

Е.А. Колесник¹ ✉М.А. Дерхо²М.Б. Ребезов^{3, 4}Г.Г. Швецов¹Е.А. Штакк¹¹Государственный университет
просвещения, Москва, Россия²Южно-Уральский государственный
аграрный университет, Троицк,
Россия³Федеральный научный центр
пищевых систем им. В.М. Горбатова
Российской академии наук, Москва,
Россия⁴Уральский государственный
аграрный университет, Екатеринбург,
Россия

✉ evgeniy251082@mail.ru

Поступила в редакцию: 01.10.2025

Одобрена после рецензирования: 11.11.2025

Принята к публикации: 26.11.2025

© Колесник Е.А., Дерхо М.А.,
Ребезов М.Б., Швецов Г.Г., Штакк Е.А.Evgeniy A. Kolesnik¹ ✉Marina A. Derkho²Maksim B. Rebezov^{3, 4}Gleb G. Shvetsov¹Ekaterina A. Shtakk¹¹Federal State University of Education,
Moscow, Russia²South Ural State Agrarian University,
Troitsk, Russia³Gorbatov Federal Research Center for
Food Systems, Moscow, Russia⁴Ural State Agrarian University,
Yekaterinburg, Russia

✉ evgeniy251082@mail.ru

Received by the editorial office: 01.10.2025

Accepted in revised: 11.11.2025

Accepted for publication: 26.11.2025

© Kolesnik E.A., Derkho M.A., Rebezov M.B.,
Shvetsov G.G., Shtakk E.A.

Дифференциальные цитофизиологические маркеры эритроидных прекурсоров, зрелых эритроидных клеток и теней эритроидных клеток вследствие эриптоза в организме ЖИВОТНЫХ

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Представлены дифференциальные диагностические маркеры интактных полихроматофильных эритробластов, зрелых эритроцитов и теней эритробластов, теней эритроцитов в нормальной картине периферической крови на модельном организме животных — птиц (*Aves*).

Методы. Морфофизиологическую характеристику эритробластов, эритроцитов и теней эритробластов, теней эритроцитов осуществляли по мазкам крови птиц *Gallus gallus* L. ($n = 40$, окрашенных по Паппенгейму) от четырех возрастных групп (*Postembryonalis* — P1, P7, P23 и P42: 1, 7, 23 и 42 дня постэмбрионального онтогенеза) промышленного стада. Идентификацию и цитофизиологический анализ теней профиля ядра, цитоплазмы, клетки и неидентифицированных теней клеток выполняли по калиброванным микрофотографиям высокого разрешения ($n = 158$).

Результаты. В организме модельных животных — птиц — морфологические изменения эритробластов периферического кровотока в результате эриптоза имеют цитофизиологический характер, соответствующий статусу клинически здорового животного. Апоптотические изменения бластных и клеточных форм эритроидного звена в периферическом кровотоке птиц группируются в такие ядерно-цитоплазматические образования различной степени выраженности, как цитолиз, фрагментация цитоплазмы, кариопикноз, кариорексис, кариолизис, фрагментация хроматина, хроматинолиз, вакуолизация цитоплазмы. Итогом изучения явлений эриптоза в периферическом звене кровотока у птиц явились разработка и формулирование дифференциальных критериев — маркеров теней эритроидных клеток с клиническим, общебиологическим и дидактическим значением.

Ключевые слова: тени клеток, апоптоз, эриптоз, полихроматофильные эритробласты, эритроциты, цитолиз, фрагментация цитоплазмы, кариопикноз, кариорексис, кариолизис, фрагментация хроматина, хроматинолиз, вакуолизация, морфология крови, цитофизиология, морфофизиология, адаптационный гомеостазис

Для цитирования: Колесник Е.А., Дерхо М.А., Ребезов М.Б., Швецов Г.Г., Штакк Е.А. Дифференциальные цитофизиологические маркеры эритроидных прекурсоров, зрелых эритроидных клеток и теней эритроидных клеток вследствие эриптоза в организме животных. *Аграрная наука*. 2025; 401(12): 36–43.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-401-12-36-43>

Differential cytophysiological markers of erythroid precursors, mature erythroid cells and shadows of erythroid cells in as a result of eryptosis in organism of animals

ABSTRACT

Relevance. Differential diagnostic markers of intact polychromatophilic erythroblasts, mature erythrocytes and erythroblast ghosts, and erythrocyte ghosts in normal peripheral blood are presented in model organism of animals — birds (*Aves*).

Methods. Morphophysiological characterization of erythroblasts, erythrocytes and erythroblast shadows, and erythrocytes shadows was performed using blood smears of *Gallus gallus* L. birds ($n = 40$, stained with Pappenheim) from four age groups (*Postembryonalis* — P1, P7, P23, and P42: days 1, 7, 23, and 42 of postembryonic ontogenesis) of a industrial herd. Identification and cytophysiological analysis shadows profile nucleus, shadows profile cytoplasm, shadows profile cell, and unidentified cell shadows were performed using calibrated high-resolution micrographs ($n = 158$).

Results. In a model organism of animals — birds — morphological changes in erythroblasts in the peripheral bloodstream as a result of eryptosis have a cytophysiological character consistent with the status of a clinically healthy animal. Apoptotic changes in blast and cellular forms of the erythroid component in the peripheral bloodstream of birds are grouped into nucleocytoplasmic formations of varying severity, including: cytolysis, cytoplasmic fragmentation, karyopyknosis, karyorrhexis, karyolysis, chromatin fragmentation, chromatinolysis, and cytoplasmic vacuolization. The study of eryptosis in the peripheral bloodstream of birds resulted in the development and formulation of differential criteria — markers of erythroid cell shadows — with clinical, general biological and didactic significance.

Key words: shadow cells, smudge cells, apoptosis, eryptosis, polychromatophilic erythroblasts, erythrocytes, cytolysis, cytoplasm fragmentation, karyopyknosis, karyorrhexis, karyolysis, chromatin fragmentation, chromatinolysis, vacuolization, blood morphology, cytophysiology, morphophysiology, adaptive homeostasis

For citation: Kolesnik E.A., Derkho M.A., Rebezov M.B., Shvetsov G.G., Shtakk E.A. Differential cytophysiological markers of erythroid precursors, mature erythroid cells and shadows of erythroid cells in as a result of eryptosis in organism of animals. *Agrarian science*. 2025; 401(12): 36–43 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-401-12-36-43>

Введение/Introduction

В отличие от млекопитающих (*Mammalia*), для организма птиц (*Aves*) физиологической нормой является циркуляция в периферическом кровотоке эритробластов разной степени зрелости [1–5] и теней эритробластов [4, 5], теней эритроцитов [4, 5], являющихся следствием адаптационного гомеостазиса [6–14]. Так, регулярное появление эритробластов и теней эритроидных клеток в периферическом кровотоке у млекопитающих, оцениваемое в полях зрения при светооптической микроскопии мазков периферической крови, может свидетельствовать о формах анемии в острой фазе [15, 16] и злокачественном перерождении в системе красной крови, то есть раке красного роста крови [17–19].

В общебиологическом аспекте необходимо отметить то, что особенности морфологии и физиологии организма птиц во многом интересны тем, что данная систематическая группа животных объединяет в своей природе структуры прогрессивных пресмыкающихся (*Reptilia*) — динозавров (*Dinosauria*) — с опорно-двигательным аппаратом, имеющим вариации адаптаций к тетраподности (четыреугоности), диподности (двуногости), воспроизведенных у птиц, адаптаций скелета к полету, прогрессивно развитый головной мозг, в том числе структуры мозжечка в сравнении с амфибиями (*Amphibia*), обеспечивающие развитую координацию локомоции в пространстве ареала, и имеют такие ароморфозы, как полноценное четырехкамерное сердце, интенсивный углеводный и липидный метаболизм, что в итоге филогенетически отразилось у птиц в гомойотермности (теплокровности).

Теплокровность явилась исходом и одновременно реализацией биофизических звеньев функциональной системы адаптационного гомеостаза у пернатых, существенно расширив приспособительные возможности организма птиц в освоении экологических ниш. Тем самым у птиц реализовались ароморфозы, имеющие черты конвергентной эволюции с млекопитающими [20] от рептилий. При этом возникшие биохимические, биофизические и физиологические потребности организма птиц в более интенсивном энергетическом метаболизме, газообмене и буферных свойствах в регуляции кислотно-основного равновесия полноценно обеспечились системой крови [21–24]. Эти приспособительные черты гомеостаза у птиц отразились в интенсификации прежде всего митохондриального синтеза гема, синтеза глобиновых цепочек в молекулярной сборке гемоглобина в цитоплазме эритроидных клеток [2–4].

Соответствующая вышеотмеченным адаптациям филогенетическая и далее онтогенетическая активация жизненного цикла эритробластов (лат. *Erythroblastus* — эквивалентный синоним нормобластов лат. *Normoblastus* [3]),

созревающих и зрелых эритроцитов, в итоге отразилась на повышении апоптоза, то есть эриптоза (*eryptosis*) [4, 5].

Активный эриптоз — нормальная генетически запрограммированная гибель интенсивно «отработавших» свой жизненный цикл эритроидных клеток с обязательным образованием морфофизиологических структур — теней, то есть структурных остатков бластных и клеточных форм, является важным методическим критерием для дифференциальной характеристики системы крови в практике клинической лабораторной диагностики [25–29].

Изыскания реакций процесса эриптоза на субклеточном и молекулярном уровнях, связанные с ролью плазмолеммы эритроидных клеток (и (или) бластов) [30–34] и дистрофических изменений внутриклеточного обмена веществ, нашли отражение в изучении устойчивости системы крови к действию эндогенных, экзогенных биотических и абиотических факторов и в разработке таргетной терапии злокачественных новообразований [35–39].

Причинно-следственное понимание явления и процесса эриптоза важно в дидактическом аспекте при обучении учащихся школ, колледжей, университетов, аспирантов по медико-биологической направленности в общебиологических компетенциях, специальностях биологических, ветеринарной и гуманитарной медицины.

Подчеркнем, что термин «эриптоз» как специальная разновидность апоптоза (*apoptosis*) эритроидных бластов и клеток был введен в научный обиход сравнительно недавно [25–29], хотя исследования по теням эритроидных клеток имеют продолжительную эмпирическую историю [30].

Специальные исследования, непосредственно посвященные вопросам морфофизиологических изменений эритробластов и эритроцитов вследствие эриптоза, малочисленны [5, 19, 29, 31].

Цель работы — экспериментально-аналитическая разработка дифференциальных критериев цитофизиологических маркеров производных эриптоза — теней прекурсоров (предшественников) зрелых эритроцитов, то есть эритробластов и теней нормоцитов, то есть теней зрелых эритроцитов (рис. 1).

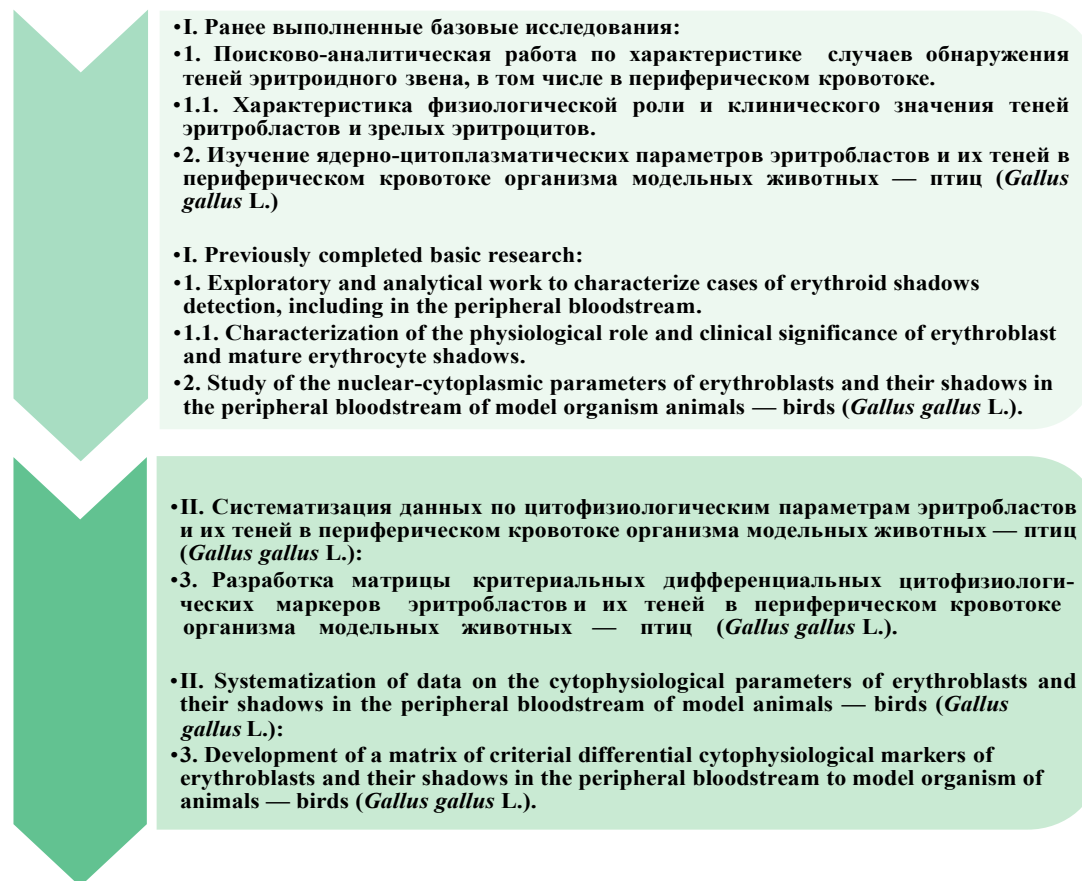
Материалы и методы исследования / Materials and methods

Экспериментальная часть работы выполнена на ООО «Чибаркульская птица» (Чибаркульский р-н, Челябинская обл., Россия).

Объектом исследования служили бройлерные цыплята *Gallus gallus* L. кросса *Hubbard ISA F15* промышленного стада, из которых в цехе выращивания (клеточное содержание), согласно принципам случайной выборки и сбалансированных групп, сформировали четыре группы ($n = 40$).

Рис. 1. Схема исследования

Fig. 1. Study scheme



Возраст цыплят в каждой из групп составил 1, 7, 23 и 42 дня постэмбрионального онтогенеза (*Postembryonalis*) — P1, P7, P23 и P42 соответственно.

Экспериментальные группы кур *Gallus gallus* L. по *Anamnesis vitae* клинически (*status praesens*) соответствовали *fusce sanitas status* — статусу здоровых животных.

Кормление и содержание цыплят осуществляли в соответствии с зооигиеническими нормами согласно рекомендациям¹.

Выполненные исследования соответствуют принципам гуманного обращения с подопытными животными, изложенным в директивах Европейского парламента и Совета ЕС по охране животных, используемых в научных целях (директива № 2010/63/EU)².

Материалом исследований служила цельная кровь, которую собирали в стандартизированные вакуумные пробирки с ЭДТА путем декапитации цыплят-бройлеров в суточном и 7-суточном возрасте и прижизненно — пункцией подкрыльцовой вены у 23- и 42-дневных цыплят [3–5]. Окраску мазков крови производили по Паппенгейму (А. Pappenheim) [3–5]. Микрофотографии были получены с помощью биологического микроскопа

МББ-1А («ЛОМО», Россия), оснащенного микрографической окулярной видеокамерой с матрицей разрешением 5 мегапикселей (Full HD High resolution HAYEAR CMOS 5.0 Megapixel microscope video camera, Китай) с визуализацией в программе TourView³ (TourTek Photonics, Китай) [3–5], с построенной светодиодной системой освещения микропрепаратов белым спектром (реализован принцип Кёлера (A. Köhler) [3–5]).

Для наиболее качественного изображения клеток крови применяли 90-кратный апохроматический объектив масляной иммерсии с апертурой 1,3 («ЛОМО», Россия), который позволяет получать микрофотографии со специальной коррекцией хроматических аберраций. Калибровку видеокамеры проводили по шкале объект-микрометра для проходящего света с ценой деления 0,01 мм («ОМП», «ЛОМО», Россия) в программе TourView. На предмет изучения учитываемых клеток крови и теней клеток проведен анализ 158 (n = 158) выполненных микрофотографий полей зрения с форменными элементами периферической крови.

В программе TourView определяли масштаб изображений, на микрофотографиях размещали масштабную линейку с ценой деления в 10

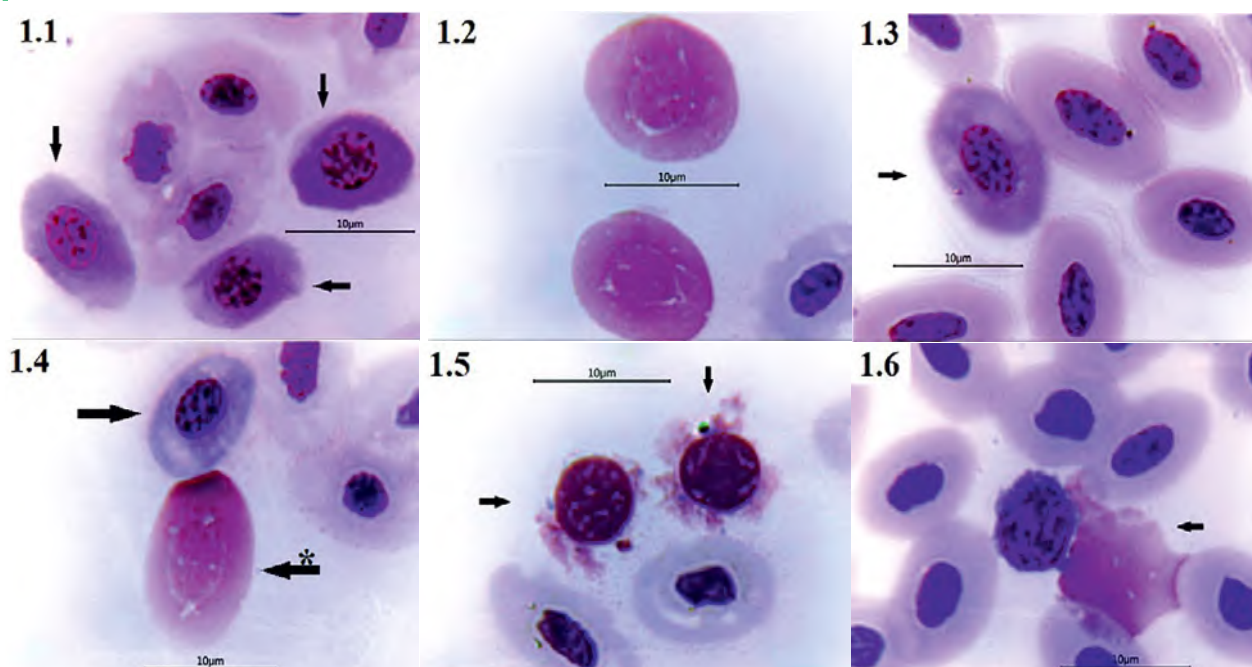
¹ Руководство Hubbard ISA.
<http://hubbardbreeders.com>

² Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных целях.
https://ruslasa.ru/wp-content/uploads/2017/06/Directive_201063_rus.pdf

³ <http://www.touptek.com>

Рис. 2. Периферическая кровь цыплят *Gallus gallus* L., возраст птиц указан в сутках (сут.), гематологическая окраска по Паппенгейму, цена деления масштабной линейки микрофотографий 10 микрометров (10 μm). На микрофотографиях представлены: 1.1 — предшественники (прекурсоры) зрелых эритроцитов — полихроматофильные эритробласты, показанные стрелкой, и зрелые эритроциты (1-е сут.); 1.2 — тени эритробластов, структурированные формами с профилем тени «цитоплазмы», «ядра» и «клетки», и зрелый эритроцит (23-е сут.); 1.3 — полихроматофильный эритроцит (нормоцит), показанный стрелкой, и зрелые эритроциты (7-е сут.); 1.4 — полихроматофильный эритроцит (нормоцит), показанный стрелкой, тень эритробласта, структурированная формами с профилем тени «цитоплазмы», «ядра» и «клетки», показанная стрелкой со звездочкой, и зрелые эритроциты (1-е сут.); 1.5 — неидентифицированные тени, структурированные с профилем тени «ядра», показанные стрелкой, и зрелые эритроциты (23-е сут.); 1.6 — неидентифицированная аморфная тень, показанная стрелкой, зрелые эритроциты и малый лимфоцит (42-е сут.)

Fig. 2. Peripheral blood of *Gallus gallus* L. chickens, the age of birds is indicated in days (days), Pappenheim hematological staining, the price of dividing a scale line of micrographs of 10 micrometers (10 μm). The micrographs show: 1.1 — precursors of mature erythrocytes — polychromatophilic erythroblasts, shown by an arrow, and mature erythrocytes (Day 1); 1.2 — shadows of erythroblasts, structured in shapes with a shadow profile of "cytoplasm", "nuclei" and "cells", and mature erythrocyte (Day 23); 1.3 — polychromatophilic erythrocyte (normocyte), shown by an arrow, and mature erythrocytes (Day 7); 1.4 — polychromatophilic erythrocyte (normocyte), shown by an arrow, the shadow of the erythroblast, structured by shapes with the profile of the shadow of the "cytoplasm", "nucleus" and "cells", shown by an arrow with an asterisk, and mature erythrocytes (Day 1); 1.5 — unidentified shadows structured with the shadow profile of the "nucleus", shown by an arrow, and mature erythrocytes (day 23); 1.6 — unidentified amorphous shadow, shown by an arrow, mature erythrocytes and a small lymphocyte (day 42)



микрометров (μm) (рис. 2). Ранее по данным эритроидным формам определяли ядерно-цитоплазматические параметры с соответствующей проверкой экспериментальных данных методами математического анализа на нормальность распределения и определения степени отличия величин выборок от генеральной совокупности (рис. 1) [5].

Собственно, текущее исследование включало аналитическую работу по выявлению и характеристике с систематизацией дифференциальных критериев маркеров теней эритробластов, неидентифицированных теней клеток, в сравнительном аспекте с интактными эритробластами в периферическом кровотоке организма модельных животных — птиц *Gallus gallus* L. (рис. 1).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Тени эритроидных клеток [2–4] образуются в результате эриптоза — специального типа апоптоза клеток (рис. 2) [5, 25, 26].

Направления апоптотических изменений структуры бластных и клеточных форм в перифери-

ческой крови кур обусловлены метаболитными, в том числе адаптационными, реакциями на организмном, системном, тканевом и клеточном уровнях [2–7, 9, 10, 22, 23]. Характер формирования эриптозных изменений на бластном (или) клеточном, субклеточном уровнях в целом у птиц обусловлен высокоинтенсивным обменом веществ и стадийностью онтогенетических реакций адаптационного гомеостаза [5, 7, 22].

Цитофизиологические изменения бластов и клеток в результате апоптоза (в основе своей эриптоза) группируются в критерии с морфологическими признаками по структуре профиля «ядра», «цитоплазмы», формы, то есть контуров «клетки» в различной степени выраженности (рис. 2, табл. 1) [5].

Идентифицируемые и неидентифицируемые тени бластов и клеток в периферическом кровотоке у птиц нередко имеют профили «вакуолей» с различной степенью сформированности (рис. 2, табл. 1) [5].

Тотальный окрас данных апоптотических образований при применении стандартизированного гистологического пигментного протокола по

Таблица 1. Матрица критериальных дифференциальных маркеров теней эритроидных прекурсоров и неидентифицированных теней в периферической крови кур *Gallus gallus* L. (n = 158)

Table 1. Matrix of criterial differential markers of shadows erythroid precursor and unidentified shadows in the peripheral blood of chickens *Gallus gallus* L. (n = 158)

Критериальный дифференциальный маркер (Criterial differential marker)		Цитофизиологическая гематологическая группа (Cytophysiological hematological group)	
		1. Структурированная тень эритробластов (Structured shadow of erythroblasts)	2. Неидентифицированная тень эритроидных клеток (Unidentified shadow of erythroid cells)
1. Группы (Groups)	1.1.1. Структурированная форма с профилем тени «ядра» (Structured form with profile a shadow of “nucleus”)	+	+/-
	1.1.2. Структурированная форма с профилем тени «цитоплазмы» (Structured form with profile a shadow of “cytoplasm”)	+	+/-
	1.1.3. Структурированная форма с профилем тени «клетки» (Structured form with profile a shadow of “cell”)	+	-
	1.2. Цитолиз (Cytolysis)	+	+
	1.2.1. Фрагментация цитоплазмы (Cytoplasm fragmentation)	-	+
	1.4. Кариопикноз (Karyopyknosis)	-	+/-
	1.5. Кариорексис (Karyorrhexis)	-	+/-
	1.6. Кариолизис (Karyolysis)	+	+
2. Межгрупповой (Intergroup)	1.6.1. Фрагментация хроматина (Chromatin fragmentation)	-	+/-
	2.1. Хроматинолиз (Chromatinolysis)	+	+
	2.2. Окрас светло-пурпурного цвета с красноватым оттенком (The color is light purple with a reddish tint)	+	+
	2.3.1. Вакуолизация цитоплазмы с аморфным типом тени цитоплазмы (Vacuolization of the cytoplasm with an amorphous type a shadow of cytoplasm)	+/-	+/-
	2.3.2. Вакуолизация цитоплазмы с губчатоподобным типом тени цитоплазмы (Vacuolization of the cytoplasm with an sponge-like type a shadow of cytoplasm)	+/-	+/-

Паппенгейму [3] — светло-пурпурного цвета с красноватым оттенком; то есть структура данных теней воспринимает преимущественно пигмент эозин и имеет характер реакции среды ближе к щелочному (рис. 2, табл. 1) [5].

Эриптоз у птиц является прежде всего следствием и показателем онтогенетических адаптаций гомеостаза [4–7, 10, 22, 23]. Эриптоз у позвоночных (*Vertebrata*), включая человека, может быть следствием адаптационных реакций организма к действию экзогенных и эндогенных факторов, проявляющихся в системе крови [17, 39, 40].

Выводы/Conclusions

1. В организме птиц, в частности кур, формирования морфологических изменений эритробластов периферического кровотока в результате эриптоза имеют цитофизиологический, то есть нормальный, характер.

2. Апоптотические изменения бластных и клеточных форм эритроидного звена в периферическом кровотоке кур группируются в эриптозные профили «ядерно-цитоплазматических» образований и контуры «клеток» с различной степенью выраженности.

Таким образом, по результатам изучения явлений эриптоза в периферическом звене кровотока у птиц были разработаны и сформулированы дифференциальные критерии — маркеры теней эритроидных клеток, имеющих клиническое, общепатологическое и дидактическое значение.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Bhattacharjee A. Avian Erythrocytes and Agranulocytes — a Review. *Science Reviews — Biology*. 2023; 2(2): 21–29. <https://doi.org/10.57098/SciRevs.Biology.2.2.2>
- Липунова Е.А., Скоркина М.Ю. Система красной крови: сравнительная физиология. Монография. Белгород: Изд-во БелГУ. 2004; 216.
- Колесник Е.А., Дерхо М.А. Характеристика проблематики морфофизиологии клеток крови неонатального онтогенеза кур. Сообщение II. Характеристика дифференциальных морфофизиологических маркеров форменных элементов крови птиц. *АПК России*. 2019; 26(4): 644–652. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4385940>

REFERENCES

- Bhattacharjee A. Avian Erythrocytes and Agranulocytes — a Review. *Science Reviews — Biology*. 2023; 2(2): 21–29. <https://doi.org/10.57098/SciRevs.Biology.2.2.2>
- Lipunova E.A., Skorkina M.Yu. The red blood system. Comparative physiology. Monograph. Belgorod: *Belgorod State University Publishing House*. 2004; 216 (in Russian).
- Kolesnik E.A., Derkho M.A. Characterizing the morphophysiology problems of blood cells of chickens' neonatal ontogenesis. Report II. Characterizing the differential morphophysiological markers of chickens' blood cells. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2019; 26(4): 644–652 (in Russian). <https://doi.org/10.5281/zenodo.4385940>

4. Колесник Е.А., Дерkho М.А., Ребезов М.Б. Функциональные морфоденситометрические параметры хроматина ядра и цитоплазмы эритробластов и эритроцитов птиц в постэмбриональном онтогенезе. *Аграрный вестник Урала*. 2024; 24(1): 59–85. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-01-59-85>
5. Колесник Е.А., Дерkho М.А., Ребезов М.Б. Формы дегенерации клеток крови, их физиологическое и клиническое значение, механизмы образования, тени клеток в мазках крови птиц. *Аграрная наука*. 2024; 378(1): 65–74. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-378-1-65-74>
6. Цыганков Е.М., Менькова А.А., Алейников И.М. Профилактика стрессов в мясном птицеводстве. Брянск: *Брянский государственный аграрный университет*. 2025; 173.
7. Колесник Е.А. Термин, понятие об адаптационном гомеостазисе, его гипотеза, теория и практика. *Системный анализ в медицине (CAM 2022). Материалы XVI Международной научной конференции*. Благовещенск: *Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания*. 2022; 13–16. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7676415>
8. Hammouche D., Mouss A.K., Meziane R., Ikhlef H. Study of the Physiological Responses of Two Strains of Laying Hens under Thermal Challenge. *Biology and Life Sciences Forum*. 2024; 36(1): 3. <https://doi.org/10.3390/blsf2024036003>
9. Hammouche D., Mouss A.K., Meziane R. Impact of climate change on thermoregulation, blood attributes and production performance in laying hens. *Journal of Livestock Science and Technologies*. 2025; 13(1): 39–46. <https://doi.org/10.22103/jlst.2024.23828.1555>
10. Xue G. *et al.* Intermittent mild cold stimulation improves the immunity and cold resistance of spleens in broilers. *Poultry Science*. 2021; 100(12): 101492. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101492>
11. Yusifova A., Aslanova S., Asadova B., Mammadova I., Safarova A. Effect of micronutrients on the peculiarities of growth and development of maize plants. *International Journal of Biosciences*. 2025; 26(6): 55–60. <https://dx.doi.org/10.12692/ijb/26.6.55-60>
12. Gunawan R.A., Sunarno S., Djaelani M.A., Kasiyati K. Leukocyte Profile of Broiler Chickens (*Gallus domesticus*) After Consumption of Feed With Spirulina (*Spirulina* sp.) Feed Additives and Liquid Nano Chitosan. *AL-Kauniyah: Jurnal Biologi*. 2025; 18(2): 303–317. <https://doi.org/10.15408/kauniyah.v18i2.40513>
13. Lestari D. *et al.* Disease resistance traits of IPB-D2 chickens: Characterization of IgY concentrations, Newcastle disease antibody titers, and leukocyte profiles. *Veterinary World*. 2025; 18(1): 172–177. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2025.172-177>
14. Kolokolnikova T., Dymkov A., Borisenko S., Kavtarashvili A. Method of Increasing Bird Adaptation in the Early Stages of Embryogenesis. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research. The Fifth Technological Order: Prospects for the Development and Modernization of the Russian Agro-Industrial Sector (TFTS 2019)*. 2020; 393: 399–402. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.200113.211>
15. Diwan A., Koesters A.G., Capella D., Geiger H., Kalfa T.A., Dorn II G.W. Targeting erythroblast-specific apoptosis in experimental anemia. *Apoptosis*. 2008; 13(8): 1022–1030. <https://doi.org/10.1007/s10495-008-0236-3>
16. Liu S., Tsyplenkova S., Fillebeen C., Pantopoulos K. Hypoferremic Response to Chronic Inflammation Is Controlled via the Hemojuvelin / Hepsidin / Ferroportin Axis and Does Not Involve Hepsidin-Independent Regulation of Fpn mRNA. *American Journal of Hematology*. 2025; 100(8): 1323–1333. <https://doi.org/10.1002/ajh.27710>
17. Hristoskova S., Holzgreve W., Hahn S., Rusterholz C. Human mature erythroblasts are resistant to apoptosis. *Experimental Cell Research*. 2007; 313(5): 1024–1032. <https://doi.org/10.1016/j.yexcr.2006.12.018>
18. Чумакова С.П., Уразова О.И., Зима А.П., Новицкий В.В. Особенности физиологии эритроцитов. Гемолиз и эритроцитоз. *Гематология и трансфузиология*. 2018; 63(4): 343–351. <https://doi.org/10.25837/HAT.2019.51.80.003>
19. Dehghan S., Kheshtchin N., Hassannezhad Sh., Soleimani M. Cell death classification: A new insight based on molecular mechanisms. *Experimental Cell Research*. 2023; 433(2): 113860. <https://doi.org/10.1016/j.yexcr.2023.113860>
20. Никитина А.Р., Зиякаева К.Р., Каюмова А.Ф., Шамратова В.Г. Оптические и морфометрические характеристики нейтрофилов крови крыс в условиях воздействия медно-цинковой колчеданной руды. *Журнал медико-биологических исследований*. 2025; 13(2): 222–232. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z244>
21. Череменина Н.А., Веремеева С.А., Краснolocboва Е.П. Биохимические показатели крови индеек мясного кросса в период роста. *Вестник КрасГАУ*. 2025; 218(5): 155–168. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-5-155-168>
4. Kolesnik E.A., Derkho M.A., Rebezov M.B. Functional morpho-densitometric parameters of chromatin of the nucleus and cytoplasm of erythroblasts and red blood cells of birds in postembryonic ontogenesis. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24(01): 59–85 (in Russian). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-01-59-85>
5. Kolesnik E.A., Derkho M.A., Rebezov M.B. Forms of degeneration of blood cells, their physiological and clinical significance, mechanisms of formation, shadows of cells in blood smears of birds. *Agrarian science*. 2024; 378(1): 65–74 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-378-1-65-74>
6. Tsygankov E.M., Menkova A.A., Aleinikov I.M. Stress prevention in poultry farming. Bryansk: *Bryansk State Agrarian University*. 2025; 173 (in Russian).
7. Kolesnik E.A. Term, concept of adaptive homeostasis, its hypothesis, theory and practice. *System Analysis in Medicine (CAM 2022). Proceedings of the XVI International Scientific Conference*. Blagoveshchensk: *Far Eastern Scientific Center for Physiology and Pathology of Respiration*. 2022; 13–16 (in Russian). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7676415>
8. Hammouche D., Mouss A.K., Meziane R., Ikhlef H. Study of the Physiological Responses of Two Strains of Laying Hens under Thermal Challenge. *Biology and Life Sciences Forum*. 2024; 36(1): 3. <https://doi.org/10.3390/blsf2024036003>
9. Hammouche D., Mouss A.K., Meziane R. Impact of climate change on thermoregulation, blood attributes and production performance in laying hens. *Journal of Livestock Science and Technologies*. 2025; 13(1): 39–46. <https://doi.org/10.22103/jlst.2024.23828.1555>
10. Xue G. *et al.* Intermittent mild cold stimulation improves the immunity and cold resistance of spleens in broilers. *Poultry Science*. 2021; 100(12): 101492. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101492>
11. Yusifova A., Aslanova S., Asadova B., Mammadova I., Safarova A. Effect of micronutrients on the peculiarities of growth and development of maize plants. *International Journal of Biosciences*. 2025; 26(6): 55–60. <https://dx.doi.org/10.12692/ijb/26.6.55-60>
12. Gunawan R.A., Sunarno S., Djaelani M.A., Kasiyati K. Leukocyte Profile of Broiler Chickens (*Gallus domesticus*) After Consumption of Feed With Spirulina (*Spirulina* sp.) Feed Additives and Liquid Nano Chitosan. *AL-Kauniyah: Jurnal Biologi*. 2025; 18(2): 303–317. <https://doi.org/10.15408/kauniyah.v18i2.40513>
13. Lestari D. *et al.* Disease resistance traits of IPB-D2 chickens: Characterization of IgY concentrations, Newcastle disease antibody titers, and leukocyte profiles. *Veterinary World*. 2025; 18(1): 172–177. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2025.172-177>
14. Kolokolnikova T., Dymkov A., Borisenko S., Kavtarashvili A. Method of Increasing Bird Adaptation in the Early Stages of Embryogenesis. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research. The Fifth Technological Order: Prospects for the Development and Modernization of the Russian Agro-Industrial Sector (TFTS 2019)*. 2020; 393: 399–402. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.200113.211>
15. Diwan A., Koesters A.G., Capella D., Geiger H., Kalfa T.A., Dorn II G.W. Targeting erythroblast-specific apoptosis in experimental anemia. *Apoptosis*. 2008; 13(8): 1022–1030. <https://doi.org/10.1007/s10495-008-0236-3>
16. Liu S., Tsyplenkova S., Fillebeen C., Pantopoulos K. Hypoferremic Response to Chronic Inflammation Is Controlled via the Hemojuvelin / Hepsidin / Ferroportin Axis and Does Not Involve Hepsidin-Independent Regulation of Fpn mRNA. *American Journal of Hematology*. 2025; 100(8): 1323–1333. <https://doi.org/10.1002/ajh.27710>
17. Hristoskova S., Holzgreve W., Hahn S., Rusterholz C. Human mature erythroblasts are resistant to apoptosis. *Experimental Cell Research*. 2007; 313(5): 1024–1032. <https://doi.org/10.1016/j.yexcr.2006.12.018>
18. Chumakova S.P., Urazova O.I., Zima A.P., Novitsky V.V. Features of the Physiology of Erythrocytes. Hemolysis and Eryptosis. *Russian journal of hematology and transfusiology*. 2018; 63(4): 343–351 (in Russian). <https://doi.org/10.25837/HAT.2019.51.80.003>
19. Dehghan S., Kheshtchin N., Hassannezhad Sh., Soleimani M. Cell death classification: A new insight based on molecular mechanisms. *Experimental Cell Research*. 2023; 433(2): 113860. <https://doi.org/10.1016/j.yexcr.2023.113860>
20. Nikitina A.R., Ziyakaeva K.R., Kayumova A.F., Shamratova V.G. Optical and Morphometric Parameters of Neutrophils in Rats Exposed to Copper-Zinc Pyrite Ore. *Journal of Medical and Biological Research*. 2025; 13(2): 222–232 (in Russian). <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z244>
21. Cheremenina N.A., Veremeeva S.A., Krasnolocbova E.P. Biochemical blood parameters of meat-cross turkeys during the growth period. *Vestnik KrasSAU*. 2025; 218(5): 155–168 (in Russian). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-5-155-168>

22. Tang X. *et al.* Cecal microbiota transplantation enhances calcium retention through modulation of gut microbiota and intestinal calcium transporter gene expression in chicks. *Poultry Science*. 2025; 104(9): 105437. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105437>
23. Vokhidova N.R., Ergashev K.X., Ibragimov D., Rashidova S.Sh. Chitosan hydroxyapatite: physic-chemical properties and its effect on the growth and development of broiler chickens. *Journal of World's Poultry Research*. 2023; 13(2): 233–243. <https://dx.doi.org/10.36380/jwpr.2023.26>
24. Seewald A., Zhong J., Siri M., Fratzl P., Raguin E. Three-dimensional imaging of vasculature and forming quail femur using cryocorrelative light and electron microscopy (cryo-CLEM). *Faraday Discussions*. 2025; 261: 430–445. <https://doi.org/10.1039/d5fd00022j>
25. Lang F., Qadri S.M. Mechanisms and significance of eryptosis, the suicidal death of erythrocytes. *Blood Purification*. 2012; 33(1-3): 125–130. <https://doi.org/10.1159/000334163>
26. Tkachenko A. Apoptosis and eryptosis: similarities and differences. *Apoptosis*. 2024; 29(3-4): 482–502. <https://doi.org/10.1007/s10495-023-01915-4>
27. Tkachenko A., Havranek O. Erythronectrosis: an overview of necroptosis or programmed necrosis in red blood cells. *Molecular and Cellular Biochemistry*. 2024; 479(12): 3273–3291. <https://doi.org/10.1007/s11010-024-04948-8>
28. Tkachenko A. Is eryptosis druggable? *Annals of Hematology*. 2024; 103(5): 1791–1792. <https://doi.org/10.1007/s00277-024-05713-z>
29. Каменская Т.В., Гончарова Н.В., Клименкова О.В., Игнацкая А.Ю., Карпенко Ф.Н. Показатели эриптоза донорских эритроцитов на разных сроках хранения и при различных методах заготовки. *Гематология. Трансфузиология. Восточная Европа*. 2025; 11(1): 27–34. <https://doi.org/10.34883/PI.2025.11.1.011>
30. Ismailov E.Sh. Infrared spectra of erythrocyte shadows in the region of the amide I and amide II bands following microwave irradiation. *Biofizika*. 1976; 21(5): 940–942. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1022261/>
31. Pyrshev K.A., Klymchenko A.S., Csúcs G., Demchenko A.P. Apoptosis and eryptosis: Striking differences on biomembrane level. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Biomembranes*. 2018; 1860(6): 1362–1371. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2018.03.019>
32. Боронихина Т.В., Ломановская Т.А., Яцковский А.Н. Плазмолемма эритроцитов и ее изменения в течение жизни клеток. *Журнал анатомии и гистопатологии*. 2021; 10(2): 62–72. <https://doi.org/10.18499/2225-7357-2021-10-2-62-72>
33. Астахов А.А., Казарцев В.В., Кучкин К.В., Barg J. Ионоселективные электроды для измерения калия в эритроцитах: модель клинической интерпретации результатов (пилотное исследование). *Современные технологии в медицине*. 2022; 14(3): 42–49. <https://doi.org/10.17691/stm2022.14.3.05>
34. Ишутина Н.А., Андриевская И.А., Дорофиев Н.Н., Кутепова О.Л., Медведева С.В. Молекулярные эффекты эритропоэтина на липидный состав мембраны эритроцитов крови пуповины новорожденных при цитомегаловирусной инфекции в период беременности. *Бюллетень физиологии и патологии дыхания*. 2019; 71: 88–93. https://doi.org/10.12737/article_5c89a90227a213.58230200
35. Tong X. *et al.* Targeting cell death pathways for cancer therapy: recent developments in necroptosis, pyroptosis, ferroptosis, and cuproptosis research. *Journal of Hematology and Oncology*. 2022; 15(1): 1–32. <https://doi.org/10.1186/s13045-022-01392-3>
36. Niu C., Zhang J. Immunoregulation role of the erythroid cells. *Frontiers in Immunology*. 2024; 15: 1466669. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1466669>
37. Шкробова Н.В., Махонько М.Н., Шарипов Д.Г., Мустафаев П.В. огу, Шелехова Т.В. Токсическое влияние свинца на работников, подвергшихся его воздействию. *Тенденции развития науки и образования*. 2024; 105-9: 70–75. <https://doi.org/10.18411/trnio-01-2024-442>
38. Perrone P. *et al.* Protective effects of olive oil antioxidant phenols on mercury-induced phosphatidylserine externalization in erythrocyte membrane: Insights into scramblase and flippase activity. *Free Radical Biology & Medicine*. 2025; 227: 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2024.11.047>
39. Alajeyan I.A., Alsughayyir J., Alfihli M.A. Zeatin Elicits Premature Erythrocyte Senescence Through Calcium and Oxidative Stress Mediated by the NOS/PKC/CK1 α Signaling Axis. *Dose-Response*. 2025; 23(1): 15593258251314825. <https://doi.org/10.1177/15593258251314825>
22. Tang X. *et al.* Cecal microbiota transplantation enhances calcium retention through modulation of gut microbiota and intestinal calcium transporter gene expression in chicks. *Poultry Science*. 2025; 104(9): 105437. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105437>
23. Vokhidova N.R., Ergashev K.X., Ibragimov D., Rashidova S.Sh. Chitosan hydroxyapatite: physic-chemical properties and its effect on the growth and development of broiler chickens. *Journal of World's Poultry Research*. 2023; 13(2): 233–243. <https://dx.doi.org/10.36380/jwpr.2023.26>
24. Seewald A., Zhong J., Siri M., Fratzl P., Raguin E. Three-dimensional imaging of vasculature and forming quail femur using cryocorrelative light and electron microscopy (cryo-CLEM). *Faraday Discussions*. 2025; 261: 430–445. <https://doi.org/10.1039/d5fd00022j>
25. Lang F., Qadri S.M. Mechanisms and significance of eryptosis, the suicidal death of erythrocytes. *Blood Purification*. 2012; 33(1-3): 125–130. <https://doi.org/10.1159/000334163>
26. Tkachenko A. Apoptosis and eryptosis: similarities and differences. *Apoptosis*. 2024; 29(3-4): 482–502. <https://doi.org/10.1007/s10495-023-01915-4>
27. Tkachenko A., Havranek O. Erythronectrosis: an overview of necroptosis or programmed necrosis in red blood cells. *Molecular and Cellular Biochemistry*. 2024; 479(12): 3273–3291. <https://doi.org/10.1007/s11010-024-04948-8>
28. Tkachenko A. Is eryptosis druggable? *Annals of Hematology*. 2024; 103(5): 1791–1792. <https://doi.org/10.1007/s00277-024-05713-z>
29. Kamenskaya T.V., Goncharova N.V., Klimenkova O.V., Ihnatskaya A.Yu., Karpenko F.N. Eryptosis Indicators of Donor Erythrocytes at Different Storage Periods and Types of Blood Component Collection. *Hematology. Transfusiology. Eastern Europe*. 2025; 11(1): 27–34 (in Russian). <https://doi.org/10.34883/PI.2025.11.1.011>
30. Ismailov E.Sh. Infrared spectra of erythrocyte shadows in the region of the amide I and amide II bands following microwave irradiation. *Biofizika*. 1976; 21(5): 940–942. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1022261/>
31. Pyrshev K.A., Klymchenko A.S., Csúcs G., Demchenko A.P. Apoptosis and eryptosis: Striking differences on biomembrane level. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Biomembranes*. 2018; 1860(6): 1362–1371. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2018.03.019>
32. Boronikhina T.V., Lomanovskaya T.A., Yatskovsky A.N. Erythrocyte Plasmalemma and Its Changes During the Cell Lifespan. *Journal of Anatomy and Histopathology*. 2021; 10(2): 62–72 (in Russian). <https://doi.org/10.18499/2225-7357-2021-10-2-62-72>
33. Astakhov A.A., Kazartsev V.V., Kuchkin K.V., Barg J. Ion-Selective Electrodes for Measuring Potassium in Erythrocytes: a Model for Clinical Interpretation of the Results (a Pilot Study). *Modern Technologies in Medicine*. 2022; 14(3): 42–49 (in Russian). <https://doi.org/10.17691/stm2022.14.3.05>
34. Ishutina N.A., Andrievskaya I.A., Dorofienko N.N., Kutepova O.L., Medvedeva S.V. Molecular effects of erythropoietin on the lipid composition of the umbilical cord blood erythrocyte membranes of newborns at cytomegalovirus infection in pregnancy. *Bulletin of Physiology and Pathology of Respiration*. 2019; 71: 88–93 (in Russian). https://doi.org/10.12737/article_5c89a90227a213.58230200
35. Tong X. *et al.* Targeting cell death pathways for cancer therapy: recent developments in necroptosis, pyroptosis, ferroptosis, and cuproptosis research. *Journal of Hematology and Oncology*. 2022; 15(1): 1–32. <https://doi.org/10.1186/s13045-022-01392-3>
36. Niu C., Zhang J. Immunoregulation role of the erythroid cells. *Frontiers in Immunology*. 2024; 15: 1466669. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1466669>
37. Shkrobova N.V., Makhonko M.N., Sharipov D.G., Mustafaev P.V. ogly, Shelekhova T.V. Toxic effect of lead on workers exposed to it. *Trends in the Development of Science and Education*. 2024; 105-9: 70–75 (in Russian). <https://doi.org/10.18411/trnio-01-2024-442>
38. Perrone P. *et al.* Protective effects of olive oil antioxidant phenols on mercury-induced phosphatidylserine externalization in erythrocyte membrane: Insights into scramblase and flippase activity. *Free Radical Biology & Medicine*. 2025; 227: 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2024.11.047>
39. Alajeyan I.A., Alsughayyir J., Alfihli M.A. Zeatin Elicits Premature Erythrocyte Senescence Through Calcium and Oxidative Stress Mediated by the NOS/PKC/CK1 α Signaling Axis. *Dose-Response*. 2025; 23(1): 15593258251314825. <https://doi.org/10.1177/15593258251314825>

40. Ma J. *et al.* Downregulation of intrinsic apoptosis pathway in erythroblasts contributes to excessive erythrocytosis of chronic mountain sickness. *Blood Cells, Molecules and Diseases*. 2019; 76: 25–31.
<https://doi.org/10.1016/j.bcmd.2019.01.002>

ОБ АВТОРАХ

Евгений Анатольевич Колесник¹

доктор биологических наук, профессор кафедры физиологии, экологии человека и медико-биологических знаний

evgeniy251082@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2326-651X>

Марина Аркадьевна Дерхо²

доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой естественно-научных дисциплин Института ветеринарной медицины

derkho2010@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3818-0556>

Максим Борисович Ребезов^{3, 4}

• доктор сельскохозяйственных наук, кандидат ветеринарных наук, профессор, главный научный сотрудник²

• доктор сельскохозяйственных наук, кандидат ветеринарных наук, профессор кафедры биотехнологии и пищевых продуктов³

rebezov@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Глеб Геннадьевич Швецов¹

кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой методики преподавания химии, биологии, экологии и географии

glebec13@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-6155-8310>

Екатерина Анатольевна Штакк¹

старший преподаватель кафедры физиологии, экологии человека и медико-биологических знаний

shtakk@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0002-3696-9270>

¹Государственный университет просвещения, ул. Радио, 10А, стр. 2, Москва, 105005, Россия

²Южно-Уральский государственный аграрный университет, ул. им. Гагарина, 13, Троицк, 457100, Россия

³Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, ул. им. Талалихина, 26, Москва, 109316, Россия

⁴Уральский государственный аграрный университет, ул. им. Карла Либкнехта, 42, Екатеринбург, 620075, Россия

40. Ma J. *et al.* Downregulation of intrinsic apoptosis pathway in erythroblasts contributes to excessive erythrocytosis of chronic mountain sickness. *Blood Cells, Molecules and Diseases*. 2019; 76: 25–31.

<https://doi.org/10.1016/j.bcmd.2019.01.002>

ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy Anatolyevich Kolesnik¹

Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Physiology, Human Ecology and Medical and Biological Knowledge

evgeniy251082@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2326-651X>

Marina Arkadyevna Derkho²

Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences at the Institute of Veterinary Medicine

derkho2010@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3818-0556>

Maksim Borisovich Rebezov^{3, 4}

• Doctor of Agricultural Sciences, Candidate of Veterinary Sciences, Professor, Chief Researcher²

• Doctor of Agricultural Sciences, Candidate of Veterinary Sciences, Professor of the Department of Biotechnology and Food Products³

rebezov@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Gleb Gennadievich Shvetsov¹

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate professor, Head of the Department of Methods of Teaching Chemistry, Biology, Ecology and Geography

glebec13@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-6155-8310>

Ekaterina Anatolyevna Shtakk¹

Senior Lecturer of the Department of Physiology, Human Ecology and Medical and Biological Knowledge

shtakk@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0002-3696-9270>

¹Federal State University of Education, 10A/2 Radio Str., Moscow, 105005, Russia

²South Ural State Agrarian University, 13 Gagarin Str., Troitsk, 457100, Russia

³Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, 26 Talalikhin Str., Moscow, 109316, Russia

⁴Ural State Agrarian University, 42 Karl Liebknecht Str., Yekaterinburg, 620075, Russia