

## ТРАВМАТОЛОГИЯ TRAUMATOLOGY

DOI: 10.29413/ABS.2018-3.6.12

УДК 616.72-018.35:616.72-007.248:543.456+539.211

Кабалык М.А.

### Возможности магнитно-резонансной томографии в диагностике микроструктурных изменений субхондральной кости при остеоартрите

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный медицинский университет» Минздрава России  
(690002, г. Владивосток, пр. Острякова, 2, Россия)

#### Резюме

**Обоснование.** Магнитно-резонансная томография не только обладает мощными возможностями по визуализации, но и представляет интерес в плане получения представлений о микроструктурных и биохимических сдвигах в тканях суставов при остеоартрите. Это свойство магнитно-резонансной томографии может быть расширено путём текстурного анализа карт матриц смежности T2-взвешенных изображений.

**Цель исследования:** оценить возможности T2-взвешенных изображений магнитно-резонансных томограмм в диагностике микроструктурных изменений субхондральной кости при остеоартрите на основании анализа спектральной вариативности времени поперечной релаксации.

**Материалы и методы.** Было обследовано 62 больных остеоартритом и 8 добровольцев без остеоартрита. Всем пациентам выполнена магнитно-резонансная томография коленных суставов на высокопольном томографе с напряжённостью магнитного поля 1,5 Тесла. Для оценки МР-изображений использовали полуквантитативные измерения тканей суставов на основании протокола WORMS. Для оценки вариативности времени поперечной релаксации ручным способом производили сегментацию T2-взвешенных изображений субхондральной кости во фронтальной проекции. Плотность протонов оценивали по 3D-гистограмме по шкале от 0 до 255.

**Результаты исследования.** При I стадии остеоартрита отмечается уменьшение интенсивности магнитно-резонансного сигнала по всей поверхности большеберцового плато с минимальными значениями в области медиального отдела коленного сустава. При II стадии остеоартрита было зарегистрировано ещё большее снижение количества протонов, совершивших фазовый переход с наименьшим значением в области медиального отдела. Текстура субхондральной кости при III стадии гонартроза характеризовалась значительным снижением интенсивности сигнала в области медиального плато большеберцовой кости. При терминальной IV стадии остеоартрита наблюдалось значительное уменьшение интенсивности текстурных спектров в области интереса.

**Заключение.** Выявленная закономерность изменения спектра времени релаксации T2-взвешенных изображений отражает дегенеративный процесс в субхондральной кости при остеоартрите. Данное свойство текстуры может быть использовано в оценке микроструктурных изменений субхондральной кости при остеоартрите, в том числе на «ранних» стадиях заболевания.

**Ключевые слова:** остеоартрит, остеоартроз, субхондральная кость, суставной хрящ, МРТ, ремоделирование

**Для цитирования:** Кабалык М.А. Возможности магнитно-резонансной томографии в диагностике микроструктурных изменений субхондральной кости при остеоартрите. Acta biomedica scientifica, 2018, 3 (6), 88-94, DOI 10.29413/ABS.2018-3.6.12.

### The Possibilities of Magnetic Resonance Imaging in the Diagnosis of Microstructural Changes of the Subchondral Bone in Osteoarthritis

Kabalyk M.A.

Pacific State Medical University  
(pr. Ostryakova 2, Vladivostok 690002, Russian Federation)

#### Abstract

**Background.** Magnetic resonance imaging not only has powerful capabilities for visualization, but is also of interest in terms of obtaining ideas about microstructural and biochemical changes in the tissues of the joints in osteoarthritis. **Aims.** To assess the possibility of T2-images of magnetic resonance imaging in the diagnosis of microstructural changes in the subchondral bone in osteoarthritis. **Materials and methods.** 62 patients with osteoarthritis and 8 volunteers without osteoarthritis were examined. All patients underwent magnetic resonance imaging of knee. To assess the variability of transverse relaxation time, the T2-images segmentation of the subchondral segmentation in the frontal projection was performed by hand. The proton density was estimated from a 3D histogram on a scale of 0 to 255. **Results.** At the first stage of osteoarthritis, the intensity of the magnetic resonance signal decreases over the entire surface of the tibial plateau, with minimal values in the region of the medial part of the knee joint. At stage 2 osteoarthritis, there was an even greater decrease in the number of protons that made the phase transition with the lowest value in the medial

*region. The subchondral bone texture in stage 3 was characterized by a significant decrease in signal intensity in the region of the medial plateau of the tibia. In the terminal stage of osteoarthritis. Conclusion. The revealed regularity of the change in the relaxation time spectrum of T2-images reflects the degenerative process in subchondral bone with osteoarthritis.*

**Key words:** osteoarthritis, subchondral bone, articular cartilage, MRI, remodeling

**For citation:** Kabalyk M.A. The possibilities of magnetic resonance imaging in the diagnosis of microstructural changes of the subchondral bone in osteoarthritis. Acta biomeca scientifica, 2018, 3 (6), 88-94, DOI 10.29413/ABS.2018-3.6.12.

## ВВЕДЕНИЕ

Остеоартрит (ОА) – широко распространённое гетерогенное заболевание, поражающее синовиальные суставы, характеризующееся развитием клеточного стресса и деградацией внеклеточного матрикса вследствие активации неадаптивных репаративных ответов на внешние факторы, включая провоспалительные пути врождённого иммунитета [2]. Гетерогенность и совокупность факторов патогенеза обуславливают структурное ремоделирование тканей суставов, идентификация которых является основой современной диагностики ОА.

Известно, что магнитно-резонансная томография (МРТ) представляет собой ценный диагностический инструмент для диагностики заболеваний суставов. МРТ даёт возможность визуально идентифицировать патологические изменения в суставном хряще (СХ), субхондральной кости (СХК), менисках, связках и других тканях [7]. Существуют несколько подходов к получению магнитно-резонансных (МР) изображений, которые основаны на детекции времени возвращения протонов к равновесному состоянию после воздействия электромагнитного импульса [5]. Особый интерес представляют изображения, взвешенные по времени поперечной релаксации, – T2-взвешенные изображения (T2ВИ), которые являются картами распределения времени релаксации в тканях [12]. Такие матрицы смежностей образуют текстуры, отражающие структуру тканей. Как известно, при ОА наблюдается ремоделирование всех тканей суставов, что непременно приводит к изменению времени релаксации протонов в электромагнитном поле за счёт изменения химического состава и структуры тканей [4]. В частности, установлено, что анизотропия коллагеновых волокон при ОА сопровождается специфическим изменением магнитного резонанса за счёт изменения содержания протонов водорода (H+) [10]. Таким образом, МР-изображения обладают ценной способностью визуализировать не только макроструктурные, но и микроструктурные особенности СХК.

Использование в клинической практике МРТ сопровождается совершенствованием методов и подходов к анализу изображений. Предприняты попытки создания количественных и полуколичественных шкал для оценки СХ и СХК для диагностики ОА [11]. Исследователи ставили перед собой цели разработать методы измерения толщины суставного хряща, отёка костного мозга и субхондральных кист [7]. Тем не менее, в ряде исследований была показана низкая способность МРТ диагностировать ранние проявления ОА [5]. Это связано с низкой разрешающей

способностью МРТ с силой поля 1,5 Тесла, особенно-стями аналитической методологии [10]. Чрезвычайно важно, что при «раннем» ОА, как правило, изменения претерпевает не структура СХК, а её качество и состав [9]. В связи с этим были предприняты попытки текстурного анализа МР-изображений. Матрицы смежности текстуры СХК представляют большой интерес, так как отражают изменения химического состава ткани [6, 13]. Кроме того, было установлено, что текстурные параметры СХК коррелируют с морфологическими проявлениями ОА [2].

Таким образом, МРТ не только обладает мощными возможностями по визуализации, но и представляет интерес в плане получения представлений о микроструктурных и биохимических сдвигах в тканях суставов. Это свойство МРТ может быть расширено путём анализа карт времени релаксации T2ВИ. Для реализации методов текстурного анализа требуется разработать оптимальный алгоритм сегментации изображений, а также методы идентификации и визуализации изменений матриц смежностей СХК T2ВИ.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценить возможности T2-взвешенных изображений магнитно-резонансных томограмм в диагностике микроструктурных изменений в субхондральной кости при остеоартрозе на основании анализа спектральной вариабельности времени поперечной релаксации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ревматологическом кабинете КГБУЗ «Владивостокская поликлиника № 3» было обследовано 62 больных ОА (средний возраст  $65,9 \pm 8,8$  года) (табл. 1). Диагноз был верифицирован в соответствии с критериями Европейской антиревматической лиги (EULAR) 2010 г. В качестве контрольной группы в исследование включено 8 добровольцев, сопоставимых по полу и возрасту с группой больных, без клинических и рентгенологических признаков ОА (средний возраст  $60,7 \pm 7,9$  года). Критериями исключения были: онкологические заболевания; микрокристаллические артропатии; системные заболевания соединительной ткани, включая ревматоидный артрит; травмы коленных суставов; длительная иммобилизация в период 24 месяца до включения в исследование; переломы мышечков бедренных костей и проксимального отдела большеберцовых костей; отсутствие согласия на участие в исследовании. Все пациенты подписывали информированное согласие на участие в исследовании. Протокол исследования был одобрен междисциплинарным комитетом по этике ФГБОУ ВО ТГМУ Минздрава России.

Всем пациентам, включённым в исследование, выполнена МРТ коленных суставов на высокопольном томографе Siemens Magnetom Symphony с напряжённостью магнитного поля 1,5 Тесла. Для оценки изменений костной ткани использованы Т2ВИ с жироподавлением. Для оценки хрящевой ткани использованы изображения proton density fat saturated (PDFS, протонная плотность с подавлением жира). Оценку МР-изображений осуществляли по протоколу Whole-Organ Magnetic Resonance Imaging Score (WORMS) [10], в рамках которого оценивали состояние СХК, суставного хряща, остеофитов.

Изображения СХК для текстурного анализа получали во фронтальной плоскости сечения в области плато большеберцовой кости на 0,5 см от суставной щели. Для получения матрицы смежностей ручным способом производили сегментацию 8-битных Т2ВИ, как показано на рисунке 1. Далее строили 3D-спектрограмму, на которой по оси Z отмечали изменения интенсивности времени релаксации по площади (оси X, Y). Оценку давали в условных единицах по шкале от 0 до 255. Процедуру сегментации и анализа осуществляли с помощью программного обеспечения ImageJ.

Статистический анализ результатов проводили в программной среде Statistica 10.0 (StatSoft Inc., США). Распределение анализируемых показателей описывалось посредством медианы (Me) [25-й; 75-й перцентили]. Статистическую значимость различий распределения непрерывных переменных определяли, используя непараметрический z-критерий Манна – Уитни в случае сравнения двух групп и H-критерий Краскела – Уоллиса при сравнении более

трёх групп. Связь между непрерывными переменными выявляли с помощью коэффициентов ранговой корреляции Спирмена ( $r$ ). Статистически значимыми считали различия показателей при  $p < 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследования показали (табл. 1), что при ОА наблюдается статистически значимое снижение толщины СХ в области мыщелков большеберцовой кости ( $z = -2,13$ ;  $p = 0,01$ ), по сравнению с группой контроля. Примечательно, что размер хрящевой пластинки мыщелков бедренной кости хоть и был ниже, но статистически значимо не отличался от такового в группе контроля ( $z = -1,06$ ;  $p = 0,1$ ). Толщина СХ бедренного и большеберцового сегментов закономерно уменьшалась по мере прогрессирования ОА, о чём говорят статистически значимые отрицательные корреляционные связи (соответственно,  $r = -0,76$ ,  $p = 0,000001$  и  $r = -0,67$ ,  $p = 0,00001$ ). При описании рентгенологом МРТ у больных ОА были обнаружены кисты СХК, истончение СХ, краевые остеофиты.

Визуальный анализ текстуры Т2ВИ субхондрального плато большеберцовой кости (рис. 1) при I стадии ОА показал уменьшение интенсивности МР-сигнала по всей поверхности плато с минимальными значениями в области медиального отдела коленного сустава. При II стадии ОА выявлено ещё большее снижение количества протонов, совершивших фазовый переход с наименьшим значением в области медиального отдела. При этом, в отличие от I стадии, не дифференцировался кортикальный слой кости в медиальной области. Текстура СХК при III стадии

Характеристика исследуемых групп, Me [ $Q_{25}$ ;  $Q_{75}$ ]

Таблица 1

Table 1

Characteristics of the groups studied, Me [ $Q_{25}$ ;  $Q_{75}$ ]

| Показатель, единица измерения                                    | Группа ОА         | Контроль        |
|------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|
| Возраст, годы                                                    | 66 [58; 75]       | 60 [52; 57]     |
| Женщины, чел.                                                    | 46                | 5               |
| Рентгенологическая стадия ОА (Kellgren – Lawrence), чел.         |                   |                 |
| I стадия                                                         | 7                 | 0               |
| II стадия                                                        | 25                | 0               |
| III стадия                                                       | 22                | 0               |
| IV стадия                                                        | 8                 | 0               |
| Толщина СХ мыщелков бедренной кости, мм                          | 1,5 [1,0; 2,0]    | 2,0 [1,5; 2,75] |
| Толщина СХ большеберцовой кости, мм                              | 2,0 [1,0; 2,0]*   | 3,0 [1,5; 3,0]  |
| Средний размер кист СХК, мм                                      | 5,8 [3,5; 8,5]    | 0 [0; 0]        |
| Размер суставной щели в латеральном отделе коленного сустава, мм | 5,1 [4,5; 5,8]*   | 6,3 [6,1; 6,5]  |
| Размер суставной щели в медиальном отделе коленного сустава, мм  | 3,8 [2,2; 4,7]*   | 5,1 [4,8; 5,3]  |
| Оценка МРТ по WORMS, балл                                        |                   |                 |
| повреждение СХК                                                  | 4,0 [3,0; 7,0]    | 0 [0; 0]        |
| повреждение СХ                                                   | 7,0 [5,0; 11,0]   | 0 [0; 0]        |
| оценка остеофитов                                                | 18,0 [11,0; 26,0] | 0 [0; 0]        |
| сумма баллов по WORMS                                            | 16,5 [12,3; 25,6] | 0 [0; 0]        |

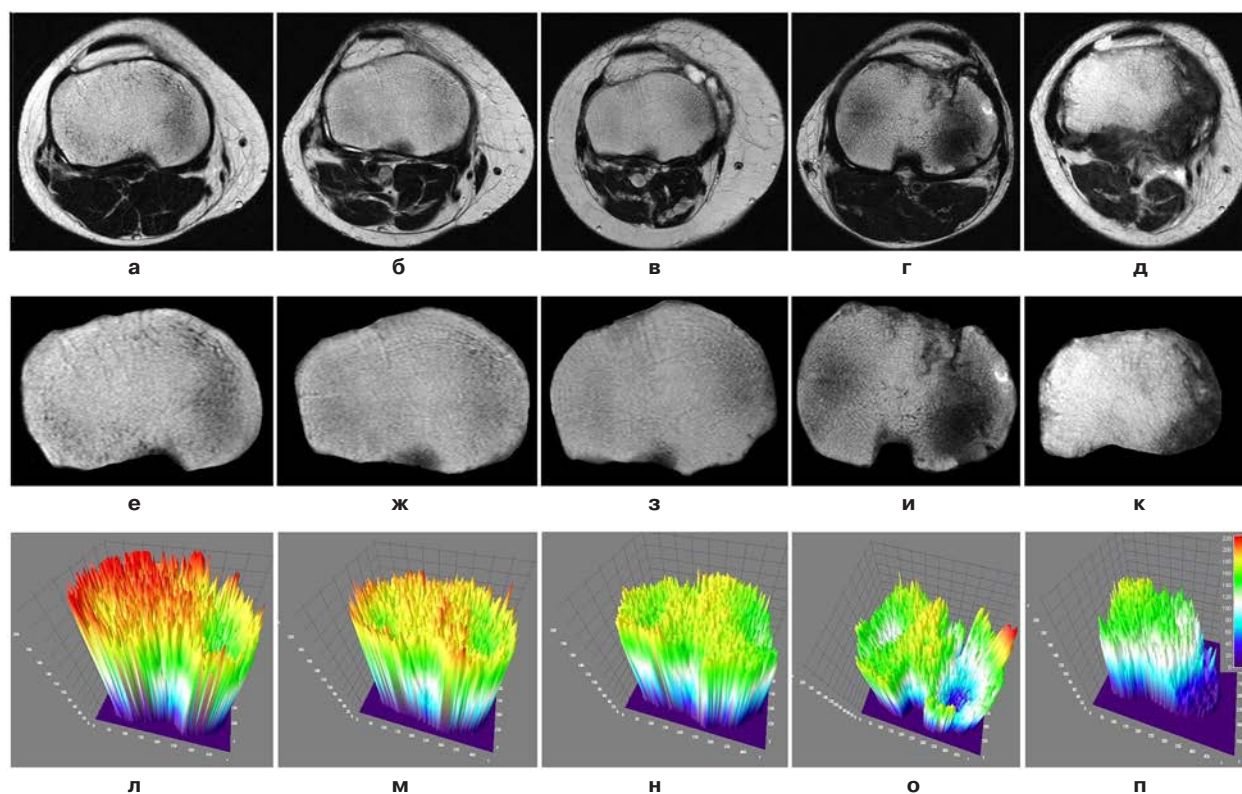
Примечание. \* – различия статистически значимы при  $p < 0,05$ .

гонартроза характеризовалась значительным снижением интенсивности сигнала в области медиального плато большеберцовой кости. При терминальной IV стадии ОА наблюдалось значительное уменьшение интенсивности текстурных спектров в области медиального отдела плато большеберцовой кости, в отличие от предыдущих стадий, отсутствовала дифференциация межмышечкового возвышения.

Проведена сравнительная оценка текстурных параметров СХК Т2-взвешенных изображений МРТ (табл. 2). Среднее значение интенсивности спектра статистически значимо снижалось по мере прогрессирования ОА ( $H = 19,3$ ;  $p = 0,004$ ) и было минимальным при IV стадии ОА. При этом данный показатель был статистически значимо выше в контрольной группе, по сравнению с I стадией ОА ( $z = 2,25$ ;  $p = 0,001$ ). Вариабельность интенсивности спектра статистически значимо не менялась по мере прогрессирования ОА ( $H = 8,9$ ;  $p = 0,06$ ). В контрольной группе отклонение среднего PD было статистически значимо ниже, по сравнению с I стадией ( $z = 2,16$ ;  $p = 0,01$ ), но статистически значимо не отличалось от больных с IV стадией ОА ( $z = 1,04$ ;  $p = 0,9$ ). Максимальное значение интенсивности статистически значимо снижалось по мере прогрессирования ОА ( $H = 20,3$ ;  $p = 0,0001$ ) и было наименьшим у больных с IV стадией ОА. Этот показатель имел максимально высокие значения в контрольной группе, по срав-

нению с I стадией ( $z = 2,26$ ;  $p = 0,001$ ). Минимальное значение спектра также статистически значимо снижалось при увеличении стадии гонартроза ( $H = 23,0$ ;  $p = 0,00001$ ) и имело статистически значимо различия между контрольной группой и I стадией гонартроза ( $z = 2,27$ ;  $p = 0,0008$ ). Диапазон колебаний интенсивности спектра текстуры статистически значимо не менялся по мере структурного прогрессирования ОА ( $H = 5,3$ ;  $p = 0,1$ ). Этот показатель был статистически значимо выше в контрольной группе при сравнении с I стадией ( $z = 2,23$ ;  $p = 0,002$ ), но не имел различий с группой терминального ОА ( $z = -1,18$ ;  $p = 0,09$ ).

Изучены взаимосвязи между микроструктурными параметрами ремоделирования СХК и макроструктурными особенностями коленного сустава при ОА. Так, среднее значение интенсивности спектра имело статистически значимую прямую корреляционную связь с толщиной суставного хряща в области мыщелков бедренной кости ( $r = 0,51$ ;  $p = 0,003$ ) и плато большеберцовой кости ( $r = 0,41$ ;  $p = 0,02$ ). Данный параметр обратно коррелировал с размером субхондральных кист ( $r = -0,63$ ;  $p = 0,0002$ ), суммарным баллом оценки сустава по WORMS ( $r = -0,48$ ;  $p = 0,006$ ). Максимальная интенсивность обратно коррелировала с оценкой остеофитов по WORMS ( $r = -0,43$ ;  $p = 0,0002$ ) и размером субхондральных кист ( $r = -0,53$ ;  $p = 0,01$ ). Минимальное значение спектра имело значимую прямую связь с размерами суставно-



**Рис. 1.** Сегментация Т2ВИ магнитно-резонансных томограм: а–д – МРТ коленного сустава в области субхондральной части плато большеберцовой кости; е–к – сегментация изображений субхондральной кости; л–п – спектры интенсивности релаксации протонов; а, е, л – норма; б, ж, м – I стадия ОА; в, з, н – II стадия ОА; г, и, о – III стадия ОА; д, к, п – IV стадия ОА.

**Fig. 1.** Segmentation of T2WI magnetic resonance tomogram. а–д – MRI of the knee in the region of the subchondral part of the tibial plateau; е–к – segmentation of subchondral bone images; л–п – spectra of the intensity of proton relaxation. а, е, л – the norm; б, ж, м – I stage OA; в, з, н – II stage OA; г, и, о – III stage OA; д, к, п – IV stage OA.

**Таблица 2**  
**Характеристика параметров текстуры субхондральной кости в исследуемых группах, Me [Q<sub>25</sub>; Q<sub>75</sub>]**  
**Table 2**  
**Characteristics of the parameters of the subchondral bone texture in the study groups, Me [Q<sub>25</sub>; Q<sub>75</sub>]**

| Параметры, у.е.                        | Контроль           | Остеоартрит (стадии) |                   |                   |                   |
|----------------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                        |                    | I                    | II                | III               | IV                |
| Среднее значение интенсивности спектра | 195 [189; 197]*    | 180 [174; 186]#      | 155 [151; 166]    | 134 [130; 147]    | 102 [75; 117]     |
| Вариабельность интенсивности спектра   | 40,1 [30,2; 42,3]* | 48,9 [45,0; 54,4]    | 48,6 [43,7; 52,4] | 49,0 [44,8; 53,2] | 48,1 [28,4; 49,9] |
| Максимальная интенсивность             | 255 [236; 255]*    | 225 [219; 235]#      | 204 [197; 218]    | 185 [176; 197]    | 143 [133; 165]    |
| Минимальная интенсивность              | 160 [158; 168]*    | 150 [139; 154]#      | 130 [124; 140]    | 111 [105; 116]    | 51 [39; 62]       |
| Диапазон интенсивности                 | 95 [81; 97]*       | 74 [65; 76]          | 70 [69; 75]       | 70 [67; 75]       | 100 [92; 100]     |

**Примечание.** \* – различия статистически значимы, по сравнению с I стадией при  $p < 0,05$  (z-критерий Манна – Уитни); # – различия в группе ОА статистически значимы при  $p < 0,05$  (H-критерий Краскела – Уоллиса).

го хряща в области бедренной ( $r = 0,61$ ;  $p = 0,0003$ ) и большеберцовой костей ( $r = 0,43$ ;  $p = 0,01$ ), обратную – со средним размером кист СХК ( $r = -0,54$ ;  $p = 0,001$ ) и суммарным баллом оценки сустава по WORMS ( $r = -0,47$ ;  $p = 0,005$ ).

### ОБСУЖДЕНИЕ

Ремоделирование субхондральной кости является ключевым фактором структурного прогрессирования ОА [3]. Это связано с тем, что изменения в СХК оказывают существенное влияние на трофику суставного хряща, что приводит к деградации его межклеточного матрикса и истончению [8]. Патологическая морфология «раннего» ОА характеризуется истончением собственной пластинки, костных трабекул СХК [1]. На «поздних» стадиях заболевания наблюдается формирования остеоподобного матрикса, который замещает нормальную структуру СХК [14]. Очевидно, что такое ремоделирование СХК приводит к биомеханическим перегрузкам и снижению трофики СХ. В этом исследовании показано, что истончение СХ неодинаково проявляется в разных отделах коленного сустава. Так, она статистически значимо ниже только в медиальном отделе колена. Как показали другие исследования, толщина СХ при «раннем» ОА является ненадёжным диагностическим признаком [14]. Можно предположить, что при ОА, особенно в дебюте, преобладают процессы микроструктурного ремоделирования СХК, приводящие на «продвинутых» стадиях к истончению и резорбции СХ. В связи с этим интерес представляют методы визуализации изменений микроструктуры СХК, в том числе на «ранних» стадиях ОА.

Основным компонентом межклеточного матрикса СХК являются фибриллярные белки, обеспечивающие минерализацию кости [10]. Можно предположить, что снижение плотности молекул водорода прямо пропорционально содержанию костного компонента. Результаты данного исследования подтверждают это предположение. Действительно, прогрессирование ОА сопровождается снижением времени релаксации протонов. При этом наблюдается закономерное уменьшение спектра времени релаксации по мере структурной прогрессии заболевания. Примечательно, что снижение этого показателя наблюдается в области максимальной биомеханической

нагрузки – в медиальном отделе плато большеберцовой кости. Уже на «ранних» стадиях ОА наблюдается глобальное снижение спектра времени релаксации. Данный феномен прогрессивно усугубляется по мере прогрессирования заболевания. Эти данные согласуются с общепринятой концепцией о прогрессивном ремоделировании СХК путём замещения его грубоволокнистым кальцинированным остеоподобным матриксом [2], что знаменует нарушениями локомоторной функции сустава.

Измерение интенсивности пиков спектра времени релаксации атомов водорода, выраженное в условных единицах, позволило установить закономерности, согласно которым при ОА наблюдается снижение интенсивности спектральных характеристик – среднего, максимального и минимального пиков. Установлено, что наилучшие различия показали пиковые значения спектра, в то время как диапазонные значения не имели статистически значимых различий. Выгодной особенностью использования данного методологического подхода является возможность значимо дискриминировать нормальный и артритический хрящ даже при I стадии заболевания.

Установлено, что спектры с матриц смежностей T2ВИ не только отражают закономерное ремоделирование СХК, но и связаны с макроструктурными изменениями тканей суставов. Так, было показано, что снижение интенсивности спектра времени релаксации СХК ассоциировано с истончением СХ, ростом остеофитов и размерами субхондральных кист. Это подтверждается результатами других исследований, подтвердившими выявленные нами закономерности [9].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выявленная закономерность изменения спектра времени релаксации T2ВИ отражает известный дегенеративный процесс в субхондральной кости при ОА. Данное свойство текстуры МР-изображений может быть использовано в оценке микроструктурных изменений СХК при ОА, в том числе на «ранних» стадиях заболевания. Цифровое выражение времени релаксации протонов не только расширяет диагностический инструментарий МРТ, но и позволяет более точно идентифицировать начальные микроструктурные изменения при ОА.

Выявленные микроструктурные особенности ремоделирования СХК связаны с глобальной структурной прогрессией, которая затрагивает все ткани сустава при ОА. Применение разработанного способа оценки микроструктурного ремоделирования СХК представляет научный и практический интерес в плане ранней диагностики, контроля эффективности терапии, в том числе в рамках персонифицированной медицины. Перспективным развитием предложенного метода является проведение морфологических сопоставлений.

#### Конфликт интересов

Авторы данной статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дубиков А.И., Кабалык М.А., Корецкая Т.Ю. Микрокристаллический стресс в патогенезе остеоартроза // Терапевтический архив. – 2016. – Т. 88, № 5. – С. 32-36. doi: 10.17116/terarkh201688532-36
2. Кабалык М.А., Коваленко Т.С., Осипов А.Л., Фадеев М.Ф. Морфологические обоснования применения методов текстурного анализа изображений субхондральной кости при остеоартрите // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 5. – С. 98–107. doi: 10.17513/spno.26895
3. Семёнова Л.А., Раденска-Лоповок С.Г., Алексеева Л.И. Морфологическая характеристика остеоартроза // Архив патологии. – 2010. – № 2. – С. 47–51.
4. Apprich S, Welsch GH, Mamisch TC, Szomolanyi P, Mayerhoefer M, Pinker K, Trattnig S. (2010). Detection of degenerative cartilage disease: comparison of high-resolution morphological MR and quantitative T2 mapping at 3.0 Tesla. *Osteoarthritis Cartilage*, 18 (9), 1211-1217. doi: 10.1016/j.joca.2010.06.002.
5. Carballido-Gamio J, Stahl R, Blumenkrantz G, Romero A, Majumdar S, Link TM. (2009). Spatial analysis of magnetic resonance T1rho and T2 relaxation times improves classification between subjects with and without osteoarthritis. *Med Phys*, 36 (9), 4059-4067. doi: 10.1118/1.3187228
6. Dijkstra AJ, Anbeek P, Yang KG, Vincken KL, Viergever MA, Castelein RM, Saris DB. (2010). Validation of a novel semiautomated segmentation method for MRI detection of cartilage-related bone marrow lesions. *Cartilage*, 1 (4), 328-334. doi: 10.1177/1947603510376819
7. Eckstein F, Burstein D, Link TM. (2006). Quantitative MRI of cartilage and bone: degenerative changes in osteoarthritis. *NMR Biomed*, 19 (7), 822-854. doi: 10.1002/nbm.1063
8. Felson DT, McLaughlin S, Goggins J, LaValley MP, Gale ME, Totterman S, Li W, Hill C, Gale D. (2003). Bone marrow edema and its relation to progression of knee osteoarthritis. *Ann Intern Med*, 139 (5 Pt 1), 330-336.
9. Gadjanski I. (2017). Recent advances on gradient hydrogels in biomimetic cartilage tissue engineering. *F1000Res*, 6. doi: 10.12688/f1000research.12391.2
10. Kester BS, Carpenter PM, Yu HJ, Nozaki T, Kaneko Y, Yoshioka H, Schwarzkopf R. (2017). T1ρ/T2 mapping and histopathology of degenerative cartilage in advanced knee osteoarthritis. *World J Orthop*, 8 (4), 350-356. doi: 10.5312/wjo.v8.i4.350

11. Peterfy CG, Guermazi A, Zaim S, Tirman PF, Miaux Y, White D, Kothari M, Lu Y, Fye K, Zhao S, Genant HK. (2004). Whole-organ magnetic resonance imaging score (WORMS) of the knee in osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage*, 12 (3), 177-190. doi: 10.1016/j.joca.2003.11.003
12. Peuna A, Hekkala J, Haapea M, Podlipská J, Guermazi A, Saarakkala S, Nieminen MT, Lammintausta E. (2017). Variable angle gray level co-occurrence matrix analysis of T(2) relaxation time maps reveals degenerative changes of cartilage in knee osteoarthritis: Oulu knee osteoarthritis study. *J Magn Reson Imaging*, 47 (5), 1316-1327. doi: 10.1002/jmri.25881
13. Steinbeck MJ, Eisenhauer PT, Maltenfort MG, Parvizi J, Freeman TA. (2016). Identifying patient-specific pathology in osteoarthritis development based on microCT analysis of subchondral trabecular bone. *J Arthroplasty*, 31 (1), 269-277. doi: 10.1016/j.arth.2015.08.021
14. Van Eck CF, Kingston RS, Cruess JV, Kharrazi FD. (2017). Magnetic resonance imaging for patellofemoral chondromalacia: is there a role for T2 mapping? *Orthop J Sports Med*, 5 (11), 2325967117740554. doi: 10.1177/2325967117740554

#### REFERENCES

1. Dubikov AI, Kabalyk MA, Koretskaya TYu. (2016). Microcrystal stress in the pathogenesis of osteoarthritis [Mikrokrystallicheskiy stress v patogeneze osteoartroza]. *Terapevticheskiy arkhiv*, 88 (5), 32-36. doi: 10.17116/terarkh201688532-36 (In Russ.)
2. Kabalyk MA, Kovalenko TS, Osipov AL, Fadeev MF. (2017). Morphological substantiation of the use of the methods of texture analysis of images of the subchondral bone in osteoarthritis [Morfologicheskie obosnovaniya primeneniya metodov tekturnogo analiza izobrazheniy subkhondral'noy kosti pri osteoartrite]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 5, 98-107. doi: 10.17513/spno.26895 (In Russ.)
3. Semyonova LA, Radenska-Lopovok SG, Alekseeva LI. (2010). Morphological characteristics of osteoarthritis [Morfologicheskaya kharakteristika osteoartroza]. *Arkhiv patologii*, (2), 47-51. (In Russ.)
4. Apprich S, Welsch GH, Mamisch TC, Szomolanyi P, Mayerhoefer M, Pinker K, Trattnig S. (2010). Detection of degenerative cartilage disease: comparison of high-resolution morphological MR and quantitative T2 mapping at 3.0 Tesla. *Osteoarthritis Cartilage*, 18 (9), 1211-1217. doi: 10.1016/j.joca.2010.06.002.
5. Carballido-Gamio J, Stahl R, Blumenkrantz G, Romero A, Majumdar S, Link TM. (2009). Spatial analysis of magnetic resonance T1rho and T2 relaxation times improves classification between subjects with and without osteoarthritis. *Med Phys*, 36 (9), 4059-4067. doi: 10.1118/1.3187228
6. Dijkstra AJ, Anbeek P, Yang KG, Vincken KL, Viergever MA, Castelein RM, Saris DB. (2010). Validation of a novel semiautomated segmentation method for MRI detection of cartilage-related bone marrow lesions. *Cartilage*, 1 (4), 328-334. doi: 10.1177/1947603510376819
7. Eckstein F, Burstein D, Link TM. (2006). Quantitative MRI of cartilage and bone: degenerative changes in osteoarthritis. *NMR Biomed*, 19 (7), 822-854. doi: 10.1002/nbm.1063

8. Felson DT, McLaughlin S, Goggins J, LaValley MP, Gale ME, Totterman S, Li W, Hill C, Gale D. (2003). Bone marrow edema and its relation to progression of knee osteoarthritis. *Ann Intern Med*, 139 (5 Pt 1), 330-336.
9. Gadjanski I. (2017). Recent advances on gradient hydrogels in biomimetic cartilage tissue engineering. *F1000Res*, 6. doi: 10.12688/f1000research.12391.2
10. Kester BS, Carpenter PM, Yu HJ, Nozaki T, Kaneko Y, Yoshioka H, Schwarzkopf R. (2017). T1ρ/T2 mapping and histopathology of degenerative cartilage in advanced knee osteoarthritis. *World J Orthop*, 8 (4), 350-356. doi: 10.5312/wjo.v8.i4.350
11. Peterfy CG, Guermazi A, Zaim S, Tirman PF, Miaux Y, White D, Kothari M, Lu Y, Fye K, Zhao S, Genant HK. (2004). Whole-organ magnetic resonance imaging score (WORMS) of the knee in osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage*, 12 (3), 177-190. doi: 10.1016/j.joca.2003.11.003
12. Peuna A, Hekkala J, Haapea M, Podlipská J, Guermazi A, Saarakkala S, Nieminen MT, Lammintausta E. (2017). Variable angle gray level co-occurrence matrix analysis of T(2) relaxation time maps reveals degenerative changes of cartilage in knee osteoarthritis: Oulu knee osteoarthritis study. *J Magn Reson Imaging*, 47 (5), 1316-1327. doi: 10.1002/jmri.25881
13. Steinbeck MJ, Eisenhauer PT, Maltenfort MG, Parvizi J, Freeman TA. (2016). Identifying patient-specific pathology in osteoarthritis development based on microCT analysis of subchondral trabecular bone. *J Arthroplasty*, 31 (1), 269-277. doi: 10.1016/j.arth.2015.08.021
14. Van Eck CF, Kingston RS, Crues JV, Kharrazi FD. (2017). Magnetic resonance imaging for patellofemoral chondromalacia: is there a role for T2 mapping? *Orthop J Sports Med*, 5 (11), 2325967117740554. doi: 10.1177/2325967117740554

#### Сведения об авторах

**Кабалык Максим Александрович** – кандидат медицинских наук, ассистент института терапии и инструментальной диагностики, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный медицинский университет» Минздрава России (690002, г. Владивосток, пр. Острякова, 2; e-mail: maxi\_maxim@mail.ru)  <http://orcid.org/0000-0003-0054-0202>

#### Information about the author

**Maksim A. Kabalyk** – Cand. Sc. (Med.), Teaching Assistant at the Institute of Therapy and Instrumental Diagnostics Pacific State Medical University (690002, Vladivostok, pr. Ostryakova, 2; e-mail: maxi\_maxim@mail.ru)  <http://orcid.org/0000-0003-0054-0202>