

Е. О. Фадеева

ТАКСОНОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПЕРА ПТИЦ

Резюме

Представлены результаты сравнительного электронно-микроскопического исследования особенностей микроструктуры контурного пера птиц. Показана диагностическая значимость компарментов микроструктуры первостепенного махового пера как основных маркёров таксономической идентификации птиц по перьям и их фрагментам. Полученные результаты исследования расширяют представление о формировании адаптивных морфологических характеристик пера, а также имеют и диагностическое значение, весьма актуальное и востребованное в широком спектре направлений биологической экспертизы.

E. O. Fadeeva

TAXONOMIC FEATURES OF THE MICROSTRUCTURE OF THE BIRDS FEATHER

Summary

Results of the scanning electron microscope comparative investigation of the contour feather microstructure peculiarities are reported. The diagnostic significance of the compartments of the primary remex microstructure as the main markers of the taxonomic identification of birds by feathers and their fragments is shown. The obtained results of the study expand the understanding of the formation of adaptive morphological characteristics of the feather, and also have diagnostic value, which is very relevant and in demand in a wide range of areas of biological examination.

Комплекс морфологических адаптаций птиц, связанных с их способностью к полёту, исследуют давно и достаточно подробно. Основное внимание в исследовании данного вопроса уделяется строению крыльев птиц. При этом практически неизученными остаются особенности микроструктуры пера, хотя исследование в данном направлении позволяет выявлять не только комплексы видоспецифических таксономически важных микроструктурных особенностей пера, но и специфические элементы микроструктуры, имеющие адаптивный характер.

Метод световой микроскопии, иногда применяемый для исследования микроструктуры перьев, выявляет лишь общие особенности

микроструктуры, но не позволяет визуализировать тонкую морфологию пера и находить основные, очень важные микроструктурные критерии видовой идентификации птиц.

На наш взгляд, ведущее значение в таксономической диагностике перьев птиц имеет сравнительный электронно-микроскопический анализ с применением сканирующего электронного микроскопа (далее SEM), позволяющего получать чёткие изображения, вследствие чего детали микроструктуры пера хорошо различимы.

Нами проведён сравнительный электронно-микроскопический анализ тонкого строения контурного пера 194 видов птиц, относящихся к 23 отрядам. До сих пор подробных комплексных исследований видоспецифических особенностей микроструктуры пера с применением сканирующего электронного микроскопа не проводилось.

Основным материалом для работы послужили первостепенные маховые перья. Выбор данного объекта исследования обусловлен следующим. Во-первых, число перьев в составе перьевого покрова у одной особи достаточно велико и варьирует у разных видов от 900 до 25 000. При этом разные типы перьев значительно различаются по своей микроструктуре. Следовательно, для получения в ходе сравнительного анализа достоверных данных необходимо выбрать один конкретный тип пера.

Во-вторых, первостепенное маховое перо – важнейший функциональный элемент крыла птиц. Это позволяет обоснованно характеризовать выявленные элементы в структуре данного типа пера не только как микроструктурные компоненты, имеющие таксономически важное значение, но и как специфические микроструктурные характеристики, отражающие комплекс эколого-морфологических адаптаций, связанных с полётом.

Для проведения сравнительного электронно-микроскопического исследования мы использовали наиболее информативные микроструктурные компоненты контурного пера – бородки первого и второго порядка (далее, соответственно, бородки I и бородки II) контурной и пуховой частей опахала первостепенного махового пера.

Препарирование бородок осуществляли по многократно апробированной нами методике [Фадеева, 2009, 2013, 2015, 2016, 2018; Бабенко, Фадеева, 2015; Фадеева, Бабенко, 2016, 2017а,б, 2019; Fadeeva, 2019, 2021 и др.].

Приготовленные препараты бородок напыляли золотом методом ионного напыления в условиях вакуума на установке Edwards S-150A

(Великобритания), просматривали и фотографировали с применением SEM JEOL-840A (Япония) при ускоряющем напряжении 15 кВ в режиме вторичной электронной визуализации. Работу проводили в Кабинете электронной микроскопии Института проблем экологии и эволюции имени А. Н. Северцова РАН.

Всего нами изготовлен 7051 препарат бородок, на основании изучения которых сделаны и проанализированы 22 732 электросканограммы. В результате был выявлен обширный ряд микроструктурных характеристик, специфичных на уровне не только отряда, но и вида, т. е. имеющих таксономическое значение.

За основу описания микроструктуры пера были взяты следующие характеристики: в контурной части опахала – конфигурация поперечного среза бородки I (рис. 1А); архитектура сердцевин на поперечном и продольном срезах бородки I (рис. 1Б, 1В): конфигурация сердцевинных полостей, степень развития кератиновых нитей, образующих внутренний каркас сердцевинных полостей, наличие или отсутствие пигментных гранул и их форма; строение кутикулы бородки I (рис. 1Г): рельеф кутикулярной поверхности, конфигурация кутикулярных клеток; микроструктура опахальца: структура бородок II проксимального отдела (далее – проксимальные бородки II), строение бородок II дистального отдела опахальца (далее – дистальные бородки II), в т. ч. конфигурация свободных отделов ороговевших кутикулярных клеток дистальных бородок II, формирующих дорсальную поверхность опахала; в пуховой части опахала пера (рис. 1Д, Е) – форма узлов в проксимальном отделе бородок II (далее – пуховые бородки): характер и степень расчленённости апикальной части сегментов, форма зубцов и степень отклонения их от основной оси пуховой бородки; наличие или отсутствие виллисов в структуре базальных клеток пуховой бородки.

Следует подчеркнуть, что у всех представителей исследованных нами отрядов птиц перечисленные выше микроструктурные характеристики пера значительно различаются не только в разных участках одной и той же бородки, но также у бородок, взятых из разных участков опахала пера [Фадеева, 2013; Фадеева, Бабенко, 2017а]. В связи с этим выявленные элементы имеют таксономическую значимость только в случае сопоставления у разных видов птиц конкретных, строго аналогичных участков бородок [Фадеева, 2018; Fadeeva, 2019, 2021].

Эффективность применения перечисленных характеристик микроструктуры первостепенного махового пера с использованием SEM в целях таксономической идентификации видов была доказана нами в

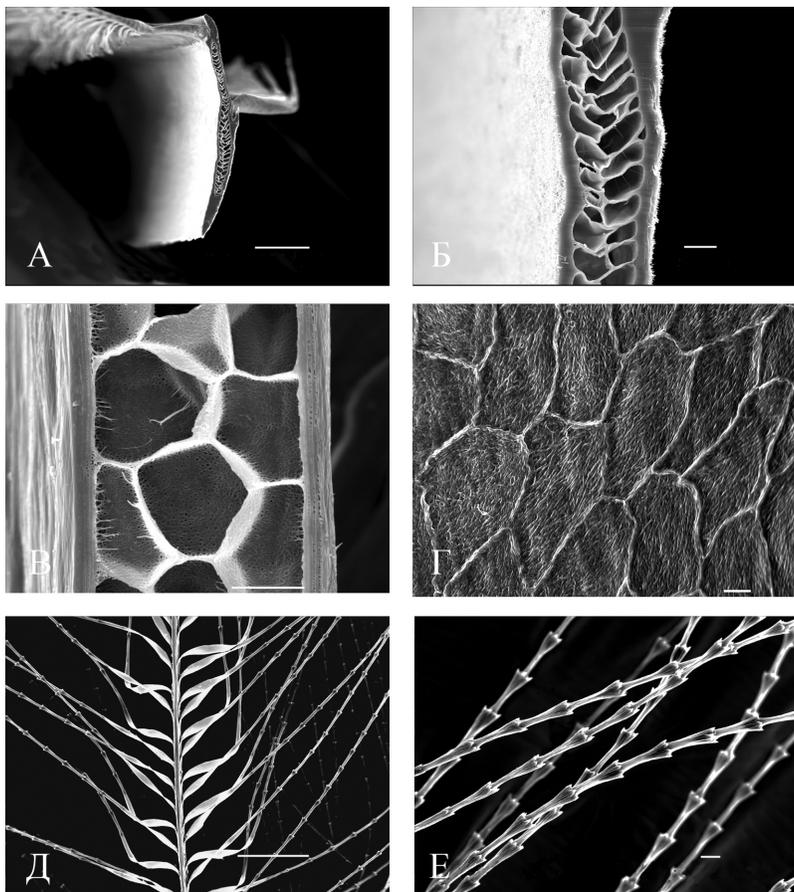


Рис. 1. Электросканограммы микроструктуры первостепенного махового пера. Контурная часть опахала, бородка первого порядка: А – поперечный срез (обыкновенный канюк *Buteo buteo*), Б – сердцевина на поперечном срезе (обыкновенный канюк), В – сердцевина на продольном срезе (серая куропатка *Perdix perdix*), Г – поверхность кутикулы (грач *Corvus frugilegus*). Пуховая часть опахала: Д – бородка первого порядка и отходящие от неё в обе стороны бородки второго порядка (галка *C. monedula*), Е – бородки второго порядка (кедровка *Nucifraga caryocatactes*). SEM (JEOL-840A). Масштаб (мкм): А, Д – 100, Б–Г, Е – 10

предыдущих работах [Бабенко, Фадеева, 2015; Фадеева, 2015, 2016, 2018; Фадеева, Бабенко, 2017а,б, 2019 и др.]

На основании проведённого нами подробного электронно-микроскопического исследования микроструктуры пера птиц впервые

выявлен ряд адаптационных эколого-морфологических особенностей архитектуры пера, обусловленных особенностями полёта [Фадеева, 2009, 2013, 2018; Fadeeva, 2019, 2021 и др.].

Выявленные нами в ходе исследования архитектуры первостепенного махового пера совообразных (Strigiformes) уникальные особенности микроструктуры опахальца бородки I являются первой детальной информацией о морфологии – на уровне SEM – сугубо специфических адаптивных характеристик их пера, разительно отличающих всех совообразных от представителей других отрядов птиц [Фадеева, 2018; Fadeeva, 2019, 2021].

Прежде всего, это особенности строения дистальных бородок II и структура апикального участка бородки I с плотно прилегающими к нему и сомкнутыми между собой удлинёнными проксимальными и дистальными бородками II. Выявленные характеристики обуславливают в целом густую ворсистую структуру дорсальной поверхности опахала (рис. 2А) и наличие комплекса своеобразных «косиц», формирующих рассученный край внутреннего опахала пера (рис. 2Б).

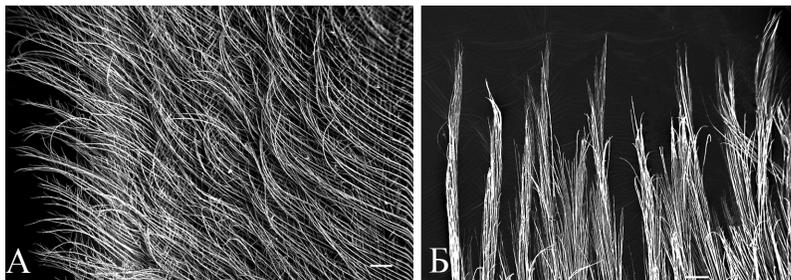


Рис. 2. Электросканограммы микроструктуры контурной части опахала первостепенного махового пера Совообразных Strigiformes: А – густая ворсистая структура дорсальной поверхности внутреннего опахала (серая неясыть *Strux aluco*), Б – рассученный край внутреннего опахала (ястребиная сова *Surnia ulula*). SEM (JEOL-840A).

Масштаб (мкм): А, Б – 100

Известно, что ворсистая структура дорсальной поверхности и рассученный край внутреннего опахала первостепенного махового пера – уникальные, сугубо специфические адаптивные особенности пера совообразных, обеспечивающие бесшумный полёт в условиях тёмного времени суток. Тем не менее, структура ворсистой поверхности опахала до сих пор подробно не рассматривалась, тонкое строение опахала в области рассученного края не изучено. Проведенное нами исследование восполняет данный пробел.

Полученные нами результаты сравнительного электронно-микроскопического исследования видоспецифических особенностей микроструктуры пера птиц не только расширяют представление о формировании адаптивных морфологических характеристик пера, но имеют и диагностическое значение, весьма актуальное и востребованное в широком спектре направлений биологической экспертизы – например, как источник розыскной и доказательной информации при проведении судебно-биологической экспертизы.

Так, нами выявлены диагностические признаки микроструктуры контурного пера соколиных, значимые в качестве фактических данных, используемых при выявлении и пресечении противоправной деятельности лиц, специализирующихся на контрабанде редких видов хищных птиц, находящихся на грани исчезновения.

Мы подробно исследовали с применением SEM особенности микроструктуры первостепенных маховых перьев трёх охраняемых видов соколиных – *Falco rusticolus*, *F. cherrug*, *F. peregrines* и одной гибридной особи (*F. rusticolus* × *F. cherrug*) [Фадеева, Бабенко, 2017а].

Данные виды являются ценными представителями ловчих соколиных птиц. Это обуславливает их браконьерский отлов с целью незаконного вывоза соколов за пределы России. Неконтролируемое массовое изъятие из природы привело к резкому сокращению численности ценных видов ловчих соколов и поставило на повестку дня вопрос о спасении их исчезающих популяций. В настоящее время все перечисленные сокола подлежат особому контролю при перемещении их через государственную границу. Наше исследование микроструктуры контурного пера редких видов соколиных в целях выявления комплекса диагностических микроструктурных характеристик, используемых в качестве фактических данных в ходе проведения судебно-биологической экспертизы, является весьма актуальным.

Кроме того, нами впервые выявлены характеристики, позволяющие эффективно определять виды птиц по перьям, собранным в природных условиях. Это, в свою очередь, существенно расширяет возможности комплексного наблюдения за состоянием популяций исследуемых видов, в частности, позволяет уточнять границы их ареалов.

Так, нами выявлены основные диагностически значимые признаки микроструктуры перьев 7 видов журавлиных (*Grus japonensis*, *G. leucogeranus*, *G. grus*, *G. canadensis*, *G. vipio*, *G. monacha*, *Anthropoides virgo*), пять из которых занесены в Красную книгу России. Одной из целей дальнейшего изучения этой группы птиц является получение дан-

ных, достаточных для оценки динамики популяции того или иного вида и выявления путей миграции посредством, в частности, накопления и изучения биологического материала (в том числе перьев), собранного в результате систематических наземных обследований потенциальных местообитаний этих птиц. Исходя из этого наше исследование микроструктуры пера журавлиных важно в контексте проводимого современного широкого исследования этой группы птиц и вносит вклад в решение проблемы спасения исчезающих популяций редких видов журавлиных [Фадеева, Бабенко, 2017a].

Исследование таксономических особенностей микроструктуры пера 8 охотничье-промысловых видов курообразных (*Lagopus lagopus*, *Lururus tetrrix*, *Tetrao urogallus*, *Tetrastes bonasia*, *Perdix perdix*, *P. daurica*, *Coturnix coturnix*, *Fhasianus colchicus*) проведено нами в рамках изучения экологии, фауны и населения представителей курообразных, отнесённых к объектам охоты, в целях рационального использования естественных запасов дичи [Бабенко, Фадеева, 2015]. В настоящее время в целях рационального использования естественных запасов дичи большое внимание уделяется изучению экологии, фауны и населения представителей курообразных, отнесённых к объектам охоты. При этом очень важна правильная таксономическая идентификация видов, особенно таких симпатрических видов как, например, глухарь и каменный глухарь, рябчик и дикуша, белая и тундряная куропатки, перепел и немой перепел.

Определение таксономической принадлежности различных видов птиц по микроструктурным признакам оперения без привлечения макроморфологических особенностей перьевого покрова является актуальной задачей в четвертичной палеонтологии и палеоэкологии при изучении таксономической структуры позднеплейстоценовых-голоценовых орнитокомплексов.

С целью выявления таксономической структуры орнитокомплексов, характерных для времени существования мамонтовой фауны в позднем плейстоцене-голоцене, нами проведена таксономическая идентификация субфоссилий, представленных фрагментами перьев птиц, ассоциированных с шерстью, а также с ископаемыми остатками жизнедеятельности крупных млекопитающих мамонтового фаунистического комплекса многолетнемерзлых отложений Северо-Востока России [Фадеева, 2015, 2016].

Проведённый нами сравнительно-микроскопический анализ субфоссильных перьев, ассоциированных с шерстью, а также с ископаемыми

остатками жизнедеятельности мамонта, собранных в позднечетвертичных аласовых отложениях Северо-Востока России, позволил предположительно идентифицировать девять видов птиц плейстоценовой биоты, фрагменты перьев которых встречаются в исследуемых пробах: *Branta nigricans*, *Anser albifrons*, *A. fabalis*, *Cygnus cygnus*, *C. bewickii*, *Anas crecca*, *A. acuta*, *Lagopus lagopus*, *L. mutus*.

В данном случае наглядно продемонстрирована диагностическая значимость основных микроструктурных характеристик контурного пера как основных маркёров таксономической идентификации ископаемых остатков птиц. Результаты исследования вносят вклад в палеоэкологическое изучение таксономической структуры орнитокомплексов, характерных для плейстоценовой биоты, и могут быть использованы при проведении палеоэкологических реконструкций среды обитания мамонтовой фауны позднплейстоценовых-голоценовых экосистем Северо-Востока России.

Проводимое нами сравнительное электронно-микроскопическое исследование микроструктуры пера позволяет не только эффективно определять виды птиц по перьям и их фрагментам, но и решать ряд дискуссионных вопросов, касающихся систематического статуса тех или иных видов. В частности, нами выявлен ряд различающихся характеристик в микроструктуре первостепенного махового пера у *Corvus cornix* и *C. corone*, а также у разных подвидов голубой сороки: *Cyanopica cyanus cyanus* и *C. c. cooki* [Фадеева, Бабенко, 2016, 2019]. Эти факты тем более интересны, что в настоящее время существуют различные мнения относительно видовой самостоятельности данных представителей врановых.

Возможности таксономической идентификации птиц, основанной на сравнительном электронно-микроскопическом анализе микроструктуры пера с применением SEM, позволяют по-новому решать проблемы селекции в птицеводстве.

Проведённое нами сравнительное микроструктурное исследование пера кур мясо-яичных, яично-мясных и декоративных пород позволило выявить комплекс наиболее информативных микроструктурных маркёров для идентификации породной принадлежности кур исследуемых пород. Результаты проведенного исследования вносят вклад в решение проблемы эффективной диагностики породной принадлежности кур и достоверности происхождения потомства, а также могут быть использованы для исследования филогенетических связей между породами кур и влияния domestikации на микроструктуру пера.

Таким образом, выявленные нами основные видоспецифические характеристики тонкого строения первостепенного махового пера птиц имеют важное таксономическое значение для диагностики пера в целях биологической экспертизы, а также могут быть использованы для исследования направленности и динамики сложной радиации морфологических и адаптационных изменений микроструктуры пера в филогенезе птиц.

Литература

Бабенко В. Г., Фадеева Е. О. 2015. Особенности тонкого строения пера курообразных (Galliformes) в контексте проблемы таксономической идентификации птиц. – Вестник МГПУ. Серия «Естественные науки», 1 (17): 40–46.

Фадеева Е. О. 2009. Адаптивные особенности микроструктуры контурного пера черного стрижа (*Arus arus*). – Вестник МГПУ. Серия Естественные науки, 2 (4): 48–55.

Фадеева Е. О. 2013. Особенности микроструктуры первостепенного махового пера орлана-белохоста (*Haliaeetus albicilla*). – Вестник МГПУ. Серия Естественные науки, 2 (12): 28–36.

Фадеева Е. О. 2015. Диагностические возможности контурного пера птиц на основе его микроструктуры. – Вестник МГПУ. Серия Естественные науки, 4 (20): 67–77.

Фадеева Е. О. 2016. Диагностическое значение микроструктуры контурного пера в контексте проблемы таксономической идентификации субфоссильных остатков. – Динамика современных экосистем в голоцене. Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием. М., Товарищество научных изданий КМК: 235–237.

Фадеева Е. О. 2018. Микроструктура первостепенного махового пера совообразных (Strigiformes). – Зоологический журнал, 97 (8): 1075–1086.

Фадеева Е. О., Бабенко В. Г. 2016. Особенности микроструктуры дефинитивного контурного пера четырех видов врановых (Corvidae). – Вестник МГПУ. Серия Естественные науки, 4 (24): 9–18

Фадеева Е. О., Бабенко В. Г. 2017а. Возможности диагностики редких видов соколов рода *Falco* по микроструктуре первостепенных маховых перьев. – Теория и практика судебной экспертизы, 12 (3): 97–104.

Фадеева Е. О., Бабенко В. Г. 2017б. Диагностическое значение микроструктуры контурного пера журавлиных (Gruidae). – Любичевские чтения – 2017. Современные проблемы экологии и эволюции. Сборник материалов Всероссийской (с междунар. участием) научной конференции. Ульяновск, УлГПУ имени И. Н. Ульянова: 438–444.

Фадеева Е. О., Бабенко В. Г. 2019. Диагностические возможности микроструктуры контурного пера врановых (Corvidae). – Экология врановых птиц в естественных и антропогенных ландшафтах Северной Евразии. Материалы XII Всероссийской конференции с международным участием. Казань, ООО «Олитех»: 162–164.

Фадеева Е. О. 2019. Microstructure of the Primary Remex of Owls (Strigiformes). – Biology Bulletin, 46 (7): 126–135.

Фадеева Е. О. 2021. Features of the architectonics of the microstructure of the primary remex of Owls (Strigiformes) due to the specifics of the flight. – Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series, 66 (2): 232–246.