



УДК 59.08+591.465.11

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПИСАНИЮ ОБЪЕМА И ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ ПТИЧЬИХ ЯИЦ

И.С. Митяй

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

Ключевые слова: яйцо, объем, площадь поверхности, относительный пространственный индекс, объемный индекс.

Modern approach to description of volume and surface area of bird eggs. - I.S.Mitiay. National University of Bioresources and Nature Use of Ukraine
The computer-based method of egg volume and surface area estimation is described. The analysis is performed by digital photographs of eggs with the help of piecewise continuous (smooth) curve equations. The following indices are suggested: the relative volumetric $I_{rV} = V_{ov}/V_{sph}$, or $I_{rV} = 6k/\pi(D/L)^2$; the relative surface $I_{rS} = S_{ov}/S_{sph}$, or $I_{rS} = (k_s*k_v*L*D^2)/(4\pi(L/2)^2) = (k_s*k_v*L)/\pi$, where I_{rV} and I_{rS} are indices, V_{ov} , S_{ov} , V_{sph} , S_{sph} - volumes and surface areas of real eggs and spheres of diameters equal to egg length; k_s , k_v are empirical coefficients.*

Key words: egg, surface area, relative spatial index, volumetric index.

Сучасні підходи до опису об'єму та площі поверхні пташиних яєць. - І.С.Мітяй. Національний університет біоресурсів та природокористування України.

Наведено комп'ютерний спосіб визначення об'єму та площі поверхні яєць за їх цифровими фотографіями на підставі рівнянь разгментно-неперервної (гладенької) кривої.

Запропоновані індекси: відносний об'ємний – $I_{rV} = V_{ov}/V_{sph}$, або $I_{rV} = 6k/\pi(D/L)^2$; відносний поверхневий $I_{rS} = S_{ov}/S_{sph}$, або $I_{rS} = (k_s*k_v*L*D^2)/(4\pi(L/2)^2) = (k_s*k_v*L)/\pi$, де I_{rV} , I_{rS} – індекси, V_{ov} , S_{ov} , V_{sph} , S_{sph} – об'єми та площі реальних яєць і сфер з діаметром рівним довжині яйця, k_s , k_v – емпіричні коефіцієнти.*

Ключові слова: яйце, об'єм, площа поверхні, відносний просторовий індекс, об'ємний індекс.

Объем и площадь поверхности являются наиболее важными характеристиками птичьих яиц. Первая характеристика лимитирует количество веществ необходимых для нормального протекания эмбриогенеза, а вторая связана с процессами теплообмена, газообмена и транспирации. Оба параметра тесно связаны с формой яйца. Специфика последней и трудности снятия промеров непосредственно с яйца породили массу

проблем методического характера. Разрозненность и несбалансированность методик, существующая в литературе, привела к тому, что названия яиц, количественные характеристики и классификация форм, а также определение объема и площади поверхности ведутся с разных позиций. Безусловно, такая ситуация практически нивелирует возможность сравнения и обобщения материалов различных авторов. Выход из создавшегося положения возможен только в случае, когда анализ всех параметров яйца будет проводиться с единых позиций. Это стало возможным с появлением цифровой фотографии и компьютерного анализа. В связи с этим задачей настоящего исследования была разработка комплексного подхода к исследованию яиц, включающего в себя количественное описание форм яиц, их классификацию и определение объема и площади поверхности путем компьютерного анализа фотографии яйца.

Материал и методы исследований

Разработка наиболее удобной методики исследования объема и площади поверхности осуществлялась на основании компьютерного анализа цифровых фотографий яиц. Перед фотографированием выполняли замеры длины и диаметра штангенциркулем с точностью до 0.1 мм. Дальнейший анализ можно проводить двумя способами. В первом случае необходимые дополнительные измерения осуществляются по фотографиям штангенциркулем или компьютерным способом с помощью существующих программ CorelDraw, Adobe Photoshop, Microsoft Office Picture Manager, с последующим проведением расчетов в специально написанных программах в Microsoft Office Excel. Во втором - фотография вводится в компьютер и вся последующая процедура, представляющая собой сканирование снимков, осуществление замеров, вычисление необходимых параметров и передачу результатов в специально преобразованную систему управления базами данных Microsoft Office Access 2003, проходит в автоматическом режиме. В обоих случаях измерение яиц в кладке можно упразднить, если фотографирование проводить в масштабе.

Фотоснимки выполнялись фотоаппаратом Pentax K10D, укрепленным на специально оборудованном штативе, обеспечивающем равномерное освещение и размещение яиц таким образом, чтобы их продольная ось была перпендикулярной оптической оси объектива фотоаппарата. Программы написаны с использованием уравнений гладкой кусочно-непрерывной функции. Это наиболее удобный метод аппроксимации, т.к. он базируется на сочленении нескольких дуг, которые, замыкаясь, образуют симметрический или асимметрический овал (овоид). Важным обстоятельством при этом является то, что дуги овала аналогичны дугам окружностей, вписанных в соответствующие зоны яйца (рис. 1).

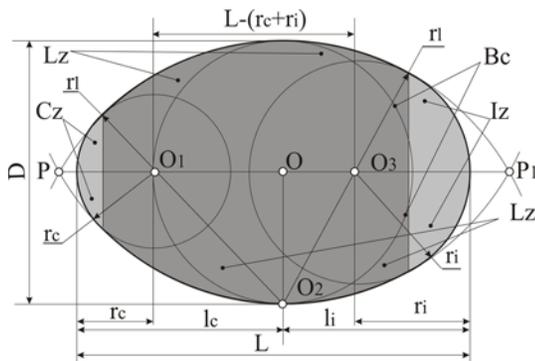


Рис. 1. Обобщенная схема овоида и варианты снятия параметров.

Примечания: O-O₃ – центры сопрягаемых дуг; P, P₁ – точки пересечения латеральных дуг; B_c – базовая окружность; Iz, Lz, Cz – инфундибулярная, латеральная и клоакальная зоны овоида и их радиусы: r₁, r₂, r₃; D-диаметр, L – длина, li, lc – инфундибулярная и клоакальная части длины.

Fig. 1. General scheme of an ovoid and options of parameters reading.

Notes: O-O₃ – centers of conjugated arcs; P, P₁ – points of intersection of lateral arcs; B_c – base circle; I_z, L_z, C_z – infundibular, lateral and cloacal zones of an ovoid and their radii: r₁, r₂, r₃; D-diameter, L – length, l_i, l_c – infundibular and cloacal portions of length.

Объем исследованного материала составляет 16494 яиц 800 видов, относящихся к 20 отрядам птиц Северо-Западной Палеарктики и прилегающих территорий.

Результаты и обсуждение

Всю совокупность методик, связанных с вычислением объема, условно можно разделить на три группы. Первая основана на использовании линейных измерений (Preston, 1953; Романов, Романова, 1959; Hoyt, 1976, 1979; Narushin, 2005). Вторая – базируется на измерении количества жидкости, вытесненной погруженным в нее яйцом (Hoyt, 1976; Тарасов, 1977; Loftin, Bowman, 1978; Комаров, 1993), и предлагаемых на этой основе видоспецифичных расчетных индексов (Черничко, Чичкин, 1999). Указанные методики не закрепились в орнитологии в силу их определенных сложностей при сборе первичного материала и осуществлении вычислений. Третья группа сформировалась недавно, благодаря развитию цифровых технологий. Ее сущность сводится к компьютерному анализу цифровых фотографий яиц. Судя по имеющимся в литературе сведениям, это направление возникло в начале прошлого века. Р. Шуфельдт (Shufeldt, 1900) и А. Маллок (Mallock, 1925) первыми применили фотографирование для описания яиц. В 60-е гг. прошлого столетия Ф.Престон (Preston, 1953, 1969) предложил использовать компьютер для обработки данных. А с 70-х гг. фотографирование и компьютерная обработка данных постепенно становится главным методом в ооморфологических исследованиях (Paganelli, Olszowska, 1974; Мянд, 1988; Monus, Barta, 2005; Bridge et al., 2007; Митяй, 2003, 2008).

Несмотря на значительное количество работ, большинство проблем оологии остаются нерешенными. Главная из них – односторонность исследований. Например, исследования объема и площади поверхности ведутся без какой-либо связи с типами и количественными характеристиками форм яиц. Последнее обстоятельство делает невозможным комплексное изучение этих взаимосвязанных между собой пространственных структур яйца, что уменьшает информативность метода. Все проблемы снимаются, если в качестве геометрического эталона реальных яиц использовать асимметрический овал (овоид). Последний можно рассматривать как комбинацию окружностей, плавно переходящих друг в друга. Единственной проблемой в данном случае является выбор количества дуг. Как показали наши исследования, симметрические яйца (около 2%) можно описать с помощью радиусов двух дуг (на самом деле их три, но две одинаковые) (рис. 2, а).

Для характеристики подавляющего большинства асимметрических яиц (около 98 %) необходимо три радиуса. Точное описание оставшегося количества возможно на основании четырех радиусов. Это связано с тем, что у некоторых форм кривизна латеральной поверхности может быть воспроизведена вращением двух дуг. Исходя из этого, форму произвольного яйца можно описать, задав аналитический вид некоторой кривой $y(x)$ в декартовой системе координат с последующим наложением дополнительных условий (например, условий гладкости, непрерывности и т.д.). В своей сущности она является гладкой кусочно-непрерывной кривой. Вращением ее вокруг оси абсцисс образуется поверхность, которая однозначно отвечает форме поверхности яйца.

Для вычисления площади поверхности используется интеграл:

$$S = 2\pi \int_{x_1}^{x_2} y(x) \sqrt{1 + y'(x)^2} dx$$

а для объема-интеграл: $V = \int_{x_1}^{x_2} \pi y^2(x) dx$.

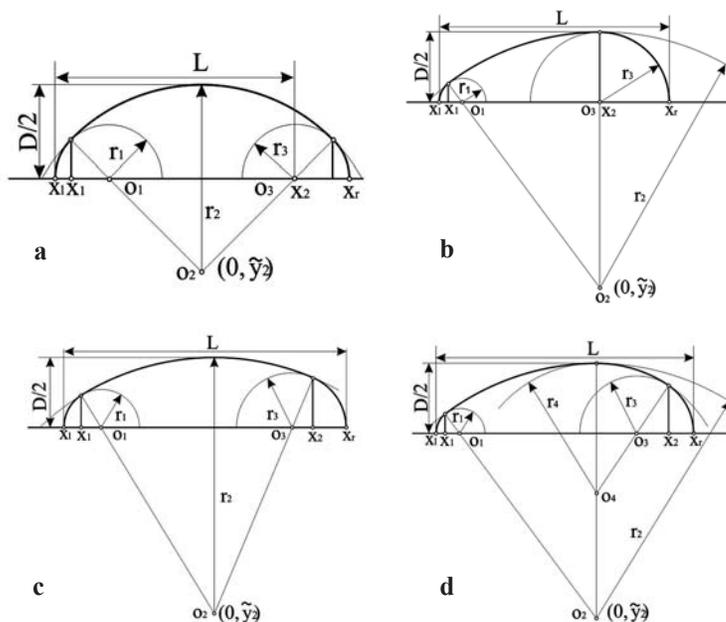


Рис. 2. Варианты оvoidных контуров при сопряжении трех (a-c) и четырех (d) дуг.
Fig. 2. Versions of ovoid profiles upon the conjugation of three (a-c) and four (d) arcs.

Безусловно, подобные алгебраические выражения и их выведение затруднительны в использовании. Это обстоятельство, по всей видимости, является главной причиной существующего разрыва между математическими разработками, максимально точно описывающими яйцо и их использованием орнитологами. Однако, развитие современных цифровых и компьютерных технологий позволяет решить эту проблему за счет объединения усилий орнитологов и математиков. В данном случае первые выдвигают проблемы, а вторые разрабатывают компьютерные программы для их разрешения. Данное сообщение является примером работ подобного типа.

Для комплексного исследования яиц, включающего промеры, вычисление индексов формы, расчетов объема, площади поверхности и их коэффициентов нами, совместно с С.М.Шелестюком, Б.А. Троценко и А.А. Демченко¹, было разработано несколько вариантов соответствующих программ, учитывающих возможности различных исследователей. Первый вариант предполагает использование «в ручном режиме» существующих программ типа CorelDraw, Adobe Photoshop, Microsoft Office Picture Manager, Graphic Converter и др. С помощью них осуществляются соответствующие операции по обработке фотографий и получению дополнительных к длине и диаметру промеров радиусов инфундибулярной, латеральной и клоакальной дуг. Последующие расчеты осуществляются по специально написанным программам в Microsoft Office Excel (рис.3).

Второй вариант сводит к минимуму «ручную работу». Цифровые фотографии яиц вводятся в компьютер (рис. 4), а промеры и расчеты осуществляются с помощью специально написанных программ.

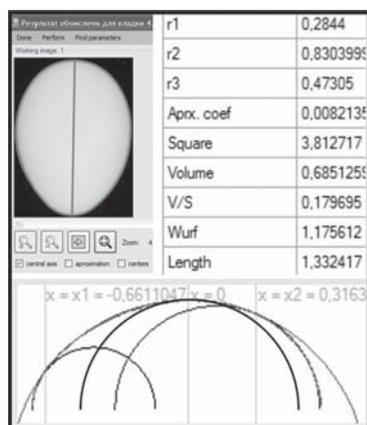
Примечание: 1 - указанным лицам автор выражает искреннюю благодарность за помощь в создании программ. Желаящим получить эти программы необходимо обратиться к автору.



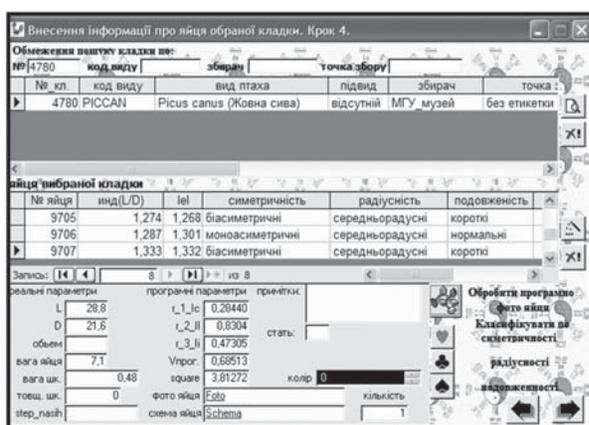
Параметры Parameters						
Основные Main			Вспомогательные Additive			
Радиус клоакальной дуги – r_1 Radius of cloacal arc	r_1	0.155	x_1	-0.69	V_1	0.00
Радиус латеральной дуги – r_2 Radius of lateral arc	r_2	1.023	y_1	0	V_2	0.68
Радиус инфундибулярной дуги – r_3 Radius of infundibular arc	r_3	0.457	x_2	0	V_3	0.09
			y_2	-0.52		
			x_3	0.21	S_1	0.03
Диаметр яйца (D=1) Egg diameter	D	1	y_3	0	S_2	3.33
					S_3	0.81
			x_1	-0.81		
Длина яйца (L) Egg length	L	1.521	x_2	0.39		
Объем яйца (V) Egg volume	V	0.768	x_1	-0.84		
Площадь поверхности (S) Area of surface	S	4.177		0.67		
Обобщающий индекс Summarizing index	Isum	1.051				

Рис. 3. Внешний вид программы по вычислению параметров яиц в «ручном» режиме.

Fig.3. The face of the program for calculating egg parameters in the manual mode.



а



б

Рис. 4. Внешний вид панели управления базами данных: а) основные блоки программы; б) панель для внесения исходных данных.

Fig.4. The face of the databases control panel: а) principal units of the program; б) raw data input panel.

Вначале на фотоснимке обводится контур изображения яйца. Затем его половина ориентируется вдоль продольной оси, измеряется относительная длина, а диаметр, при этом, принимается за единицу. На следующем этапе в кривую (половина контура) вписываются полуокружности, из которых она состоит и измеряются их радиусы. В связи с относительным характером, эти показатели одновременно выступают индексами инфундибулярной, латеральной и клоакальной зон, а также индексом удлиненности. Площадь поверхности и объем вычисляются по вышеприведенным формулам. Данные

автоматически передаются в специально разработанный на языке программирования С# комплекс (VBA + Microsoft Office Acces) управления базами данных (рис.5).

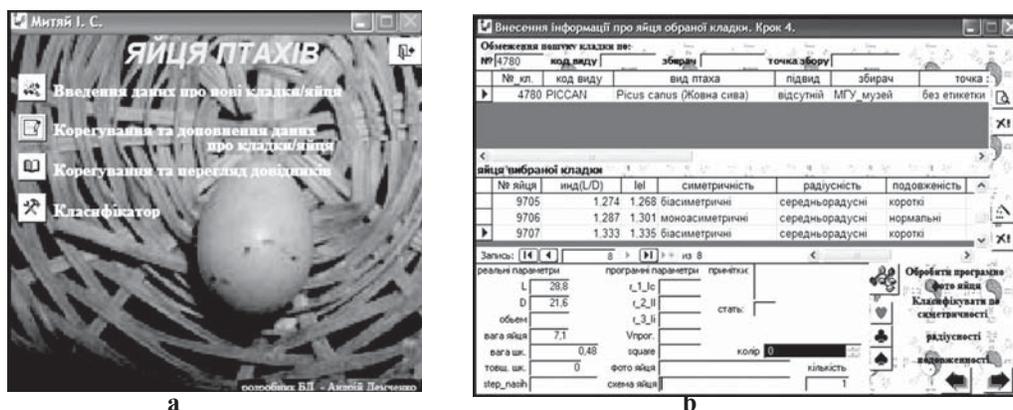


Рис. 5. Внешний вид результатов сканирования (а) и панели с окончательными данными (б).
 Fig. 5. The faces of the scanning results (a) and of the final data panel (b).

В отношении объема и площади поверхности возможен и другой способ их определения, базирующийся на подсчете количества пикселей. В его основании лежит метод расчета на основании нанесения нескольких сечений на профиль яйца и замеров диаметра в этих местах (рис. 6).

По своей сути каждый из сегментов является сферическим поясом. Сумма показателей каждого сегмента и есть искомые площадь поверхности и объем овоида. Чем больше сечений, тем точнее данные. Как известно, цифровая фотография это совокупность мелких квадратов (пикселей). В связи с этим, количество сечений на снимке яйца соответствует количеству пикселей фотоаппарата, что свидетельствует о потенциально высокой точности метода (табл. 1).

Наряду с этим, вычисления площади поверхности можно осуществлять по известному объему. На этот счет в литературе существует несколько предложений: $S=4.951 \cdot V^{0.667}$ (Paganelli, Olszowka, Ar, 1974); $S=4.857 \cdot V^{0.667}$ (Hoyt, 1976). Процедуру получения исходных данных мы упростили еще больше. По имеющимся у нас данным

по объему и площади поверхности около 16500 яиц птиц Северо-Западной Палеарктики и прилегающих территорий, мы вычислили k_v , k_s (табл. 2). Среднее значение k_v оказалось немного больше ($k_v=0.511$), чем $k=0.509$, приводимое Хойтом (Hoyt, 1979). Это еще раз свидетельствует о необходимости использования средних внутривидовых значений этого коэффициента. Упомянутые коэффициенты позволяют использовать формулы $S=k_s \cdot V$ или $S=k_s \cdot k_v \cdot L \cdot D^2$, где S – площадь поверхности, V – объем, k_s , k_v – коэффициенты поверхности и объема, L – длина, D – диаметр. Для вычислений площади поверхности яиц с ошибкой около трех процентов можно использовать $k_s=5,566 \pm 0.001$ ($n=16494$).

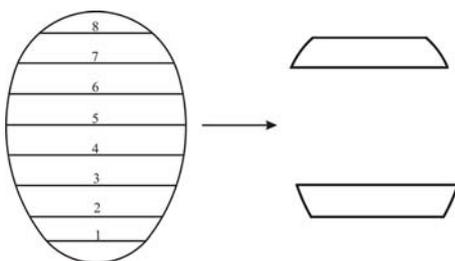


Рис. 6. Геометрическая схема для расчетов объема и площади поверхности
 Fig. 6. Geometrical scheme for volume and surface area calculations.

Таблица 1. Сравнительная характеристика замеренных, компьютерных и расчетных данных.
Table 1. Measured, computer-generated and calculated data comparison.

№	Замеренные параметры (объем - по количеству вытесненной воды) Measured parameters (volume – according to quantity of displaced water)			Расчетные параметры по (Hoyt, 1979) Calculated parameters (according to Hoyt 1979)		Компьютерные параметры Computer parameters	
	Длина Length	Диаметр Diameter	Объем Volume	Индекс (I_{el}) Index (I_{el})	Объем Volume	Индекс (I_{el}) Index (I_{el})	Объем Volume
1	55.1	44.2	55.0	1.247	54.8	1.229	54.2
2	58.4	44.7	59.0	1.306	59.4	1.272	58.3
3	60.3	44.1	59.0	1.367	59.7	1.347	59.9
4	55.8	42.7	52.5	1.307	51.8	1.301	52.4
5	59.3	44.1	59.5	1.345	58.7	1.337	59.5
6	60.8	44.1	61.0	1.379	60.2	1.376	60.9
7	56.6	43.8	56.0	1.292	55.3	1.282	56.0
8	62.4	45.0	64.0	1.387	64.3	1.369	63.9
9	56.5	42.9	54.0	1.317	52.9	1.331	54.4
10	62.5	45.8	65.5	1.365	66.7	1.337	65.8
11	56.6	42.7	54.0	1.326	52.5	1.309	52.7
12	57.2	43.5	54.8	1.315	55.1	1.317	56.5
13	59.7	42.8	57.1	1.395	55.7	1.395	55.9
14	58.4	42.8	55.5	1.364	54.5	1.358	54.6
15	58.2	45.3	61.0	1.285	60.8	1.290	61.5
16	59.2	44.9	60.0	1.318	60.7	1.292	60.0
17	60.0	46.0	65.5	1.304	64.6	1.303	65.6
18	55.6	42.3	52.5	1.314	50.6	1.312	51.4
19	55.5	44.6	57.1	1.244	56.2	1.220	56.1
20	57.2	43.8	55.5	1.306	55.9	1.271	54.9
21	58.5	43.5	57.1	1.345	56.3	1.328	56.6
22	62.8	44.5	65.6	1.411	63.3	1.414	64.3
23	57.9	45.8	63.9	1.264	61.8	1.269	62.7
24	53.8	43.5	55.2	1.237	51.8	1.248	53.4
25	59.3	45.7	65.9	1.298	63.0	1.296	64.3
26	54.6	44.6	57.1	1.224	55.3	1.217	55.8
27	57.9	43.2	57.8	1.340	55.0	1.349	56.3
28	60.8	45.0	64.0	1.351	62.7	1.356	63.6
29	58.3	44.8	62.0	1.301	59.6	1.307	62.1
30	57.2	43.9	58.5	1.303	56.1	1.310	57.5
	58.2±0.4	44.2±0.18	58.9±0.75	1.319±0.01	58.4±0.7	1.311±0.01	57.8±0.78

Таблица 2. Коэффициенты расчета поверхности и объема птичьих яиц
Table 2. Surface and volume indices of avian eggs.

Отряд Order	n	Коэффициент объема (k_v) Volume Index (k_v)			Коэффициент поверхности (k_s) Surface Index (k_s)		
		Min	Max	M±m	Min	Max	M±m
Sphenisciformes	39	0.482	0.523	0.512±0.0016	5.436	5.812	5.651±0.0156
Struthioniformes	40	0.505	0.531	0.516±0.0012	5.271	5.805	5.491±0.0227
Gaviiformes	145	0.496	0.530	0.512±0.0005	5.532	5.204	5.369±0.0052
Podicipediformes	378	0.488	0.531	0.506±0.0003	5.250	5.615	5.466 ±0.0031
Procellariiformes	55	0.505	0.534	0.519±0.0008	5.356	5.669	5.490 ±0.0091
Pelecaniformes	211	0.497	0.529	0.511±0.0003	5.155	5.524	5.375±0.0041
Ciconiiformes	503	0.49	0.528	0.509±0.0003	5.337	5.704	5.527 ±0.0029
Anseriformes	636	0.495	0.540	0.514±0.0002	5.221	5.633	5.482±0.0023
Falconiformes	1573	0.500	0.529	0.515±0.0001	5.395	5.865	5.640 ±0.0017
Galliformes	984	0.486	0.532	0.512±0.0003	5.350	5.825	5.610 ±0.0021
Gruiformes	645	0.491	0.527	0.510±0.0002	5.255	5.812	5.503 ±0.0031
Charadriiformes	2468	0.472	0.527	0.500±0.0002	5.294	5.774	5.567 ±0.0015
Columbiformes	224	0.505	0.538	0.519±0.0004	5.304	5.694	5.528 ±0.0053
Cuculiformes	150	0.504	0.553	0.519±0.0007	5.237	5.754	5.528 ±0.0073
Strigiformes	297	0.504	0.531	0.516±0.0003	5.473	5.878	5.680±0.0039
Caprimulgiformes	74	0.508	0.525	0.520±0.0007	5.352	5.627	5.478 ±0.0071
Apodiiformes	49	0.512	0.534	0.518±0.0007	5.263	5.537	5.408±0.0097
Coraciiformes	261	0.506	0.530	0.518±0.0003	5.382	5.910	5.678±0.0048
Upupiformes	144	0.506	0.531	0.517±0.0005	5.345	5.608	5.460±0.0046
Piciformes	583	0.496	0.534	0.517±0.0002	5.403	5.464	5.584±0.0028
Passeriformes	7069	0.485	0.542	0.511±0.0001	5.185	5.834	5.571±0.0009

Кроме абсолютных, важное значение имеют относительные пространственные критерии. В качестве последних мы предлагаем использовать следующие относительные индексы: расчета объема – $I_{rv} = V_{ov} / V_{sph}$ и расчета поверхности $I_{rs} = S_{ov} / S_{sph}$, где I_{rv} и I_{rs} – индексы относительного объема и относительной площади поверхности, а V_{ov} , S_{ov} , V_{sph} , S_{sph} – объемы и площади реальных яиц и сфер с диаметром равным длине яйца. Такой подход очень удобный для наглядного представления степени приближения овоида к сфере (рис. 7).

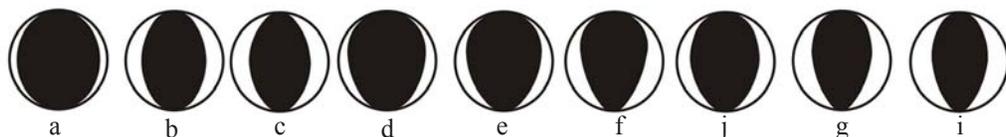


Рис. 7. Схема, иллюстрирующая сравнение яиц со сферой: а-с - симметрических; d-f - моноасимметрических; g-i) биасимметрических

Fig. 7. The scheme illustrating eggs compared to sphere: a-c - symmetrical; d-f - monoasymmetrical; g-i - biasymmetrical.

Если в формуле $I_{rv} = V_{ov} / V_{sph}$ в числителе поставить формулу Хойта (Hoyt, 1979): $V_{ov} = kLD^2$, а в знаменателе формулу для определения объема сферы с диаметром равным длине яйца: $V_{sph} = 4/3\pi(L/2)^3 = \pi L^3/6$ и осуществить необходимые сокращения, то мы получим:

$$I_{rv} = 6k/\pi * (D/L)^2.$$

Не трудно заметить, что в состав формулы входит индекс удлиненности. Если последний использовать, как отношение длины к диаметру, то формула будет иметь вид - $I_{rv} = 6k/\pi * l^2$. Для относительной площади поверхности формула будет иметь следующий вид:

$$I_{rs} = S_{ov} / S_{sph} = (k_s * k_v * L * D^2) / (4 \pi (L/2)^2) = (k_s * k_v * L) / \pi.$$

Предлагаемые индексы позволяют осуществлять необходимые сравнения, а также анализировать яйца с точки зрения большей или меньшей инкубационной пригодности. В качестве эталона для сравнения мы использовали шар. Последний обладает множеством присущих только ему качеств. Например, только у этого физического тела соотношение объема к площади поверхности максимальное. Этот показатель очень важный для птичьих яиц, т.к. он связан с вещественно-энергетической стороной процесса инкубации. Яйца с максимальным объемом при минимальной площади поверхности обладают целым рядом преимуществ. Скорлупа у них характеризуется максимальной прочностью при минимальной толщине. Процессы газообмена и транспирации в данном случае проходят оптимальнее, чем при толстой скорлупе. Малая площадь поверхности обладает меньшей теплоотдачей, что является залогом большей выживаемости эмбриона в момент отсутствия насиживающей птицы на гнезде. Максимальный объем позволяет вместить большее количество необходимых веществ и т. д.

Заключение

Вышеизложенные материалы показывают, что использование цифровых фотографий и их компьютерного анализа открывает широкие перспективы в исследованиях птичьих яиц. Абсолютные и относительные пространственные показатели позволяют не только сравнивать яйца между собой, но и производить анализ их инкубационной пригодности.

Последнее обстоятельство очень важно, т.к. при наличии только оологического материала появляется возможность осуществления прогнозов состояния популяции еще в начале гнездового периода.

Существенным преимуществом данного метода является экономичность, скорость выполнения, прижизненное получение максимума информации (индексы формы, объем, площадь поверхности, определение качества яиц и прогнозирование успешности размножения к началу насиживания и др.) при минимальном беспокойстве птиц. Кроме этого, фотографирование яиц и создание электронной базы данных цифровых фотографий с большей пользой для науки и охраны птиц может заменить традиционно существующее коллекционирование. Международная база данных не только позволит осуществлять всевозможные сравнения и обобщения, но и даст возможность «реанимировать» старые дневниковые записи, путем проведения необходимых расчетов на основании длины и диаметра с использованием эмпирических коэффициентов, полученных из этой базы.

Литература

- Комаров И.Ф. Определение объема птичьих яиц в полевых условиях // Современные проблемы оологии. Материалы I Междунар. конф. стран СНГ. – Липецк, 1993. – С. 81-83.
- Митяй И.С. Новая методика комплексной оценки формы яйца // Бранта. – 2003. - Вып. 6. - С. 179–192.
- Митяй И.С. Использование современных технологий в исследованиях птичьих яиц // Вісник Запорізького національного університету. Біологічні науки. – 2008. - №1. – С. 175-183.
- Романов А.Л., Романова А.И. Птичье яйцо. – М.: Пищепромиздат, 1959. – 620 с.
- Тарасов В.А. Прибор для измерения объема птичьего яйца и его использование для изучения некоторых сторон биологии гнездования птиц // Гнездовая жизнь птиц. – Пермь: ПГПИ, 1977. – С. 47–49.
- Черничко И.И., Чичкин В.Н. Косвенный метод вычисления объема яиц у колониально гнездящихся ржанкообразных птиц // Бранта. - 1999. – Вып. 2. - С. 159–165.
- Baker D.E. A geometric method for determining shape of bird eggs // The Auk. - 2002. - Vol. 119 – P.1179-1186.
- Bridge E.S., Boughton R.K., Aldredge R.A., Harrison T. E., Bowman R., Schoech S.J. Measuring egg size using digital photography: testing Hoyt's method using Florida Scrub-Jay eggs // Journal of Field Ornithology. – 2007. - Vol. 78 - P. 109-116.
- Hoyt D.F. The effect of shape on the surface-volume relationships of birds eggs // The Condor. – 1976. - Vol. 78. – P. 343–349.
- Hoyt D.F. Practical methods of estimating volume and fresh weight of bird eggs // The Auk. – 1979. - Vol. 96 – P.73–77.
- Mallock A. The shapes of birds' eggs // Nature. – 1925. - Vol. 116 - P. 311-312.
- Monus F., Barta Z. Repeatability analysis of egg shape in a wild tree sparrow (*Passer montanus*) population: a sensitive method for egg shape description // Acta zool. Hung. – 2005. - Vol. 51 – P. 151-162.
- Narushin V.G. Egg geometry calculation using the measurements of length and breadth // Poultry Science. – 2005. – Vol. 84 - P. 482-484.
- Paganelli C.V., Olszowka A., Ar. A. The avian egg: surface area, volume, and density // The Condor. – 1974. - Vol. 76 – P. 319 - 325.
- Preston F.W. The shapes of birds egg // The Auk . – 1953. - Vol. 70 – P. 160 – 182.
- Preston F.W. Shapes of birds eggs: extant north american families // The Auk. – 1969. - Vol. 86 – P. 246 - 264.
- Shufeldt R.W. On the Scientific Photography of Birds Eggs // The Condor. – 1900. - Vol. 2 – P. 75 – 78.
- Tatum J.B. Egg volume // The Auk. – 1975. - Vol. 92 – P. 576-580.
- Tatum J.B. Area-volume relationship for a bird's egg // Short Communications. 1976.
- Hoyt D.F. The effect of shape on the surface-volume relationships of birds eggs // The Condor. – 1976. - Vol. 78 – P. 343 – 349.
- Loftin R.W., Bowman R.D. A device for measuring egg volumes // The Auk. - 1978. - Vol. 95 – P. 190-192.