

ГЕТЕРОГЕННОСТЬ КЛУБОЧКОВ НЕФРОНОВ КАК МАРКЕР МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗРЕЛОСТИ ПОЧЕК У СУТОЧНЫХ ЦЫПЛЯТ

Хоменко Н. А., аспирант кафедры анатомии и физиологии животных, Институт «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского».

Лемешченко В. В., доктор ветеринарных наук, профессор, Институт «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского».

Исследовали морфометрические параметры клубочков нефронов у 12 суточных цыплят (общий объем гистологической выборки — 120 клубочков) с использованием гистологических методов. Установили, что диаметр клубочков варьирует от 14,13 до 52,92 мкм. Средний диаметр составил $26,69 \pm 0,63$ мкм, коэффициент вариации — 25,9 %. Распределение имеет выраженный правосторонний сдвиг с концентрацией значений в диапазоне 22–30 мкм. Корреляционный анализ выявил статистически значимую положительную взаимосвязь между средним диаметром клубочков и почечно-соматическим индексом ($r = +0,771$; $p < 0,01$; $n = 12$). Коэффициент детерминации $r^2 = 0,594$. Полученные данные подтверждают сопряжённость микро- и макроуровней организации почки.

Ключевые слова: морфометрия, клубочки нефронов, гистология, почечно-соматический индекс, цыплята.

HETEROGENEITY OF NEPHRON GLOMERULI AS A MARKER OF MORPHOFUNCTIONAL MATURITY OF THE KIDNEYS IN DAY-OLD CHICKS

Khomenko N. A., Postgraduate student of the Department of Animal Anatomy and Physiology, Institute "Agrotechnological Academy" of FSAEI HE «V. I. Vernadsky Crimean Federal University».

Lemeshchenko V. V., Doctor of Veterinary Science, Professor, Institute "Agrotechnological Academy" of FSAEI HE «V. I. Vernadsky Crimean Federal University».

Morphometric parameters of glomeruli of nephrons were studied in 12 day-old chickens (total volume of the histological sample – 120 glomeruli) using histological methods. It was found that the diameter of glomeruli varies from 14.13 to 52.92 μm . The average diameter was 26.69 ± 0.63 μm , the coefficient of variation – 25.9%. The distribution has a pronounced right-sided shift with the concentration of values in the range of 22–30 μm . Correlation analysis revealed a statistically significant positive relationship between the average diameter of glomeruli and the renal-somatic index ($r = +0.771$; $p < 0.01$; $n = 12$). The determination coefficient $r^2 = 0.594$. The obtained data confirm the conjugation of micro- and macro-levels of the kidney organization.

Keywords: morphometry, nephron glomeruli, histology, renal somatic index, chicks.

Введение

Почка является ключевым органом гомеостаза у птиц, обеспечивающим выведение продуктов азотистого обмена и регуляцию водно-солевого баланса. Морфофункциональной единицей почки служит нефрон, фильтрационная способность которого в значительной степени определяется размерами клубочка. У птиц, в отличие от млекопитающих, почки содержат два типа нефронов — рептильный (без петли Генле) и петлевой (с петлей Генле), что создаёт дополнительные сложности для морфометрической оценки. Рептильные нефроны составляют 70 % и более от общего числа, их клубочки мельче и содержат меньше мезангиальных клеток, тогда как петлевые нефроны, хотя и менее многочисленны, обеспечивают способность к концентрации мочи за счёт противоточной системы в петлях Генле. Диаметр клубочков у птиц, по данным литературы, составляет в среднем 15–50 мкм в зависимости от вида и типа нефрона [2, 3].

Формирование почек у птиц продолжается в раннем постнатальном онтогенезе, и к моменту вылупления почки являются чувствительным индикатором условий эмбрионального развития. В частности, показано, что повышенная потеря массы яйца в процессе инкубации коррелирует с увеличением относительной массы почек у суточных цыплят. Однако остаётся неясным, отражается ли этот эффект на размерах клубочков нефронов — ключевых структурных элементах, определяющих фильтрационную способность органа. Морфометрические данные о размерах почечных клубочков у кур преимущественно получены на взрослых особях; для суточного возраста подобные сведения

единичны, а сопоставление гистологических параметров с показателем ПСИ ранее не проводилось. ПСИ, представляющий собой отношение площади почек к массе тела, является одним из маркеров морфофункциональной зрелости выделительной системы и может использоваться в сравнительной морфологии и экологической физиологии [4, 5].

Цель настоящего исследования — провести анализ гетерогенности клубочков нефронов как маркера морфофункциональной зрелости почек у суточных цыплят.

Материал и методы

Объектом исследования служили суточные цыплята русской белой породы (n=12). Морфологический материал получен в условиях инкубатория при стандартном режиме инкубации: температура 37,5–37,8 °С, относительная влажность 55–60 %, поворот яиц 6 раз в сутки. После вылупления животных взвешивали на электронных весах с точностью до 0,01 г, затем проводили эвтаназию с соблюдением этических норм. Для гистологического исследования почки фиксировали в 10 % нейтральном забуференном формалине в течение 24 часов. После стандартной проводки через спирты возрастающей концентрации и ксилол материал заливали в парафин. Срезы толщиной 5–7 мкм изготавливали на ротационном микротоме, окрашивали гематоксилином и эозином по общепринятой методике [1]. Микроскопию и фотофиксацию препаратов проводили на микроскопе Leica DM2000 (Германия), с объективами Plan 10x, 20x и 40x с использованием цифровой камеры. Для каждого среза измеряли не менее 10 клубочков, равномерно распределённых по корковому слою. Общий объем гистологической выборки составил n = 120. Для описания общей совокупности измерений вычисляли средний диаметр (M), стандартное отклонение (SD), стандартную ошибку средней ($m = SD / \sqrt{n}$, где n — общее число измеренных клубочков), коэффициент вариации (CV). Распределение значений анализировали по 5 группам с равным интервалом.

Измерения диаметра клубочков (D) проводили по формуле:

$$D = L / \pi,$$

где L — длина окружности клубочка, измеренная вдоль базальной мембраны капсулы Боумена.

Группировку проводили по принципу равных интервалов:

$$\text{Шаг группы} = (D_{\max} - D_{\min}) / 5 = (52,92 - 14,13) / 5 = 7,92 \text{ мкм}.$$

Почечно-соматический индекс определяли на параллельной выборке суточных цыплят (n=12), полученных в аналогичных условиях инкубации. ПСИ рассчитывали как:

$$\text{ПСИ} = [(S_{\text{правой}} + S_{\text{левой}}) / \text{масса тела}] \times 100 \text{ (мм}^2\text{/г)},$$

где $S_{\text{правой}}$ и $S_{\text{левой}}$ — площади почек, измеренные как произведение максимальной длины на максимальную ширину с помощью цифрового штангенциркуля (точность 0,01 мм).

Статистическую обработку проводили с использованием коэффициента корреляции Пирсона (r), рангового анализа и расчёта коэффициента вариации в среде Microsoft Excel (пакет «Анализ данных»).

Результаты исследований

При гистологическом исследовании почки суточных цыплят имеют типичное для птиц строение и состоят из коркового и мозгового вещества, покрытого тонкой фиброзной капсулой. Зональность органа выражена отчётливо: корковое вещество образовано почечными дольками, в которых сосредоточены основные элементы фильтрации и реабсорбции — почечные тельца, проксимальные и дистальные извитые канальцы, а также начальные отделы собирательных трубочек (рис. 1).

Почечные тельца представлены сосудистыми клубочками малого размера, которые содержат 3–4 капиллярные петли. Клубочки окружены капсулой Боумена, выстланной плоским эпителием. Мочевое пространство капсулы преимущественно щелевидное, у части клубочков визуальное не определяется. В корковом веществе хорошо различимы клубочки двух типов: рептильные — более мелкие, расположенные ближе к периферии дольки, и петлевые — более крупные, локализованные в средних отделах корковых долек. Оба типа клубочков окружены плотно упакованными канальцами проксимального и дистального отделов нефронов. Просвет проксимальных канальцев в подавляющем большинстве не визуализируется вследствие плотного смыкания апикальных поверхностей эпителиоцитов. Дистальные извитые канальцы выстланы цилиндрическим эпителием меньшей высоты. Часть дистальных канальцев имеет хорошо различимый просвет, иногда широкий, что является одним из дифференциальных признаков при сопоставлении с проксимальными отделами (рис. 2).

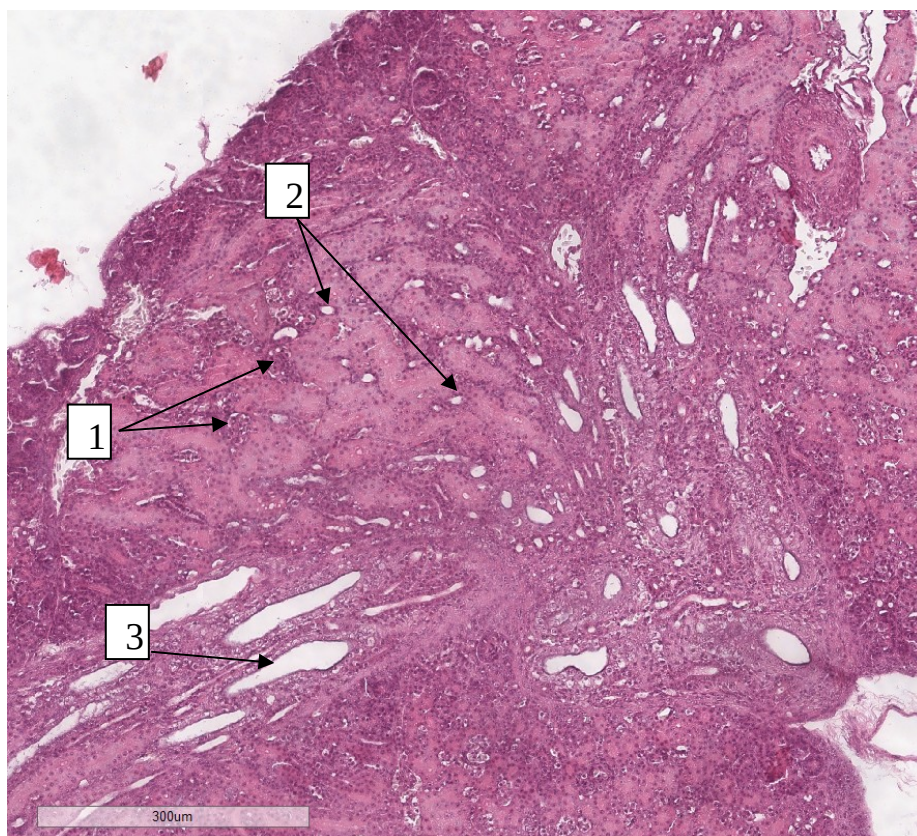


Рисунок 1. Гистологический препарат почки суточного цыплёнка, Leica DM2000 (Германия), окраска гематоксилин-эозином, увеличение $\times 150$: 1. Почечное тельце, 2. Проксимальные и дистальные извитые каналцы, 3. Собирательная трубочка.

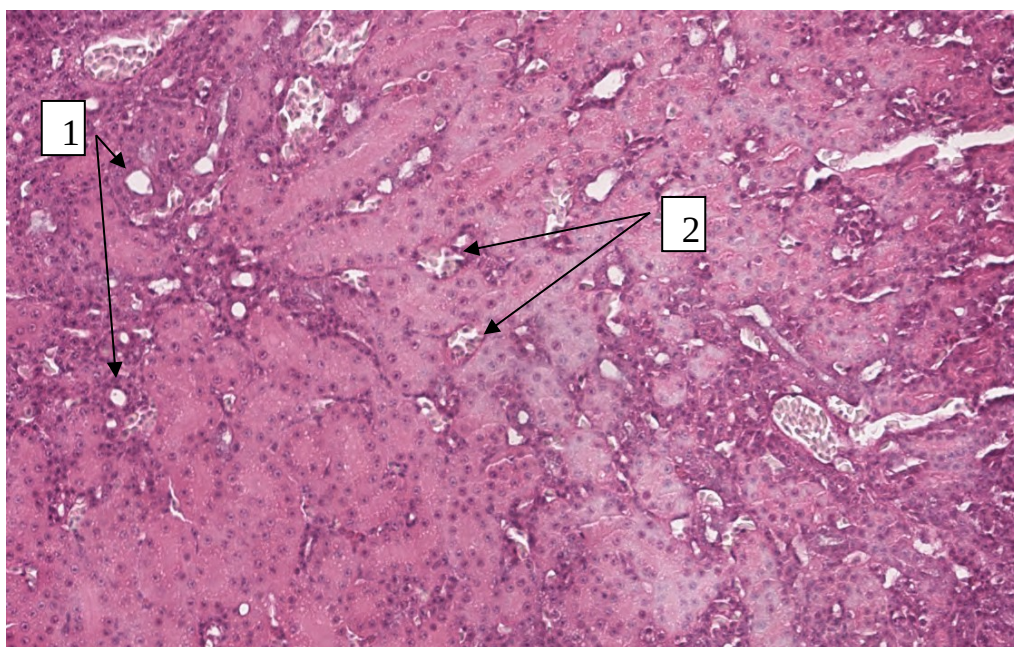


Рисунок 2. Гистологический препарат почки суточного цыплёнка, Leica DM2000 (Германия), окраска гематоксилин-эозином, увеличение $\times 400$: 1. Проксимальные и дистальные извитые каналцы, 2. Почечные капилляры.

Собирательные трубочки по диаметру равны или несколько меньше дистальных каналцев. В корковом веществе они выстланы кубическим эпителием, в мозговом — призматическим. Цитоплазма эпителиоцитов светлая, крупное ядро расположено в центре клетки. В мозговом веществе

собираательные трубочки последовательно сливаются, формируя третичные, а затем вторичные и первичные притоки мочеточника. Сосудистое русло почек хорошо развито и представлено междольковыми и внутридольковыми артериями и венами, а также густой сетью капилляров, окружающих структуры коркового и мозгового вещества. Все сосуды имеют нормальное кровенаполнение, признаков стаза, тромбоза или геморрагий не обнаружено.

Диаметр клубочков демонстрировал значительную вариабельность, варьируя от 14,13 до 52,92 мкм. Средний диаметр клубочков по всей совокупности измерений составил 26,69 мкм, стандартная ошибка средней — 0,63 мкм, стандартное отклонение — 6,92 мкм, коэффициент вариации — 25,9 % (табл. 1).

Таблица 1. Основные морфометрические показатели диаметра клубочков нефронов у суточных цыплят

Показатель	Значение
Диапазон диаметров, мкм	14,13–52,92
Размах вариации, мкм	38,79
Среднее (M), мкм	26,69
Стандартное отклонение (SD), мкм	6,92
Стандартная ошибка средней (m), мкм	0,63
Коэффициент вариации (CV), %	25,9
Асимметрия	+0,72
Эксцесс	+0,21

Большинство измеренных значений (86 из 120; 71,7 %) находились в диапазоне 22–30 мкм, что указывает на наличие преобладающего размера клубочков в исследованной выборке. Остальные наблюдения распределялись в диапазонах 14–22 мкм (27 измерений; 22,5 %) и 30–53 мкм (7 измерений; 5,8 %). (рис. 3).



Рисунок 3. Гистограмма распределения диаметров клубочков нефронов у суточных цыплят.

Коэффициент асимметрии распределения составил +0,72, что указывает на правостороннюю асимметрию — «хвост» распределения вытянут в сторону более крупных клубочков. Коэффициент эксцесса составил +0,21, что свидетельствует о близости формы распределения к нормальному.

Индивидуальные средние диаметры клубочков (по 10 измерениям на каждое животное) варьировали от 22,30 до 33,31 мкм (M=27,06 мкм; SD=2,67 мкм; CV=9,9 %) (табл. 2).

Таблица 2. Индивидуальные средние диаметры клубочков нефронов и почечно-соматический индекс у суточных цыплят

Цыплёнок	Средний диаметр, мкм	ПСИ
1	22,30	4,70
2	26,32	5,11
3	27,96	5,29
4	33,31	7,54
5	28,31	7,29
6	28,11	7,14
7	28,44	7,43

8	24,93	5,08
9	30,55	7,48
10	24,22	5,02
11	26,73	5,18
12	23,55	4,94
M ± m	27,06 ± 0,77	5,52 ± 0,31
SD	2,67	1,09
CV, %	9,9	19,7

Почечно-соматический индекс у исследованных цыплят составил 4,70–7,54 ($M=5,52$; $SD=1,09$; $CV=19,7\%$). Корреляционный анализ выявил статистически значимую положительную взаимосвязь между индивидуальным средним диаметром клубочков и ПСИ: $r=+0,771$ ($p<0,01$; $n=12$). Коэффициент детерминации $r^2=0,594$ свидетельствует о том, что около 59 % вариабельности почечно-соматического индекса может быть объяснено вариабельностью среднего диаметра клубочков. Сравнительный анализ вариабельности показал, что диаметр клубочков (по всей совокупности из 120 измерений) характеризуется большей изменчивостью ($CV=25,9\%$), чем ПСИ ($CV=19,7\%$), что предполагает более высокую морфологическую пластичность микроуровня по сравнению с макроуровнем. Обнаруженная широкая вариабельность диаметра клубочков ($CV=25,9\%$) у суточных цыплят согласуется с литературными данными о высокой морфологической гетерогенности почек птиц на ранних этапах постнатального онтогенеза. Полученные значения (средний диаметр $26,69\pm0,63$ мкм, диапазон 14,13–52,92 мкм) соответствуют данным, приведённым в литературе.

Разброс размеров клубочков вероятно отражает разную степень зрелости нефронов. У суточных цыплят, в корковом слое присутствуют зоны где формируются новые нефроны. Эти новообразованные клубочки, как правило, мельче и могут характеризоваться слабо выраженным мочевым пространством, что согласуется с нашими наблюдениями о щелевидном или визуально неопределяемом пространстве капсулы у части почечных телец. Выявленное согласованное унимодальное распределение диаметра клубочков и ПСИ не противоречит гипотезе о том, что более крупные клубочки, как правило, ассоциированы с большей суммарной площадью почек на групповом уровне. Это может отражать сопряжённость микро- и макроуровней организации органа. Одна из возможных интерпретаций состоит в том, что внешние факторы, действуя на уровне целостного организма, способны запускать каскад реакций, приводящих к согласованному увеличению как размеров фильтрационных элементов, так и общей массы почечной ткани.

В рамках теоретической модели рекурсивной прогрессии полученные данные могут быть интерпретированы как проявления адаптивных перестроек на разных уровнях организации. Увеличение ПСИ и тенденция к формированию более крупных клубочков могут рассматриваться, как возникающие на стыке эмбриональных условий и генетически детерминированных норм реакции [6–8].

Выводы

1. У суточных цыплят выявлена значительная вариабельность диаметра клубочков нефронов: диапазон 14,13–52,92 мкм, среднее значение $26,69\pm0,63$ мкм, коэффициент вариации 25,9 %.
2. Распределение диаметров клубочков характеризуется правосторонней асимметрией (+0,72) с концентрацией большинства измерений (71,7 %) в диапазоне 22–30 мкм.
3. Выявлена статистически значимая положительная корреляция между индивидуальным средним диаметром клубочков и почечно-соматическим индексом ($r=+0,771$; $p<0,01$; $n=12$). Полученные результаты подтверждают сопряжённость микро- и макроуровней организации почки.
4. Диаметр клубочков характеризуется большей вариабельностью ($CV=25,9\%$), чем ПСИ ($CV=19,7\%$), что позволяет предположить более высокую морфологическую пластичность микроуровня по сравнению с макроуровнем.

Список использованных источников

1. Волкова О. В., Елецкий Ю. К. Основы гистологии с гистологической техникой. М. : Медицина, 1971. 304 с.
2. Abdul-Aziz T., Fletcher O. J. Urinary System // Avian Histopathology. 4th ed. Jacksonville, FL : American Association of Avian Pathologists, 2020. P. 431–476.
3. Braun E. J. Comparative renal function in reptiles, birds, and mammals // Seminars in Avian and Exotic Pet Medicine. 1998. Vol. 7, No. 2. P. 62–71.

4. Wideman R. F. Maturation of glomerular size distribution profiles in domestic fowl (*Gallus gallus*) // *Journal of Morphology*. 1989. Vol. 201, No 2. P. 205–213.
5. Gregg C. M., Wideman R. F. Morphological and functional comparisons of normal and hypertrophied kidneys of adult domestic fowl (*Gallus gallus*) // *American Journal of Physiology*. 1990. Vol. 258, No 2 Pt 2. P. F403–F413.
6. Лемещенко, В. В. Мета-уровень структурной организации как проявление иерархического синтеза в морфологии млекопитающих и птиц / В. В. Лемещенко // Сборник трудов Международного научно-практического симпозиума «Актуальные вопросы прикладной морфологии», Москва, 20 марта 2026 года / ред.: С. В. Позябин [и др.]. – Москва: ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА имени К. И. Скрябина, 2026. – С. 58–59.
7. Лемещенко, В. В. Взаимодействие корреляционных кластеров как механизм иерархического синтеза в перинатальный период у кур и перепелов / В. В. Лемещенко, М. С. Кетрарь, Н. А. Хоменко // Сборник трудов Международного научно-практического симпозиума «Актуальные вопросы прикладной морфологии», Москва, 20 марта 2026 года / ред.: С. В. Позябин [и др.]. – Москва: ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА имени К. И. Скрябина, 2026. – С. 57–58.
8. Lemeshchenko V. A meta-theory of hierarchical synthesis as a fractal paradigm of cooperation: the recursive transit of complexity through transitional meta-levels. Version 1. – Text : electronic // Research Square. 2026. 1 electronic resource (20 p.). DOI: 10.21203/rs.3.rs-8425906/v1.

Сведения об авторах

Хоменко Н. А., аспирант кафедры анатомии и физиологии животных, Институт «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», e-mail: khomenko@mail.ru, г. Симферополь, п. Аграрное, Институт «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского».

Лемещенко В. В., доктор ветеринарных наук, профессор, заведующий кафедрой анатомии и физиологии животных, Институт «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», e-mail: lemeshenko@mail.ru, г. Симферополь, п. Аграрное, Институт «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского».

УДК 619:591.4:636.5

Хоменко Н. А., Лемешченко В. В.

ГЕТЕРОГЕННОСТЬ КЛУБОЧКОВ НЕФРОНОВ КАК МАРКЕР МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗРЕЛОСТИ ПОЧЕК У СУТОЧНЫХ ЦЫПЛЯТ

Почка является ключевым органом гомеостаза у птиц, обеспечивающим выведение продуктов азотистого обмена и регуляцию водно-солевого баланса. Морфофункциональной единицей почки служит нефрон, фильтрационная способность которого в значительной степени определяется размерами клубочка. Цель исследования — провести морфометрическую характеристику клубочков нефронов у суточных цыплят на основе гистологического анализа и установить характер взаимосвязи среднего диаметра клубочков с почечно-соматическим индексом (ПСИ).

Исследовали морфометрические параметры клубочков нефронов у 12 суточных цыплят (общий объем гистологической выборки — 120 клубочков) с использованием гистологических методов (окраска гематоксилином и эозином, световая микроскопия). Гистологическая картина почек соответствовала физиологической норме: корковое и мозговое вещество чётко дифференцированы, почечные тельца содержат 3–4 капиллярные петли, проксимальные канальцы выстланы высоким цилиндрическим эпителием с пенистой базофильной цитоплазмой, дистальные канальцы — более низким эпителием с оксифильной цитоплазмой и наличием просвета. Установили, что диаметр клубочков варьирует от 14,13 до 52,92 мкм при среднем значении $26,69 \pm 0,63$ мкм ($SD=6,92$ мкм, $CV=25,9$ %). Распределение характеризуется правосторонней асимметрией (+0,72) с концентрацией большинства измерений (71,7 %) в диапазоне 22–30 мкм. Индивидуальные средние диаметры клубочков составили 22,30–33,31 мкм ($M=27,06$ мкм; $SD=2,67$ мкм). Корреляционный анализ выявил статистически значимую положительную взаимосвязь между средним диаметром клубочков и ПСИ: $r=+0,771$ ($p<0,01$; $n=12$). Коэффициент детерминации $r^2=0,594$. Сравнительный анализ вариабельности показал, что диаметр клубочков характеризуется большей изменчивостью ($CV=25,9$ %), чем ПСИ ($CV=19,7$ %).

Таким образом, полученные данные подтверждают сопряжённость микро- и макроуровней организации почки (клубочки → ПСИ) и не противоречат модели иерархического синтеза, в которой внешние факторы могут выступать модификаторами формирования морфогенетических конфигураций. Результаты могут быть использованы в качестве ориентировочных значений при гистологической оценке состояния почек у суточных цыплят.

Abstract

UDC 619:591.4:636.5

Khomenko N. A., Lemeshchenko V. V.

HETEROGENEITY OF NEPHRON GLOMERULI AS A MARKER OF MORPHOFUNCTIONAL MATURITY OF THE KIDNEYS IN DAY-OLD CHICKS

The kidney is a key organ of homeostasis in birds, providing excretion of nitrogen metabolism products and regulation of water-salt balance. The morphofunctional unit of the kidney is the nephron, the filtration capacity of which is largely determined by the size of the glomerulus. The aim of the study was to perform a morphometric characterization of nephron glomeruli in day-old chicks based on histological analysis and to establish the relationship between the mean glomerular diameter and the renal somatic index (RSI).

Morphometric parameters of nephron glomeruli were studied in 12 day-old chicks (total histological sample — 120 glomeruli) using histological methods (hematoxylin and eosin staining, light microscopy). The histological picture of the kidneys corresponded to the physiological norm: cortical and medullary layers are clearly differentiated, renal corpuscles contain 3–4 capillary loops, proximal tubules are lined with high columnar epithelium with foamy basophilic cytoplasm, distal tubules — with lower epithelium with oxyphilic cytoplasm and visible lumen. The glomerular diameter was found to vary from 14.13 to 52.92 μm with a mean value of 26.69 ± 0.63 μm ($SD=6.92$ μm , $CV=25.9$ %). The distribution is characterized by right-sided asymmetry (+0.72) with concentration of the majority of measurements (71.7 %) in the range of 22–30 μm . Individual mean glomerular diameters ranged from 22.30 to 33.31 μm ($M=27.06$ μm ; $SD=2.67$ μm). Correlation analysis revealed a statistically significant positive relationship between the mean glomerular diameter and RSI: $r=+0.771$ ($p<0.01$; $n=12$). The coefficient of determination was $r^2=0.594$. Comparative analysis of variability showed that the glomerular diameter is characterized by greater variability ($CV=25.9$ %) than RSI ($CV=19.7$ %).

Thus, the obtained data confirm the conjugation of micro- and macro-levels of kidney organization (glomeruli $\rightarrow$ RSI) and do not contradict the model of hierarchical synthesis, in which external factors may act as modifiers of morphogenetic configuration formation. The results can be used as reference values for histological assessment of kidney condition in day-old chicks.