Валерьевич Новочадов, доктор медицинских наук, профессор, директор института естественных наук, Волгоградский государственный университет, просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация, novochadov.valeriy@volsu.ru.