



## РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ЭМБРИОНОВ В ЯЙЦЕ ПТИЦЫ ДО ЕГО ИНКУБАЦИИ

✉ Алейников А.Ф.<sup>1,2</sup>, Осипенко И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук

Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет

Новосибирск, Россия

✉ e-mail: fti2009@yandex.ru

Сформулированы и обоснованы требования к методам определения пола эмбриона в яйце в соответствии с ужесточением ранее принятых норм отбраковки петушков при инкубации. Проведен анализ новых разрабатываемых методов определения и отбраковки эмбрионов яиц в течение 7 дней их инкубации, описаны их преимущества и недостатки. Выявлены два неинвазивных метода, которые имеют определенную перспективу коммерческого внедрения в отрасль птицеводства (инфракрасная спектроскопия и компьютерное зрение). Цель исследования – определить возможности неинвазивного метода определения пола эмбриона в яйце до инкубации на основании интеллектуального анализа предложенных морфометрических признаков яйца птицы. Впервые разработан метод определения полового диморфизма, основанный на анализе параметров асимметрии яйца по трем пространственным координатам, определяемым методами компьютерного зрения с применением машинного обучения. Разработана экспериментальная установка оценки жизнеспособности и создание необходимых условий для проведения инкубации и вывода цыплят для подтверждения осуществления предлагаемого метода. В состав ее входят smart инкубатор «Умная наседка», брудер, тепловизионная микрокамера TE-Q1, маслonaполненный радиатора POLARIS модели PRE T 0915, увлажнитель воздуха Ergorpower ER 604, бактерицидный облучатель-рециркулятор воздуха DEFENDER 2-15C, термогигрометр RGK TH-30 и ноутбук. При получении изображений в установке использован цифровой фотоаппарат Canon EOS 2000D EF-S 18-55 III Kit с современной CMOS-матрицей (22,3 × 14,9 мм) и мощным процессором. Геометрическую пространственную цифровую модель каждого яйца программным путем искусственно разбивали на множество элементов, по которым определяли асимметрию формы яйца. При этом по измеренным линейным размерам каждого элемента определяли их индексы формы, площадь, объем и периметр. Проведена инкубация 72 оплодотворенных яиц курицы кросса Dekalb White. После инкубации удалось достоверно определить пол 38 цыплят. Применение методов машинного обучения при решении задач бинарной классификации для малой выборки (38) с большой размерностью исходного набора признаков позволило получить три окончательные модели со значением точности метрик достоверности AUC = 73–72% и F1 = 69–72%: Random Forest классификатор с 4 оценщиками и максимальной глубиной 3; классификатор случайного леса с 10 оценщиками и максимальной глубиной 5 и классификатор AdaBoost с 4 оценщиками дерева решений и максимальной глубиной 3. Экспериментальное подтверждение взаимосвязи асимметрии формы яйца с его половым диморфизмом позволит приблизиться к решению мировой научной проблемы достоверного определения пола яйца до инкубации.

**Ключевые слова:** яйцо, инкубация, эмбрион, диморфизм, определение, методы, компьютерное зрение

## DEVELOPMENT OF A NEW METHOD FOR EVALUATING EMBRYOS IN A BIRD EGG BEFORE INCUBATION

✉ Aleynikov A.F.<sup>1,2</sup>, Osipenko I.V.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>*Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences*  
Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia

<sup>2</sup>*Novosibirsk State Technical University*  
Novosibirsk, Russia

✉ e-mail: fti2009@yandex.ru

The requirements to the methods of embryo sex determination in an egg have been formulated and substantiated in accordance with the tightening of the previously accepted norms of cockerel culling during incubation. New methods under development for identifying and culling of egg embryos within 7 days of incubation have been analyzed, and their advantages and disadvantages have been described. Two non-invasive techniques have been identified that have some potential for commercialization in the poultry industry (infrared spectroscopy and computer vision). The purpose of the study is to determine the possibilities of a non-invasive method for determining the sex of an embryo in an egg prior to incubation based on intelligent analysis of the proposed morphometric features of poultry eggs. The scientific novelty of the research lies in the fact that for the first time a method of determining sexual dimorphism based on the analysis of egg asymmetry parameters by three spatial coordinates determined by computer vision methods with the use of machine learning has been developed. An experimental unit for viability assessment and establishment of the necessary conditions for incubation and hatching of chicks has been developed to validate the implementation of the proposed method. It includes a smart incubator "Smart Nest", a brooder, a thermal imaging micro-camera TE-Q1, an oil-filled radiator POLARIS model PRE T 0915, an air humidifier Ergopower ER 604, a bactericidal air irradiator-re-circulator DEFENDER 2-15C, a thermohygrometer RGK TH-30 and a laptop. For image acquisition, the setup utilized a Canon EOS 2000D EF-S 18-55 III Kit digital camera with a state-of-the-art CMOS sensor (22.3 × 14.9 mm) and a powerful processor. The geometric spatial digital model of each egg was artificially divided into a set of elements by software, by which the asymmetry of the egg shape was determined. In doing so, their shape indices, area, volume and perimeter were determined from the measured linear dimensions of each element. Incubation of 72 fertilized eggs of Dekalb White cross hen was carried out. Following the incubation, it was possible to reliably determine the sex of 38 chicks. Applying machine learning methods in solving binary classification problems for a small sample (38) with high dimensionality of the initial feature set yielded three final models with accuracy metrics AUC = 73–72% and F1 = 69–72%: Random Forest classifier with 4 evaluators and maximum depth of 3; Random Forest classifier with 10 evaluators and maximum depth of 5 and AdaBoost classifier with 4 decision tree evaluators and maximum depth of 3. Experimental confirmation of the relationship between the egg shape asymmetry and its sexual dimorphism will make it possible to approach the solution of the world scientific problem of reliable determination of the egg sex before incubation.

**Keywords:** egg, incubation, embryo, dimorphism, definition, methods, machine vision

**Для цитирования:** Алейников А.Ф., Осипенко И.В. Разработка нового метода оценки эмбрионов в яйце птицы до его инкубации // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2023. Т. 53. № 11. С. 106–120. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-11-11>

**For citation:** Aleynikov A.F., Osipenko I.V. Development of a new method for evaluating embryos in a bird egg before incubation. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2023, vol. 53, no. 11, pp. 106–120. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-11-11>

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22-26-00198.

### Acknowledgments

The study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 22-26-00198.

## ВВЕДЕНИЕ

Отбраковке однодневных петушков после проведения инкубационного периода ежегодно подвергаются более 7 млрд домашних птиц [1]. Учитывая, что эта процедура осуществляется, как правило, антигуманными методами – путем мацерации и удушения в среде углекислого газа, она вызывает общественную озабоченность неэтичными действиями производителей пищевой продукции [2]. В связи с этим в ряде европейских стран (Германия, Франция) с 2022 г. действует закон о запрещении массовой выбраковки суточных цыплят<sup>1</sup>. В Швейцарии планируют ввести подобный запрет в 2026 г. Производителей обязали использовать технологии определения пола цыпленка до его рождения и предотвращать процесс появления петушков в процессе инкубации. Кроме того, с 2024 г. в ряде стран Европы планируют введение запрета на уничтожение живых эмбрионов в яйце птицы после 6-го дня инкубации<sup>2</sup>. Это связано с наличием сердечных сокращений у развивающегося эмбриона уже на 3-й день инкубации и серой зоны болевого порога эмбриона на 7-й день инкубации яйца курицы (см. сноску 2).

Определение пола эмбриона в яйце до инкубации остается нерешенной проблемой [3]. В связи с новыми тенденциями перспективный метод определения пола эмбриона в яйце должен:

- не разрушать целостность яичной скорлупы или эмбриона, т.е. быть неинвазивным методом;
- не оказывать отрицательного влияния на эмбрион в яйце и цыплят в процессе их вывода и дальнейшего развития;
- осуществлять отбраковку инкубационных яиц до инкубации или в срок до 6–7 дней, когда маловероятен болевой порог у развивающегося эмбриона, т.е. быть приемлемым с этической точки зрения;

– быть быстродействующим, чтобы его можно было применять к большому количеству яиц в производственных инкубаторах;

– исключать применение зарубежных сложных технологий, технических и других средств при его реализации;

– обладать необходимой достоверностью или точностью прогноза полового диморфизма в яйце;

– не иметь трудоемких операций, сложных аналитических процедур, приводящих к удорожанию его коммерческой реализации, но обладать перспективой его использования непосредственно на инкубаторах отечественных птицефабрик.

В связи с этим при анализе существующих методов оценки полового диморфизма эмбрионов яиц птицы и разработке нового метода путем экспериментальных исследований в данной работе учтены изложенные выше требования к нему.

Цель исследования – определить возможности неинвазивного метода определения пола эмбриона в яйце до инкубации на основании интеллектуального анализа предложенных морфометрических признаков яйца птицы.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Проведенный анализ более 100 источников по существующим методам и средствам оценки полового диморфизма эмбрионов яйца птицы при инкубации (до 7 сут) выявил пять основных методов (см. табл. 1). К методам, способным осуществлять отбраковку инкубационных яиц в срок до 7 дней, можно отнести инфракрасную спектроскопию (ИК) с помощью оптического трансмиссионного спектрометра UV-VIS-NIR [4] и компьютерное (техническое) зрение с использованием нейронной сети генетического алгоритма обратного распространения ошибки (GA-BPNN) [5].

<sup>1</sup>Gschweng D. In Deutschland ist es seit 2022 verboten, Küken zu schreddern // Die Industrie umgeht das Verbot. 2023. 11.01. <https://www.infosperber.ch/gesundheit/ernaehrung/bruderhaehne-toeten-verboten-nun-sterben-sie-im-ausland/> (дата обращения 15.09.2023).

<sup>2</sup>Akiyama R., Matsuhisa A., Pearson J.T., Tazawa H. Long-term measurement of heart rate in chicken eggs // Comp. Biochem. Physiol. Part A Mol. Integr. Physiol. 1999. Vol. 124. Is. 4. P. 483–490.

**Табл. 1.** Существующие методы определения пола эмбриона в ранние дни инкубации  
**Table 1.** Existing methods for determining the sex of an embryo in the early days of incubation

Метод определения пола	Особенность	День определения	Достоверность, %	Преимущества	Недостатки	Источник
Инфракрасная спектроскопия	Трансмиссионная спектроскопия (диапазон длин волн 360–1000 нм)	7-й	От 84,29 до 87,14	Неинвазивный метод	Большая трудоемкость определения пола	4
Компьютерное (техническое) зрение	Определение структуры и распределения по объему инкубируемого яйца кровеносных сосудов, нейронная сеть GA-BPNN	4-й	От 89,00 до 78,58 для двойных и одиночных вскрытых слоев	Неинвазивный метод, реализуется с помощью недорогих технических средств, ранний срок определения пола	Достоверность прогноза пола зависит от окраски инкубируемого яйца, наличия на его скорлупе неоднородных включений, необходимость строгой ориентации для получения изображений	5
Рамановская спектроскопия	Забор крови эмбриона, длина волны возбуждения лазера – 785 нм	3,5-й	До 90	Ранний срок определения пола, достаточная достоверность прогноза	Инвазивный метод: вскрытие оболочки яйца, что оказывает влияние на развитие эмбриона	6, 7
Флуоресцентная спектроскопия	Забор крови эмбриона, длина волны лазера – 785 нм	3,5-й	До 90	То же	То же	8
«Двухволновая» флуоресцентная спектроскопия	Забор крови эмбриона, вскрытие яйца на тупом конце яйца	4-й	До 96	Ранний срок определения пола, внутренняя мембрана яйца не повреждается, высокая достоверность прогноза	Инвазивный метод: вскрытие оболочки яйца на его тупом конце	9

Эти методы в какой-то степени соответствуют сформулированным выше требованиям по реализации их в отрасли птицеводства в качестве оценки полового диморфизма эмбрионов до появления у них ноцицепции.

Однако трансмиссионная спектрометрия требует<sup>3</sup>:

- исключения в зоне поведения анализа любого внешнего света, электронного шума, малейших вибраций и других воздействий;
- помещения особым образом исследуемого образца в специальную индивидуально разрабатываемую для него ячейку, которая не должна содержать материалы, поглощающие инфракрасное излучение (пластмасса, стекло);
- регулирования параметров микроклимата, особенно относительной влажности воздуха, так как от изменений зависит точность проведения аналитических процедур такого спектрометра.

В связи с этим процедура анализа методом ИК-спектрометрии длительна, сложна, трудоемка и мало привлекательна для инвестиций при коммерческой реализации.

Применение компьютерного зрения уменьшает затраты на трудоемкие процессы, связанные с нарастающей интенсификацией производства продукции птицефабрик. Они обеспечивают формирование большого объема разнообразных данных по оценке жизнедеятельности и прогноза половых признаков эмбриона в яйце для последующего анализа [3, 5].

Что касается разрабатываемого метода по определению структуры и распределения по объему инкубируемого яйца кровеносных сосудов, то он не имеет высокой достоверности определения пола (см. табл. 1). Во-первых, поверхность скорлупы яиц должна иметь чисто белую однородную поверхность, без крапинок и посторонних включений, иначе это вносит дополнительные ошибки в определении пола эмбриона [10]. Во-вторых, на достоверность определения влияют физиологические и биохимические процессы, протекающие в период развития эмбриона, по-

скольку в процессе инкубации значительно изменяется соотношение составных частей яйца. Например, при инкубации происходит уменьшение массы белка, особенно это резко выражено с 3-го по 5-й день (от 50,38 до 21,44%), и к 7-му дню желток достигает 65,4% массы яйца<sup>4</sup>.

При реализации метода оценки пола эмбрионов по признакам структуры кровеносных сосудов требуется применение светопрозрачной цифровой камеры в связи с потерей светопрозрачности жидкости в яйце в процессе инкубации [11], роботизированной системы идентификации яйца, кратковременного извлечения его из инкубатора, установки на ложемент идентично по всей партии инкубированных яиц, подсвеченного от источника излучения, а также получение прецизионного изображения сосудов, быстрое помещение его в инкубатор и др. Для обнаружения и получения изображения необходимо использовать дополнительную систему, которая с помощью трехкоординатного исполнительного механизма осуществит обнаружение кровеносных сосудов и получение четкого изображения их структуры. Следует заметить, что в начальные дни инкубации структура сосудов мало различима. Размеры и характер распределения сосудов по поверхности неодинаковы, поскольку эти признаки изменяются в зависимости от площади проекции яйца на получаемом изображении. Далее в процессе получения изображений необходимо выдерживать время, чтобы более вязкий, чем белок, желток перестал совершать колебательные перемещения и выбрать проекцию, обеспечивающую захват системы кровеносных сосудов. В связи с этим затраты на внедрение данного метода сопоставимы с затратами на разработку существующей роботизированной системы Ella немецкой компании Seleggt, производительностью 3600 яиц в час, позволяющей определить пол будущего цыпленка на 8–10-й день ин-

<sup>3</sup>Инфракрасная спектроскопия: <https://microbiologynote.com/ru/принцип-инфракрасной-ИК-спектроскопии-инструментальное-применение/> (дата обращения 15.09.2023).

<sup>4</sup>Физиология развивающегося эмбриона: [https://studref.com/534356/agropromyshlennost/fiziologiya\\_razvivayuschegosya\\_embriona#:](https://studref.com/534356/agropromyshlennost/fiziologiya_razvivayuschegosya_embriona#:) (дата обращения 15.09.2023).



кубации с 98%-й достоверностью инвазивным методом (см. рис. 1)<sup>5</sup>.

Предлагается метод, основанный на идее использования морфометрических признаков яйца для определения пола эмбриона [12]. В развитии рассматриваемого подхода, основанного на определении отношения продольного к поперечному линейному размеру яйца, предлагается сделать акцент на определение асимметрии морфометрических признаков яйца относительно пространственных координат. Можно предположить, что характер асимметрии куриных яиц по пространственным координатам с зародышами мужского и женского пола различный.

Стремление к симметрии формы у живых организмов – известный факт, он объясняется уменьшением энтропии в упорядоченных системах. Форма яйца будущих курочек может быть более симметричной, чем у будущих петушков, и она будет стремиться приблизиться к сфере (с целью сохранения будущего потомства) [13]. Это позволит более равномерно распределять силы на скорлупу

яйца с будущей курочкой при возможных резких механических нагрузках и повысить ее устойчивость к повреждению скорлупы по сравнению с яйцом противоположного пола [3, 14].

Разрабатываемый метод содержит следующие приемы, выполняемые с помощью комплекса компьютерных программ [15].

Определяют шесть базовых параметров цифровой модели яйца в пикселях (пкс): продольный размер  $l$ , поперечный размер  $b$ , периметр, площадь, объем и индекс формы (отношение поперечного  $b$  к продольному размеру  $l$ ).

В полученной цифровой модели яйца по значениям продольного и поперечного размера изображения яиц устанавливают центр эллипсоидной фигуры.

Исходные изображения эллипсоидных фигур яиц делят на четыре равных сектора и из каждого сектора методом зеркального отображения формируют четыре новых изображения, определяя при этом половины поперечных и продольных размеров изо-



**Рис. 1.** Внешний вид роботизированного комплекса Ella

**Fig. 1.** External view of the Ella robotic complex

<sup>5</sup>In-ovo sexing: [https://en.wikipedia.org/wiki/In-ovo\\_sexing#:~:text=In%20poultry%20farming%2C%20in-ovo%20sexing,-company%20Seleggt%20in%20November%202018](https://en.wikipedia.org/wiki/In-ovo_sexing#:~:text=In%20poultry%20farming%2C%20in-ovo%20sexing,-company%20Seleggt%20in%20November%202018) (дата обращения 15.09.2022).

бражения конкретного яйца и вычисляя их площади и периметры. Далее вписывают из центра эллипсоидной фигуры модели круг. Значение радиуса круга равно половине поперечного размера конкретного изображения яйца. Затем вычисляют площади, периметры и их суммы, разность и отношение их друг к другу на участках вне вписанного круга как у острого, так и тупого конца изображения яйца. В итоге получают 45 переменных признаков модели.

Потом симметрично от центра формируют 12 равномерных сечений перпендикулярно продольной оси  $l$  конкретного изображения яйца и определяют значения всех поперечных размеров изображения яиц, а также всех размеров их пересечений на продольной оси конкретного изображения яйца. Вычисляют их соотношения на всех участках пересечения, распределение индексов формы. Затем через равномерные сегменты углов эллипсоидной фигуры яиц ( $\Omega = 10$  град.) ее разбивают на систему из 36 радиус-векторов и определяют их модули от выбранного центра фигуры до границы контура изображений конкретного яйца.

Все полученные выше данные, характеризующие форму цифровой модели яиц и ее отклонение от симметрии, подвергают статистическому анализу. При этом выделяют только те данные, у которых уровень значимости в каждой выделенной размерной группе был наименьшим. Далее выделенные данные используют в методах машинного обучения, применимого при решении задачи бинарной классификации для малых выборок с большой размерностью исходного набора признаков.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

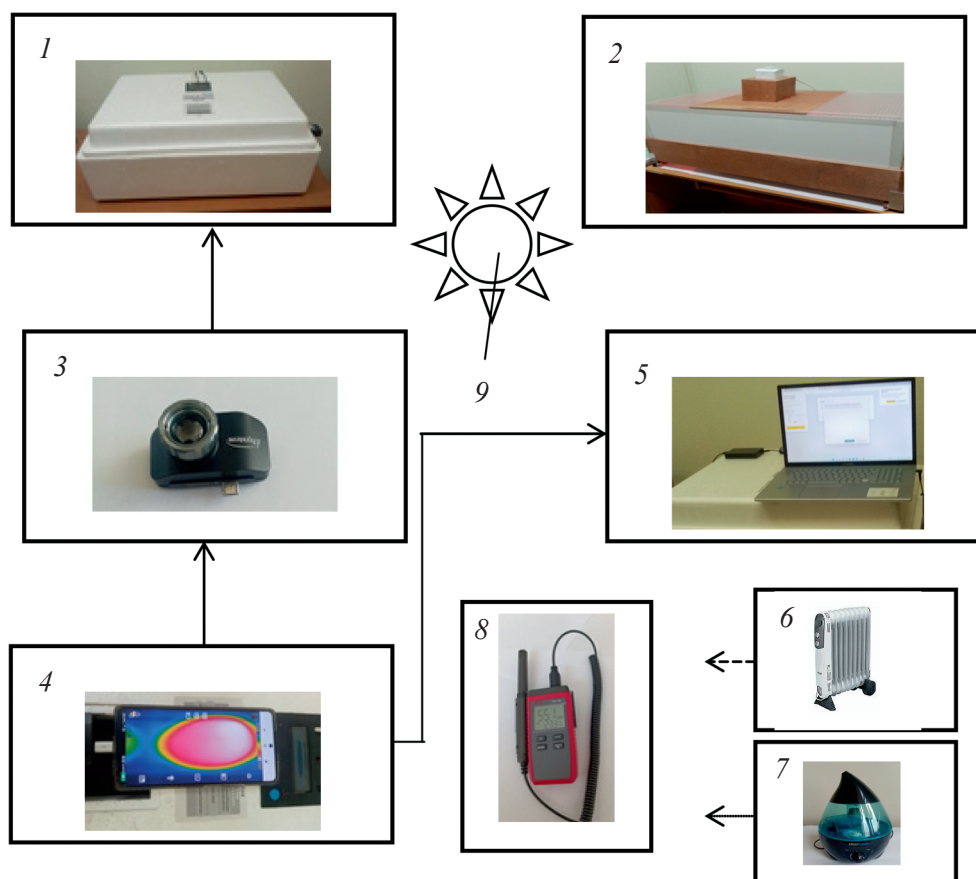
Для проведения экспериментальных исследований создана установка для оценки жизнеспособности (далее УПЖ) и создание необходимых условий для проведения инкубации и вывода цыплят. В состав установки оценки и поддержания жизнеспособности входил инкубатор 1, брудер 2, тепловизор 3, смартфон 4, ноутбук 5, электрический нагреватель 6, увлажнитель 7, прибор для из-

мерения температуры и влажности воздуха 8 и облучатель-рециркулятор воздуха ультрафиолетовый бактерицидный 9 (см. рис. 2). УПЖ была размещена в изолированной темной комнате площадью 14 м<sup>2</sup>, где с помощью маслonaполненного радиатора POLARIS модели PRE T 0915 и увлажнителя воздуха Ergorpower ER 604 поддерживали необходимые температуру и относительную влажность воздуха в соответствии с рекомендациями, изложенными в руководстве по эксплуатации на инкубатор.

В качестве инкубатора выбран отечественный Smart инкубатор «Умная наседка» ИБ2НБ-УИ, ТУ4743-002-8610978–2008, предназначенный для инкубации шести видов домашней птицы. Он, как и установка для получения изображений яйца методом компьютерного зрения, размещен в темной комнате.

Основные технические характеристики инкубатора по сопровождающей документации следующие: питание электроэнергией 12 В, 8 А, максимальная мощность 80 Вт, диапазон регулируемых температур от 37,0 до 39,5 °С, точность поддержания температуры  $\pm 0,1$  °С, вместимость эталонных куриных яиц – 104 яйца; габаритные размеры корпуса (без привода) 795 × 595 × 295 мм, масса в упаковке не более 4 кг.

Для обеспечения жизни выведенных птенцов после инкубации необходимо поместить их в специальное изолированное ограниченное замкнутое пространство, где нужно поддерживать более высокий по сравнению с отопляемым помещением тепловой режим. Кроме того, в этом пространстве должны быть созданы все условия развития такого живого организма. В первую очередь необходимо обеспечить птенцов питьевой водой с возможностью добавления в нее стимулирующих и лекарственных средств и пищи. Также необходимо своевременно удалять отходы жизнедеятельности, исключить возможность возникновения сквозного потока воздуха, возникающего через отверстия и щели в помещении, при этом осуществлять возможность подачи чистого и свежего воздуха и др. Для этих целей приобретен брудер



**Рис. 2.** Состав установки УПЖ

**Fig. 2.** Composition of the VAU (viability assessment unit)

разборный 77 с инфракрасной керамической лампой и поилкой.

Партию яиц перед инкубацией подвергли оценке на жизнеспособность с помощью овоскопа Алиса и тепловизионной микрокамеры TE-Q1.

После этого с помощью установки технического зрения получали прецизионные изображения (цифровые модели) каждого инкубационного яйца. Для получения изображений в установке использован цифровой фотоаппарат Canon EOS 2000D EF-S 18-55 III Kit с современной CMOS-матрицей ( $22,3 \times 14,9$  мм) и мощным процессором [3]. Его характеристики: глубина цвета 42 бит/пкс, диапазон светочувствительности матрицы – от 100 до 6400 ISO, кроп-фактор равен 1,6, экспозиция автоматическая с приоритетом как диафрагмы, так и выдержки, видоискатель зеркаль-

ный (TTL) с полем зрения 95%, скорость быстрой съемки – три кадра в секунду.

К каждому кадру изображения яйца применен фильтр HSV (тон, насыщенность, яркость), что позволило получить изображение без бликов с высоким разрешением изображения ( $1660 \times 1900$  пкс) и черно-белой цветностью. Таким образом, после этих преобразований в кадре сформирован единственный объект белого цвета в виде замкнутой овальной геометрической фигуры, форма которой соответствует исследуемому объекту – яйцу курицы.

Перед инкубацией все элементы установки УПЖ и партия яиц проходили дезинфекцию в соответствии с рекомендациями<sup>6</sup>. Для поддержания санитарно-профилактических мероприятий в помещении использован бактерицидный облучатель-рециркулятор воз-

<sup>6</sup>ОСТ 10-85-87. Производство инкубационных яиц сельскохозяйственной птицы. Технология прединкубационной обработки. Основные параметры. Минсельхоз России, 1988.



духа DEFENDER 2-15C. После процедуры определения и сохранения параметров изображений яиц в персональном компьютере из всей партии исследуемых яиц отбраковано восемь с низкой жизнеспособностью зародыша яйца. Куриные яйца в количестве 72 шт. в течение 21 сут подвергнуты инкубации (кросс Dekalb White). В процессе инкубации из 72 яиц вывелись 69 живых птенцов, из которых в брудере погибли четыре птенца и семь вылупились с признаками рахитизма. Из здоровых 58 птенцов достоверно идентифицировать по полу удалось лишь 38 (24 птенушка и 14 курочек). С целью повышения достоверности определения пола заключение об их половой принадлежности принимали лишь при совпадении внешних признаков перьев однодневных цыплят и их рефлекторных реакций [15].

Таким образом, исходный набор данных состоял из 38 выборок изображений, из которых формировался набор числовых геометрических характеристик. Каждый набор описан 93 признаками асимметрии. В связи с тем, что распределение практически всех параметров асимметрии отлично от нормального, для проверки гипотезы об отличии средних использовали два критерия:  $p1$  – U-критерий Манна-Уитни и  $p2$  – критерий Колмогорова-Смирнова [16].

Применение двух критериев позволит повысить достоверность подтверждения гипотезы об отличии средних (математических) ожиданий. По результатам статистического анализа, который на имеющихся данных о параметрах асимметрии не дал достоверных различий для двух рассматриваемых групп, из всех показателей выбрано 26. При этом выбирали данные с наименьшими значениями критериев  $p1$  и  $p2$  (см. табл. 2).

В полученную группу признаков вошли геометрические характеристики яйца: два признака из базовых параметров, четыре – из параметров индекса формы, основанных на поперечных и продольных размерах по отрезкам, семь – из параметров модулей радиус-векторов, 13 – из параметров признаков асимметрии по разделению на четверти и вписанной окружности.

Однако использование статистического анализа не дало ожидаемых результатов.

В связи с этим принято решение исследовать применимость методов машинного обучения для получения моделей, способных определять пол цыпленка на основе геометрических характеристик яйца и выявления наиболее информативных признаков.

При построении моделей набор функций, полученных с помощью различных методов обработки изображений, сгруппирован в несколько отдельных категорий:

- G01 (6 признаков – периметр, площадь, объем, продольные и поперечные размеры, индексы формы);

- G02 (11 признаков – индексы формы на основе сегментных поперечных и продольных размеров);

- характеристики радиус-векторов, проведенных от центра объекта к границе контура: G03 (36 признаков – длина вектора по сегменту); G04 (18 признаков – соотношение длин под углом 180 град.); G05 (18 признаков – соотношение длин под углом 90 град.);

- характеристики готового образца: G06 (16 признаков – группа 1: площади, периметры); G07 (8 признаков – группа 2: с использованием вписанной окружности); G08 (12 признаков – группа 3: усредненные характеристики);

- G09 (4 функции – расчетные объемы элементов разбиения);

- G10 (93 функции: комбинация групп G01-G09);

- G11 (53 функции: комбинация групп G01-G03).

Использованы следующие алгоритмы машинного обучения (МО): построение таких моделей, как деревья решений, случайные леса, адаптивное повышение, логистическая регрессия и машины опорных векторов (SVM) для классификации с использованием следующих конфигураций:

- M01: классификатор дерева решений с максимальной глубиной 3;

- M02: классификатор дерева решений с максимальной глубиной 5;

- M03: классификатор случайного леса с 4 оценщиками и максимальной глубиной 3;

- M04: классификатор случайного леса с 10 оценщиками и максимальной глубиной 5;

**Табл. 2.** Список параметров, выбранных на этапе статистического анализа\*

**Table 2.** List of parameters selected at the statistical analysis stage\*

Но- мер	Код параметра	Описание параметра, пкс	Диапазон (партии)	Курочки	Петушки	$p1$ (p-value)	$p2$ (p-value)
<i>Базовые параметры и асимметрия по срезам</i>							
1	x_height	$l$	956,0 ÷ 1091	1053 ± 38	984 ± 28	0,44	0,64
2	x_perim	Периметр (Per.)	2989,4 ÷ 3407,6	3234,7 ± 97,5	3218,9 ± 89,0	0,41	0,58
3	x_M1_shapeInd_01	$l/b$ в для сегмента 1	2,2 ÷ 2,7	2,4 ± 0,1	2,4 ± 0,1	0,75	0,44
4	x_M1_shapeInd_09	$l/b$ сегмента 9	36,2 ÷ 40,7	37,9 ± 1,2	37,8 ± 0,7	0,89	0,32
5	x_M1_shapeInd_10	$l/b$ для сегмента 10	34,8 ÷ 39,2	36,5 ± 1,2	36,3 ± 0,8	0,82	0,49
6	x_M1_heightPerN	$\Delta l$	79,7 ÷ 92,6	87, 7 ± 3.2	87,7 ± 2,4	0,44	0,64
<i>Параметры асимметрии по модулю радиус-векторов</i>							
7	x_M3_a080	При $\Omega = 80$ град.	479 ÷ 558	527,0 ± 19,8	527,5 ± 14	0,42	0,70
8	x_M3_a090	При $\Omega = 90$ град.	479 ÷ 570	535,4 ± 21,8	534,5 ± 15	0,33	0,64
9	x_M3_a100	При $\Omega = 100$ град.	475 ÷ 557	527,0 ± 19,8	526,1 ± 15	0,41	0,64
10	x_M3_a140	При $\Omega = 140$ град.	423 ÷ 460	440 ± 10	439 ± 9	0,66	0,44
11	x_M3_a150	При $\Omega = 150$ град.	416 ÷ 434	425 ± 9	425 ± 8	0,86	0,44
12	x_M3_a250	При $\Omega = 250$ град.	490 ÷ 516	502 ± 14	502 ± 12	0,49	0,64
13	x_M3_a300	При $\Omega = 300$ град..	461 ÷ 510	489 ± 13	487 ± 9	0,59	0,49
<i>Параметры, полученные по приему четвертей и вписанной окружности</i>							
14	x_M4_UL_height	$l$	958 ÷ 1116	1072 ± 44	1071 ± 30	0,34	0,49
15	x_M4_UL_perimDown	Per. нижней фигуры вне вписанного круга	2149 ÷ 2716	2404 ± 136	2467,5 ± 100	<i>0,18</i>	<i>0,13</i>
16	x_M4_UL_perimUpper	Per. верхней фигуры вне вписанного круга	2179 ÷ 2770	2418 ± 142	2484 ± 109	<i>0,14</i>	<i>0,13</i>
17	x_M4_UR_height	$l$	958 ÷ 1140	1072 ± 44	1070 ± 31	0,34	0,49
18	x_M4_DL_perimDown	Per. нижней фигуры вне вписанного круга	2715 ÷ 3023	2914 ± 79	2895 ± 74	0,34	0,58
19	x_M4_DL_perimUpper	Per. верхней фигуры вне вписанного круга	2715 ÷ 3023	2916 ± 81	2895 ± 74	0,30	0,39
20	x_M4_DR_perimDown	Per. p нижней фигуры вне вписанного круга	2711 ÷ 3065	2923 ± 80	2888 ± 84	0,31	0,64
21	x_M4_DR_perimUpper	Per. верхней фигуры вне вписанного круга	2711 ÷ 3063	292 ± 82	2889 ± 84	0,23	0,49
23	x_M4_UL_perim_avg	Среднее значение ( $\mu$ ) Per. левого верхнего сегмента вне круга	2164 ÷ 2580	2411 ± 137	2476 ± 104	<i>0,16</i>	<i>0,13</i>
24	x_M4_DL_perim_avg	$\mu$ Per. правого нижнего сегментов вне круга	2715 ÷ 3023	2915 ± 80	2895 ± 74	0,30	0,39
25	x_M4_DR_perim_avg	$\mu$ Per. обоих нижних сегментов вне круга	2711 ÷ 3009	2924 ± 85	2889 ± 84	0,27	0,64
26	x_M4_UR_volume	$\mu$ площади обоих правых верхних сегментов вне круга	332 384 976 ÷ 42 825 441	387 671 169 ± 28 014 778	385 584 292 ± 23 636 658	0,66	0,41

\*Самые малые значения  $p1$ ,  $p2$  у анализируемых параметров отмечены курсивом.

- M05: классификатор AdaBoost с 4 оценщиками дерева решений и максимальной глубиной 3;
- M06: классификатор опорных векторов с ядром «RBF»;
- M07: классификатор опорных векторов с «линейным» ядром;
- M08: логистическая регрессия с регуляризацией L2.

Для обработки и анализа данных использовали язык программирования Python, при реализации перечисленных алгоритмов создания и обучения моделей МО выбрана библиотека *scikit-learn*, при построении моделей использовали программу Orange 3 с графическим интерфейсом пользователя. При оценке метрик модели применен подход перекрестной проверки в двух различных вариантах<sup>7</sup>. На начальном этапе работы использовали метод исключающего контроля, в котором тестируемое подмножество состояло из одной выборки ( $k = 1$ ), а количество делений и моделей было эквивалентно количеству выборок ( $N = 38$ ). На этапе построения и выбора модели реализован  $K$ -кратный метод контроля с  $K = 3$  разбиениями и усреднением результатов.

Преимущество использования перекрестной проверки заключается в том, что она позволяет более надежно оценить производительность модели, поскольку проверяет способность модели обобщать новые данные, которые не замечены во время обучения. Это помогает предотвратить переоснащение, когда модель хорошо работает с обучающими данными, но плохо – с новыми. Таким образом, перекрестная проверка может обеспечить более точную оценку производительности модели и сделать ее более надежной для практического использования. Среди многочисленных показателей, доступных для оценки моделей классификации<sup>8</sup>, в этом исследовании использовали AUC ROC (площадь под кривой рабочей характеристики приемника) и F1-мера. F1-мера вычисляется как гармо-

ническое среднее точности и полноты, обеспечивая равный вес как для точности, так и для полноты.

Многогранность поставленной задачи потребовала ряда экспериментов, каждый из которых давал желаемый результат.

В ходе первого эксперимента проверяли правильность идентификации каждого образца с помощью методов машинного обучения. Второй эксперимент предусматривал использование различных алгоритмов машинного обучения, что привело к созданию предварительного набора моделей.

В третьем, последнем, эксперименте сформирован результирующий набор признаков и получена окончательная модель машинного обучения.

Рассмотрим подробнее ход каждого из проведенных экспериментов.

В наборах данных небольшого размера выборки ошибка при сборе данных может существенно повлиять на конечный результат. Для изучения идентифицируемого объекта из исходной выборки с использованием моделей машинного обучения использован метод *Leave-One-Out* с применением алгоритмов ML M01-M06 для групп признаков G01-G10. В итоге построено  $38 \times 10 \times 6$  моделей. Далее в набор алгоритмов машинного обучения добавлены методы M07 и M08.

По результатам первого эксперимента для формирования модели отобраны группы G01, G02, G03 и G11. Для каждой группы функций G01, G02, G03, G11 и алгоритма обучения M01-M08 построены модели с использованием перекрестной проверки  $K$ -кратности с тремя разделами. Метрики для каждой перетасовки усреднялись для получения окончательной оценки метрик классификации. Всего было сгенерировано  $4 \times 8 \times 3$  модели. Обобщенные результаты для AUC ROC и F1-меры представлены в табл. 3. Среди полученных моделей самые высокие усредненные метрики ( $AUC = 67\text{--}72\%$ ,  $F1 = 70\text{--}76\%$ ) имеют модели, сгенерированные алгоритма-

<sup>7</sup>Wong T.-T. Performance evaluation of classification algorithms by k-fold and leave-one-out cross validation // Pattern Recognition, 2015. Vol. 48. Is. 9. P. 2839–2846.

<sup>8</sup>Branco P., Torgo L., Ribeiro R.P. A Survey of Predictive Modeling on Imbalanced Domains // ACM computing surveys (CSUR). 2016. Vol. 49. Is. 2. P. 1–50

**Табл. 3.** Результаты экспериментов (перекрестная проверка  $K = 3$ )

**Table 3.** Results of the experiments (Cross-validation,  $K = 3$ )

Номер эксперимента	Группа функций	Метрики	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08
2	G01	AUC	0,484	0,495	0,627	0,543	0,536	0,382	0,559	0,464
		F1	0,56	0,54	0,61	0,59	0,59	0,51	0,51	0,54
	G02	AUC	0,664	0,655	0,659	<b>0,673</b>	<b>0,718</b>	0,532	0,618	0,464
		F1	0,68	0,68	0,68	<b>0,76</b>	<b>0,74</b>	0,61	0,49	0,58
	G03	AUC	0,427	0,509	0,489	0,602	0,532	0,495	0,386	0,436
		F1	0,45	0,53	0,52	0,61	0,58	0,47	0,51	0,48
	G11	AUC	0,614	0,584	0,698	<b>0,723</b>	<b>0,673</b>	0,591	0,309	0,432
		F1	0,58	0,59	0,65	0,68	<b>0,71</b>	0,54	0,51	0,58
	G12	AUC	0,668	0,634	0,734	<b>0,720</b>	<b>0,693</b>	0,600	0,591	0,364
		F1	0,68	0,62	0,73	<b>0,70</b>	<b>0,71</b>	0,51	0,58	0,49
	G13	AUC	0,602	0,627	0,668	0,702	0,602	0,577	0,386	0,368
		F1	0,63	0,65	0,67	0,61	0,64	0,51	0,51	0,54

ми M04 и M05, используя функции из групп G02 и G11. Метрики для группы функций G02 (11 функций) превышали показатели моделей, созданных с использованием группы функций G1 (53 функции), поэтому модели, построенные с меньшим количеством функций, дали лучшие результаты, чем модели с большим количеством. Это можно объяснить «проклятием размерности», шумом в данных и увеличением энтропии [16]. По мере увеличения количества признаков количество шума и случайности в данных также увеличивается, что усложняет извлечение значимых закономерностей и информации из данных. Методы уменьшения размерности и методы выбора признаков являются полезными инструментами для решения этих проблем и повышения производительности модели.

Целью третьего эксперимента было улучшить показатели модели за счет использования более информативных функций. Эта задача решена за счет реализации значений SHAP [17].

Из данных табл. 3 можно выделить три окончательные модели со значениями показателей точности  $AUC = 73\text{--}72\%$  и  $F1 = 69\text{--}72\%$ : Random Forest классификатор с 4 оценщиками и максимальной глубиной 3, класси-

фикатор случайного леса с 10 оценщиками и максимальной глубиной 5, классификатор AdaBoost с 4 оценщиками дерева решений и максимальной глубиной 3 (выделено полужирным шрифтом).

## ВЫВОДЫ

1. Обоснованы важнейшие требования к разработке неивазивного метода отбраковки эмбрионов в яйце птицы в течение 6–7 дней инкубации, когда у эмбрионов маловероятно возникновение перцепций и болевых ощущений.

2. Проведенный анализ новых разрабатываемых методов определения и отбраковки эмбрионов яиц в ранние дни инкубации показал, что этим требованием в большей степени соответствуют методы, использующие возможности компьютерного зрения и машинного обучения.

3. Предложен метод определения полового диморфизма до инкубации, основанный на анализе параметров асимметрии прецизионной информационной модели формы яйца, путем машинного обучения при решении задач бинарной классификации для малых выборок с большой размерностью исходного набора переменных признаков (логистиче-



ская регрессия, одиночные деревья решений, случайные леса, случайные леса в составе метода адаптивного бустинга).

4. Разработана и описана установка для экспериментального подтверждения возможности реализации предложенного метода на практике.

5. На малой выборке инкубированных цыплят, состоящей из 38 цыплят, у которых удалось достоверно идентифицировать пол, получены три окончательные модели со значением точности AUC = 73–72% и F1 = 69–72%: Random Forest классификатор с 4 оценщиками и максимальной глубиной 3; классификатор случайного леса с 10 оценщиками и максимальной глубиной 5 и классификатор AdaBoost с 4 оценщиками дерева решений и максимальной глубиной 3.

6. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенная комбинация алгоритмов машинного обучения позволяет разрабатывать модели классификации для задач, где пространство признаков значительно превышает размер выборки с неоднозначно идентифицируемыми выборками.

7. Экспериментально выявлена взаимосвязь асимметрии формы яйца при определении его полового диморфизма до инкубации, что внесло определенный вклад в решение сложной проблемы – достоверного определения пола яйца до инкубации. Это важный шаг к внедрению промышленного метода по определению пола в ближайшем будущем. При этом решается важнейшая коммерческая задача – минимизация материальных (потребление энергии, тепла и др.) и временных затрат в процессе инкубации.

8. Предлагаемая система приемов определения пола эмбриона в яйце птицы может быть интегрирована с другими системами определения качества, основанных на компьютерном зрении. Например, при обнаружении механических дефектов, сортировке, определении жизнеспособности и степени развития зародыша в яйце перед инкубацией, ранней диагностике развития болезней в нем и др.

9. Планируются дальнейшие исследования по увеличению объема выборки инкубированных цыплят и получению моделей

классификации с более высокой достоверностью определения пола эмбриона в яйце до инкубации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khaliduzzaman A., Fujitani S., Kondo N., Oga-wa Y., Fujiura T., Suzuki T., Kashimori A., Sy-duzzaman M., Rahman A.* Non-invasive characterization of chick embryo body and cardiac movements using near infrared light // *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2018. Vol. 12. P. 32–39. DOI: 10.1016/j.eaef.2018.09.002.
2. *Corion M., Keresztes J., De Ketelaere B., Saeys W.* In ovo sexing of eggs from brown breeds with a gender-specific color using visible-near-infrared spectroscopy: effect of incubation day and measurement configuration // *Poultry Science*. 2022. Vol. 101. Is. 5. P. 101782. DOI: 10.1016/j.psj.2022.101782.
3. *Алейников А.Ф.* Методы неинвазивной оценки полового диморфизма эмбрионов в яйце птицы // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2022. Т. 52. № 5. С. 105–116. DOI: 10.26898/0370-8799-2022-5-13.
4. *Zhu Z.H., Hong Q., Wu L.F., Wang Q.H., Mai M.H.* Early identification of male and female embryos based on UV/Vis transmission spectroscopy and extreme learning machine // *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2019. Vol. 39. P. 2780–2787.
5. *Zhu Z.H., Ye Z.F., Тан Y.* Non-destructive identification for gender of chicken eggs based on GA-BPNN with double hidden layers // *Journal of Applied Poultry Research*. 2021. Vol. 30. Is. 4. P. 100203. DOI: 10.1016/j.japr.100203.
6. *Xie C., Tang W., Yang C.* A review of the recent advances for the in ovo sexing of chicken embryos using optical sensing techniques // *Poultry Science*. 2023. Vol. 102. Is. 10. P. 102906. DOI: 10.1016/j.psj.2023.102906.
7. *Galli R., Preusse G., Schnabel C., Bartels T., Cramer K., Krautwald-Junghanns M.-E., Koch E., Steiner G.* Sexing of chicken eggs by fluorescence and Raman spectroscopy through the shell membrane // *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13. Is. 2. P. 0192554. DOI: 10.1371/journal.pone.0192554.
8. *Krautwald-Junghanns M.-E., Cramer K., Fischer B., Förster A., Galli R., Kremer F., Mape-sa E.U., Meissner S., Preisinger R., Preusse G.,*

- Schnabel C., Steiner G., Bartels T.* Current approaches to avoid the culling of day-old male chicks in the layer industry, with special reference to spectroscopic methods // *Poultry Science*. 2018. Vol. 97. Is. 3, 1. P. 749–757. DOI: 10.3382/ps/pex389.
9. *Preuß G., Porstmann T., Bartels T., Schnabel C., Galli R., Koch E., Oelschlägel M., Ucker mann G.* Steiner Highly sensitive and quick in ovo sexing of domestic chicken eggs by two-wavelength fluorescence spectroscopy // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2023. Vol. 415. P. 603–613.
  10. *Ching C.T.S., Wang C.-K., Li C., Chiu H.-N.* Bio-impedance-measurement-based non-invasive method for in ovo chicken egg sexing // *Biosensors*. 2023. Vol. 13. Is. 4. P. 440. DOI: 10.3390/bios130404402023.
  11. *Asil U., Nasibov E.* Sex detection in the early stage of fertilized chicken eggs via image recognition International // *Journal of Computer Science and Information Technology*. 2023. Vol. 15. N 2. P. 15202. DOI: 10.5121/ijcsit.2023.15202.
  12. *Toksoz C., Albayrak M., Yasar H.* Chicken egg sexing by using data mining process // *Fresenius Environmental Bulletin*. 2021. Vol. 30. Is. 2. P. 1373–1381.
  13. *Rosandić M., Vlahović I., Paara V.* Novel look at DNA and life – Symmetry as evolutionary forcing // *Journal of Theoretical Biology*. 2019. Vol. 483. P. 109985. DOI: 10.1016/j.jtbi.2019.08.016.
  14. *De Oliveira-Boreli F.P., Pereira D.F., Alencar Gonçalves J., Da Silva V.Z., De Alencar Nääs I.* Non-destructive assessment of hens' eggs quality using image analysis and machine learning // *Smart Agricultural Technology*. 2023. Vol. 4. P. 100161. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100161.
  15. *Aleynikov A., Osipenko I.* Information technology for culling poultry eggs before incubation based on gender // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 390. P. 03005. DOI: 10.1051/e3s-conf/202339003005.
  16. *Zhang Y., Wang H., Cheng Y., Qin X.* pyCLAMs: An integrated Python toolkit for classifiability analysis // *SoftwareX*. 2022. Vol. 18. P. 101007. DOI: 10.1016/j.softx.2022.101007.
  17. *Debie E., Shafi K.* Implications of the curse of dimensionality for supervised learning classifier systems: Theoretical and empirical analyses // *Pattern Analysis and Applications*. 2019. Vol. 22. Is. 2. P. 519–536. DOI: 10.1007/s10044-017-0649-0.
- ## REFERENCES
1. *Khaliduzzaman A., Fujitani S., Kondo N., Oga wa Y., Fujiura T., Suzuki T., Kashimori A., Syduzzaman M., Rahman A.* Non-invasive characterization of chick embryo body and cardiac movements using near infrared light. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2018, vol. 12, pp. 32–39. DOI: 10.1016/j.eaef.2018.09.002
  2. *Corion M., Keresztes J., De Ketelaere B., Saeys W.* In ovo sexing of eggs from brown breeds with a gender-specific color using visible-near-infrared spectroscopy: effect of incubation day and measurement configuration. *Poultry Science*, 2022, vol. 101, is. 5, p. 101782. DOI: 10.1016/j.psj.2022.101782.
  3. *Aleynikov A.F.* Methods for noninvasive assessment of sexual dimorphism of embryos in the poultry egg. *Sibirskij vestnik sel'skohozyajstvennoj nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*, 2022, vol. 52, no. 5, pp. 105–116. (In Russian). DOI: 10.26898/0370-8799-2022-5-13.
  4. *Zhu Z.H., Hong Q., Wu L.F., Wang Q.H., Mai M.H.* Early identification of male and female embryos based on UV/Vis transmission spectroscopy and extreme learning machine. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, vol. 39, pp. 2780–2787.
  5. *Zhu Z.H., Ye Z.F., Tan Y.* Non-destructive identification for gender of chicken eggs based on GA-BPNN with double hidden layers // *Journal of Applied Poultry Research*, 2021, vol. 30, is. 4, p. 100203. DOI: 10.1016/j.japr.100203.
  6. *Xie C., Tang W., Yang C.* A review of the recent advances for the in ovo sexing of chicken embryos using optical sensing techniques. *Poultry Science*, 2023, vol. 102, is. 10, p. 102906. DOI: 10.1016/j.psj.2023.102906.
  7. *Galli R., Preusse G., Schnabel C., Bartels T., Cramer K., Krautwald-Junghanns M.-E., Koch E., Steiner G.* Sexing of chicken eggs by fluorescence and Raman spectroscopy through the shell membrane. *PLoS ONE*, 2018, vol. 13, is. 2, p. 0192554. DOI: 10.1371/journal.pone.0192554.
  8. *Krautwald-Junghanns M.-E., Cramer K., Fischer B., Förster A., Galli R., Kremer F., Mape sa E.U., Meissner S., Preisinger R., Preusse G.,*

- Schnabel C., Steiner G., Bartels T. Current approaches to avoid the culling of day-old male chicks in the layer industry, with special reference to spectroscopic methods, *Poultry Science*, 2018, vol. 97, is. 3, 1, p. 749–757. DOI: 10.3382/ps/pex389.
9. Preuß G., Porstmann T., Bartels T., Schnabel C., Galli R., Koch E., Oelschlägel M., Uckermann G. Steiner Highly sensitive and quick in ovo sexing of domestic chicken eggs by two-wavelength fluorescence spectroscopy. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2023, vol. 415, pp. 603–613.
10. Ching C.T.S., Wang C.-K., Li C., Chiu H.-N. Bioimpedance-measurement-based non-invasive method for in ovo chicken egg sexing. *Biosensors*, 2023, vol. 13, is. 4, p. 440. DOI: 10.3390/bios130404402023.
11. Asil U., Nasibov E. Sex detection in the early stage of fertilized chicken eggs via image recognition International. *Journal of Computer Science and Information Technology*, 2023, vol. 15, no. 2, p. 15202. DOI: 10.5121/ijcsit.2023.15202.
12. Toksoz C., Albayrak M., Yasar H. Chicken egg sexing by using data mining process. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2021, vol. 30, is. 2, pp. 1373–1381.
13. Rosandić M., Vlahović I., Paara V. Novel look at DNA and life – Symmetry as evolutionary forcing. *Journal of Theoretical Biology*, 2019, vol. 483. p. 109985. DOI: 10.1016/j.jtbi.2019.08.016.
14. De Oliveira-Boreli F.P., Pereira D.F., Alencar Gonçalves J., Da Silva V.Z., De Alencar Nääs I. Non-destructive assessment of hens' eggs quality using image analysis and machine learning. *Smart Agricultural Technology*, 2023, vol. 4, p. 100161. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100161.
15. Aleynikov A., Osipenko I. Information technology for culling poultry eggs before incubation based on gender. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 390, p. 03005. DOI: 10.1051/e3s-conf/202339003005.
16. Zhang Y., Wang H., Cheng Y., Qin X. pyCLAMs: An integrated Python toolkit for classifiability analysis. *SoftwareX*, 2022, vol. 18, p. 101007. DOI: 10.1016/j.softx.2022.101007.
17. Debie E., Shafi K. Implications of the curse of dimensionality for supervised learning classifier systems: Theoretical and empirical analyses. *Pattern Analysis and Applications*, 2019, vol. 22, is. 2, pp. 519–536. DOI: 10.1007/s10044-017-0649-0.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

✉ **Алейников А.Ф.**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник: **адрес для переписки:** Россия, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, а/я 463; e-mail: fti2009@yandex.ru

**Осипенко И.В.**, ассистент кафедры, аспирант

## AUTHOR INFORMATION

✉ **Alexander F. Aleynikov**, Doctor of Science in Engineering, Professor, Head Researcher; **address:** PO Box 463, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russia; e-mail: fti2009@yandex.ru

**Ivan V. Osipenko**, Department Assistant, Post-graduate Student

Дата поступления статьи / Received by the editors 02.08.2023  
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 13.09.2023  
Дата публикации / Published 15.12.2023