

ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ЭССЕНЦИАЛЬНЫХ И ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЕРЕ ЦЫПЛЯТ-БРОЙЛЕРОВ (*Gallus gallus* L.) КРОССА ARBOR ACRES В УСЛОВИЯХ ЮЖНО-УРАЛЬСКОЙ БИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ РОССИИ*

С.В. ЛЕБЕДЕВ, О.А. ЗАВЬЯЛОВ ✉, А.Н. ФРОЛОВ, М.Я. КУРИЛКИНА,
В.В. ГРЕЧКИНА

Дисбаланс микроэлементов представляет серьезную угрозу для здоровья и продуктивных качеств сельскохозяйственных животных и птицы, поэтому важен контроль и оптимизация поступления химических элементов, в том числе с учетом условий биогеохимических провинций и антропогенных загрязнений. В настоящее время в качестве биосубстрата для определения элементного статуса птицы используется кровь. Однако, когда речь идет об оценке элементного статуса за относительно длительный период времени, предпочтение отдается перу, в том числе потому, что получение этого биосубстрата минимально инвазивно. Объем доступной информации о содержании макро- и микроэлементов в пере пород и кроссов сельскохозяйственной птицы ограничен (в особенности в возрастном аспекте), что затрудняет объективную интерпретацию лабораторных данных. В представленной работе мы подтвердили возможность использовать перо в качестве биоматериала для определения статуса цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres по эссенциальным и токсичным химическим элементам при коммерческом разведении в условиях Южно-Уральской биогеохимической провинции с участками техногенного загрязнения. Также впервые охарактеризованы возрастные изменения содержания этих элементов в пере цыплят в указанных условиях и выполнено процентильное ранжирование полученных показателей по методике, рекомендуемой для определения физиологической нормы в выборке. Целью исследования было определение содержания эссенциальных и токсичных элементов в пере цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres разного возраста в условиях Южно-Уральской биогеохимической провинции и ранжирование полученных показателей по процентиллям для оценки границ возрастной нормы для выборки. Работу выполняли на территории Южно-Уральской биогеохимической провинции России на клинически здоровых цыплятах-бройлерах кросса Arbor Acres в возрасте 7 сут ($n = 120$), 21 сут ($n = 120$) и 35 сут ($n = 120$). Содержание питательных веществ, макро- и микроэлементов в рационе обследованной птицы находилось в пределах потребностей цыплят-бройлеров в соответствующие периоды выращивания. В качестве сравниваемых биосубстратов использовали кровь и перо (выщипывали маховые перья). Для исследований отбирался проксимальный участок пера массой не менее 0,4 г. Элементный состав пера и сыворотки крови определяли методами атомно-эмиссионной и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-DRC-MS). Результаты количественного определения каждого элемента в пере ранжировали в восходящей градации в виде упорядоченного ряда согласно рекомендациям американского общества ветеринарной клинической патологии (процентили 2,5 и 97,5). Установлено, что содержание P, Cr, I, Se, Li, Si, As, Hg, Sn, Sr в пере цыплят-бройлеров достоверно варьировало в зависимости от возраста. В связи с этим фактор возраста необходимо учитывать при разработке референсных интервалов для конкретных регионов. В настоящем исследовании выполнено процентильное ранжирование (процентили 2,5 и 97,7 при доверительном интервале CI = 90 %) данных по 25 химическим элементам (Al, As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sn, Hg, Sr, V, Zn) в пере физиологически здоровых цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres в разном возрасте (7, 21 и 35 сут). Полученные данные могут быть полезны при выявлении элементозов у цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres.

Ключевые слова: цыплята-бройлеры, Arbor Acres, кровь, перо, эссенциальные элементы, токсичные элементы, возраст, процентильное ранжирование.

Дисбаланс минеральных веществ представляет серьезную угрозу для здоровья и продуктивных качеств сельскохозяйственных животных и птицы (1, 2), при этом важно учитывать поступление в организм как жизненно необходимых, так и токсичных химических элементов (3). Токсичные металлы в избыточных количествах могут ослаблять иммунную систему, вызывая оксидативный стресс (4), который негативно влияет на биохимические параметры, воспроизводительную функцию и продуктивность, увеличивает

* Исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 21-16-00009.

частоту сердечных заболеваний и приводит к проявлению разных мутаций и новообразований (5).

Для территории Южно-Уральского региона характерна биогеохимическая мозаичность с дефицитом йода, фтора, селена, наличием локальных территорий с высокими уровнями цинка, меди, стронция и никеля. На фоне природных биогеохимических провинций на локальных территориях идет формирование техногенных провинций по никелю, марганцу, фтору, свинцу (6, 7). Промышленные технологии выращивания птицы предусматривают использование современных систем водоочистки, комбикормов, кормовых добавок и нормирование рациона по нутриентам и минеральному составу в соответствии с возрастными потребностями и физиологическими особенностями кроссов разных направлений продуктивности. Это позволяет в достаточной степени стандартизировать режимы кормления и избежать влияния условий провинций на рост, развитие и продуктивность птицы. Тем не менее при разработке и адаптации таких регламентов должны учитываться локальные биогеохимические факторы и в том числе характер и уровень техногенных загрязнений (3-5).

Очевидно, что при контроле и оптимизации поступления минеральных веществ наиболее приемлемы неинвазивные методы оценки метаболического статуса, включающей определение элементного состава в биосубстратах. Такие работы выполнены на мясном (8) и молочном (9) скоте, в спортивном коневодстве (10), в промышленном птицеводстве (11). В настоящее время у птицы при анализе элементного статуса в качестве биосубстрата чаще всего используют кровь (12), но в случае, когда необходимо контролировать эти показатели в течение достаточно длительного времени и при минимальных негативных последствиях для организма, предпочтение отдается перу (13). Кроме того, доказано, что содержание тяжелых металлов в пере птиц — информативный показатель при оценке загрязненности территорий тяжелыми металлами (14). Также установлено, что по количеству микроэлементов в пере можно в целом охарактеризовать обменный пул основных эссенциальных и токсичных элементов у цыплят-бройлеров и кур-несушек (15).

Однако объем доступной информации о накоплении макро-, микро- и токсичных элементов у сельскохозяйственной птицы (в частности, у цыплят-бройлеров) в разные периоды онтогенеза ограничен. Более того, для большинства пород и кроссов отсутствуют справочные интервалы, рассчитанные согласно рекомендациям Американского общества ветеринарной клинической патологии (16), в том числе скорректированные с учетом локальных условий разведения. Это затрудняет объективную интерпретацию и сравнение результатов при анализе биоэлементного статуса птицы.

Arbog Acres — крупный мясной кросс с крепким костяком, высоким выходом мяса из тушки (до 72 %), развитой мускулатурой, что понижает жирность продукта, и сокращенными сроками откорма (17). По данным на 2016 год, в Африке за 10 лет кросс занял до 20 % рынка, он популярен в Алжире, Египте, Тунисе, Мозамбике, используется для производства мяса в США и Китае (18).

В представленной работе мы подтвердили возможность использовать перо в качестве биоматериала для определения статуса цыплят-бройлеров кросса Arbog Acres по эссенциальным и токсичным химическим элементам при коммерческом разведении в условиях Южно-Уральской биогеохимической провинции с участками техногенного загрязнения. Также впервые охарактеризованы возрастные изменения содержания этих элементов в пере цыплят в указанных условиях и выполнено процентильное ранжирование по-

лученных показателей по методике, рекомендуемой для определения физиологической нормы в выборке. Эти данные могут быть использованы для выявления элементозов у цыплят-бройлеров Arbor Acres на разных этапах онтогенеза и метаболической коррекции своевременно обнаруженных нарушений с помощью минеральных комплексов.

Нашей целью было определение содержания эссенциальных и токсичных элементов в перо цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres разного возраста в условиях Южно-Уральской биогеохимической провинции и ранжирование полученных показателей по процентилям для оценки границ возрастной нормы для выборки.

Методика. Экспериментальные исследования проводили в соответствии с инструкциями, рекомендациями, протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Приказ Минздрава СССР № 755 от 12.08.1977 «О мерах по дальнейшему совершенствованию организационных форм работы с использованием экспериментальных животных»; «Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-20092»). Все процедуры выполняли в соответствии с правилами Комитета по этике животных ФНЦ БСТ РАН. При проведении исследований были предприняты усилия, чтобы свести к минимуму страдания животных и уменьшить число анализируемых образцов.

Птицу выращивали на трех птицеводческих предприятиях (ЗАО «Птицефабрика Оренбургская», ИП КФХ Т.П. Тузиков, КФХ В.А. Малышев), расположенных на территории Южно-Уральской биогеохимической провинции (Оренбургская обл.) (6, 7).

Исследования выполняли на клинически здоровых цыплятах-бройлерах кросса Arbor Acres в возрасте 7 сут ($n = 120$), 21 сут ($n = 120$) и 35 сут ($n = 120$). Условия кормления и содержания для всех обследованных цыплят соответствовали рекомендуемым для кросса и были примерно идентичными. Птица содержалась в металлических клетках размером 145×70×250 см (ширина×глубина×высота) с сеточными полами. Содержание питательных веществ в рационе обследованной птицы находилось в пределах потребностей цыплят-бройлеров в соответствующие периоды выращивания (19). Для кормления птицы использовали полнорационные комбикорма (Россия) ПК-0 (0-10 сут), ПК-5 (11-24-е сут), ПК-6 (25-е сут и старше). В качестве минеральной составляющей в комбикорм вводился премикс Коудайс МКорма (Россия) в количестве 25 кг/т. В состав премикса входили минеральные компоненты (69,10 %), известняк (21,6 %), отруби (9,3 %).

Перо и кровь для анализа по возрастам (7, 21 и 35 сут) брали у трех особей в каждой из 40 случайно выбранных клеток, расположенных в разных секциях цехов на обследованных предприятиях. Маховые перья (5 шт.) выщипывали из крыла, для исследований отбирали проксимальный участок пера массой не менее 0,4 г. Образцы крови (не менее 2 мл) у птицы в возрасте в 21 и 35 сут брали утром из подкрыльцовой вены в вакуумные пробирки (7 мл) с активатором свертывания крови («Hebei Xing Sky & Co.», Китай). Сыворотку крови отделяли центрифугированием в течении 10 мин при 1000 об/мин. Пробирки охлаждали до температуры -8°C и хранили до проведения элементного анализа.

Перо измельчали до величины фракции не более 2 мм. Полученные образцы перьев промывали в ацетоне («Sigma-Aldrich, Co.», США) для удаления внешних загрязнений, затем трижды промывали в деионизированной воде (18 МОМ/см) и высушивали при 60°C до постоянной массы. По 50 мг образцов перьев помещали в тефлоновые пробирки с 5 мл концентрированной азотной кислоты («Sigma-Aldrich, Co.», США) и подвергали обработке

в микроволновой системе («Bergh of Products + Instruments GmbH», Германия). Полученные растворы разливали в полипропиленовые пробирки объемом 15 мл, довели до ионизированной водой до конечного объема 15 мл и тщательно перемешивали встряхиванием.

Содержание эссенциальных, условно эссенциальных (Ca, K, Mg, Na, P, Co, Cr, Cu, Fe, I, Li, Mn, Se, Si, Sr, V, Zn), токсичных и потенциально токсичных (As, B, Cd, Hg, Ni, Pb и Sn) микроэлементов в образцах измеряли на спектрометре NexION 300D («Perkin Elmer», США) с автосамплером ESI SC-2 DX4 («Scientific, Inc.», США). Для калибровки использовались стандартные растворы с разными концентрациями микроэлементов, приготовленные из наборов Universal Data Acquisition Standards Kits («Perkin Elmer, Inc.», США). Одноэлементный стандарт чистоты иттрия и родия — 10 г/л («Perkin Elmer, Inc.», США), используемый для внутренней онлайн-стандартизации. Для лабораторного контроля качества был использован постоянный анализ сертифицированного эталонного материала hair GBW09101 («Shanghai Institute of Nuclear Research», Китай). Анализ проводился до и после каждого этапа обследования. Степень извлечения всех проанализированных микроэлементов составила не менее 88 %.

Результаты количественного определения каждого элемента в переранжировали в восходящей градации в виде упорядоченного ряда согласно рекомендациям American Society for Veterinary Clinical Pathology (16) (интервалы концентраций химических элементов по процентиллям (2,5 и 97,5). Достоверность различий оценивали при помощи U-критерия Манна-Уитни. Уровень значимости (p) принимался меньшим или равным 0,05. Для расчета корреляционной связи между оцениваемыми признаками использовался метод ранговой корреляции Спирмена. В таблицах приведены средние значения показателей (M) и их стандартные отклонения ($\pm SD$). Для обработки данных использовали пакет прикладных программ Statistica 10.0 («StatSoft, Inc.», США).

Результаты. В России значительную часть поголовья кросса Arbor Acres разводят в условиях Южно-Уральской биогеохимической провинции. Согласно данным из открытых источников, на предприятии ЗАО «Птицефабрика Оренбургская» годового оборот поголовья этого кросса составляет 1,8 млн гол., что свидетельствует о его перспективности. АО «Башкирский бройлер» (Республика Башкортостан) — репродуктор второго порядка по производству инкубационного яйца Arbor Acres для Республики Башкортостан и Оренбургской области.

Для территории Южно-Уральской биохимической провинции, наряду с дефицитом некоторых элементов, характерно неравномерное распределение различных источников загрязнения — предприятий химической, нефтехимической, топливной, добывающей промышленности (железные, медные, никелевые руды, асбест, нефть), черной и цветной металлургии (производство никеля, кобальта, меди) (6, 7).

Содержание химических элементов в суточном рационе цыплят-бройлеров в разные возрастные периоды представлено в таблице 1.

1. Содержание химических элементов в суточном рационе цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres по возрастным периодам при выращивании (Оренбургская обл., Южно-Уральская биогеохимическая провинция, 2022 год)

Элемент	Период выращивания, сут		
	0-14	15-28	29-42
	Макроэлементы		
Ca	287,2	821,5	1533,6
K	251,7	339,6	452,4
Mg	60,8	87,9	127,1

Na	41,2	57,1	66,5
P	203,6	589,7	1102,3
Эссенциальные элементы			
Co	0,007	0,010	0,011
Cr	0,304	1,883	4,526
Cu	1,25	1,55	2,00
Fe	5,69	10,36	15,98
Mn	3,51	6,55	9,38
I	0,027	0,044	0,034
Se	0,006	0,015	0,025
Zn	4,42	8,25	11,55
Условно-эссенциальные элементы			
B	0,504	0,695	0,860
Li	0,0021	0,0025	0,0030
Si	1,07	2,54	5,86
Ni	0,042	0,095	0,174
V	0,023	0,167	0,473
Токсичные элементы			
Al	0,337	0,524	0,800
As	0,001	0,028	0,043
Cd	0,001	0,002	0,003
Hg	0,000	0,000	0,000
Pb	0,002	0,015	0,022
Sn	0,000	0,000	0,000
Sr	0,400	0,754	1,258

Во всех хозяйствах и во все возрастные периоды цыплята были физиологически здоровы, нормально развивались и имели относительно высокую динамику живой массы и ее прирост (табл. 2).

2. Динамика живой массы у цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres на птицеводческих предприятиях ($n = 120$, $M \pm SD$, Оренбургская обл., Южно-Уральская биогеохимическая провинция, 2022 год)

Показатель	Хозяйство		
	ЗАО «Птицефабрика Оренбургская»	ИП КФХ Т.П. Тузиков	КФХ В.А. Малышев
Живая масса, г:			
7 сут	183,2±19,34	179,4±14,48	180,2±18,61
21 сут	653,2±84,34	634,3±76,61	652,1±87,64
35 сут	1862,4±201,09	1811,6±187,69	1830,3±202,11
Среднесуточный прирост, г/(гол·сут)	60,0±21,17	58,3±16,34	58,9±18,64
Абсолютный прирост, кг/(гол·опыт)	1,68±0,49	1,63±0,38	16,65±0,43

Сравнительный анализ выявил существенную разницу в содержании основных эссенциальных и токсичных элементов в пере обследованной птицы в разные периоды роста и развития (табл. 3).

3. Содержание (мг/кг) макро-, эссенциальных и токсичных элементов в пере цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres разного возраста при выращивании на птицеводческих предприятиях ($n = 120$, $M \pm SD$, Оренбургская обл., Южно-Уральская биогеохимическая провинция, 2022 год)

Элемент	Возраст, сут		
	7	21	35
Макроэлементы			
Ca	1496±124,9	1214±144,4	928,1±118,1
K	2429±622,0	2510±155,7	2283±199,3
Mg	314,0±64,41	435,2±51,31	419,3±83,13
Na	1346±311,4	1665±98,15	1801±105,6
P	1060±428,0	1382±102,5	1072±86,28 ^b
Эссенциальные элементы			
Co	0,0741±0,0151	0,0588±0,0075	0,0618±0,0120
Cr	3,02±0,264	4,63±0,421	3,03±0,261 ^b
Cu	13,32±2,22	9,60±1,55	10,64±1,78
Fe	89,74±14,38	81,93±16,35	57,23±6,20
I	8,54±2,03	0,838±0,0828 ^a	0,477±0,0562 ^{ab}
Mn	10,27±1,86	16,38±3,25	15,66±4,46
Se	1,020±0,1417	0,597±0,0204 ^a	0,568±0,0184 ^a
Zn	176,0±13,48	314,0±50,54	268,2±42,99

Условно-эссенциальные элементы			
B	1,84±0,359	2,65±0,261	2,43±0,354
Li	0,106±0,0236	0,0464±0,0071 ^a	0,0467±0,0047 ^a
Ni	0,879±0,125	1,38±0,266	1,36±0,342
Si	103,0±12,58	80,55±5,02	39,52±5,52 ^{ab}
V	0,225±0,0247	0,473±0,0604	0,254±0,0370 ^b
Токсичные элементы			
Al	21,74±4,20	13,09±2,09	13,44±2,43
As	0,0672±0,0065	0,0617±0,0047	0,0496±0,0032 ^b
Cd	0,0310±0,0091	0,0318±0,0147	0,0142±0,0035
Hg	0,0357±0,0127	0,0094±0,0012 ^a	0,0130±0,0016 ^a
Pb	1,78±0,335	1,84±0,384	2,44±0,700
Sn	0,234±0,117	1,50±1,34	0,0715±0,0102 ^a
Sr	4,57±0,790	2,45±0,348 ^a	2,14±0,352 ^a

Примечание. Приведены данные по трем предприятиям (ЗАО «Птицефабрика Оренбургская», ИП КФХ Т.П. Тузилов, КФХ В.А. Мальшев).

^a Различия между показателями на 21-е и 35-е сут по сравнению с 7-ми сут статистически значимы при $p \leq 0,05$.

^b Различия между показателями на 35-е сут по сравнению с 28-ми сут статистически значимы при $p \leq 0,05$.

В перо 7-суточных цыплят-бройлеров мы выявили самое высокое содержание P, I, Se, Li, Si, As, Hg, Sn и Sr. По мере взросления в период с 7-х по 21-е и 35-е сут эти показатели достоверно снижались (см. табл. 3). Ранее сообщалось, что возраст может влиять на метаболизм микроэлементов у сельскохозяйственной птицы (20). В качестве возможной причины выявленного нами снижения показателей по мере взросления птицы может быть то, что такие элементы, как Ca, P, Zn, I, Cu, играют важную роль в качестве кофакторов ферментных систем, связанных с минерализацией костей — процессом, подверженным возрастным изменениям (21). Так, установлено, что при формировании органической матрицы костной ткани и ее минерализации два возраста выделяются как критические — 14 и 35 сут, когда минеральная насыщенность органического костного матрикса уменьшается, что ослабляет кости опорных конечностей (22). Заслуживает внимания тот факт, что минимальное содержание практически всех оцениваемых химических элементов в нашем эксперименте отмечали в период начала линьки — в возрасте 35 сут. Период линьки обычно сопровождается естественным снижением потребления корма и угнетением метаболизма микроэлементов (23). При определении возрастной динамики количества токсичных элементов мы выявили достоверное ($p \leq 0,05$) уменьшение содержания As, Hg, Sn, Sr в перо цыплят-бройлеров в возрасте 21 и 35 сут по сравнению с показателями в 7-суточном возрасте. Эти различия могут быть связаны с метаболизмом металлотионеина — белка, который синтезируется в организме животных в ответ на поступление тяжелых металлов из внешней среды. Уровень металлотионеина, в свою очередь, регулируется половыми гормонами (24), концентрация которых зависит от возраста (25). Следует, однако, отметить, что в другом нашем исследовании у птицы с возрастом токсичные элементы, наоборот, накапливались (как мы полагаем, из-за более длительного поступления токсичных металлов с кормом и питьевой водой) (11).

Чтобы оценить допустимость использования пера птицы в качестве биосубстрата при элементном анализе, мы сравнили полученные данные с результатами исследования образцов крови (табл. 4). Анализ этих данных показал, что динамика концентраций химических элементов в сыворотке крови в целом соответствовала таковой в перо обследованной птицы.

При корреляционном анализе (табл. 5) достоверная ($p \leq 0,05$) положительная связь между содержанием биоэлементов в перо и сыворотке крови в нашем исследовании была установлена по Al, Ca, Cr, Cd, Fe, I, Mg, P, Pb, Se, Zn.

4. Концентрация (мг/л) макро-, эссенциальных и токсичных элементов в сыворотке крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres разного возраста при выращивании на птицеводческих предприятиях (n = 120, M±SD, Оренбургская обл., Южно-Уральская биогеохимическая провинция, 2022 год)

Элемент	Возраст, сут	
	21	35
Макроэлементы		
Ca	0,159±0,0151	0,125±0,0132*
K	0,289±0,0447	0,282±0,0421
Mg	0,0372±0,0014	0,0322±0,0015
Na	3,01±0,482	3,22±0,484
P	0,263±0,0221	0,196±0,0225*
Эссенциальные элементы		
Co	0,0021±0,0003	0,0036±0,0005**
Cr	0,0112±0,0021	0,0053±0,0022*
Cu	0,131±0,0154	0,178±0,0195*
Fe	1,98±0,182	1,32±0,144**
I	0,0621±0,0061	0,0452±0,0052**
Mn	0,0351±0,0133	0,0231±0,0034
Se	0,212±0,0423	0,154±0,0331
Zn	2,32±0,355	2,22±0,328
Условно-эссенциальные элементы		
B	0,714±0,145	0,537±0,115
Li	0,0188±0,0034	0,0247±0,0042
Ni	0,0093±0,0034	0,0082±0,0027
V	0,0052±0,0021	0,0074±0,0025
Токсичные элементы		
As	0,0032±0,0006	0,0051±0,0007*
Al	0,0633±0,0082	0,0854±0,0076*
Cd	0,0011±0,0002	0,0004±0,0002*
Hg	0,0002±0,0002	0,0007±0,0003
Pb	0,0003±0,0001	0,0003±0,0001
Sn	0,0009±0,0003	0,0007±0,0003
Sr	0,142±0,0264	0,135±0,0277

Примечание. Приведены данные по трем предприятиям (ЗАО «Птицефабрика Оренбургская», ИП КФХ Т.П. Тузиков, КФХ В.А. Малышев).

*, ** Различия с показателями в возрасте 21 сут статистически значимы соответственно при p ≤ 0,05 и p ≤ 0,01.

5. Коэффициенты корреляции Спирмена между содержанием макро-, эссенциальных и токсичных элементов в пере и сыворотке крови у цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres при выращивании на птицеводческих предприятиях (n = 360, Оренбургская обл., Южно-Уральская биогеохимическая провинция, 2022 год)

Эл	Al	As	B	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	I	K	Li	Mg	Mn	Ni	P	Pb	Se	Sn	Sr	V	Zn
Al	0,8*	-0,4	0,0	-0,2	0,4	0,1	-0,4	0,4	-0,6	0,0	-0,3	-0,2	0,0	-0,3	0,2	0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,7	-0,3	0,3	0,0
As	0,4	-0,8*	0,4	0,0	0,5	-0,2	-0,6	0,6	-0,5	0,2	-0,2	0,1	0,0	-0,5	0,5	0,5	-0,3	-0,1	-0,1	-0,8	-0,4	0,2	-0,3
B	0,4	-0,3	0,4	0,0	0,5	-0,2	-0,6	0,6	-0,5	0,2	-0,2	0,1	0,0	-0,2	0,5	0,5	-0,3	-0,1	-0,1	-0,8	-0,4	0,2	-0,3
Ca	0,4	-0,4	0,4	0,7*	0,5	-0,2	-0,6	0,6	-0,5	0,2	-0,2	0,1	0,0	-0,2	0,5	0,5	-0,3	-0,1	-0,1	-0,8	-0,4	0,2	-0,3
Cd	0,4	-0,4	0,2	-0,1	0,6*	-0,1	-0,6	0,6	-0,5	0,1	-0,4	0,0	0,1	-0,4	0,4	0,6	-0,2	-0,1	-0,4	-0,8	-0,4	0,3	-0,2
Co	0,4	-0,5	0,4	0,0	0,5	-0,2	-0,6	0,6	-0,5	0,2	-0,2	0,1	0,0	-0,5	0,5	0,5	-0,3	-0,1	-0,4	-0,8	-0,4	0,2	-0,3
Cr	0,5	-0,5	0,5	0,1	0,4	-0,3	-0,6	0,7	-0,4	0,3	-0,2	0,2	-0,1	-0,6	0,5	0,4	-0,3	0,0	-0,3	-0,7	-0,3	0,2	-0,5
Cu	0,2	-0,6	0,0	-0,2	0,4	0,1	-0,4	0,4	-0,6	0,0	-0,3	-0,2	0,0	-0,4	0,2	0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,7	-0,3	0,3	0,0
Fe	0,4	-0,5	0,4	0,0	0,5	-0,2	-0,6	0,6	0,6*	0,2	-0,2	0,1	0,0	-0,5	0,5	0,5	-0,3	-0,1	-0,4	-0,8	-0,4	0,2	-0,3
Hg	0,0	-0,3	-0,2	-0,3	0,2	0,2	-0,2	0,2	-0,6	-0,2	-0,2	-0,6	0,1	-0,4	0,0	0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,5	-0,1	0,3	0,2
I	0,5	-0,3	0,5	0,1	0,4	-0,3	-0,6	0,7	-0,4	0,3	0,8*	0,2	-0,1	-0,4	0,5	0,4	-0,3	0,0	-0,2	-0,7	-0,3	0,2	-0,3
K	0,4	-0,4	0,4	0,0	0,5	-0,2	-0,6	0,6	-0,5	0,2	-0,2	0,1	0,0	-0,3	0,5	0,5	-0,3	-0,1	-0,2	-0,8	-0,4	0,2	-0,3
Li	0,1	-0,2	0,0	-0,3	0,2	0,0	-0,3	0,5	-0,6	-0,1	-0,2	-0,3	0,1	-0,4	0,2	0,4	-0,2	-0,2	-0,4	-0,7	-0,3	0,3	0,1
Mg	0,4	-0,3	0,4	0,0	0,5	-0,2	-0,6	0,6	-0,5	0,2	-0,2	0,1	0,0	0,7*	0,5	0,5	-0,3	-0,1	-0,3	-0,8	-0,4	0,2	-0,3
Mn	0,4	-0,4	0,4	0,0	0,5	-0,2	-0,6	0,6	-0,5	0,2	-0,2	0,1	0,0	-0,3	0,5	0,5	-0,3	-0,1	-0,3	-0,8	-0,4	0,2	-0,3
Na	0,2	-0,2	0,0	-0,2	0,4	0,1	-0,4	0,4	-0,6	0,0	-0,3	-0,2	0,0	-0,3	0,2	0,4	-0,3	-0,2	-0,5	-0,7	-0,3	0,3	0,0
Ni	0,4	-0,4	0,4	0,0	0,5	-0,2	-0,6	0,6	-0,5	0,2	-0,2	0,1	0,0	-0,4	0,5	0,5	-0,3	-0,1	-0,3	-0,8	-0,4	0,2	-0,3
P	0,4	-0,4	0,3	0,2	0,3	-0,3	-0,5	0,7	-0,4	0,1	-0,1	0,1	-0,2	-0,4	0,4	0,3	0,8*	0,0	-0,4	-0,7	-0,3	0,2	-0,4
Pb	0,2	-0,2	-0,1	-0,2	0,3	0,2	-0,4	0,3	-0,5	0,0	-0,4	-0,3	0,0	-0,3	0,1	0,4	-0,3	0,7*	-0,4	-0,6	-0,3	0,4	0,1
Se	0,2	-0,3	0,2	-0,1	0,4	-0,1	-0,4	0,5	-0,6	0,1	-0,1	-0,2	0,0	-0,5	0,3	0,3	-0,4	-0,2	0,6*	-0,7	-0,3	0,2	-0,1
Si	0,7	-0,3	0,7	0,3	0,5	-0,4	-0,8	0,6	-0,2	0,4	-0,1	0,5	-0,1	-0,2	0,7	0,5	-0,5	0,2	-0,3	-0,7	-0,2	-0,1	-0,4
Sn	0,2	-0,3	0,0	-0,2	0,4	0,1	-0,4	0,4	-0,6	0,0	-0,3	-0,2	0,0	-0,4	0,2	0,4	-0,3	-0,2	-0,5	-0,7	-0,3	0,3	0,0
Sr	0,3	-0,2	0,3	0,0	0,3	-0,2	-0,5	0,6	-0,5	0,1	-0,2	0,0	0,0	-0,5	0,4	0,4	-0,3	-0,1	-0,6	-0,8	-0,4	0,2	-0,2
V	0,6	-0,4	0,6	0,2	0,4	-0,4	-0,7	0,7	-0,3	0,3	-0,2	0,4	-0,1	-0,2	0,6	0,6	-0,4	0,1	-0,8	-0,8	-0,3	-0,6*	-0,5
Zn	0,3	-0,5	0,2	-0,2	0,5	0,1	-0,5	0,4	-0,5	0,2	-0,4	-0,1	0,1	-0,3	0,3	0,5	-0,3	-0,2	-0,6	-0,7	-0,3	0,3	0,7*

Примечание. Эл — элемент. Приведены данные по трем предприятиям (ЗАО «Птицефабрика Оренбургская», ИП КФХ Т.П. Тузиков, КФХ В.А. Малышев).

* Корреляции статистически значимы при p ≤ 0,05.

Таким образом, можно констатировать, что в целом элементный анализ пера отражает концентрацию химических элементов в сыворотке крови, что позволяет рекомендовать маховые перья в качестве неинвазивного биосубстрата для оценки элементного статуса цыплят-бройлеров. Вместе с тем отметим, что по As и V имели место достоверные ($p \leq 0,05$), но отрицательные корреляции. Возможная причина таких различий заключается в том, что состав крови значительно более динамичен и отражает изменения за гораздо меньший промежуток времени, а перо как биосубстрат позволяет охарактеризовать элементный статус за длительный период (26). Кроме того, содержание химических элементов в пере выше, чем в сыворотке крови. Это увеличивает аналитическую чувствительность определения и информативность оценки изменений элементного статуса при использовании пера.

Сущность использованного нами процентильного метода ранжирования результатов измерения (16) состоит в том, что ряд, охватывающий весь диапазон количественных колебаний признака (100 %), делят на 100 интервалов и устанавливают процентильные вероятности, промежутки между которыми составляют процентильные интервалы. При расчетах мы следовали международным рекомендациям по ветеринарным лабораторным стандартам (16), в соответствии с которыми в качестве физиологической нормы в выборке предлагается после исключения выбросов (аномально высокие и/или низкие значения анализируемого показателя) использовать интервал от 2,5 до 97,5 процентиля. Обязательное условие применения этого метода — расчет 90 % доверительных интервалов для верхней и нижней границ, которые позволяют с известной вероятностью оценить математическое ожидание генеральной совокупности при дальнейшем расширении экспериментальной выборки.

Содержание химических элементов в пере цыплят-бройлеров в разные периоды роста и развития (7, 21, 35 сут) достоверно ($p \leq 0,05$) различались, поэтому значения показателей мы ранжировали для каждого возраста отдельно (табл. 6).

6. Процентильные интервалы ранжирования содержания (мг/кг) макро-, эссенциальных и токсичных элементов в пере цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres разного возраста при выращивании на птицеводческих предприятиях ($n = 120$, Оренбургская обл., Южно-Уральская биогеохимическая провинция, 2022 год)

Элемент	2,5 (CI = 90 %)	97,5 (CI = 90 %)
Возраст 7 сут		
<i>Макроэлементы</i>		
Ca	1222 (794,3-1649)	1821 (1183-2458)
K	1053 (684,4-1421)	3972 (2581-5362)
Mg	177,0 (115,1-238,9)	475,0 (308,7-641,2)
Na	665,2 (432,3-897,7)	2094 (1361-2826)
P	302,3 (196,3-407,7)	2892 (1879-3904)
<i>Эссенциальные элементы</i>		
Co	0,0343 (0,0223-0,0465)	0,104 (0,0676-0,140)
Cr	2,63 (1,71-3,55)	3,76 (2,44-5,07)
Cu	7,33 (4,77-9,89)	17,91 (11,64-24,17)
Fe	50,3 (32,7-67,91)	118,0 (76,7-159,3)
I	4,94 (3,21-6,67)	13,49 (8,76-18,21)
Mn	5,34 (3,47-7,21)	13,34 (8,67-18,01)
Se	0,637 (0,414-0,860)	1,29 (0,838-1,74)
Zn	144,2 (93,63-194,4)	210,0 (136,5-283,5)
<i>Условно-эссенциальные элементы</i>		
B	1,24 (0,806-1,67)	2,70 (1,75-3,64)
Li	0,0644 (0,0423-0,0873)	0,174 (0,113-0,234)
Ni	0,552 (0,359-0,745)	2,16 (1,40-2,91)
Si	76,67 (49,83-103,5)	126,0 (81,9-170,1)
V	0,170 (0,111-0,230)	0,290 (0,188-0,391)

	<i>Токсичные элементы</i>	
Al	10,45 (6,79-14,12)	30,68 (19,94-41,41)
As	0,0481 (0,0313-0,0653)	0,0786 (0,0507-0,1050)
Cd	0,0082 (0,0054-0,0114)	0,0582 (0,0373-0,0776)
Hg	0,0154 (0,0102-0,0203)	0,112 (0,0728-0,151)
Pb	0,848 (0,551-1,14)	2,39 (1,55-3,22)
Sn	0,0974 (0,0634-0,131)	0,584 (0,379-0,788)
Sr	3,03 (1,97-4,09)	6,60 (4,29-8,91)
	В о з р а с т 21 с у т	
	<i>Макроэлементы</i>	
Ca	462,0 (300,3-623,7)	3592 (2334-4849)
K	1594 (1036-2151)	4740 (3081-6399)
Mg	209,0 (135,8-282,1)	1298 (843,7-1752)
Na	981,0 (637,6-1324)	3254 (2115-4392)
	<i>Эссенциальные элементы</i>	
Co	0,0135 (0,0087-0,0173)	0,158 (0,102-0,213)
Cr	1,66 (1,08-2,24)	9,98 (6,48-13,47)
Cu	3,34 (2,17-4,51)	43,04 (27,97-58,10)
Fe	29,13 (18,93-39,33)	427,0 (277,5-576,4)
I	0,230 (0,150-0,311)	1,73 (1,12-2,33)
Mn	1,39 (0,904-1,87)	69,89 (45,42-94,35)
Se	0,441 (0,287-0,595)	0,791 (0,514-1,060)
Zn	136,0 (88,40-183,6)	929,2 (603,8-1254)
	<i>Условно-эссенциальные элементы</i>	
B	0,791 (0,514-1,07)	6,43 (4,17-8,68)
Li	0,0093 (0,0062-0,0134)	0,167 (0,108-0,225)
Ni	0,154 (0,100-0,208)	4,62 (3,01-6,23)
Si	42,45 (27,59-57,31)	143,0 (92,95-193,1)
V	0,112 (0,0732-0,151)	1,33 (0,86-1,79)
	<i>Токсичные элементы</i>	
Al	2,79 (1,81-3,76)	44,12 (28,67-59,56)
As	0,0301 (0,0193-0,0407)	0,124 (0,0806-0,167)
Cd	0,0034 (0,0023-0,0045)	0,372 (0,241-0,502)
Hg	0,0022 (0,0014-0,0025)	0,0284 (0,0184-0,0383)
Pb	0,226 (0,147-0,305)	6,44 (4,18-8,69)
Sn	0,0194 (0,0125-0,0265)	33,60 (21,84-45,36)
Sr	0,595 (0,387-0,803)	7,31 (4,75-9,86)
	В о з р а с т 35 с у т, м г / к г	
	<i>Макроэлементы</i>	
Ca	349,0 (226,8-471,1)	3390 (2203-4576)
K	949,0 (616,8-1281)	7422 (4824-10019)
Mg	148,0 (96,20-199,8)	2736 (1778-3693)
Na	876,0 (569,4-1182)	2838 (1844-3831)
P	371,0 (241,1-500,8)	2750 (1787-3712)
	<i>Эссенциальные элементы</i>	
Co	0,0065 (0,0043-0,0094)	0,277 (0,180-0,373)
Cr	1,47 (0,956-1,98)	7,12 (4,62-9,61)
Cu	4,08 (2,65-5,51)	59,12 (38,42-79,81)
Fe	22,99 (14,94-31,03)	191,0 (124,15-257,8)
I	0,158 (0,103-0,213)	1,84 (1,19-2,48)
Mn	0,894 (0,581-1,20)	133,0 (86,45-179,50)
Se	0,338 (0,220-0,456)	0,933 (0,606-1,250)
Zn	125,0 (81,25-168,7)	1362 (885,3-1838)
	<i>Условно-эссенциальные элементы</i>	
B	1,07 (0,696-1,44)	12,25 (7,96-16,53)
Li	0,0089 (0,0062-0,0124)	0,125 (0,0812-0,168)
Ni	0,0957 (0,0623-0,129)	9,52 (6,18-12,85)
Si	10,63 (6,91-14,35)	140,0 (91,21-189,5)
V	0,0473 (0,0315-0,0643)	1,06 (0,689-1,430)
	<i>Токсичные элементы</i>	
Al	1,87 (1,21-2,52)	75,90 (49,33-102,4)
As	0,0267 (0,0173-0,0365)	0,0934 (0,0607-0,126)
Cd	0,0013 (0,001-0,002)	0,107 (0,0695-0,144)
Hg	0,0018 (0,0012-0,0026)	0,0474 (0,0302-0,0629)
Pb	0,243 (0,158-0,328)	21,87 (14,21-29,52)
Sn	0,0078 (0,0053-0,0113)	0,238 (0,154-0,321)
Sr	0,365 (0,237-0,493)	9,66 (6,27-13,04)

П р и м е ч а н и е. Эл — элемент. Приведены данные по трем предприятиям (ЗАО «Птицефабрика Оренбургская», ИП КФХ Т.П. Тузиков, КФХ В.А. Малышев).

Наибольшие интервалы практически по всем изучаемым элементам (за исключением Na, P, Se, Li, Hg) имели место у цыплят-бройлеров в воз-

расте 7 сут. Максимально широкими интервалами для К, Mg, Co, Cu, Mn, Se, Zn, В, Ni, Al, Pb, Sr характеризовался молодняк птицы в возрасте 35 сут. В целом более широкие интервалы концентраций, выявленные у птицы в раннем возрасте, свидетельствует о нестабильности метаболизма по отмеченным элементам, что может быть связано с индивидуальными особенностями особей.

Пищевые продукты содержат широкий спектр микроэлементов, некоторые из них имеют питательную ценность (Fe, Cu, Zn, Mn, Se, Co, Cr), в то время как другие обладают токсичными свойствами (Pb, Cd, Ni) (27). По данным разных исследований, содержание биоэлементов связано с геохимическими условиями региона разведения птицы (6). Так, в нашем эксперименте показатели по Zn были выше, чем у цыплят (*Gallus gallus domesticus*), разводимых в экологически благополучных регионах Малайзии (28), но практически сопоставимы с полученными для этого кросса в Пакистане (29), по Cu и Mn — сравнимы с результатами для Кореи (30) и значительно ниже, чем в Бельгии (31). Содержание Pb и Cd в пере цыплят-бройлеров в нашем исследовании (Южно-Уральская биогеохимическая провинция России) было значительно ниже, чем у цыплят, разводимых в регионах с высокой техногенной нагрузкой, в частности в Южной Корее (кросс Ross 308, воздействующий фактор — близость к крупному мегаполису) (32), Китае (кросс неизвестен, воздействующий фактор — горнодобывающая металлургия) (33), Республике Косово (кросс *G. gallus domesticus*, воздействующий фактор — близость к крупному мегаполису) (34), но при этом мало отличалось от показателей для птицы (*G. gallus domesticus*), разводимой вблизи столицы штата Ойо в Нигерии (35). Наблюдаемые различия могут быть связаны с неодинаковыми региональными и локальными фоновыми загрязнениями токсичными металлами в обследуемых областях (36). Кросс и вид птицы также могут оказывать значительное влияние на содержание минералов в пере. Так, при сравнительной оценке содержания химических элементов в пере цыплят кроссов *G. gallus domesticus* и *Coturnixcoturnix japonica*, разводимых в условиях одной биохимической провинции были выявлены значительные различия: у *C. japonica* содержание Al, Mn, Co, Cu, Fe и Pb было выше, чем у кросса *G. gallus domesticus* (28). Кроме того, методология отбора, оценки и статистического анализа минерального состава биосубстратов может оказать значительное влияние на полученные результаты, что затрудняет работу по сравнительному анализу результатов, полученных в различных исследованиях (37,38).

Итак, накопление P, Cr, I, Se, Li, Si, As, Hg, Sn и Sr в пере цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres в условиях Южно-Уральской биогеохимической провинции (Россия) достоверно ($p \leq 0,05$) варьировало в зависимости от возраста. В связи с этим фактор возраста необходимо учитывать при разработке референсных интервалов физиологической нормы обеспеченности макро-, микроэлементами и предельных значений токсикантов у птицы в конкретных регионах. Мы определили содержание 25 химических элементов (Al, As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sn, Hg, Sr, V, Zn) в пере у физиологически здоровых цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres в разные возрастные периоды (7, 21 и 35 сут). Следуя международным ветеринарным стандартам расчета процентильных интервалов для определения границ физиологической нормы в анализируемой выборке (процентили 2,5 и 97,5 при CI = 90 %), мы выполнили ранжирование полученных данных для каждого возраста птицы. Эти результаты могут быть полезны при выявлении элементозов у цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres.

AGE-DEPENDENT ACCUMULATION OF ESSENTIAL AND TOXIC CHEMICAL ELEMENTS IN FEATHER OF ARBOR ACRES BROILERS (*Gallus gallus* L.) REARED IN THE SOUTH URAL BIOGEOCHEMICAL PROVINCE OF RUSSIA

S.V. Lebedev, O.A. Zav'yalov ✉, A.N. Frolov, M.Ya. Kurilkina, V.V. Grechkina

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies RAS, 29, ul. 9 Yanvaryu, Orenburg, 460000 Russia, e-mail lsv74@list.ru, Oleg-Zavyalov83@mail.ru (✉ corresponding author), forleh@mail.ru, k_marina4@mail.ru, viktor1985too@mail.ru

ORCID:

Lebedev S.V. orcid.org/0000-0001-9485-7010

Kurilkina M.Ya. orcid.org/0000-0003-0253-7867

Zav'yalov O.A. orcid.org/0000-0003-2033-3956

Grechkina V.V. orcid.org/0000-0002-1159-0531

Frolov A.N. orcid.org/0000-0003-4525-2554

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Supported financially from the Russian Science Foundation, project No. 21-16-00009

Final revision received June 20, 2022

doi: 10.15389/agrobiol.2023.2.386eng

Accepted July 22, 2022

Abstract

Microelement imbalances are a serious threat to the health and productive traits of farm animals and poultry, so it is important to control and optimize input of chemical elements with regard to the conditions of a biogeochemical province and anthropogenic pollution. Currently, blood is used as a biosubstrate to determine the elemental status in birds. However, preference is given to feather when it comes to assessing the elemental status over a relatively long period, also because obtaining this biosubstrate is minimally invasive. The amount of available information on macro- and microelements content in the feather of poultry breeds and crosses is limited (especially in terms of age), which makes it difficult to objectively interpret laboratory data. In the presented work, we confirmed the possibility of using feathers as a biomaterial for determining the essential and toxic chemical elements status in Arbor Acres cross broiler chickens in commercial breeding in the conditions of South Ural biogeochemical province with areas of technogenic pollution. In addition, the age-related changes in elements content in chickens' feathers under the specified conditions were characterized for the first time, and the percentile ranking of the obtained indicators was performed according to the method recommended for determining the physiological norm in the sample. The aim of the study was to determine the essential and toxic elements content in Arbor Acres broiler chickens of different ages under the conditions of South Ural biogeochemical province and to rank the obtained indicators by percentiles to estimate the limits of the age norm for the sample. The research was carried out on the territory of South Ural biogeochemical province of Russia on clinically healthy Arbor Acres broiler chickens at the age of 7 days ($n = 120$), 21 days ($n = 120$) and 35 days ($n = 120$). The content of nutrients, macro- and microelements in the diet of the examined birds was within the limits of the requirements for broiler chickens during the corresponding growing periods. Blood and feathers (the flight feathers were plucked out) were used as compared biosubstrates. The proximal part of the feather weighing at least 0.4 g was selected for research. The elemental composition of feathers and blood serum was determined by inductively coupled plasma atomic emission and mass spectrometry (ICP-DRC-MS). The results of the quantitative determination of each element in feather were ranked in ascending gradation in the form of an ordered series according to the recommendations of the American Society for Veterinary Clinical Pathology (2.5 and 97.5 percentile). It was found that the content of P, Cr, I, Se, Li, Si, As, Hg, Sn, Sr in feather of broiler chickens varied significantly depending on age. In this regard, the age factor must be taken into account when developing reference intervals for specific regions. In this study, percentile ranking (2.5 and 97.7 percentiles with a confidence interval CI = 90 %) of data on 25 chemical elements (Al, As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sn, Hg, Sr, V, Zn) in feather of physiologically healthy Arbor Acres cross broiler chickens at different ages (7; 21; 35 days). The obtained data can be useful in detecting elementoses in Arbor Acres broiler chickens.

Keywords: broiler chickens, Arbor Acres, blood, feather, essential elements, toxic elements, age, percentile ranking.

REFERENCES

1. Bagirov V.A., Duskaev G.K., Kazachkova N.M., Rakhmatullin Sh.G., Yausheva E.V., Kosyan D.B., Makaev Sh.A., Dusaeva Kh.B. Addition of Quercus cortex extract to broiler diet changes slaughter indicators and biochemical composition of muscle tissue. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2018, 53 (4): 799-810 (doi: 10.15389/agrobiology.2018.4.799eng).
2. Zhaimysheva S.S., Kosilov V.I., Miroshnikov S.A., Duskaev G.K., Nurzhanov B.S. Genetic and physiological aspects of bulls of dual-purpose and beef breeds and their crossbreeds. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 421(2): 022028 (doi 10.1088/1755-1315/421/2/022028).
3. Miroshnikov S., Zavyalov O., Frolov A., Poberukhin M., Sleptsov I.I., Sirazetdinov F. The content of toxic elements in hair of dairy cows as an indicator of productivity and elemental status of ani-mals. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(18): 18554-18564.
4. Haziri I., Haziri A., Ozuni E., Mehmeti I. Dynamics of malondialdehyde depending on Cd concentration and their relation with the daily weight gain on the chicken hybrid. *Asian. J. Anim. Vet. Adv.*, 2017, 12: 38-43 (doi: 10.3923/ajava.2017.38.43).
5. Ma Y., Shi Y., Wu Q., Ma W. Dietary arsenic supplementation induces oxidative stress by suppressing nuclear factor erythroid 2-related factor 2 in the livers and kidneys of laying hens. *Poultry Science*, 2021, 100(2): 982-992 (doi: 10.1016/j.psj.2020.11.061).
6. Miroshnikov S.V., Notova S.V., Kiyayeva E.V., Alidzhanova I.E., Slobodskov A.A. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, 10(159):17-20 (in Russ.).
7. Ma Y., Shi Y., Wu Q., Ma W. Dietary arsenic supplementation induces oxidative stress by suppressing nuclear factor erythroid 2-related factor 2 in the livers and kidneys of laying hens. *Poultry Science*, 2021, 100(2): 982-992 (doi: 10.1016/j.psj.2020.11.061).
8. Miroshnikov S.A., Zavyalov O.A., Frolov A.N., Bolodurina I.P., Kalashnikov V.V., Grabeklis A.R., Tinkov A.A., Skalny A.V. The reference intervals of hair trace element content in Hereford cows and heifers (*Bos taurus*). *Biol. Trace. Elem. Res.*, 2017, 180(1): 56-62 (doi: 10.1007/s12011-017-0991-5).
9. Miroshnikov S.A., Skalny A.V., Zavyalov O.A., Frolov A.N., Grabeklis A.R. The reference values of hair content of trace elements in dairy cows of Holstein breed. *Biol. Trace. Elem. Res.*, 2020, 194(1): 145-151 (doi: 10.1007/s12011-019-01768-6).
10. Kalashnikov V., Zajcev A., Atroshchenko M., Kalinkova L., Kalashnikova T., Miroshnikov S., Frolov A., Zavyalov O. The content of essential and toxic elements in the hair of the mane of the trotter horses depending on their speed. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2018, 25(22): 21961-21967 (doi: 10.1007/s11356-018-2334-2).
11. Lebedev S., Zavyalov O., Frolov A. Age features and reference intervals for the concentrations of some essential and toxic elements in laying hens. *Veterinary World*, 2022, 15(4): 943-952 (doi: 10.14202/vetworld.2022.943-952).
12. Fisinin V.I., Egorov I.A., Vertiprakhov V.G., Grozina A.A., Lenkova T.N., Manukyan V.A., Egorova T.A. Activity of digestive enzymes in duodenal chymus and blood in broilers of parental lines and the meat cross depending on dietary bioactive additives. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2017, 52(6): 1226-1233 (doi: 10.15389/agrobiology.2017.6.1226eng).
13. Parolini M., Sturini M., Maraschi F., Profumo A., Costanzo A., Caprioli M., Rubolini D., Ambrosini R., Canova L. Trace elements fingerprint of feathers differs between breeding and non-breeding areas in an Afro-Palaearctic migratory bird, the barn swallow (*Hirundo rustica*). *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2020, 28(13): 15828-15837 (doi: 10.1007/s11356-020-11597-z).
14. Rutkowska M., Plotka-Wasyłka J., Lubinska-Szczygieł M., Ryżńska A., Możejko-Ciesielska J., Namieśnik J. Birds' feathers — suitable samples for determination of environmental pollutants. *Trends Anal. Chem.*, 2018, 109: 97-115 (doi: 10.1016/j.trac.2018.09.022).
15. Gudima V.O., Wambu E.W., Lagat G., Waddams K.E. Fluoride in chicken (*Gallus domesticus*) feathers from Nakuru, Kenya. *Africa Environmental Review Journal*, 2021, 4(2): 73-81 (doi: 10.2200/aerj.v4i2.152).
16. Friedrichs K.R., Harr K.E., Freeman K.P., Szladovits B., Walton R.M., Barnhart K.F., Blanco-Chavez J. ASVCP reference interval guidelines: determination of de novo reference intervals in veterinary species and other related topics. *Vet. Clin. Pathol.*, 2012, 41(4): 441-453 (doi: 10.1111/vcp.12006).
17. Younis M.E.M., Aboelnour A., Swelum A.A., Ghoneim H.A., Abd El-Hack M.E., Khafaga A.F., Al-Ghadi M.Q., Al-Himadi A.R., Almutairi B.O., Ammari A.A., Ghanima M.M.A. Impact of oral supplementation of different levels of tamoxifen on productive and reproductive efficiencies and carcass traits of Avian48 and Arbor Acres broilers. *Animals (Basel)*, 2020,10(8): 1367 (doi: 10.3390/ani10081367).
18. Laz'ko M.V., Abderakhim Adam A. *Izvestiya TSKhA*, 2020, 5: 72-82 (doi: 10.26897/0021-342X-2020-5-72-82) (in Russ.).
19. *Arbor Acres: spravochnik po vyrashchivaniyu broylerov*. Aviagen, USA, 2018.
20. Dede S., Değ̈er Y. Compare study of the trace elements (Zn and Cu) concentration in blood

- plasma and feather of laying hens and the effects of age on the concentrations. *Sağlık Bilimleri Dergisi, Firat Üniversitesi*, 2000, 14(1): 61-64.
21. Pereira C.G., Rabello C.B., Barros M.R., Emilia H., Manso C.S.S., Batista dos Santos M.J., Faria A.G., Bezerra de Oliveira H., Medeiros-Ventura W.R.L., Júnior R.V.S., Carvalho C.C.D., Fireman A.K. Zinc, manganese and copper amino acid complexed in laying hens' diets affect performance, blood parameters and reproductive organs development. *PLoS ONE*, 2020, 15(11): 0239229 (doi: 10.1371/journal.pone.0239229).
 22. Chernov I.S., Semenyutin V.V., Chernova E.N., Krapivina E.V., Kosov A.V., Yakovleva I.N., Yastrebova O.N. Using ergotropics to normalize the homeostasis system activity in broiler chickens. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021, 677: 042064 (doi: 10.1088/1755-1315/677/4/042064).
 23. Yousaf M.S., Rahman Z.U., Sandhu M.A., Bukhari S.A., Yousaf A. Comparison of the fast-induced and high dietary zinc-induced molting: trace elements dynamic in serum and eggs at different production stages in hens (*Gallus domesticus*). *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2009, 93(1): 35-43 (doi: 10.1111/j.1439-0396.2007.00775.x).
 24. Shimada H., Hashiguchi T., Yasutake A., Waalkes M.P., Imamura Y. Sexual dimorphism of cadmium-induced toxicity in rats: involvement of sex hormones. *Arch. Toxicol.*, 2012, 86: 1475-1480 (doi: 10.1007/s00204-012-0844-0).
 25. Vivoli G., Fantuzzi G., Bergomi M., Tonelli E., Gatto M.R., Zanetti F., Del Dot M. Relationship between zinc in serum and hair and some hormones during sexual maturation in humans. *Sci. Total. Environ.*, 1990, 95: 29-40 (doi: 10.1016/0048-9697(90)90050-5).
 26. Skalnaya M.G. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2005, 2: 11-13 (in Russ.).
 27. Korish M.A., Attia Y.A. Evaluation of heavy metal content in feed, litter, meat, meat products, liver, and table eggs of chickens. *Animals (Basel)*, 2020, 10(4): 727. (doi: 10.3390/ani10040727).
 28. Salwa A.A., Shuhaimi-Othman M., Babji A. Assessment of trace metals contents in chicken (*Gallus gallus domesticus*) and quail (*Coturnixcoturnix japonica*) tissues from Selangor (Malaysia). *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2012, 5: 441-451 (doi: 10.3923/jest.2012.441.451).
 29. Abdullah M., Fasola M., Muhammad A., Malik S.A., Bostan N., Bokhari H., Kamran M.A., Shafqat M.N., Alamdar A., Khan M., Ali N., Musstjab S.A., Eqani A.Sh. Avian feathers as a non-destructive bio-monitoring tool of trace metals signatures: a case study from severely contaminated areas. *Chemosphere*, 2015, 119: 553-561 (doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.06.068).
 30. Jungsoo K., Tae-Hoe K. Heavy metal concentrations in feathers of Korean Shorebirds. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 2008, 55(1): 122-128 (doi: 10.1007/s00244-007-9089-y).
 31. Dauwe T., Lieven B., Ellen J., Rianne P., Ronny B., Marcel E. Great and blue tit feathers as biomonitors for heavy metal pollution. *Ecological Indicators*, 2002, 1(4): 227-234 (doi: 10.1016/S1470-160X(02)00008-0).
 32. Kim J.H., Lee H.K., Park G.H., Choi H.S., Ji S.Y., Kil D.Y. Determination of the toxic level of dietary mercury and prediction of mercury intake and tissue mercury concentrations in broiler chickens using feather mercury concentrations. *Journal of Applied Poultry Research*, 2019, 28(4): 1240-1247 (doi: 10.3382/japr/pfz090).
 33. Zhuang P., Zou B., Lu H., Li Z. Heavy metal concentrations in five tissues of chickens from a mining area. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2014, 23(6): 2375-2379.
 34. Haziri I., Latifi F., Rama A., Zogaj M., Haziri A., Aliu H., Sinani A., Mehmeti I., Stari J. Assessment of environmental pollution with metals in some industrial regions of Kosovo using chicken (*Gallus gallus domesticus*) breast feathers. *Slovenian Veterinary Research*, 2019, 56(3): 93-103 (doi: 10.26873/SVR-553-2019).
 35. Emmanuel T.T. Appraisal of lead in the organs and tissues of domestic chicken (*Gallus gallus domesticus*) in Ibadan. *Int. J. Pure. Appl. Zool.*, 2016, 4(2): 225-234.
 36. Hui C.A. Concentrations of chromium, manganese, and lead in air and in avian eggs. *Environmental Pollution*, 2002, 120(2): 201-206 (doi: 10.1016/S0269-7491(02)00158-6).
 37. Saitoh K., Sera K., Gotoh T., Nakamura M. Comparison of elemental quantity by PIXE and ICP-MS and/or ICP-AES for NIST standards. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2002, 189(1-4): 86-93 (doi: 10.1016/S0168-583X(01)01012-6).
 38. Elzain A.H., Ebrahim A.M., Eltoum M.S. Comparison between XRF, PIXE and ICP-OES techniques applied for analysis of some medicinal plants. *J. Appl. Chem.*, 2016, 9: 6-12.