

УДК 598.24/59.018

БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛА ТАКАХЕ *PORPHYRIO HOCHSTETTERI* (RALLIDAE, GRUIFORMES) ПО АБРИСУ КЛЮВА: ГРАФИЧЕСКИЙ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ

А.А. Виноградов, А.А. Серов, А.В. Зиновьев

Тверской государственный университет, Тверь

В статье приводятся результаты применения метода бесконтактного определения пола птиц по профильному абрису головы к редкому нелетающему пастушку из Новой Зеландии – такахе. Графический этап позволил выявить визуальные различия в профильных абрисах клюва самцов и самок. Достоверность найденных различий была подтверждена набором статистических приемов анализа, показавших почти 100-процентную эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: *птицы, такахе, половые различия, клюв, статистика.*

DOI: 10.26456/vtbio130

Введение. Проблема определения пола по внешним признакам у мономорфных видов птиц известна давно. Особенно остро она выступает в полевых условиях, когда исследователь довольствуется лишь визуальным контактом с объектом изучения. В этом случае, чаще всего, достоверное определение его половой принадлежности возможно только в сезон размножения по различию в поведении брачных партнеров. Во всех остальных случаях требуется поимка птиц: для снятия промеров или взятия биоматериалов на анализ. Промеры, а, в особенности, их соотношения, позволяют с той или иной степенью достоверности определить пол. По понятным причинам получить данные для применения таких методов не всегда представляется возможным; птицы могут быть редки, недоступны, их беспокойство может быть крайне нежелательным. Или в распоряжении исследователя могут быть только фотографии. Чтобы избежать указанных затруднений нами был разработан метод, состоящий из графического и статистического анализа профильных абрисов голов птиц, выполненных по их фотографиям, когда решающим фактором половой сегрегации выступает различие в абрисе клюва (Виноградов, 2014). Указанный метод показал высокую (нередко, 100-процентную) эффективность для всех проверенных нами мономорфных видов птиц, принадлежащих отдаленным друг от друга

систематическим группам (Vinogradov, 2012; Виноградов, 2015а, б, 2018а, б; Виноградов, Жигир, 2018; Виноградов, Серов, 2019).

Мономорфный нелетающий представитель пастушковых (Rallidae) такахе (*Porphyrio hochstetteri*) находится на грани исчезновения и требует максимально аккуратного отношения со стороны человека в природе. Вторично открытый в 1948 году, такахе был взят под особую охрану на всех территориях Новой Зеландии. Все известные способы определения пола пастушка контактны (Williams, Miers, 1958; Williams, 1960; Eason, 1992; Marchant, Higgins, 1993; Crouchley, 1994; Eason et al., 2001). В связи с этим мы задались целью адаптировать наш бесконтактный метод к такахе, обратив особое внимание на эффективность и наглядность статистических приемов анализа материала.

Материал и методика. Материал для исследования происходил из нескольких источников: (1) разнесенные по полу (42 самца и 22 самки) фотографии такахе из питомника на горе имени Брюса в 130 км от Веллингтона; (2) фотографии тушек и чучел такахе (10 самцов и 7 самок) из коллекций двух музеев в Новой Зеландии: Музея Кентерберри (Canterbury Museum, Christchurch) и Музея Те Папа Тонгарева (Te Papa Tongarewa Museum, Wellington). Таким образом, базой для нашей работы послужили 52 самца и 29 самок такахе.



Рис. 1. Вычерченный растровый абрис головы и клюва самца такахе поверх фотографии – базовый образец для последующего совмещения внутри группы самцов (фото ЗАВ) (публикуется с разрешения музея Кентерберри, Крайстчерч)

Следуя описанной ранее методике (Виноградов, 2014), нами были выполнены растровые абрисы голов такахе обоих полов (рис. 1). Абрисы исполнялись в отдельных прозрачных слоях и затем, наложенные друг на друга, максимально совмещались с сохранением пропорций и обязательным совмещением разреза клюва.

В этих сформированных пакетах абрисов голов и клювов самцов и самок нами по методу наименьших квадратов прорисовывался усреднённый абрис профиля головы соответствующего пола (рис. 2). Полученные таким образом усреднённые абрисы профилей голов самца и самки затем максимально возможно точно совмещались друг с другом при сохранении пропорций (рис. 3).

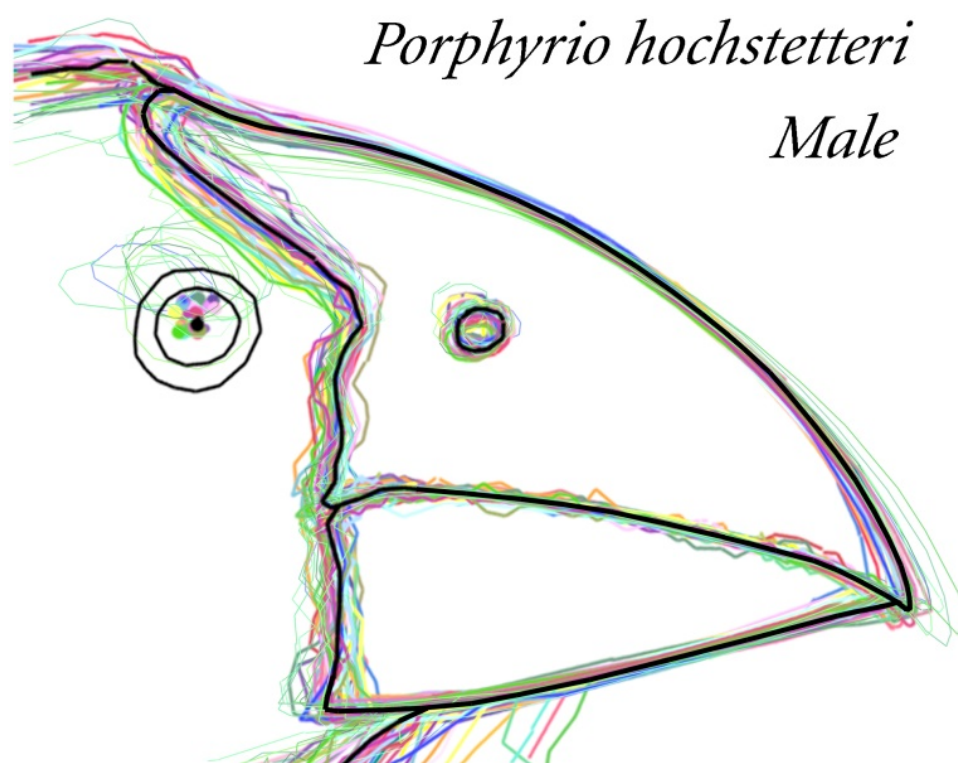


Рис. 2. Усреднённый абрис профиля головы самца такахе (жирная черная линия) поверх пакета абрисов (цветные линии) профилей голов всех исследованных самцов

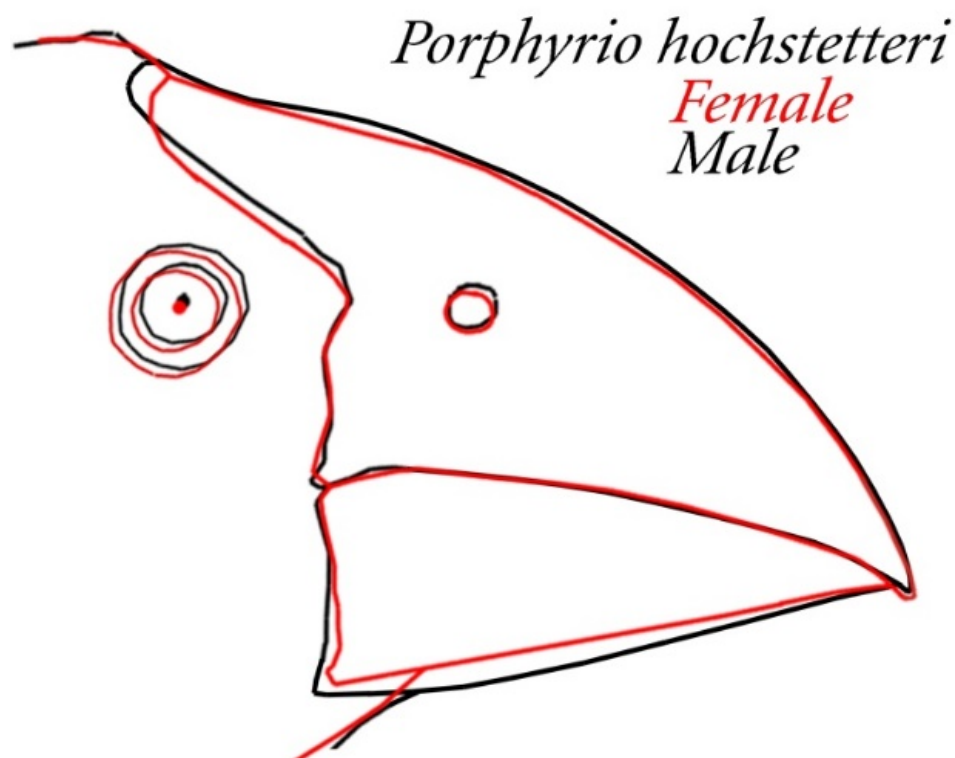


Рис. 3. Усредненные абрисы профилей голов самца (черный контур) и самки (красный контур) такахе, наложенные друг на друга для визуализации половых различий

Все абрисы для их последующего измерения по установленным промерам ориентировались так, чтобы линия, проходящая по границе оперения в основании клюва, приближалась к вертикали (рис. 4).

Все измерения длин проекций реперных точек на оси X или Y осуществлялись в условных единицах (см) в графическом редакторе Adobe Photoshop CS2 с помощью функции «Информация». При этом одна из меток данного измерения принималась за начало координат. Для измерения параметров e , f , l , k мы прибегали к вращению абрисов без трансформации их размера и пропорций (рис. 4).

Математической оценке подверглись 16 параметров (a , b , c , d , e , f , k , l , m , n , o и p), в том числе, 4 суммирующих размерных параметра ($ef=e+f$, $j=b+d$, $kl=k+l$ и $mn=m+n$) и 60 отношений размерных переменных друг к другу, не зависящие от размеров изображения.

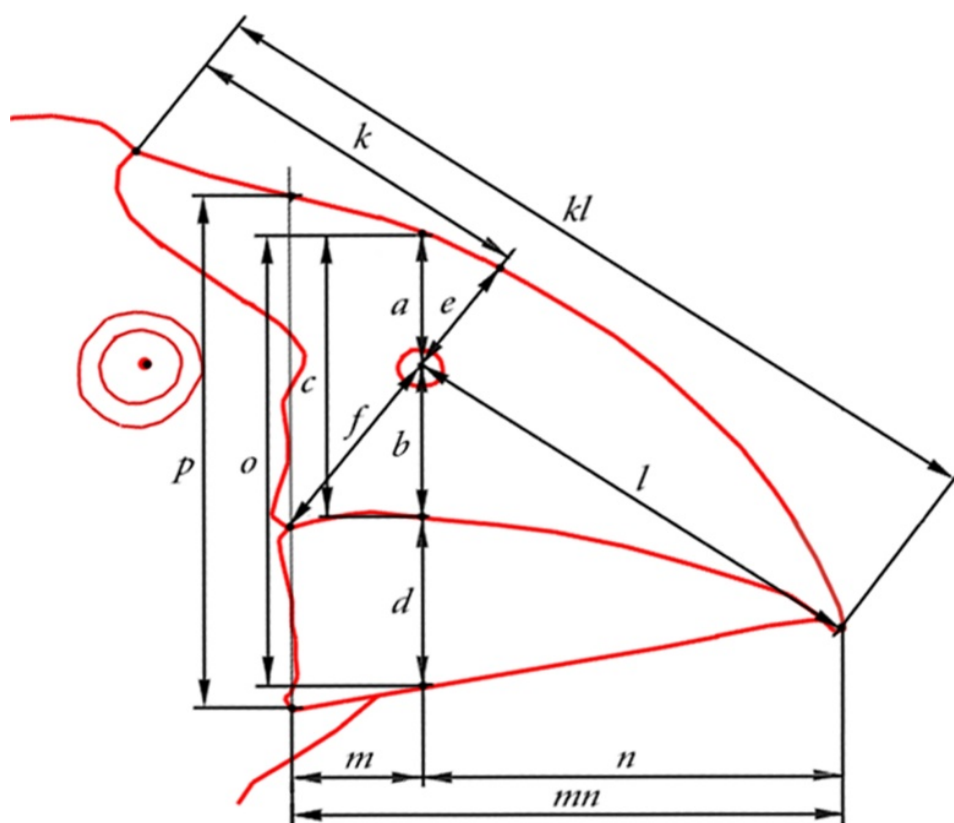


Рис. 4. Промеры, использованные нами для математического анализа половых различий формы клюва такахе

Оценка важности показателей для выявления половых различий формы клюва *Porphyrio hochstetteri* определялась по методу Random Forest с модификацией «conditional permutation importance» в пакете *R party* (Altmann et al, 2010), а также другими методами.

Статистическую вероятность гендерных различий по размерным параметрам и индексам рассчитывали по значениям U-test Манна-Уитни. Применялись также методы сравнения двух независимых многомерных выборок: дискриминантный анализ с использованием регрессии на основе частных наименьших квадратов (PLS-DA) (Herve, 2016; Эрве, 2018), MANOVA, робастный MANOVA (Кабаков, 2014), а так же метод ANOSIM, реализованный в пакете *R vegan*. Точки отсечения по наиболее важным переменным определялись в пакете *R Optimal Cutpoints*. Ряд вычислений был выполнен в специализированном для анализа биологических морфометрических данных пакете *R Morpho*.

Результаты. Уже этап визуализации половых различий при формировании пакетов абрисов профилей голов такахе

противоположных полов показал, что абрисы самцов и самок птиц этого вида различны (рис. 3). Лишь один экземпляр №24400 (Музей Те Рапа Tongarewa Museum, Wellington), самка по этикетке, обнаружил все признаки самца в профильном абрисе головы. Он же оказался среди самцов в графиках зависимости размерных параметров и индексов (рис. 5, 6). Прогноз половой принадлежности экземпляра №24400, проведённый нами далее по 12 наиболее популярным методам бинарной классификации (Шитиков, Мастицкий, 2017), также, однозначно, свидетельствовал о принадлежности этой особи к самцам. Очевидно, неверно определенный по полу, этот экземпляр был исключен нами из дальнейших статистических выкладок.

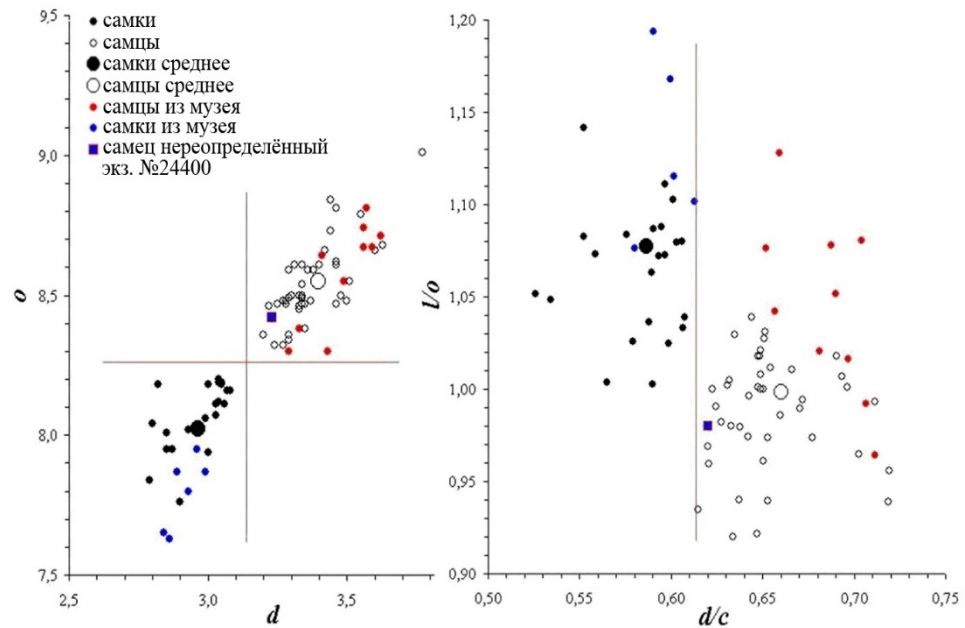


Рис. 5. Положение точек координат самцов ($n = 53$) и самок ($n = 28$) *Porphyrion hochstetteri* по значениям пар промеров d , o и отношений d/c , l/o .
Линии полностью отграничивают распределения точек координат значений противоположных полов

По размерным параметрам d и o , а также индексам d/c , c/o , d/o и d/l зон перекрывания соответствующих им значений для самцов и самок нет; половая принадлежность также по этим переменным может быть определена достоверно (табл. 1, рис. 5). В таблице 1 представлены сводные результаты определения оптимальных точек отсечения по переменным, которые обнаружили точность разделения противоположных полов не менее 80%.

Таблица 1

Точки отсечения с качеством классификации по переменным «X» и «Y»

Параметр		Точка отсечения	Знак	Точность разделения	AUC
<i>x3</i>	<i>j</i>	5,92	>=	0,99	0,99
<i>x5</i>	<i>d</i>	3,10	>=	1	1
<i>x15</i>	<i>o</i>	8,30	>=	1	1
<i>x16</i>	<i>p</i>	9,30	>=	0,88	0,94
<i>y0</i>	<i>d/l</i>	0,37	>=	1	1
<i>y8</i>	<i>a/d</i>	0,77	<=	0,9	0,93
<i>y16</i>	<i>b/d</i>	0,85	<=	0,86	0,93
<i>y20</i>	<i>c/o</i>	0,62	<=	1	1
<i>y21</i>	<i>c/p</i>	0,56	<=	0,85	0,86
<i>y22</i>	<i>d/c</i>	0,44	>=	1	1
<i>y23</i>	<i>d/n</i>	0,44	>=	0,98	0,99
<i>y24</i>	<i>d/p</i>	0,35	>=	0,85	0,93
<i>y25</i>	<i>d/o</i>	0,38	>=	1	1
<i>y26</i>	<i>d/mn</i>	0,33	>=	0,95	0,97
<i>y29</i>	<i>e/d</i>	0,68	<=	0,81	0,91

Примечание. Знаки >= или <= задают направление для отнесения птицы к категории male

Половую принадлежность такахе можно достоверно определить по значениям дискриминантных функций прямых, полностью разделяющих облака точек координат самцов и самок на графиках зависимости некоторых индексных параметров (рис. 6):

$y_{b/d} - 2,3214x_{b/o} = 0,1012$, при значениях функции >0,1012 – самки, <0,1012 – самцы;

$y_{d/n} - 0,3769x_{c/l} = 0,21$, при значениях функции >0,21 – самцы, <0,21 – самки.

Статистический анализ половых различий формы клюва с использованием U-test Манна-Уитни показывает, что для 9 из 16 определённых нами размерным (рис. 4) и 40 из 60 индексным параметрам есть статистические различия. Это подтверждает тезис о наличии полового диморфизма в абрисах голов такахе, выявленного нами при совмещении усреднённых абрисов профилей голов противоположных полов (рис. 3).

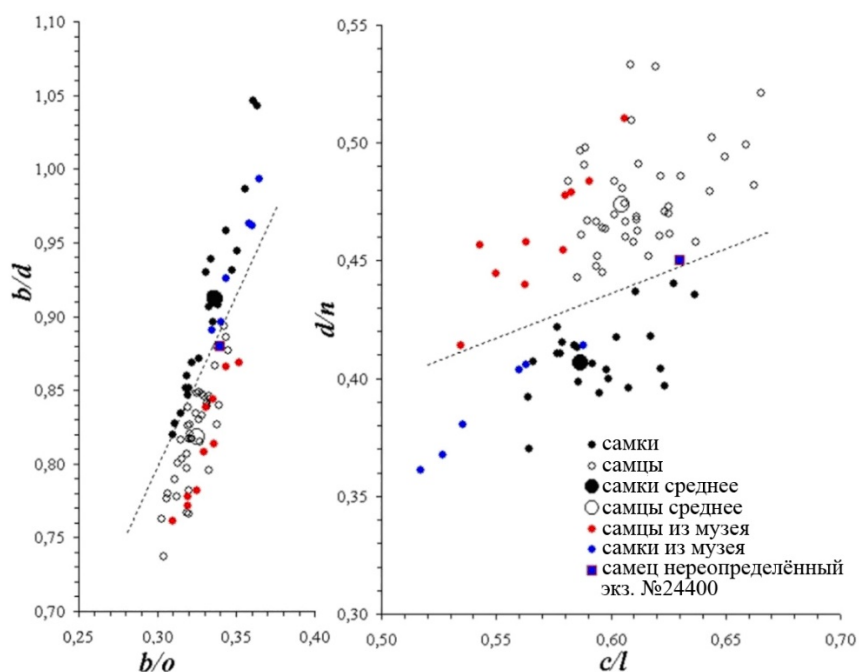


Рис. 6. Положение точек координат значений отношений b/o , b/d и c/l , d/n самцов ($n = 53$) и самок ($n = 28$) *Porphyrio hochstetteri*. Пунктирные линии, описываемые дискриминантными функциями, полностью разделяют «облака» точек противоположных полов

Оценка важности показателей по определению пола также методом «Random Forest» выявила наиболее значимые переменные группы «X» – размерные параметры $j(x3)$, $d(x5)$, $o(x15)$ и переменные группы «Y» – индексы $d/l(y0)$, $c/o(y20)$, $d/c(y22)$, $d/n(y23)$, $d/o(y25)$, $d/mn(y26)$ (рис. 7).

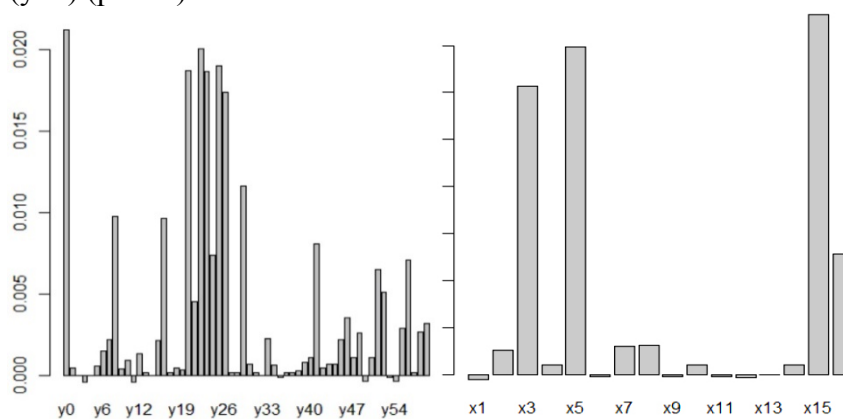


Рис. 7. Важность переменных для выявления половых различий формы клюва *Porphyrio hochstetteri* по методу Random Forest с модификацией «conditional permutation importance» в пакете *R party*.

Повели себя чувствительно к половым различиям в абрисах п рофилей голов такахе и несколько других примененных нами методов статистического анализа и визуализации:

– Метод MANOVA показал значимые различия многомерных данных для противоположных полов:

по важным переменным группы «X»: статистика Pillai = 0.81464, p-value < 2.2e-16;

по важным переменным группы «Y»: статистика Pillai = 0.69537, p-value < 2.2e-16.

– Робастный метод MANOVA Robust One-way MANOVA (Bartlett Chi2) (Шитиков, Мастицкий, 2017) в пакете *R rrcov* также показал значимые результаты:

по важным переменным группы «X»: Wilks' Lambda = 0.19049, Chi2-Value = 80.1570, p-value < 2.2e-16;

по важным переменным группы «Y»: Wilks' Lambda = 0.19309, Chi2-Value = 88.0320, p-value < 2.2e-16.

– Перестановочный тест, с применением функции *permudist* пакета *Morpho* также показал значимые различия этих многомерных данных между полами:

по всем 16 переменным группы «X»: dist = 1.014321, p-value = 0.001;

по всем 60 переменным группы «Y»: dist = 0.2169405, p-value = 0.0001.

– Метод ANOSIM, реализованный в пакете *R vegan*, показал статистически значимое преобладание полового диморфизма над индивидуальной изменчивостью в группах самцов и самок (p-value = 0.001) по всем переменным «X» и «Y» соответственно (рис. 8).

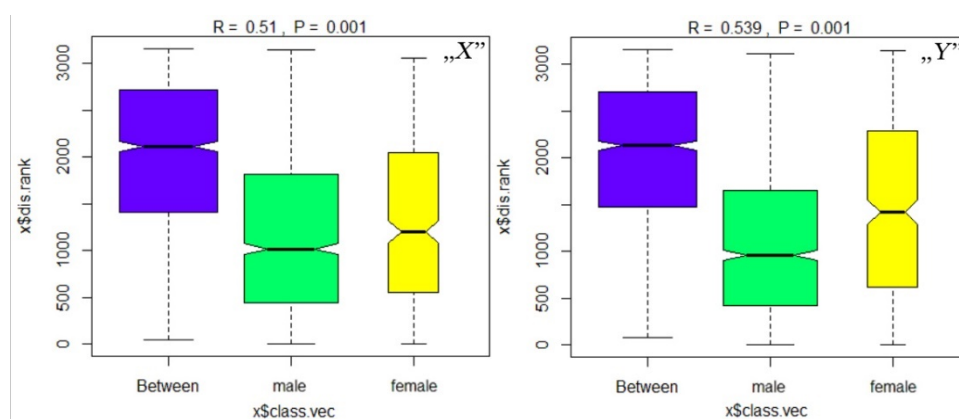


Рис. 8. Результаты применения метода ANOSIM по всем 16 переменным «X» и 60 переменным «Y» соответственно

На ординационных диаграммах многомерных данных дискриминантного анализа с использованием регрессии на основе частных наименьших квадратов (PLS-DA) точки координат значений переменных групп «X» и «Y» для самцов и самок не имеют зон перекрывания, что подтверждает наличие полового диморфизма формы клюва такахе (рис. 9).

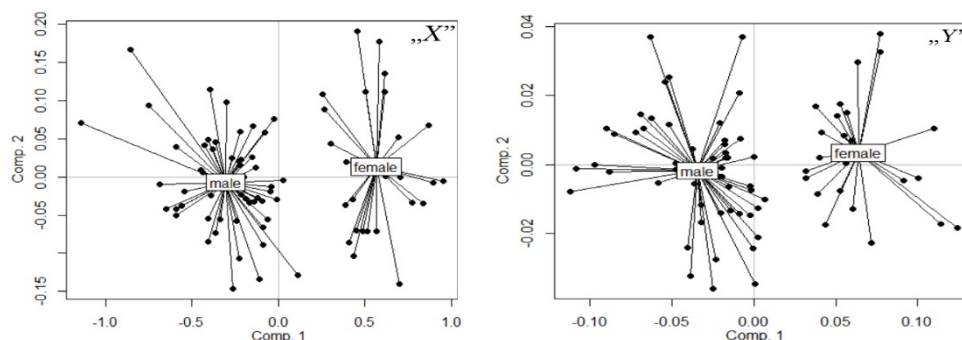


Рис. 9. Визуализация результатов PLS-DA такахе: “X” – по размерным переменным j, d, o ; “Y” – по индексам $c/o, d/c, d/l$

Методы SHAP оценки важности показателей классификации, реализованные в библиотеке «shap» среды Python 3, позволяют не только оценить важность показателей классификации для данного метода, но и визуализировать выполнение алгоритма отнесения данного экземпляра к наиболее вероятному классу (Edward, 2018). Прогноз половой принадлежности методами SHAP для коллекционных экземпляров из музея Те Папа Тонгарева *ad. OR.020999 (A)*, *ad. 15670 (B)* (рис. 10) оказался успешным.



Рис. 10. Фото самца *ad. OR.020999 (A)* и самки *ad. 15670 (B)* (публикуется с разрешения Музея Те Папа Тонгарева, Веллингтон) (фото ЗАВ)

Пол, заявленный на этикетках – самец и самка соответственно – был подтвержден (рис. 11).

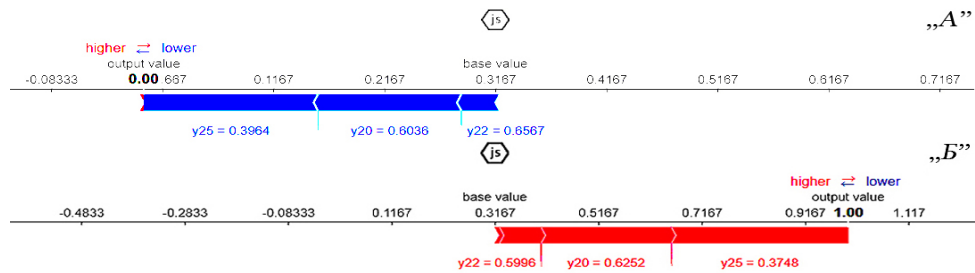


Рис. 11. Визуализация результатов определения пола в среде Jupyter Notebook (длина полосок пропорциональна важности переменных):
“А” – *ad. OR.020999*. Вероятность принадлежности к классу *male* – 100%; “Б” – *ad. № 15670*. Вероятность принадлежности к классу *female* – 100%

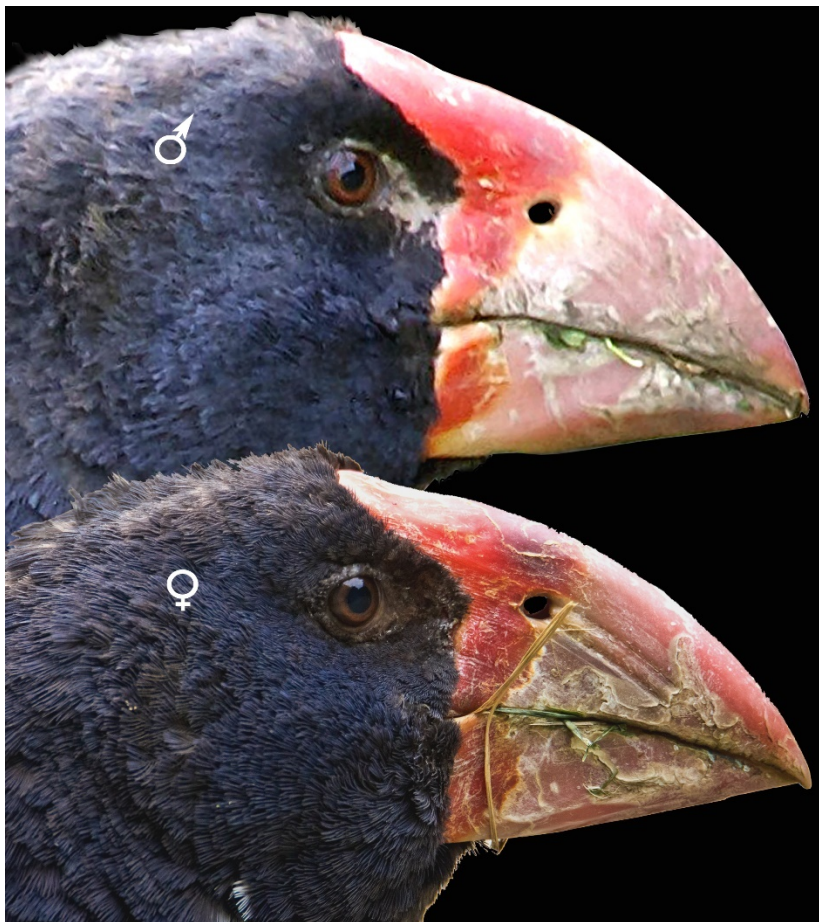


Рис. 12. Коллаж-сравнение профилей головы самца (фото Steve Attwood) и самки (фото Pete Naik)

Графические и статистические методы анализа единодушны в одном – все они указывают на основное отличие в абрисах профилей головы противоположных полов такахе – различную высоту подклювья (рис. 3, 12). Этот признак является доминирующим в описании «самцового» и «самочьего» типов профильного абриса клювов такахе.

Тип клюва самца. Конёк надклювья более выпуклый, особенно в основной трети клюва. «Бляшка» более выраженная и дальше простирающаяся на лоб; её вершина может заходить за проекцию заднего края глаза. Подклювье заметно более высокое, чем у самки, часто образует в подбородочной области выраженную выпуклую дугу (рис. 3, 12).

Тип клюва самки. Конёк надклювья плавно и равномерно выгнут по всей его длине. «Бляшка» менее выражена, чем у самца и никогда не заходит за проекцию заднего края глаза. Подклювье не образует в подбородочной области выраженную выпуклую дугу; граница его нижнего края почти прямая, слегка выпуклая или даже несколько вогнута в предвершинной трети (рис. 3, 12).

Заключение. Метод бесконтактного определения пола по профильному абрису головы и клюва, примененный к редкому виду – нелетающему новозеландского пастушку такахе, показал свою эффективность. Высота подклювья в совокупности с рядом менее выраженных признаков в строении клюва самцов и самок позволяют безошибочно определить пол птицы, как визуальным, так и с применением методов статистического анализа.

Мы благодарны Полу Скофилду, старшему куратору Музея естественной истории Кентербери (Крайстчерч, Новая Зеландия), Томасу Шульцу и Алану Теннисону, менеджерам коллекции Музея Те Папа Тонгарева (Веллингтон, Новая Зеландия), за предоставленные для исследования коллекционные экземпляры такахе.

Список литературы

- Виноградов А.А. 2015. Определение пола гагарки (*Alca torda* L.) по абрису клюва / Тезисы IX Международной конференции хранителей орнитологических коллекций. Орнитологические коллекции: из прошлого в будущее. Государственный Дарвиновский музей. М. С. 34-35.
- Виноградов А.А. 2015. Опыт определения пола люриков (*Alle alle* L.: ALCIDAE) по абрису клюва // Вестник Тверского государственного университета. Серия Биология и экология. Т. 3. С. 84-96.
- Виноградов А.А. 2015. Половые различия в строении клюва птиц на примере белого аиста (*Ciconia ciconia* L.) / Материалы V совещания «Редкие виды

- птиц нечерноземного центра России». М.: Московский государственный педагогический университет. С. 163-170.
- Виноградов А.А. 2017. Визуализация гендерных различий и определение пола белолобого гуся *Anser albifrons* по профильным фотографиям / Вклад заповедной системы в сохранение биоразнообразия и устойчивое развитие: Материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием), посвященной 85-летию организации Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника и 100-летию заповедной системы России. Тверь: Твер. гос. ун-т. С. 93-99.
- Виноградов А.А. 2018. Попытка объяснения половых различий формы клюва некоторых мономорфных видов птиц с позиций функциональной морфологии / Ред. Гаврилов и др. Орнитология: история, традиции, проблемы и перспективы. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 120-летию со дня рождения профессора Г.П. Дементьева. М.: Т-во научных изданий КМК. С. 83-90.
- Виноградов А.А. 2014. Метод выявления половых различий в строении клюва у мономорфных видов птиц: на примере белокрылой крачки (*Chlidonias leucopterus*: Sterninae) // Зоологический журнал. Т. 93. № 10. С. 1236–1249.
- Виноградов А.А., Жигир Д.Р. 2018. Предварительное сообщение о половом диморфизме формы клюва серой вороны / Под ред. Поповкиной А.Б., Харитоновой С.П. Тезисы докладов 1-го Всероссийского орнитологического конгресса, 29 января – 4 февраля 2018 г., г. Тверь, Россия. Тверской государственный университет. Тверской филиал Московского гуманитарно-экономического университета. Тверь. С. 56-57.
- Кабаков Р.И. 2014. R в действии: Анализ и визуализация данных в программе R. /пер. с англ. П. А. Волковой М.: ДМК Пресс. 580 с.
- Павлинов И. Я., Микешина Н.Г. 2002. Принципы и методы геометрической морфометрии // Журнал общей биологии. Т. 63, № 6. С. 473-493.
- Шитиков В.К., Мاستицкий С.Э. 2017. Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. 351 с. – Эл. книга, адрес доступа: <https://github.com/ranalytics/data-mining>.
- Эрве М. 2018. Путеводитель по применению статистических методов с использованием R. Планирование исследований и анализ результатов в биологии с помощью программного обеспечения R. Перевод с фр. В.К. Шитикова. http://www.ievbras.ru/ecostat/Kiril/R/Erve/Erve_rus.pdf.
- Altmann A. Toloşi L. Sander O. Lengauer T. 2010. Permutation importance: a corrected feature importance measure. *Bioinformatics*, V. 26, Is. 10. P. 1340–1347.
- Crouchley D. 1994. Takahe recovery plan (*Porphyrio [Notornis] mantelli*) // Threatened species recovery plan series. Threatened Species Unit Department of Conservation P.O. Box 10-420. Wellington. New Zealand. Nelson/Marlborough Conservancy for the Threatened Species Unit. No. 12. P. 42.

- Eason D.* 1992. Takahe, *Notornis mantelli*: artificial incubation of eggs and methods to determine sex. Unpublished thesis: University of Otago.
- Eason D., Millar C.D., Cree A., Halverson J., Lambert D.M.* 2001. A comparison of five methods for assignment of sex in the takahe (Aves: *Porphyrio mantelli*) // *J. Zool.*, Lond. The Zoological Society of London Printed in the United Kingdom. V. 253. P. 281-292.
- Edward M.* 2018. Interpreting your deep learning model by SHAP. <https://towardsdatascience.com/interpreting-your-deep-learning-model-by-shap-e69be2b47893>.
- Herve M.* 2016. Aide-mémoire de statistique appliquée à la biologie. Construire son étude et analyser les résultats à l'aide du logiciel R. <https://cran.r-project.org/doc/contrib/Herve-Aide-memoire-statistique.pdf>.
- Marchant S., Higgins P.J.* 1993. Handbook of Australian: New Zealand & Antarctic Birds // Raptors to lapwings. Melbourne, Oxford University Press. V. 2. P. 486-488.
- Takahē population 100 breeding pairs strong // Department of Conservation of New Zealand. 2018. <https://www.doc.govt.nz/news/media-releases/2017/takahe-population-100-breeding-pairs-strong/>.
- Vinogradov A.* 2012. Bill shape helps in non-invasive determination of sex in monomorphic White-winged Tern (*Chlidonias leucopterus*, Sterninae, Aves) // *Zoology in Changing World, how animals respond to human activities, Book of Abstracts, The 21-st International Congress of Zoology*. Haifa University. P. 119.
- Vinogradov A.A.* 2018. Sex determination in great auks (*Alca impennis* l.) based on beak outlines (– an attempt) // *ANG Fokus*, V. 2, P. 25-43.
- Williams G.R.* 1960. The takahe (*Notornis mantelli*): a general survey // *Trans Roy Soc NZ* V.88/ P. 235-258.
- Williams G.R., Miers K.H.* 1958. A five-year banding study of the takahe (*Notornis mantelli* Owen) // *Notornis*. V. 8. P. 1-12.

NON-CONTACT METHOD OF SEXING TAKAHĒ (*PORPHYRIO HOCHSTETTERI* L.) BY BEAK OUTLINES: GRAPHIC AND STATISTICAL APPROACHES

A.A. Vinogradov, A.A. Serov, A.V. Zinoviev
Tver State University, Tver

Here we present the results of applying the method of non-contact sexing of birds by the profile beak outlines to a rare flightless rallid from New Zealand – takahē. The graphic stage of the method made it possible to identify visual differences in the profile outlines of the beak of males and females. The reliability of the differences found was confirmed by a set of statistical analysis techniques that showed almost 100 percent effectiveness of the proposed method.

Keywords: *birds, takahē, gender differences, beak, statistics*

Об авторах:

ВИНОГРАДОВ Андрей Анатольевич – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры зоологии и физиологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: Vinogradov.AA15@tversu.ru.

СЕРОВ Анатолий Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического и естественнонаучного образования, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: Serov.AA@tversu.ru.

ЗИНОВЬЕВ Андрей Валерьевич – доктор биологических наук, заведующий кафедрой зоологии и физиологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: Zinovev.AV@tversu.ru.

Виноградов А.А. Бесконтактный метод определения пола такахе *Porphyrion hochstetteri* (Rallidae, Gruiformes) / А.А. Виноградов, А.А. Серов, А.В. Зиновьев // Вестн. ТвГУ. Сер.: Биология и экология. 2020. № 1(57). С. 53-67.