

МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ ЦИНКА В МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА

К.Н. НАРОЖНЫХ

(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет»)

Биохимические процессы, происходящие в организме крупного рогатого скота, связаны с их элементным статусом. Поэтому актуальным является поиск моделей прижизненной оценки уровня цинка в мышечной ткани животных. Уровень цинка в мышечной ткани оказывает влияние на показатели качества говядины. Исследованы пробы диафрагмальной мышцы массой 100 г, отобранные от крупного рогатого скота герефордской породы, разводимого в типовых условиях промышленного комплекса на юге Западной Сибири (Россия). Элементный анализ проведен атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией на спектрометре МГА-1000. Определение гематологических показателей: уровень эритроцитов, лейкоцитов и гемоглобина – производили на автоматическом гематологическом анализаторе РСЕ-90VET. Биохимические показатели определяли с использованием фотометрических методов на биохимическом анализаторе Photometer-5010. Расчет коэффициентов регрессионных моделей проводили методом наименьших квадратов. Выбор наиболее точной и эффективной модели осуществляли на основании комплексной оценки показателей внутренних и внешних критериев качества. Значения зависимой переменной соответствуют гауссовскому. Выявлена высокая скоррелированность между независимыми переменными. В результате селекции на основе внутренних и внешних критериев качества выявлена оптимальная модель прогноза уровня цинка в мышечной ткани герефордского скота, содержащая три предиктора: скорость оседания эритроцитов (мм/ч), цветовой показатель и общий холестерин (ммоль/л). Модель соответствует необходимым допущениям: остатки имеют вид нормального распределения, отсутствуют автокорреляции и влиятельные наблюдения. Между главными эффектами основной модели отсутствуют признаки мультиколлинеарности ($VIF = 1,0-1,1$). Полученная модель может быть использована для прижизненной оценки уровня цинка в мышечной ткани крупного рогатого скота.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, герефордская порода, цинк, моделирование, регрессия

Введение

Основными источниками цинка для сельскохозяйственных животных являются прежде всего концентрированные корма [1]. Богатым источником цинка являются дрожжи, а этот микроэлемент сконцентрирован в отрубях и зародышах злаковых зерен. Побочные продукты животного белка – такие, как рыбная мука, обычно являются более богатыми источниками этого элемента по сравнению с добавками растительного белка [2]. Распространенными формами цинка, используемого для дополнения рационов животных, являются оксид цинка и кормовой сульфат цинка [3]. Потребность в цинке в рационе для разных видов подробно описана в литературе [1, 4–5].

Цинк активно всасывается в соответствии с потребностями организма путем опосредованного транспорта в проксимальном отделе тонкой кишки, особенно в двенадцатиперстной кишке [6]. Пассивный транспорт действует по диффузионному механизму, и его эффективность пропорциональна концентрации Zn в просвете

кишечника [7, 8]. Существует обратная зависимость между уровнями цинка в рационе и процентом усвоения цинка из рациона. При этом повышенное усвоение цинка происходит при дефиците цинка в рационе, и наоборот [9].

Несмотря на то, что элементный статус связан с происходящими в организме биохимическими процессами [10, 11], методика оценки интерьера по элементному статусу животных по показателям крови пока не получила широкого распространения в практике сельскохозяйственного производства. Это обусловлено высокими финансовыми затратами и трудоемкостью исследования химического состава органов и тканей животных [12–14].

Основная цель исследований заключалась в поиске оптимальной и эффективной модели прогноза уровня цинка в мышечной ткани крупного рогатого скота геррефордской породы, которая позволит прижизненно и малоинвазивным способом оценивать элементный статус животных. Для достижения поставленной цели был проведен гематологический, биохимический и атомно-абсорбционный анализ проб мышечной ткани крупного рогатого скота. На основании полученных данных осуществлялась подгонка регрессионной модели методом наименьших квадратов и выявлена наиболее оптимальная и эффективная модель.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–76–00003. URL: <https://rscf.ru/project/22-76-00003/>.

Материал и методы исследований

Исследование выполнено на животных (n=24) геррефордской породы в возрасте 16–18 мес., разводившихся на юге Западной Сибири. Животные содержались в хозяйствах Новосибирской области в типовых условиях промышленного комплекса с соблюдением ветеринарных и зоотехнических требований в соответствии с законодательством (ГОСТ 32855–2014, ГОСТ 26090–84, ГОСТ 32855–2014) и в стандартных для каждого вида и породы условиях. Кормление осуществлялось типовым полнорационным комбикормом с учетом возраста, живой массы и направления продуктивности животных (ГОСТ Р 52254–2004, ГОСТ 32855–2014, ГОСТ 32855–2014).

Убой животных проводился согласно действующим требованиям, технологической инструкции и нормативно-правовым документам, действующим на территории Российской Федерации (ГОСТ 34120–2017, ФЗ-498, ГОСТ 34120–2017). Перед убоем проведены исследования слизистых оболочек, кожи и ее производных. На момент убоя животные были клинически здоровыми. Животные находились на 12–18-часовой предубойной голодной диете. Отбор органов и тканей производили в убойном пункте сразу после забоя, затем они были заморожены и хранились при температуре от –18 до –24 °С. Образцы скелетной мускулатуры массой 100 г отбирали с диафрагмальной мышцы. Пробы крови были взяты из яремной вены животных и стабилизированы 5%-ным цитратом натрия. Образцы крови в течение 6–8 ч доставлялись в лабораторию, где проводился гематологический и биохимический анализ.

Пробоподготовку и анализ образцов мышечной ткани проводили в соответствии с методикой (ГОСТ 17261–2008) на атомно-абсорбционном спектрометре МГА-1000 (ООО «Льюмэкс», Россия).

Определение гематологических показателей: уровень эритроцитов, лейкоцитов и гемоглобина – производили на автоматическом гематологическом анализаторе PCE-90VET (Hight Technology Inc, США). Биохимические показатели определяли с использованием фотометрических методов на биохимическом анализаторе Photometer-5010 (Robert Riele GmbH & Co KG, Германия).

Статистическая обработка исходных данных выполнялась с использованием языка статистического программирования R. Проверка условий для подгонки моделей осуществлялась согласно протоколу разведочного анализа данных [15]. Анализ потенциальных выбросов проводили с помощью теста Граббса [16]. Тестирование соответствия распределений данных гауссовскому проводили с помощью теста Шапиро-Уилка [17]. Расчет коэффициента корреляции между переменными осуществляли с применением критерия Спирмена [18]. Оценку мультиколлинеарности проводили с помощью вычисления коэффициента инфляции дисперсии для каждого параметра [15], а также графическим методом с использованием матрицы диаграммы рассеяния переменных регрессионных моделей. Коэффициенты модели рассчитывали методом наименьших квадратов. Множественные сравнения влиятельных наблюдений проводили с помощью поправки Бонферонни [19]. Условия независимости остатков модели проверяли с использованием теста Дарбина-Уотсона [20].

Для поиска модели прогноза уровня цинка в мышечной ткани герефордского скота был использован комплекс предикторов, который для удобства был переименован (табл. 1).

Данные по гематологическим и биохимическим показателям крови (табл. 1) соответствовали популяционной норме [21–23], что указывает на отсутствие патологических процессов и косвенно свидетельствует о здоровье животных.

Таблица 1

Обозначение и расшифровка для комплекса независимых переменных используемых для селекции регрессионных моделей

Показатель	Медианные значения	Норма	Единицы измерения	Переменная в модели
Zn в мышцах	49,5	-	мг/кг	y
Fe в крови	0,05	0,05–0,29	ммоль/л	x1
Лейкоциты	8,6	4,5–12,0	$\times 10^9$ ед.	x2
Эритроциты	7,41	5,5–8,0	$\times 10^{12}$ ед.	x3
Гемоглобин	127,5	85–135	г/л	x4
СОЭ	0,5	0,5–2,0	мм/ч	x5
Цветовой показатель крови	1,06	0,7–1,1	соотношение	x6
Протеин	75,4	56–78	г/л	x7
Альбумин	37	25–45	г/л	x8
Глобулин	36,8	34–45	г/л	x9
Мочевина	6,1	2,8–8,8	ммоль/л	x10
Мочевая кислота	123,7	100–300	мкмоль/л	x11
Холестерин	3,33	1,6–5,0	ммоль/л	x12

Результаты и их обсуждение

Важным этапом разведочного анализа при подгонке регрессионных моделей и отборе пула предикторов является оценка мультиколлинеарности. При ее наличии оценки коэффициентов модели будут неустойчивыми, а анализ вклада отдельных факторов в дисперсию переменной отклика будет затруднительным. В результате может возникнуть парадоксальная ситуация, когда коэффициенты регрессионной модели статистически не будут значимыми, в то время как модель в целом по критерию Фишера – статистически значима. Поэтому для оценки ассоциаций между переменными рассчитаны значения коэффициента корреляции Спирмена и построены корреляционная матрица и диаграммы рассеяния (рис. 1, 2).

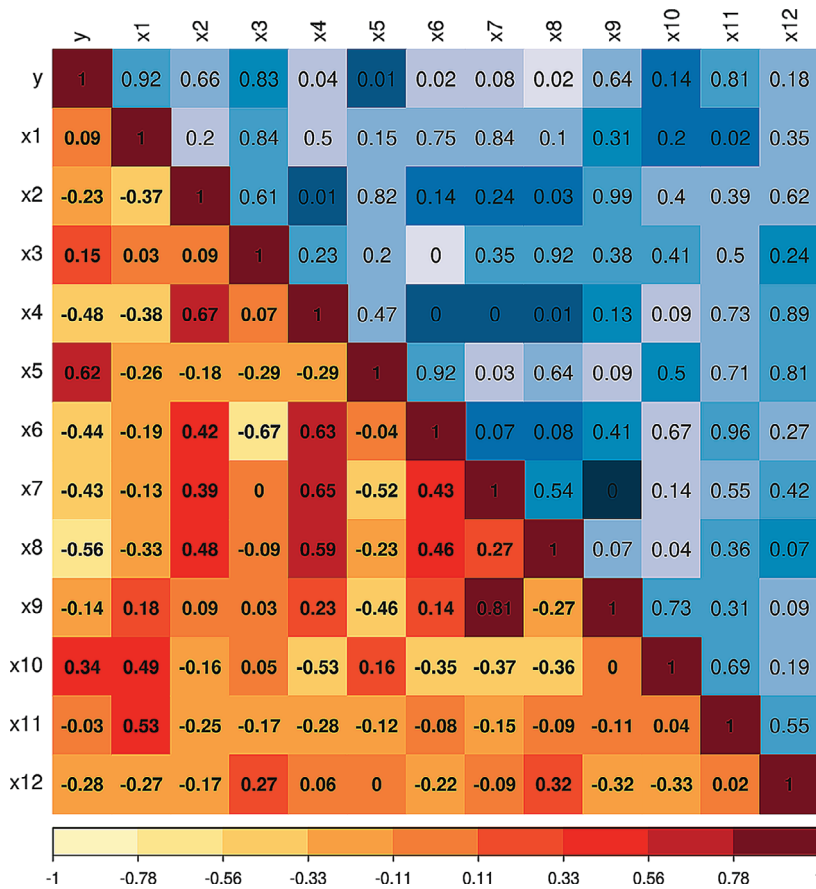


Рис. 1. Корреляционная матрица переменных регрессионных моделей

В нижнем треугольнике на красном фоне (рис. 1) – вычисленные коэффициенты корреляции, а в верхнем (на синем фоне) – уровни значимости для этих коэффициентов. Анализ показал достаточно большое количество связей между переменными. Зависимая переменная ассоциирована со значениями скорости оседания эритроцитов, с гемоглобином, цветовым показателем крови и альбуминами. Данные переменные, с одной стороны, могут являться потенциальными предикторами уровня цинка в мышечной ткани. Однако они между собой также скоррелированы: так, гемоглобин связан с цветовым показателем и альбумином, которые в свою очередь ассоциированы между собой. Поэтому при включении их всех в модель будет проявляться эффект дублирования и внесение «шума».

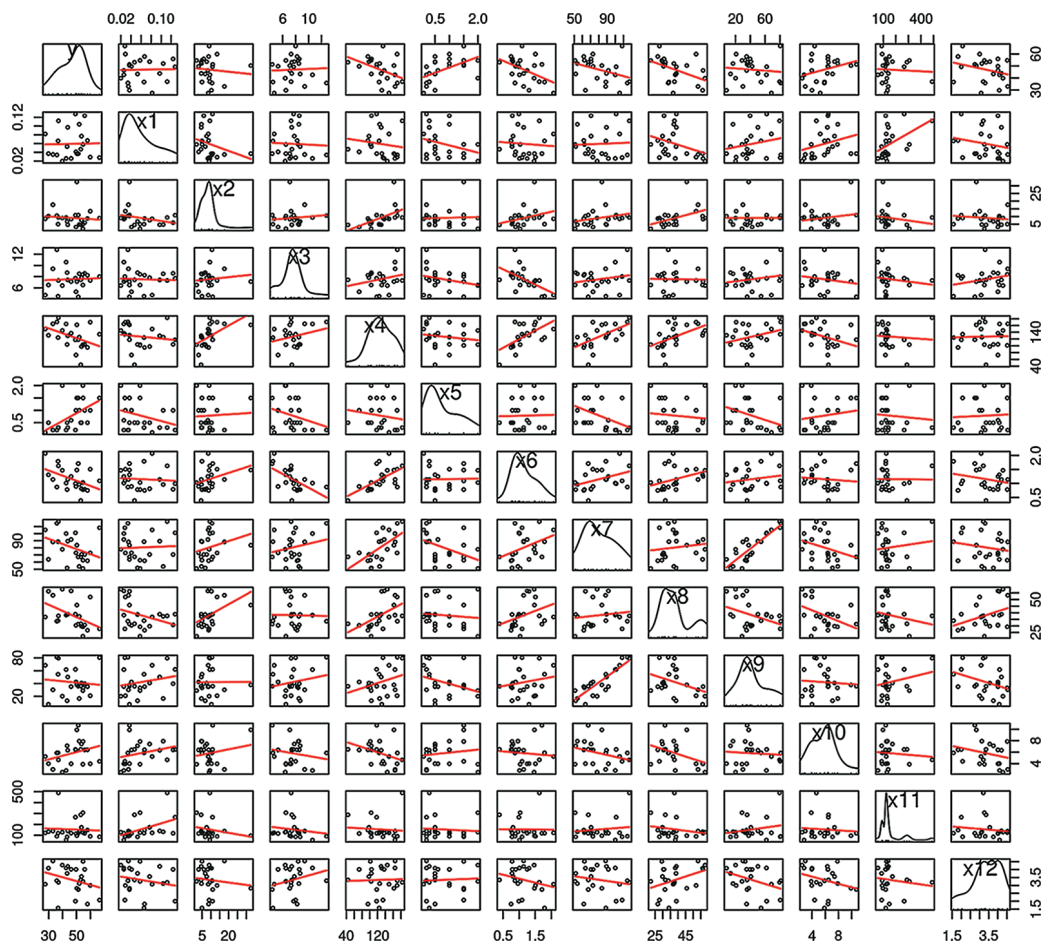


Рис. 2. Матрица диаграмм рассеяния переменных регрессионных моделей

В результате селекции модели по внутренним критериям качества, начиная с полной модели по всем подмножествам, было отобрано три модели кандидата. Так, пошаговым комбинированным алгоритмом по информационному критерию Акаике (AIC) [24] была отобрана модель с 8 коэффициентами (табл. 2).

При ранжировании моделей по значению скорректированного коэффициента детерминации (R^2_{adj}) лучшая модель включает в себя 7 переменных (табл. 3, рис. 3).

Последняя модель-претендент из трех предикторов была наиболее компактной и имеет лучшие значения по критерию Мэллоу (C_p) и байесовскому информационному критерию (BIC) (табл. 4, рис. 3).

В результате оценки фактора инфляции дисперсии для моделей-кандидатов очевидно, что только в модели с 3 предикторами отсутствует мультиколлинеарность (табл. 5). У остальных моделей половина коэффициентов показывает высокие значения фактора инфляции дисперсии (VIF), поэтому прогноз таких моделей на новых данных может давать неустойчивые результаты.

Оценка статистической значимости коэффициентов и моделей-кандидатов в целом представлена в таблицах 2, 3, 6. Все модели в целом были достоверными, однако наибольшее значение F-критерия наблюдалось в компактной модели с 3 коэффициентами (табл. 6). Также в этой модели каждый из коэффициентов в отдельности был статистически значимым в отличие от двух других моделей-претендентов (табл. 2, 3).

Таблица 2

Параметры оценки коэффициентов модели-претендента (пошаговым алгоритмом) прогноза уровня цинка в мышечной ткани, мг/кг, от показателей крови

Обозначение коэффициентов	Оценки коэффициентов	Стандартные ошибки коэффициентов	t-статистика	P_t
Int.	144,820	27,811	5,207	<0,001
x3	-8,442	3,147	-2,683	0,017
x4	0,484	0,186	2,606	0,020
x5	6,003	2,643	2,271	0,038
x6	-58,959	17,051	-3,458	0,004
x7	-0,327	0,222	-1,473	0,161
x9	0,332	0,184	1,806	0,091
x11	-0,029	0,015	-1,953	0,070
x12	-4,726	1,677	-2,819	0,013
RSE – 5,646; F-критерий – 7,197; $p < 0,001$.				

Примечание. Здесь и далее: Int. – свободный член уравнения; RSE – стандартная ошибка остатков; F-statistic – значение критерия Фишера; P_t – уровень значимости для t-статистики; p – уровень значимости модели.

Таблица 3

Параметры оценки коэффициентов модели-претендента (комбинированным алгоритмом) прогноза уровня цинка в мышечной ткани, мг/кг, от показателей крови

Обозначение коэффициентов	Оценки коэффициентов	Стандартные ошибки коэффициентов	t-статистика	P_t
Int.	144,820	27,811	5,207	<0,001
x3	-8,442	3,147	-2,683	0,017
x4	0,484	0,186	2,606	0,020
x5	6,003	2,643	2,271	0,038
x6	-58,959	17,051	-3,458	0,004
x7	-0,327	0,222	-1,473	0,161
x9	0,332	0,184	1,806	0,091
x11	-0,029	0,015	-1,953	0,070
x12	-4,726	1,677	-2,819	0,013
RSE – 5,646; F-критерий – 7,197; $p < 0,001$.				

**Модели-кандидаты прогноза уровня цинка в мышечной ткани
по значению внутренних критериев качества**

Формула модели	df	p	SSE	MSE	R ²	R ² _{adj}	AIC	BIC
Лучшая модель по значению R ² _{adj}								
$y \sim 1+x_3+x_4+x_5+x_6+x_8+x_{11}+x_{12}$	16	7	486,3	30,39	0,79	0,7	158,32	177,09
Лучшая модель по значению BIC и Cp								
$y \sim 1+x_5+x_6+x_{12}$	20	3	729,72	36,49	0,69	0,64	160,06	174,11

Примечание. Здесь и далее: df – число степеней свободы; p – число независимых переменных модели; SSE – сумма квадратов остатков; MSE – средний квадратов остатков; R² – коэффициент детерминации.

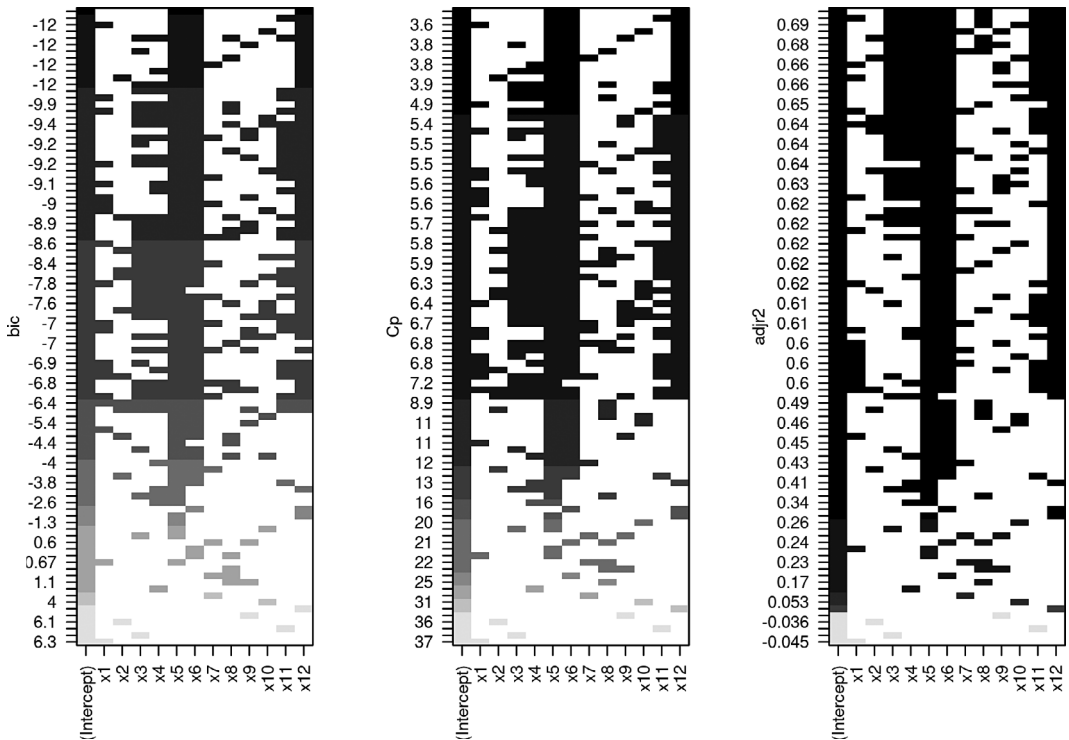


Рис. 3. Ранжирование моделей прогноза уровня цинка в мышечной ткани по байесовскому информационному критерию и критерию Мэллоу и скорректированному коэффициенту детерминации (слева направо)

Для оценки эффективности прогноза каждой из моделей-кандидатов необходимо использовать внешние критерии качества. Так, по результатам кросс-валидации с градацией наблюдений на 3 блока лучшая аппроксимация отмечается в модели с 3 предикторами (рис. 4, верхний левый), где четко видим, что сохранился угол наклона регрессионных линий.

Это наблюдение подтверждается при расчете среднего квадрата методом кросс-валидации (табл. 7). Методом кросс-проверки можно получить также несмещенные оценки

коэффициента детерминации (табл. 7). В результате все внешние оценки качества моделей указывают, что модель с тремя предикторами (x_5 , x_6 , x_{12}) является оптимальной и лучше всего подходит для прогноза уровня цинка в мышечной ткани геррефордского скота.

Таблица 5

Значения фактора инфляции дисперсии для коэффициентов регрессионных моделей оценки уровня цинка в мышечной ткани

Предиктор	Полная модель	$y \sim x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_8 + x_{11} + x_{12}$	$y \sim x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_9 + x_{11} + x_{12}$	$y \sim x_5 + x_6 + x_{12}$
x1	2,1	–	–	–
x2	4,2	–	–	–
x3	24	25,1	25,3	–
x4	33,8	26,5	28,2	–
x5	2,3	1,4	1,8	1
x6	33,3	33,2	33,5	1,1
x7	595,9	–	14	–
x8	162,6	2,5	–	–
x9	658,6	–	10,9	–
x10	3,3	–	–	–
x11	1,8	1,4	1,5	–
x12	1,8	1,4	1,5	1,1

Таблица 6

Параметры оценки коэффициентов модели-претендента (по критерию Мэллоу и байесовскому информационному критерию) прогноза уровня цинка в мышечной ткани

Обозначение коэффициентов	Оценки коэффициентов	Стандартные ошибки коэффициентов	t-статистика	P_i
Int.	73,580	7,166	10,267	<0,001
x5	9,409	2,118	4,443	<0,001
x6	-14,461	3,240	-4,463	<0,001
x12	-5,218	1,512	-3,450	0,003
RSE – 6,04; F-statistic – 14,7; $p < 0,001$.				

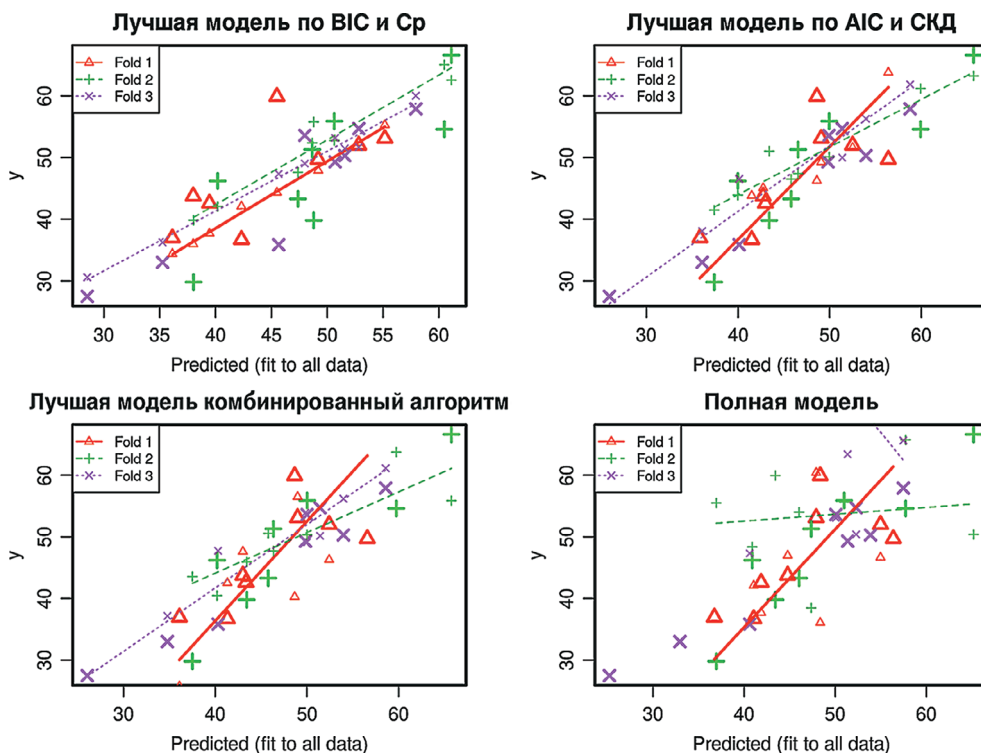


Рис. 4. Визуализация моделей-претендентов оценки уровня цинка в мышцах методом кросс-валидации с разбитием (градацией) на 3 блока

Таблица 7

Оценка ошибки при кросс-проверке регрессионных моделей прогноза уровня цинка в мышечной ткани

Формула модели	SS	df	MS	R ²	R ² _{cv}
$y \sim 1+x_5+x_6+x_{12}$	1102	24	46	0,684	0,489
$y \sim 1+x_3+x_4+x_5+x_6+x_8+x_{11}+x_{12}$	1240	24	52	0,790	0,523
$y \sim 1+x_3+x_4+x_5+x_6+x_7+x_9+x_{11}+x_{12}$	1854	24	77	0,793	0,545
$y \sim 1+x_1+x_2+x_3+x_4+x_5+x_6+x_7+x_8+x_9+x_{10}+x_{11}+x_{12}$	66180	24	2757	0,805	0,051

Примечание. R²_{cv} – коэффициент детерминации, рассчитанный методом кросс-валидации.

Проверка допущений в отношении остатков. Чтобы убедиться в пригодности модели для оценки, согласно методике последним этапом необходимо проверить допущения в отношении остатков выбранной модели. Поскольку модель множественной регрессии является частным случаем общих линейных моделей, в отношении остатков делаются предположения, отвечающие условиям теоремы Гаусса-Маркова. Поэтому распределение остатков в первую очередь тестировалось на соответствие нормальному распределению с помощью формальных критериев Андерсона-Дарлинга ($A = 0,27$; $p = 0,63$) и Шапира-Уилка ($W = 0,96$; $p = 0,56$). Визуализация распределения остатков также подтверждает выполнение предположения о соответствии распределения Гаусса (рис. 5, 6, верхний правый).

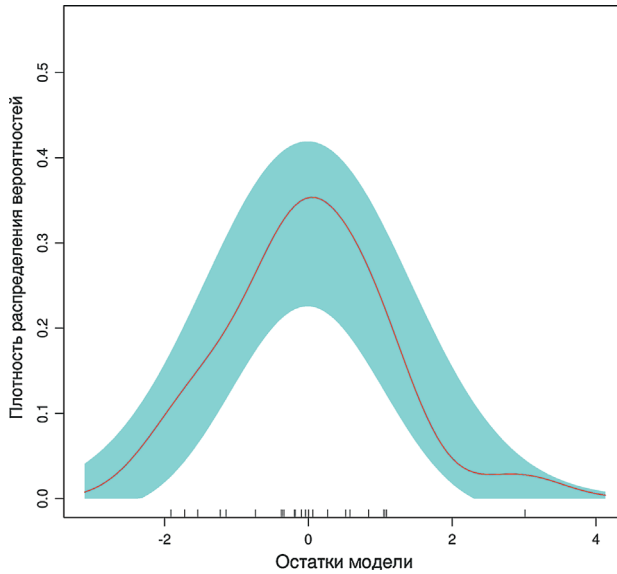


Рис. 5. Распределение остатков регрессионной модели оценки уровня цинка, мг/кг, в мышечной ткани

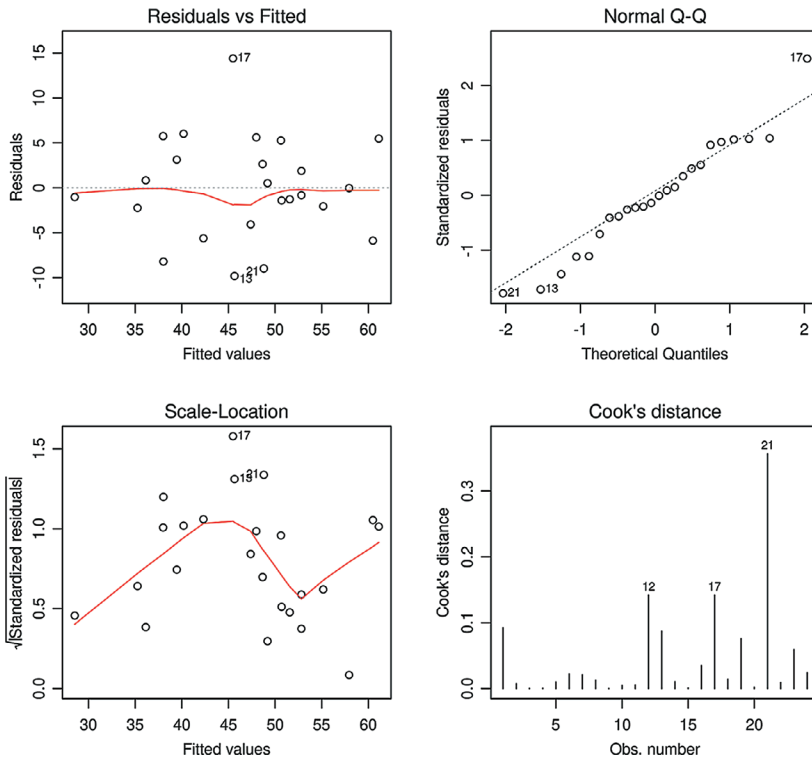


Рис. 6. Остатки в зависимости от отклика, график квантилей, квадратный корень стандартизированных остатков в зависимости от отклика и дистанций Кука (слева направо)

Разброс остатков и квадратного корня из стандартизированных остатков в зависимости от предсказанных моделью значений указывает на гомоскедастичность дисперсии остатков (рис. 6, левый нижний и верхний графики). Последний правый нижний график рисунка 6 предназначен для выявления влиятельных наблюдений. Порядковыми номерами обозначены

наблюдения с высокими значениями расстояния Кука. Данные наблюдения могут быть потенциальными выбросами. С помощью формального теста остатков с поправкой Бонферрони студентизированный остаток с максимальным значением будет проверяться на соответствие t-распределению. В результате максимальное значение студентизированного остатка составило 2,92, что соответствовало скорректированному уровню значимости (p) – 0,21.

Таким образом, нет оснований считать потенциально влиятельные наблюдения выбросами. Последним этапом оценивалась независимость остатков модели посредством проверки на наличие автокорреляций. С помощью критерия Дарбина-Уотсона, значение которого составило $d=1,5$, это соответствует коэффициенту автокорреляции, равному 0,21 ($p=0,08$). Проведенный тест подтверждает нулевую гипотезу об отсутствии автокорреляций в остатках модели.

Таким образом, для наиболее оптимальной и точной модели прогноза концентрации цинка в мышечной ткани необходимо установить уровень общего холестерина, значение цветового показателя крови, скорость оседания эритроцитов и подставить эти значения в уравнение регрессии:

$$y = 73,576 - 9,409 \times \text{СОЭ} - 14,461 \times \text{ЦП} - 5,218 \times \text{ОХ},$$

где y – концентрация цинка в мышечной ткани, мг/кг; СОЭ – скорость оседания эритроцитов, мм/ч; ЦП – цветовой показатель крови; ОХ – общий холестерин, ммоль/л.

Визуализация описанной модели в форме диаграммы рассеяния предсказанных и наблюдаемых значений с линией тренда представлена на рисунке 7. Полученная модель показала достаточно высокий уровень точности при внешней оценке критериев качества (табл. 7, рис. 4), поэтому ее можно рекомендовать для прогнозирования уровня цинка в мышечной ткани герефордского скота.

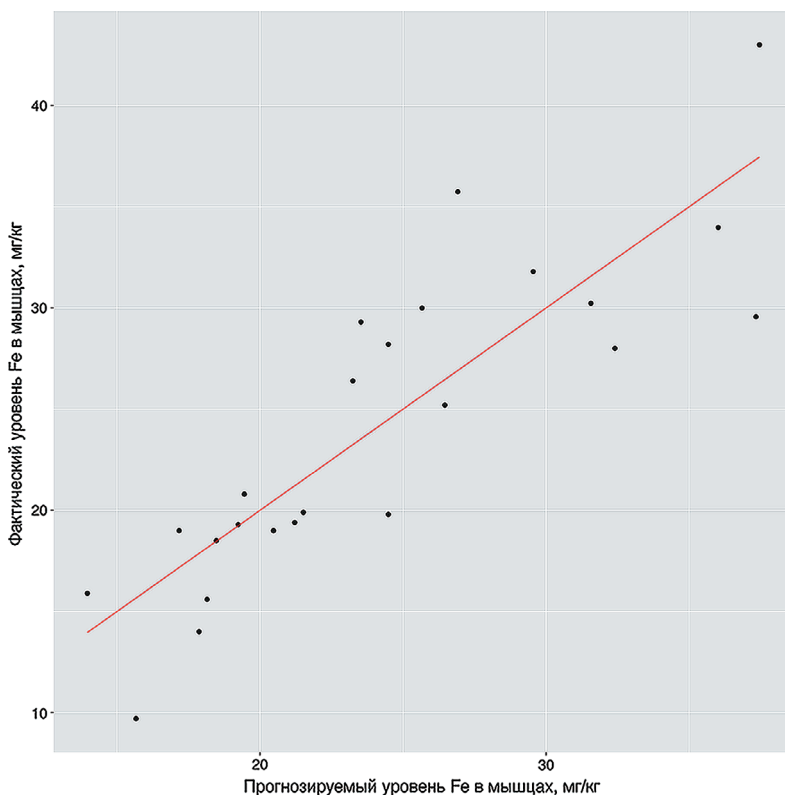


Рис. 7. Модель ожидаемого и фактического уровня цинка в мышечной ткани крупного рогатого скота

Выводы

В будущих исследованиях можно протестировать эффективность предложенной модели на новых данных и при необходимости повышения точности прогноза – продолжить обучение модели. Полученные результаты могут быть использованы в области экологии с целью оценки экологического благополучия и определения допустимой нагрузки цинка на животных. Для ветеринарной медицины полученная модель дает возможность прижизненно оценивать уровень цинка в мышечной ткани герефордского скота. В дальнейшем необходимо проводить подобные исследования на больших популяциях и применять смешанные линейные модели, которые учитывают дополнительные случайные эффекты.

Библиографический список

1. *Косолапов В.М.* Минеральные элементы в кормах и методы их анализа / В.М. Косолапов, В.А. Чуйков, Х.К. Худякова, В.Г. Косолапова. – М.: ООО «Угрешская типография», 2019. – 272 с.
2. McDonald P.M. Animal nutrition / P.M. McDonald R.A. Edwards J.F.D Greenhalgh C.A. Morgan, L.A. Sinclair, R.G. Wilkinson. – Greenhalgh: Pearson Education, 2022. – 752 p.
3. *Shah O.S.* Zinc as an element of therapeutic importance: A review / O.S. Shah, A.R. Baba, Z.A. Dar, T. Hussain, U. Amin, A. Jan, I. Asharaf, S.U. Nabi, A.U. Haq // The Pharma Innovation Journal. – 2017. – Vol. 6 (12). – Pp. 433–436.
4. *Карпенко А.Ф.* Полноценное кормление высокопродуктивных коров: Монография / А.Ф. Карпенко, Н.П. Разумовский, Д.Т. Соболев, А.А. Царенок. – Минск: Беларуская навука, 2021. – 430 с.
5. *Suttle N.F.* Mineral Nutrition of Livestock. – 4th Edition. – Cambridge: CABI, 2010. – Pp. 420–450.
6. *Fadlalla I.M.* The Interactions of Some Minerals Elements in Health and Reproductive Performance of Dairy Cows, in New Advances in the Dairy Industry. – London: IntechOpen, 2022. – 29 p.
7. *Yousif H.M.* Changes in Hormones and Some Antioxidant Markers That Correlated to Zinc Deficiency and Affecting Wool Growth in Male Lambs / H.M. Yousif R.A.E.S.A. Rezk A.M. El Mahdy // Journal of Current Veterinary Research. – 2022. – Vol. 4 (2). – Pp. 22–30.
8. *Cousins R.J.* Role of zinc in the regulation of gene expression // Proceedings of the Nutrition Society. – 1998. – Vol. 57. – Pp. 307–311.
9. *Krebs N.F.* Overview of zinc absorption and excretion in the human gastrointestinal tract // The Journal of nutrition. – 2000. – Vol. 130 (5). – Pp. 1374S–1377S.
10. *Miller W.J.* Absorption, tissue distribution, endogenous excretion, and homeostatic control of zinc in ruminants // The American journal of clinical nutrition. – 1969. – Vol. 22. – № 10. – Pp. 1323–1331.
11. *Мирошников С.А.* Региональные особенности элементного состава шерсти крупного рогатого скота (результаты пилотного исследования) / С.А. Мирошников, А.В. Харламов, О.А. Завьялов, А.Н. Фролов // Вестник мясного скотоводства. – 2015. – № 2 (90). – С. 7–10.
12. *Скальный А.В.* Аналитические методы в биоэлементологии / А.В. Скальный, Е.В. Лакарова, В.В. Кузнецов, М.Г. Скальная. – СПб.: Наука, 2009. – 576 с.
13. *Мирошников С.А., Лебедев С.В.* Диапазон концентраций (референтные значения) химических элементов в теле животных // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 6 (112). – С. 241–243.

14. Скальный А.В. Микроэлементозы человека: гигиеническая диагностика и коррекция // Микроэлементы в медицине. – 2000. – Т. 1 (1). – С. 2–8.
15. Харламов А.В. Информативность биосубстратов при оценке элементного статуса сельскохозяйственных животных (обзор) / А.В. Харламов, А.Н. Фролов, О.А. Завьялов, С.А. Мирошников // Вестник мясного скотоводства. – 2014. – № 4 (87). – С. 53–58.
16. Zuur A.F., Ieno E.N., Elphick C.S. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems // Methods in ecology and evolution. – 2010. – Vol. 1, № 1. – Pp. 3–14.
17. Adikaram K.L.B. Data transformation technique to improve the outlier detection power of Grubbs' test for data expected to follow linear relation / K.L.B. Adikaram M.A. Hussein, M. Effenberger, T. Becker // Journal of applied mathematics. – 2015. – Vol. 2015. – Pp. 1–9.
18. Razali N.M., Wah Y.B. Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests // Journal of statistical modeling and analytics. – 2011. – Vol. 2 (1). – Pp. 21–33.
19. Xiao W. Novel online algorithms for nonparametric correlations with application to analyze sensor data // 2019 IEEE International Conference on Big Data. – 2019. – Pp. 404–412.
20. Aickin M., Gensler H. Adjusting for multiple testing when reporting research results: the Bonferroni vs Holm methods // American journal of public health. – 1996. – Vol. 86 (5). – Pp. 726–728.
21. Баймишев Х.Б., Савинков А.В. Ветеринарная гематология: Методические указания для выполнения практических работ. – Кинель: РИЦ СГСХА, 2014. – 34 с.
22. Васильев Ю.Г., Трошин Е.И., Любимов А.И. Ветеринарная клиническая гематология: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2022. – 656 с.
23. Васильева С.В., Конопатов Ю.В. Клиническая биохимия крупного рогатого скота: Учебное пособие для вузов. 3-е изд. – СПб.: Лань, 2021. – 188 с.
24. Chen Y. Spatial autocorrelation approaches to testing residuals from least squares regression // PloS one. – 2016. – Vol. 11, № 1. – Pp. e0146865.

MODELS FOR PREDICTING THE LEVEL OF ZINC IN THE MUSCLE TISSUE OF CATTLE

K.N. NAROZHNYKH

(Novosibirsk State Agrarian University)

Biochemical processes occurring in of cattle related to their elemental status. Therefore, the search for models of in vivo assessment of the level of zinc in the muscle tissue of animals is relevant. The level of zinc in muscle tissue influences the quality indicators of beef. The samples of the diaphragmatic muscle weighing 100 g were taken from Hereford cattle bred under typical conditions of an agribusiness sector in the south of Western Siberia (Russia). Elemental analysis was carried out by the atomic absorption method with electrothermal atomization on a spectrometer MGA-1000. Measuring of hematological parameters – erythrocyte, leucocyte and haemoglobin levels – was carried out on an automatic hematological analyzer PCE-90VET. Biochemical parameters were determined using photometric methods on a Photometer-5010 biochemical analyzer. The coefficients of regression models were calculated using the least squares method. The choice of the most accurate and effective model was made on the basis of a comprehensive assessment of indicators of internal and external quality criteria. The values of the dependent variable correspond to the Gaussian one. A high correlation between independent variables was

revealed. The selection based on internal and external quality criteria revealed an optimal model for predicting the level of zinc in muscle tissue of Hereford cattle, containing three predictors: erythrocyte sedimentation rate (mm/h), color index and total cholesterol (mmol/l). The model meets the necessary assumptions: the residuals are normally distributed, there are no autocorrelations, and the observations are influential. There is no evidence of multicollinearity between the main effects of the main model ($VIF = 1.0-1.1$). The resulting model can be used for in vivo assessment of the level of zinc in the muscle tissue of cattle.

Key words: cattle, Hereford breed, zinc, modelling, regression.

References

1. Kosolapov V.M., Chuykov V.A., Khudyakova Kh.K., Kosolapova V.G. Mineral'nye elementy v kormakh i metody ikh analiza [Mineral elements in feed and methods of their analysis]. M.: OOO "Ugreshskaya tipografiya". 2019: 272. (In Rus.)
2. McDonald P.M., R.A. Edwards, Greenhalgh J.F.D., Morgan C.A., Sinclair L.A., Wilkinson R.G. Animal nutrition. Greenhalgh. Pearson Education. 2022: 752.
3. Shah O.S., Baba A.R., Dar Z.A., Hussain T., Amin U., Jan A., Asharaf I., Nabi S.U., Haq A.U. Zinc as an element of therapeutic importance: A review. The Pharma Innovation Journal. 2017; 6 (12): 433–436.
4. Karpenko A.F., Razumovskiy N.P., Sobolev D.T., Tsarenok A.A. Polnotsennoe kormlenie vysokoproduktivnykh korov: monografiya [Complete feeding of highly productive cows: monograph]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2021: 430. (In Rus.)
5. Suttle N.F. Mineral Nutrition of Livestock. 4th Edition. Cambridge: CABI. 2010: 420–450.
6. Fadlalla I.M. The Interactions of Some Minerals Elements in Health and Reproductive Performance of Dairy Cows, in New Advances in the Dairy Industry. London. IntechOpen. 2022: 29.
7. Yousif H.M., Rezk R.A.E.S.A., El Mahdy A.M. Changes in Hormones and Some Antioxidant Markers That Correlated to Zinc Deficiency and Affecting Wool Growth in Male Lambs. Journal of Current Veterinary Research. 2022: 4 (2): 22–30.
8. Cousins R.J. Role of zinc in the regulation of gene expression. Proceedings of the Nutrition Society. 1998; 57: 307–311.
9. Krebs N.F. Overview of zinc absorption and excretion in the human gastrointestinal tract. The Journal of nutrition. 2000; 130 (5): 1374S-1377S.
10. Miller W.J. Absorption, tissue distribution, endogenous excretion, and homeostatic control of zinc in ruminants. The American journal of clinical nutrition. 1969; 22; 10: 1323–1331.
11. Miroshnikov S.A. Regional'nye osobennosti elementnogo sostava shersti krupnogo rogatogo skota (rezul'taty pilotnogo issledovaniya) [Regional features of the elemental composition of cattle wool (results of a pilot study)]. Vestnik myasnogo skotovodstva. 2015; 2(90): 7–10. (In Rus.)
12. Skal'niy A.V., Lakarova E.V., Kuznetsov V.V., Skal'naya M.G. Analiticheskie metody v bioelementologii [Analytical methods in bioelementology]. Spb.: Nauka, 2009: 576. (In Rus.)
13. Miroshnikov S.A., Lebedev S.V. Diapazon kontsentratsii (referentnye znacheniya) khimicheskikh elementov v tele zhivotnykh [Range of concentrations (reference values) of chemical elements in the body of animals]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2009; 6(112): 241–243. (In Rus.)
14. Skal'niy A.V., Frolov A.N., Zav'yalov O.A., Miroshnikov S.A. Mikroelementozy cheloveka: gigienicheskaya diagnostika i korraktsiya [Human microelementoses: hygienic diagnostics and correction]. Mikroelementy v meditsine. 2000; 1 (1): 2–8. (In Rus.)

15. *Kharlamov A.V., Frolov A.N., Zav'yalov O.A., Miroshnikov S.A.* Informativnost' biosubstratov pri otsenke elementnogo statusa sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh (obzor) [Informativity of biosubstrates in assessing the elemental status of farm animals (review)]. *Vestnik myasnogo skotovodstva*. 2014; 4(87): 53–58. (In Rus.)
16. *Zuur A.F., Ieno E.N., Elphick C.S.* A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in ecology and evolution*. 2010; 1; 1: 3–14.
17. *Adikaram K.L.B., Hussein M.A., Effenberger M., Becker T.* Data transformation technique to improve the outlier detection power of Grubbs' test for data expected to follow linear relation. *Journal of applied mathematics*. 2015; 2015: 1–9.
18. *Razali N.M., Wah Y.B.* Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of statistical modeling and analytics*. 2011; 2 (1): 21–33.
19. *Xiao W.* Novel online algorithms for nonparametric correlations with application to analyze sensor data. 2019 IEEE International Conference on Big Data. 2019: 404–412.
20. *Aickin M., Gensler H.* Adjusting for multiple testing when reporting research results: the Bonferroni vs Holm methods. *American journal of public health*. 1996; 86 (5): 726–728.
21. *Baymishev Kh.B., Savinkov A.V.* Veterinarnaya gematologiya: metodicheskie ukazaniya dlya vypolneniya prakticheskikh rabot [Veterinary hematology: guidelines for practical work]. Kinel': RITs SGSKhA, 2014: 34. (In Rus.)
22. *Vasil'ev Yu.G., Troshin E.I., Lyubimov A.I.* Veterinarnaya klinicheskaya gematologiya: Uchebnoe posobie [Veterinary clinical hematology: textbook]. Spb.: Izdatel'stvo "Lan". 2022: 656. (In Rus.)
23. *Vasil'eva S.V., Konopatov Yu.V.* Klinicheskaya biokhimiya krupnogo roga togo skota: uchebnoe posobie dlya vuzov [Clinical biochemistry of bovine animals: textbook for universities]. Spb.: Lan', 2021: 188. (In Rus.)
24. *Chen Y.* Spatial autocorrelation approaches to testing residuals from least squares regression. *PloS one*. 2016; 11; 1: e0146865.

Нарожных Кирилл Николаевич, заведующий лабораторией, канд. биол. наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет»; 630039, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160; тел.: (952) 938–38–91; e-mail: k@narozhnykh.ru

Kirill N. Narozhnykh, CSc (Bio), Head of the Laboratory, Novosibirsk State Agrarian University (160 Dobrolyubova Str., Novosibirsk, 630039, Russian Federation; phone: (952) 938–38–91; E-mail: k@narozhnykh.ru