

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ТЕКСТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУБХОНДРАЛЬНОЙ КОСТИ ПРИ ГОНАРТРОЗЕ

Кабалык М.А.

*ГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный медицинский университет» Минздрава России, Владивосток, e-mail: maxi\_maxim@mail.ru*

Субхондральная кость (СХК) представляет собой область практического и научного интереса с позиций диагностики и прогнозирования остеоартроза (ОА), который представляет собой большую медицинскую проблему. Цель исследования – оценить взаимосвязь спектральных характеристик и показателей текстуры субхондральной кости с данными стандартной рентгенографии. В исследование включено 92 пациента в возрасте с ОА коленных суставов (КС) и 24 добровольца без ОА. Выполнялась стандартная рентгенография КС по общепринятой методике в прямой проекции на цифровом рентгенологическом аппарате. Для оценки спектральных свойств изображения СКХ применяли стандартный алгоритм быстрого преобразования Фурье, по которому строили график функции, по которому оценивали значение экстремума спектра Фурье. Изучение текстурных признаков изображения суставной щели проводили с использованием аналитического протокола GLCM. Получали показатели второго углового момента, обратного момента разностей, энтропии. Полученные результаты свидетельствуют о том, что по мере прогрессирования ОА КС наблюдается изменение экстремума спектра Фурье СКХ, что в полной мере отражает современную концепцию её роли в патогенезе ОА. Получены данные, свидетельствующие о том, что текстурные характеристики отражают общепринятую стадийность ОА, являются важным подтверждением значимости данного метода в оценке рентгенограмм.

Ключевые слова: остеоартроз, субхондральная кость, спектр Фурье, анализ текстур.

## SPECTRAL AND TEXTURAL CHARACTERISTICS OF THE SUBCHONDRAL BONE IN GONARTHROSIS

Kabalyk M.A.

*Pacific State Medical University, Vladivostok, e-mail: maxi\_maxim@mail.ru*

Subchondral bone (SCB) is an area of practical and scientific interest with diagnostic positions and prediction of osteoarthritis (OA), which is a big health problem. The purpose of research - to assess the relationship of the spectral characteristics and indicators texture subchondral bone with a standard X-ray data. The study included 92 patients aged with OA of knee (COA) and 24 volunteers without OA. Perform standard radiographs of the COP by the standard technique in the direct projection on the digital X-ray machine. To estimate the spectral properties of SCB image used the standard algorithm for fast Fourier transform on the graph of the function which is being built, in which assessed the value of the extremum of the Fourier spectrum. The study of textural features the image of the joint space was performed using the analytical protocol GLCM. Teaches second angular momentum indicators (ASM), a reverse torque difference, entropy. The results suggest that the progression of OA of the COA, a change extremum Fourier spectrum of the SCB, which fully reflects the modern concept of its role in the pathogenesis of OA. There is evidence indicating that the textural characteristics reflect the conventional staging OA is an important confirmation of the importance of this method in the evaluation of radiographs.

Keywords: osteoarthritis, subchondral bone, Fourier spectrum, texture analysis.

Остеоартроз (ОА) представляет собой глобальную проблему человечества, затрагивающую большую часть населения развитых стран, приводя к инвалидности и внушительным экономическим потерям [13]. Раскрытие генетических, метаболических, биохимических и биомеханических триггеров позволило определить вектор развития научных поисков в данном направлении. В настоящее время достаточно хорошо детализован патогенез ОА, в котором ведущая роль на начальных этапах развития заболевания отводится субхондральной кости (СХК) [1, 2].

ОА развивается по сценарию склерозирования, уплотнения и повышения массы СХК, которые приводят к активации процессов ангиогенеза в СХК способствуют диффузии провоспалительных биологически-активных субстанций и возникновению микрокристаллического стресса [8]. Ремоделирование СХК при ОА происходит под влиянием неблагоприятных биомеханических факторов [6]. Эти данные обуславливают большой интерес к идентификации изменений, происходящих в СКХ с позиций диагностики, классификации, прогнозирования и контроля эффективности проводимой терапии.

Многочисленные исследования показали низкую диагностическую значимость стандартной рентгенографии суставов в диагностике изменений, происходящих в СХК и суставной щели [3, 7]. Вместе с тем рентгенография является превосходным методом получения информации о трёхмерной структуре костной ткани, может быть использована для оценки текстурных характеристик [9]. С другой стороны, любое изображение представляет собой систему функций, описывающих существенные характеристики изображения, что позволяет применять спектральные подходы для анализа, например на основе преобразования Фурье [10].

Важным видится и то обстоятельство, что пиксельные значения текстуры СКХ лежат в спектре оттенков серого, что подсказывает возможность измерения целого ряда текстурных характеристик по GLCM (GreyLevelCo-occurrenceMatrix – матрица совпадений градаций серого) алгоритму [3].

**Цель исследования** – оценить взаимосвязь спектральных характеристик и показателей текстуры субхондральной кости с данными стандартной рентгенографии.

**Материалы и методы.** В исследование включено 92 пациента (78 женщин и 14 мужчин) в возрасте 47–90 ( $66,1 \pm 10,5$ ) лет с ОА коленных суставов (КС) I-IV рентгенологических стадий по Kellgren. Все пациенты имели боль в коленных суставах, интенсивность которой была не менее 20 мм по цифровой шкале боли от 0 мм до 100 мм. В группу сравнения были включены 24 (16 женщин и 8 мужчин) добровольца в возрасте 20–34 ( $29,6 \pm 5,96$ ) лет без клинических и рентгенологических признаков гонартроза. Клиническая характеристика групп пациентов в табл.1. Всеми пациентами было подписано информированное согласие на участие в исследовании, протокол исследования был одобрен междисциплинарным комитетом по этике ГБОУ ВПО ТГМУ Минздрава России.

Таблица 1

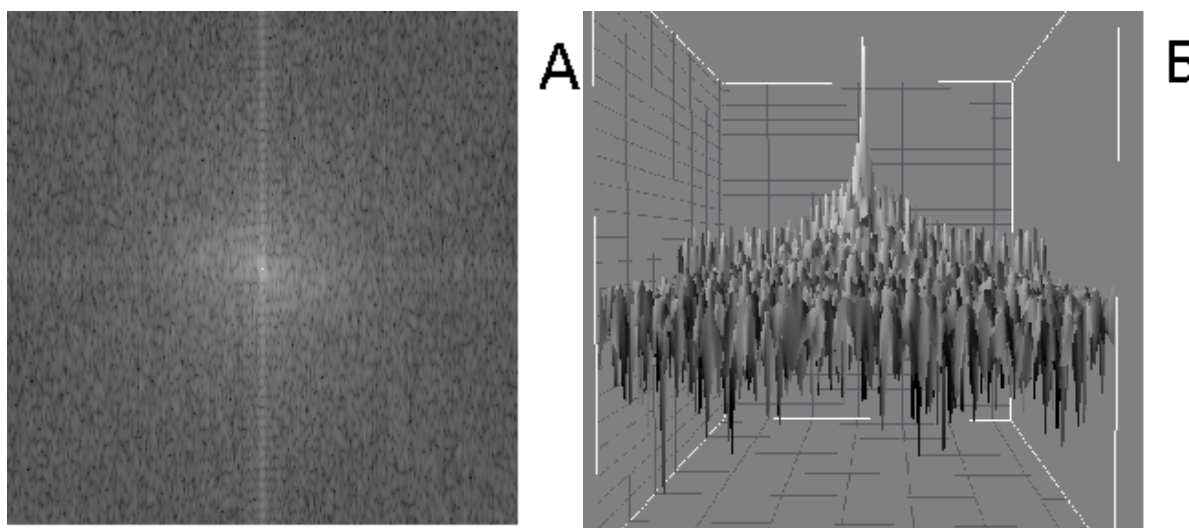
**Клиническая характеристика групп пациентов**

| Параметры        | Группа ОА | Группа сравнения |
|------------------|-----------|------------------|
| Всего, n, абс.   | 92        | 24               |
| Пол ж/м, n, абс. | 78/14     | 16/8             |

|                             |           |           |
|-----------------------------|-----------|-----------|
| Возраст, M±SD               | 66,1±10,5 | 29,6±5,96 |
| Стадия ОА I/II/III-IV, абс. | 14/52/26  | ---       |

Критерии исключения: травмы коленных суставов в период до 24 месяцев до включения в исследование, переломы мыщелков бедренных и проксимального отдела большеберцовых костей, отсутствие согласия на участие в настоящем исследовании.

Каждый пациент был осмотрен врачом-ревматологом, проведено клиническое и рентгенологическое исследование. Выполнялась стандартная рентгенография КС по общепринятой методике в прямой проекции на цифровом рентгенологическом аппарате «КРТ ОКО Электрон». Цифровые рентгенограммы обрабатывали в режиме «pixeltopixel». На изображении выбирали область интереса, включающую участок субхондральной кости размером  $48 \pm 2 \times 90 \pm 4$  пикселей. Объектом интереса в основной группе выбирали наиболее болезненный сустав; в группе сравнения исследовали правый КС.



*Рис. 1. Алгоритм получения спектра Фурье: А – быстрое дискретное образование Фурье, Б – спектр Фурье*

Для оценки спектральных свойств изображения СКХ применяли стандартный алгоритм быстрого преобразования Фурье, по которому строили график функции, по которому оценивали значение экстремума спектра Фурье (ЭСФ) (рис. 1). Изучение текстурных признаков изображения суставной щели проводили с использованием аналитического протокола GLCM. Поучали показатели второго углового момента (ASM), обратного момента разностей (IDM), энтропии (E).

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием пакета программ Statistica 6.0 (StatSoft, США), включая общепринятые методы параметрического и непараметрического анализа. Для параметров, распределение которых отличалось от нормального, при сравнении двух групп использовали Z-критерий Манна – Уитни, для

сравнения более двух групп использовали Н-критерий Краскела – Уоллиса и/или медианный тест. Результаты представлены в виде среднего и стандартного отклонения ( $M \pm SD$ ). Корреляционный анализ проводился по методу Спирмена. Различия считались статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

**Результаты.** У пациентов, включенных в исследование, экстремум спектра Фурье субхондральной кости обратно коррелировал со стадией заболевания ( $r = -0,3$ ,  $p = 0,02$ ) и наличием больших остеофитов ( $r = -0,3$ ,  $p = 0,02$ ) и не был связан возрастом ( $r = -0,02$ ,  $p = 0,9$ ) и полом ( $r = -0,2$ ,  $p = 0,1$ ).

Показатели GLCM текстурного анализа продемонстрировали статистически значимые связи с рентгенологическим признаками ОА КС (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты корреляционного анализа GLCM текстурных характеристик субхондральной кости**

| Параметры         | ASM                              | IDM                             | E                               |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Стадия, стадия    | $r = -0,576$ ;<br>$p = 0,000002$ | $r = -0,525$ ;<br>$p = 0,00002$ | $r = 0,568$ ;<br>$p = 0,000003$ |
| Возраст, годы     | $r = -0,483$ ;<br>$p = 0,0001$   | $r = -0,456$ ;<br>$p = 0,0004$  | $r = 0,483$ ;<br>$p = 0,0001$   |
| Большие остеофиты | $r = -0,451$ ;<br>$p = 0,0004$   | $r = -0,362$ ;<br>$p = 0,005$   | $r = 0,425$ ;<br>$p = 0,0009$   |

У пациентов с ОА спектр Фурье СКХ был статистически значимо ниже по сравнению с группой лиц без ОА ( $Z = 2,13$ ,  $p = 0,03$ ). Характеристики текстуры СКХ также были статистически значимо ниже, чем в группе сравнения: ASM:  $Z = -3,12$ ,  $p = 0,002$ ; IDM:  $Z = -3,25$ ,  $p = 0,001$ ; E:  $Z = -3,14$ ,  $p = 0,002$  (табл. 2).

У лиц обоих полов в группе ОА спектральные и текстурные характеристики не имели статистически значимых различий.

Таблица 2

**Показатели фрактальных и текстурных характеристик сегментированных изображений субхондральной кости в исследуемых группах**

| Показатель | Группа ОА             |                       |                      | Группа сравнения      |                      |                                |
|------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|
|            | Общее<br>n=92         | Женщины<br>n=78       | Мужчины<br>n=14      | Общее<br>n=24         | Женщины<br>n=16      | Мужчины<br>n=8                 |
| ЭСФ        | 167,39<br>$\pm 14,76$ | 167,21<br>$\pm 15,66$ | 168,43<br>$\pm 8,96$ | *173,33<br>$\pm 6,54$ | 173,37<br>$\pm 8,17$ | 173,25<br>$\pm 2,96$           |
| ASM        | 0,407<br>$\pm 0,029$  | 0,402<br>$\pm 0,041$  | 0,431<br>$\pm 0,181$ | *0,462<br>$\pm 0,052$ | 0,486<br>$\pm 0,046$ | $\square$ 0,414<br>$\pm 0,019$ |
| IDM        | 0,875<br>$\pm 0,009$  | 0,872<br>$\pm 0,051$  | 0,889<br>$\pm 0,040$ | *0,918<br>$\pm 0,027$ | 0,933<br>$\pm 0,014$ | $\square$ 0,890<br>$\pm 0,024$ |
| E          | 1,045<br>$\pm 0,035$  | 1,053<br>$\pm 0,092$  | 1,003<br>$\pm 0,099$ | 0,932<br>$\pm 0,093$  | 0,886<br>$\pm 0,072$ | $\square$ 1,024<br>$\pm 0,049$ |

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

□ Внутригрупповые различия статистически значимы при  $p < 0,05$ .

У молодых лиц без ОА, включенных в исследование, наблюдали половые особенности организации текстуры СХК. Так показатели GLCM были у женщин статистически значимо ниже: ASM:  $Z = -2,38$ ,  $p = 0,02$ ; IDM:  $Z = -2,38$ ,  $p = 0,02$ ; E:  $Z = -2,38$ ,  $p = 0,02$ . Вместе с тем спектральные характеристики не имели значимых различий.

У пациентов, включенных в исследование, не удалось установить статистически значимых различий не по одному изучаемому параметру между группой сравнения и пациентами с I стадией гонартроза.

ЭСФ значимо снижался по мере прогрессирования рентгенологических симптомов ОА КС ( $N = 6,7$ ,  $p = 0,03$ , рисунок 2). GLCM текстурные характеристики статистически значимо варьировали по мере нарастания рентгенологических симптомов ОА КС. Как показано на рисунке 3, второй угловой момент и обратный момент разностей статистически значимо снижались (соответственно:  $N = 9,7$ ,  $p = 0,008$ ;  $N = 6,7$ ,  $p = 0,03$ ). Показатель энтропии, напротив, имел тренд увеличения ( $N = 9,4$ ,  $p = 0,009$ ).

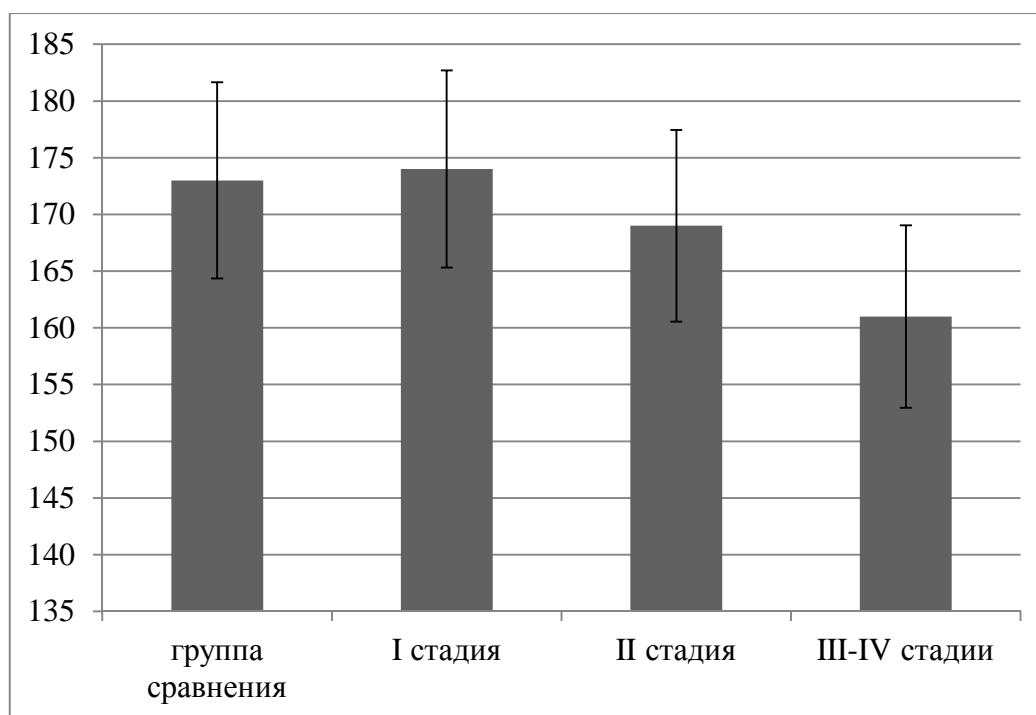


Рис. 2. Динамика спектральной характеристики субхондральной кости

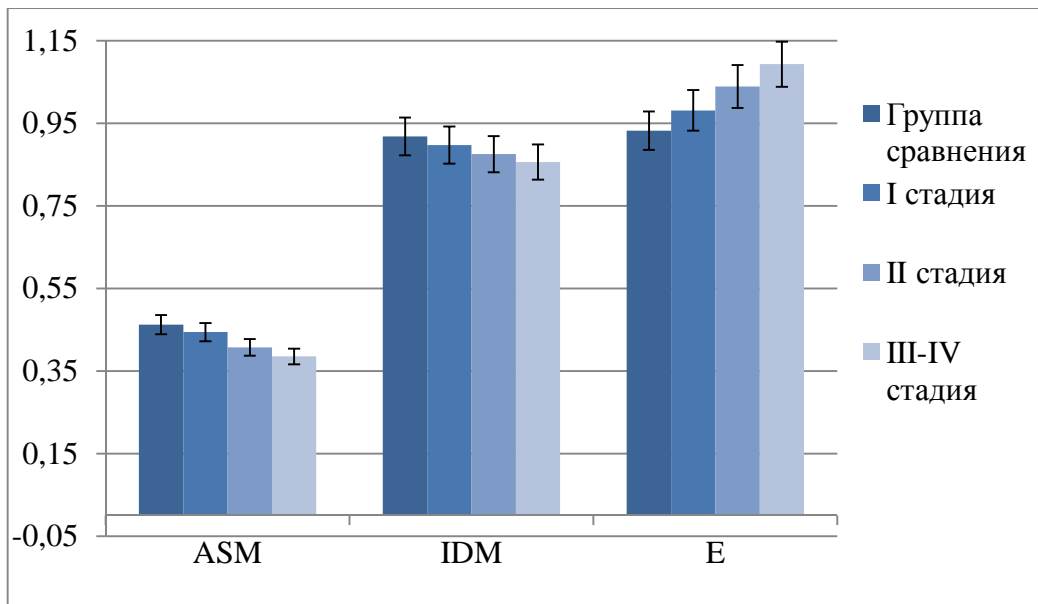


Рис. 3. Динамика GLCM параметров текстуры субхондральной кости

### Обсуждение

Как показали исследования, анализ изображений на основе преобразования Фурье представляет собой надёжный метод автоматической классификации, который может быть использован при анализе изображений [4]. Наши результаты в полной мере подтверждают это обстоятельство. Полученные результаты свидетельствуют о том, что по мере прогрессирования ОА КС наблюдается изменение экстремума спектра Фурье СХК, что в полной мере отражает современную концепцию её роли в патогенезе ОА. По мере прогрессирования ОА происходит склерозирование и уплотнение СХК за счёт формирования остеоподобного матрикса, при этом происходит снижение интенсивности экстремума Фурье. Таким образом, экстремум спектра Фурье представляет собой надёжную текстурную характеристику, отражающую стадийность рентгенологического процесса при ОА КС.

Кроме спектральных размерностей, нами были изучены текстурные характеристики СХК, такие как второй угловой момент, обратный момент разностей и энтропия, которые продемонстрировали закономерные изменения по мере прогрессирования ОА. Нужно отметить незначительное число публикаций результатов исследований с применением GLCM анализа текстур [3]. Учитывая то обстоятельство, что текстурные характеристики основаны на оценке градаций оттенков серого, то можно предположить, что по их колебанию можно судить об изменениях в текстуре СХК по мере прогрессирования ОА [11]. Наши данные показывают возможность идентификации процессов СХК и краевой оссификации суставной щели. Очевидно, GLCM текстурные характеристики отражают общие процессы при ОА. Это согласуется с мнениями других авторов, изучавших взаимосвязь текстурных характеристик и качеством костной ткани [12]. Было убедительно

показано, что текстурные характеристики тестов коррелируют с морфометрическими показателями [5]. Наши данные, свидетельствующие о том, что текстурные характеристики отражают общепринятую стадийность ОА, являются важным подтверждением значимости данного метода в оценке рентгенограмм.

Полученные нами данные свидетельствуют о связи экстремума спектра Фурье, полученного в ходе протокола быстрого преобразования, текстурных характеристик с рентгенологическими проявлениями ОА. Эти данные представляют собой интерес с позиции дальнейшего изучения вариабельности изученных маркеров в ходе прогрессирования и лечения ОА. Использование математических моделей позволит стандартизировать рентгенографию, повысить её диагностическую значимость, будет способствовать развитию автоматических систем анализа и принятия решений.

### Список литературы

1. Зайцева Е.М., Смирнов А.В., Алексеева Л.И. Оценка минеральной плотности костной ткани субхондральных отделов бедренной и большеберцовой костей при гонартрозе // Научно-практическая ревматология. – 2005. – № 1. – Р. 27-30.
2. Кабалык М.А., Дубиков А.И., Петрикеева Т.Ю. и др. Феномен микрокристаллического стресса при остеоартрозе // Тихоокеанский мед. журнал. – 2014. – № 1. – Р. 70-74.
3. Кабалык М.А. Фрактальные и текстурные характеристики изображений субхондральной кости при остеоартрозе // Успехи современной науки. – 2016. – № 3. – С. 66-72.
4. Томакова Р.А., Филист С.А., Горбатенко С.А. и др. Анализ гистологических изображений посредством морфологических операторов, синтезированных на основе преобразования Фурье и нейросетевого моделирования // Биотехносфера. – 2010. – Т. 3, № 9. – С. 54-60.
5. Chappard D., Guggenbuhl P., Legrand E. et al. Texture analysis of X-ray radiographs is correlated with bone histomorphometry // J. Bone. Miner. Metab. – 2005. – Vol. 23, № 1. – P.24-29.
6. Englund M., Guermazi A., Roemer F.W. et al. Meniscal pathology on MRI increases the risk for both incident and enlarging subchondral bone marrow lesions of the knee: the MOST Study // Ann. Rheum. Dis. – 2010. – Vol. 69. – P. 1796–1802.
7. Hunter D.J., Zhang Y.Q., Tu X. et al. Change in joint space width: hyaline articular cartilage loss or alteration in meniscus? // Arthritis Rheum. – 2006. – Vol. 54, № 8. – P. 2488–2495.
8. Kamibayashi L., Wyss U.P., Cooke D.V., Zee B. Changes in mean trabecular orientation in the medial condyle of the proximal tibia in osteoarthritis // Calcif. Tissue Int. – 1995. – Vol. 57. – P. 69–73.

9. Papaloucas C.D., Ward R.J., Tonkin C.J., Buckland-Wright C. Cancellous bone changes in hip osteoarthritis: a short-term longitudinal study using fractal signature analysis // *Osteoarthritis Cartilage*. – 2005. – Vol. 13, № 11. – P. 998–1003.
10. Rautiainen J., Lehto L.J., Tiitu V. et al. Osteochondral repair: evaluation with sweep imaging with fourier transform in an equine model // *Radiology*. – 2013. – Vol. 269, №1. – P. 113-121.
11. Thevenot J., Hirvasniemi J., Pulkkinen P. et al. Assessment of risk of femoral neck fracture with radiographic texture parameters: a retrospective study // *Radiology*. – 2014. – Vol.272, №1. – P. 184-191.
12. Wen C.Y., Chen Y., Tang H.L. et al. Bone loss at subchondral plate in knee osteoarthritis patients with hypertension and type 2 diabetes mellitus // *Osteoarthritis Cartilage*. – 2013. – Vol. 21, № 11. – P. 1716-1723.
13. Yu S.P., Hunter D.J. Managing osteoarthritis // *Aust. Prescr.* – 2015. – Vol. 38, № 4. – P. 115-119.