

## АНАЛИЗ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КАЧЕСТВ ГНЕЗД ПТИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ АППАРАТУРЫ

Симонов С.А.<sup>1</sup>, Матанцева М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт биологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия, e-mail: ssave@gmail.com*

Представлен авторский метод исследования теплоизоляционных качеств гнезд птиц с использованием тепловизионной аппаратуры в полевых и лабораторных условиях. Описаны параметры оборудования, приведены устройство и физические характеристики разработанного авторами инфракрасного излучателя с цифровым управлением, поддерживающим заданную температуру. Предложены алгоритмы проведения исследований для решения различных задач (изучение внутри- и межвидовой изменчивости теплоизоляционных качеств гнезд, зависимость теплоизоляционных качеств от стадии гнездования и т.д.). Приведены формулы расчета объема и плотности построек (параметров, влияющих на их теплоизоляционные качества) для чашеобразных и для сферических гнезд. Представлены некоторые результаты апробации предлагаемого метода при изучении теплоизоляционных качеств гнезд воробьиных птиц в ходе исследований 2015 г. Охарактеризованы потенциальные возможности предлагаемого метода.

Ключевые слова: гнезда птиц, структура и параметры гнезд, инфракрасная термография, теплоизоляция, энергосбережение, архитектурная бионика

## THE ANALYSIS OF HEAT INSULATION IN BIRD NESTS WITH THERMAL IMAGING EQUIPMENT

Simonov S.A.<sup>1</sup>, Matantseva M.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, e-mail: ssave@gmail.com*

We present the original analysis method of heat insulation properties of bird nests with the state-of-the-art thermal imaging equipment in field conditions and laboratory. The approaches include thermal imaging with a spheroid infrared emitter for standardization of measurements. We consider parameters of the tested equipment and physical characteristics of the stable infrared emitter based on the digital controller. The basic approaches in thermal insulation investigations according to different research aims (investigations of the intra- and interspecific variability of heat insulating qualities of nests, the dependence of heat insulation qualities of a nest from the stage of breeding, etc.) are described. The paper contains formulas and description of a process of the nest volume and nest density (parameters affected the heat insulation qualities) calculation for cup nests and sphere nests. Some information about approbation of the methods on the passerine nests in 2015 is also presented. The potential possibilities of the proposed methods are characterized as well.

Keywords: bird nests, structure and parameters of nests, infrared thermography, thermal insulation, energy-saving, architectural bionics

Одним из наглядных проявлений адаптаций птиц к разнообразным условиям обитания можно считать многообразие форм гнезд и используемых при их создании материалов. Изучению морфологии гнезд и особенностей их пространственной конфигурации в различных климатических и географических условиях посвящено значительное число исследований [1; 2; 3 и др.]. Наряду с размерными характеристиками гнезда большое значение имеют качественный состав материала, из которого оно построено, и пространственная конфигурация гнездового материала. До недавнего времени наиболее точные методы исследования теплопроводности материалов требовали физической трансформации образца в стационарных условиях, что существенно затрудняло процесс исследования гнезд. С появлением доступных методов неразрушающего контроля и измерения в строительстве ситуация изменилась, о чем свидетельствуют результаты

некоторых исследователей, уделяющих особое внимание теплоизоляционным качествам гнезд [4; 5; 7]. В России аналогичных работ с применением современной тепловизионной аппаратуры ранее не проводили.

Настоящая работа основана на использовании тепловизионной техники, позволяющей получить тепловую картину исследуемого объекта непосредственно в полевых условиях без необходимости деформировать постройку, исследовать теплопроводность отдельных элементов гнезд птиц различных экологических групп, выявлять наиболее уязвимые элементы конструкции и максимально защищенные от теплопотерь участки гнезда.

### **Предлагаемый алгоритм исследований теплоизоляционных качеств гнезд**

#### 1. Полевые работы.

##### 1.1. Поиск гнезд.

1.2. Регистрация явлений гнездового периода каждой наблюдаемой пары птиц или гнездящейся особи, экстраполяция предстоящих событий (момент вылупления, процесс роста птенцов, момент вылета из гнезда) для корректировки календарного плана полевой работы.

##### 1.3. Регистрация основных параметров гнезд.

1.3.1. Измерения гнезд (до того, как форма гнезда может быть нарушена подросшими птенцами):

1) шарообразных (наружного и внутреннего поперечных диаметров, наружной и внутренней длины, высоты гнезда, высоты подземной и надземной частей (для наземных гнезд), высоты и ширины входного отверстия);

2) чашеобразных (наружного и внутреннего диаметра, высоты и глубины гнезда) на стадии нахождения в гнезде яиц или маленьких птенцов.

1.3.2. Описание параметров расположения гнезда (для возможности последующего анализа зависимости структуры гнезда и способа его расположения).

1.3.3. Характеристика гнездового субстрата и микростации (для возможности последующего анализа зависимости структуры гнезда и особенностей места гнездования).

1.3.4. Измерение массы гнезда с естественными параметрами увлажнения при его изъятии сразу после вылета птенцов или их гибели (для возможности последующего анализа зависимости плотности (и через нее теплопроводности) гнезда от влажности).

2. Регистрация теплопотерь в процессе протекания явлений гнездования (насиживание яиц и выкармливание птенцов) посредством инфракрасной термографии с фиксированных позиций, позволяющей получить картину распределения тепловых полей с высокой точностью и таким способом определить теплоизоляционную эффективность построек (для получения сопоставимых данных все наблюдения должны проводиться в предрассветных

сумерках, когда эффект нагрева окружающих гнездо предметов солнцем сведен к минимуму, а плотность насиживания яиц и согревания птенцов, как правило, максимальна), при нахождении взрослой птицы в гнезде и в ее отсутствие для оценки степени и характера изменения функциональных параметров в процессе эксплуатации гнезда:

2.1. в период «плотного» насиживания кладки, когда взрослая птица преимущественно не покидает кладку, а отлучившись, стремится скорее продолжить насиживание;

2.2. во время согревания птенцов.

3. Исследование термоизоляционных свойств гнезд при просвечивании стенки гнезда искусственным телом заданной температуры. Организация работы в полевых условиях исключает артефакты, вызванные деформацией гнезда при транспортировке в лабораторию. С другой стороны, при возможности транспортировки гнезда с сохранением целостности данный этап исследований можно перенести в лабораторию, что может быть актуально при большом количестве материала.

3.1. Получение снимков каждого гнезда с помощью тепловизора и помещаемого в лоток гнезда термоизлучателя с заданной температурой с целью создания основы для проведения сравнительного анализа характеристик разных гнезд. В зависимости от задач исследований возможно проведение серии снимков гнезд на разных этапах гнездового цикла, съемка серии гнезд на одинаковых этапах гнездового цикла и т.п.

3.2. Регистрация условий наблюдений (например, температура и влажность воздуха в непосредственной близости от гнезда, сила и направление ветра в гнездовой микростации, наличие и характер атмосферных осадков при проведении работы в поле) для учета факторов среды, способных существенно повлиять на репрезентативность данных. Кроме того, поскольку искусственная стандартизация климатических условий в природе невозможна, регистрация условий обеспечит возможность выбора из всего спектра данных информации, полученной при аналогичных условиях, для проведения сравнительного анализа.

4. Лабораторные работы.

4.1. Описание пространственного взаиморасположения и качественного состава слоев используемого материала в гнездах разных типов.

4.2. Определение массы каждого слоя гнезда в условиях естественного увлажнения и после горячей сушки до постоянной массы, для определения показателей плотности укладки гнездового материала послойно.

4.3. Определение естественной (установленной в полевых условиях в день вылета из гнезда последнего птенца или разорения) и сухой массы гнезд для последующего вычисления показателей плотности укладки гнездового материала всей постройки.

4.4. Вычисление *плотности укладки гнездового материала* – предлагаемого нами параметра, характеризующего структуру укладки материала – отношение сухой массы постройки к вычисленному объему гнезда на основании морфометрических параметров объема и массы постройки или ее частей (физический смысл параметра аналогичен плотности материалов, единицы измерения – г/см<sup>3</sup>).

5. Камеральный анализ тепловизионных изображений гнезд, полученных в естественных условиях и при работе с искусственным телом заданной температуры в зависимости от целей исследований (сравнительный анализ теплоизоляционных качеств гнезд в зависимости от стадии гнездования, характеристик гнезд конспецифичных особей в пределах ареала, теплоизоляционных качеств построек представителей разных видов и т.д.).

### **Проведение инфракрасной съемки**

Применение инфракрасного излучателя фиксированного размера в гнездах птиц, имеющих различные размеры, требует корректировки условий проведения наблюдений. С целью получения сравнимых показателей теплопотерь в гнездах мы корректировали время работы инфракрасного излучателя до момента тепловизионной съемки на основании показателей толщины стенки гнезда согласно формуле, выведенной на основе закона теплопроводности Фурье с некоторыми допущениями:

$$\tau_{\text{гнезда}} = (\delta_{\text{гнезда}} \cdot \tau_{\text{эталона}}) / \delta_{\text{эталона}},$$

где  $\tau_{\text{гнезда}}$  – время нагрева исследуемого гнезда;  $\delta_{\text{гнезда}}$  – толщина стенки исследуемого гнезда;  $\tau_{\text{эталона}}$  – время нагрева эталонного гнезда;  $\delta_{\text{эталона}}$  – толщина стенки эталонного гнезда (измеренного первым).

Для того чтобы учесть различия форм гнезд, при проведении тепловизионной съемки следует выбирать стандартизированные положения камеры относительно гнезда. В случае с чашеобразными гнездами мы проводили съемку 4 кадров с горизонтальным смещением камеры относительно оси гнезда пошагово на 90°. Для сферических гнезд снимали добавочно вид сверху. При соблюдении равного расстояния между линзой объектива и плоскостью гнезда в каждой серии снимков мы получали возможность группового анализа снимков и дальнейшего расчета теплопотерь со всей поверхности гнезда, осуществляя развертку трехмерного изображения в двумерное (рис. 1).

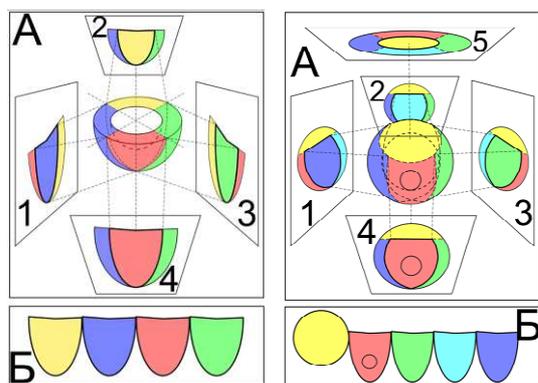


Рис. 1. А: 1 – 4 – позиции съемки гнезда в горизонтальной плоскости, 5 – снимок вида сверху; Б – объединение разверток снятых изображений при групповом анализе снимков

### Апробация метода

В качестве основного средства визуализации распределения тепловых полей в исследуемых гнездах мы использовали тепловизор Testo 875i (разрешение инфракрасной матрицы прибора – 160x120 пикселей, температурная чувствительность NETD – <50 мК (при 30°C), спектральный диапазон термочувствительной матрицы – 7.5-14 мкм, угол обзора объектива – 32°x23°). Прибор выполнен в эргономичном влагозащищенном корпусе, что позволяет использовать устройство непосредственно в полевых условиях.

С целью стандартизации условий измерений регистрировали силу и направление ветра, влажность и температуру окружающего воздуха с помощью цифрового комплексного измерительного прибора Testo 410-2 (точность прибора – 0,1 м/с, 0,1°C, 0,1% гН).

В качестве эталонного источника инфракрасного излучения использовали разработанный нами на базе цифрового термостатического реле VM945F (MasterKit™) стабилизированный искусственный инфракрасный излучатель (рис. 2), поддерживающий выбранные значения температуры рабочего узла в пределах от 0 до 99 °C с точностью 0,1°C. Нагревательный элемент излучателя представляет собой лампу накаливания мощностью 55 Ватт в цепи 12 V. Пространство между колбой лампы накаливания и внутренней поверхностью стальной сферы, образующей рабочий узел инфракрасного излучателя, заполнено теплоносителем в виде сплава Розе (висмут 50%, свинец 25–28 %, олово 22–25%) с температурой плавления 94–98°C. В поверхности сферы выполнено окно, в которое помещен термочувствительный элемент термостатического реле, осуществляющий измерение температуры на поверхности сферы с целью автоматической корректировки режима нагрева. Поверхность сферы окрашена матовой черной краской для максимального повышения коэффициента излучения поверхности. Рабочий узел излучателя смонтирован на штативе с возможностью фиксации сферы в заданной точке пространства. Питание силовой цепи нагревательного элемента осуществляется аккумуляторной батареей (12 V, 9 Ah, 27 А).

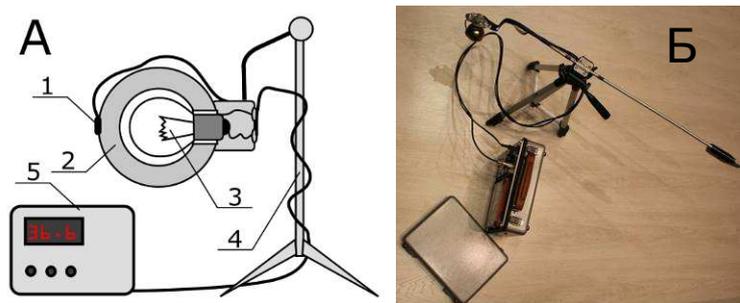


Рис. 2. А – схема стабилизированного инфракрасного излучателя: 1 – термочувствительный датчик, 2 – стальная сфера (залита сплавом Розе), 3 – нагревательный элемент (лампа накаливания), 4 – штатив, 5 – электронный блок управления устройством; Б – вид на устройство в сборе сверху

Апробацию метода в 2015 г. проводили в Карелии и Мурманской области на гнездах воробьиных птиц [6]. Получено более 500 термограмм гнезд птиц 12 видов. Анализ термограмм проведен с использованием компьютерной программы Testo © IRSoft 3.6. В качестве примера этапов анализа на рисунке 3 представлены видимое изображение, термограмма и гистограмма распределения тепловых полей на выделенном участке гнезда певчего дрозда.

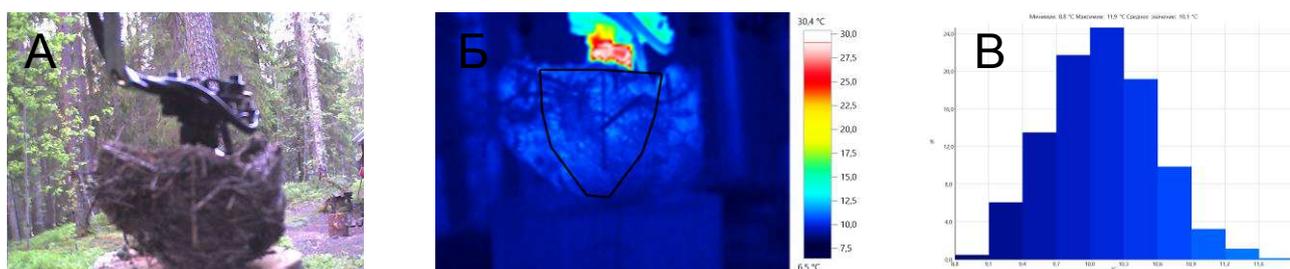
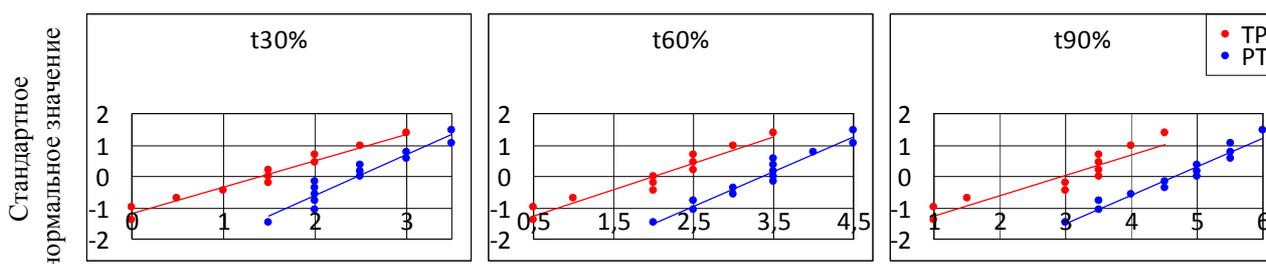


Рис. 3. А – фотография гнезда, Б – изображение гнезда в ИК спектре с выделенным для анализа участком (черным цветом), В – гистограмма распределения тепловых полей на выделенном участке

Для иллюстрации результатов апробации метода приведены относительные показатели теплопроводности гнезд пеночки-веснички и певчего дрозда (рис. 4) по результатам измерения с термостабильным инфракрасным излучателем. Анализировали прирост температуры участка поверхности, составляющего 30, 60 и 90% всей поверхности гнезда, относительно температуры окружающего воздуха. Результаты показали значимые различия относительного прироста температуры для рассматриваемых участков. Однако степень различия в прогреве эквitemпературных элементов, составляющих 30% площади гнезда, уменьшалась при повышении температуры, снижая межвидовые различия. По-видимому, это можно объяснить тем, что эквitemпературные участки 30% площади гнезд приходится на максимально изолированные части гнезд и реакция таких участков на воздействие инфракрасным излучателем сходна у представителей разных видов. Несмотря на

схожую динамику изменения температуры гнезда от температуры окружающей среды, сохраняется видовое различие этого показателя.



Разница в значениях температуры участка поверхности и температуры воздуха, °C

*Рис. 4. Характеристики теплопроводности гнезд пеночек-весничек *Phylloscopus trochilus* (PT,  $n = 13$ ) и певчих дроздов *Turdus philomelos* (TP,  $n = 11$ ): нормальные графики QQ разницы температуры 30%, 60% и 90% поверхности ( $t_{30\%}$ ,  $t_{60\%}$  и  $t_{90\%}$  соответственно) и температуры воздуха*

### Возможности метода

Применение метода дает возможность пойти дальше изучения морфологии и качественного состава построек птиц, в область инструментальных исследований принципов функционирования отдельных элементов в структуре гнезда. Ожидается получение новых данных по гнездовой биологии и поведению птиц, способах и возможностях их адаптации к меняющимся условиям среды посредством функциональных особенностей гнезд, что в конечном итоге будет способствовать расширению теоретических представлений о механизмах этологической и экологической пластичности животных.

*Работа проведена по гранту Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук (проект № МК-3599.2015.4) и при частичном финансировании РФФИ (проект 15-05-03493-а).*

### Список литературы

1. Балацкий Н.Н. Гнезда птиц юга Западно-Сибирской равнины. — Новосибирск: Наука-Центр, 2009. 184 с.
2. Goodfellow P. Avian Architecture: How Birds Design, Engineer, and Build. — Princeton and Oxford: Princeton Univ. Press, 2011. 160 p.
3. Hall Z.J., Street S.E., Auty S., Healy S.D. The coevolution of building nests on the ground and domed nests in Timaliidae // *The Auk*. 2015. Vol. 132. № 3. P. 584.
4. Heenan C.B. An overview of the factors influencing the morphology and thermal properties of avian nests // *Avian Biol. Res.* Vol. 6. № 2. 2013. P. 104–118.

5. Local temperature and not latitude determines the design of Blue Tit and Great Tit nests / D.C. Deeming [et al.] // Avian Biol. Res. Vol. 5. № 4. 2012. P. 203–208.
6. Simonov S.A., Matantseva M.V. Thermal insulation of passerine nests in North-West Russia: preliminary results and ideas // 10th Conference of the European Ornithologist's Union: Programme and Abstracts. Badajoz. 2015. P. 95. URL:  
<http://nebula.wsimg.com/1acc6dd48604301eccc3088cf2632cbe?AccessKeyId=91BC33EB060402A7B673&disposition=0&alloworigin=1> (дата обращения: 16.09.15).
7. Töpfer T., Gedeon K. The construction and thermal insulation of Ethiopian Bush-crow (*Zavattariornis stresemanni*) nests: a preliminary study // Avian Biol. Res. Vol. 5. № 4. 2012. P. 198–202.

**Рецензенты:**

Илюха В.А., д.б.н., доцент, заведующий лабораторией экологической физиологии животных Института биологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск;  
Артемьев А.В., д.б.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории зоологии Института биологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск.