

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63>**ПРИМЕНЕНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЯСА СИБИРСКОГО ОСЕТРА ЛЕНСКОЙ ПОПУЛЯЦИИ, РАЗВОДИМОГО В УСЛОВИЯХ УСТАНОВКИ ЗАМКНУТОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Научная статья

Отрадных П.И.^{1,*}, Бардуков Н.В.², Никипелов В.И.³, Никипелова А.К.⁴, Белоус А.А.⁵, Зиновьева Н.А.⁶¹ ORCID : 0000-0002-1153-5815;² ORCID : 0000-0002-5497-2409;³ ORCID : 0009-0008-6411-2454;⁴ ORCID : 0009-0002-8248-7555;⁵ ORCID : 0000-0001-7533-4281;^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, Подольск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (deriteronard[at]gmail.com)

Аннотация

Впервые в России произведено измерение и визуализация спектра цвета филе сибирского осетра ленской популяции в контексте проведения исследований его прогнозирования и выявления взаимосвязи с хозяйственно-полезными признаками. С целью определения возможности прогноза цветовых характеристик филе осетровых рыб, были составлены уравнения множественной регрессии для элементов спектра цветовой модели CIELAB. Для этого путём корреляционного анализа были определены морфометрические характеристики, в наибольшей степени взаимосвязанные с каждым элементом спектра. Так, диапазон коэффициентов корреляции варьировал в следующих пределах: для спектра L*: от -0,18 до 0,22 (слабая отрицательная (с длиной головы) и положительная (с длиной хвостового стебля) корреляция); для спектра a*: от 0,06 до 0,71 (незначительная (с длиной всей рыбы) и сильная положительная (с массой тела) корреляция); для спектра b*: от +0,20 до +0,75 (слабая (с пектоцентральной и вентроанальной расстоянием) и сильная положительная (с массой тела) корреляция). Подбор моделей, в наибольшей степени описывающих изменчивость исследованных элементов спектра, осуществлялся при помощи алгоритма пошаговой регрессии на основе информационного критерия Акаике. Итоговая точность прогноза, выраженная в коэффициенте детерминации, составила $R^2 = 0,424...0,597$ при достоверности не ниже $p=0,003$, что видится приемлемым результатом для моделей, составленных на выборке объемом 50 голов, однако в рамках естественнонаучного исследования подобный результат считается умеренным. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования предложенного подхода для прогнозирования цветовых характеристик филе осетровых рыб на основе доступных морфометрических показателей. Это позволит оперативно прогнозировать качество сырья всего поголовья на основе исследования некоторой его доли, что имеет большое практическое значение. Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть связаны с расширением выборки исследованных объектов, включением дополнительных предикторов, а также апробацией примененного подхода в производственных условиях. Также это исследование имеет большое значение для формирования подходов к оценке генетической составляющей изменчивости хозяйственно-полезных признаков у осетровых рыб. В этом направлении возможна дальнейшая адаптация методологии BLUP и GWAS для поиска ассоциаций цветовых характеристик филе с полиморфизмами отдельных генов.

Ключевые слова: сибирский осетр, популяция, товарная аквакультура, цвет филе, коэффициент корреляции, прогноз данных.

APPLICATION OF MORPHOMETRIC TRAITS TO PREDICT COLOUR CHARACTERISTICS OF MEAT OF SIBERIAN STURGEON OF THE LENA POPULATION, BRED UNDER CONDITIONS OF A CLOSED WATER SUPPLY SYSTEM

Research article

Otradnov P.I.^{1,*}, Bardukov N.V.², Nikipelov V.I.³, Nikipelova A.K.⁴, Belous A.A.⁵, Zinoveva N.A.⁶¹ ORCID : 0000-0002-1153-5815;² ORCID : 0000-0002-5497-2409;³ ORCID : 0009-0008-6411-2454;⁴ ORCID : 0009-0002-8248-7555;⁵ ORCID : 0000-0001-7533-4281;^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Podolsk, Russian Federation

* Corresponding author (deriteronard[at]gmail.com)

Abstract

For the first time in Russia, the colour spectrum of fillets of Siberian sturgeon of the Lena population was measured and visualized in the context of research into its prediction and identification of its relationship with economically useful traits. In

order to determine the possibility of predicting the colour characteristics of sturgeon fillets, multiple regression equations were developed for the elements of the CIELAB colour model spectrum. For this purpose, the morphometric characteristics that are most correlated with each element of the spectrum were determined by correlation analysis. Thus, the range of correlation coefficients varied as follows: for the spectrum L*: from -0.18 to 0.22 (weak negative (with head length) and positive (with tail stem length) correlations); for the spectrum a*: 0.06 to 0.71 (weak (with whole fish length) and strong positive (with body mass) correlations); for spectrum b*: +0.20 to +0.75 (weak (with pectoventral and ventroanal distance) and strong positive (with body mass) correlations). The selection of models that best describe the variability of the studied elements of the spectrum was carried out using a stepwise regression algorithm based on the Akaike information criterion. The final prediction accuracy, expressed in the coefficient of determination, was $R^2 = 0.424...0.597$ with the reliability not lower than $p=0.003$, which seems to be an acceptable result for models compiled on a sample of 50 heads, but within the framework of natural science research such a result is considered moderate. The results obtained indicate the promising use of the proposed approach for predicting the colour characteristics of sturgeon fillets based on available morphometric indicators. This will make it possible to promptly predict the quality of raw material of the entire stock on the basis of the study of some of its share, which is of great practical importance. Further research in this direction may be related to the expansion of the sample of studied objects, inclusion of additional predictors, as well as approbation of the applied approach in production conditions. This study is also of great importance for the formation of approaches to the assessment of the genetic component of variability of economically useful traits in sturgeon fish. Further adaptation of the BLUP and GWAS methodology to search for associations of fillet colour characteristics with polymorphisms of individual genes is possible in this direction.

Keywords: Siberian sturgeon, population, commercial aquaculture, fillet colour, correlation coefficient, data prediction.

Введение

Осетровые рыбы являются уникальными и ценными видами, обусловленными их долгой продолжительностью жизни, крупным размером и высокой экономической ценностью. В северном полушарии осетровые (*Acipenseridae*) долгое время считались ценными рыбными ресурсами, главным образом для производства икры [1]. В последние десятилетия антропогенная и промышленная деятельность представляла серьезную угрозу естественной среде обитания дикого осетра [2].

Большинство видов осетровых находятся под угрозой исчезновения и включены в Конвенцию о международной торговле видами дикой фауны и флоры, находящимися под угрозой исчезновения (СИТЕС). Так, в настоящее время основным источником продукции осетровых является аквакультура [3], [4].

Сибирский осетр (*Acipenser baerii*) является одним из наиболее распространенных видов, используемых в аквакультуре из-за его быстрого роста и производства икры. В настоящее время сибирский осетр находится под угрозой вымирания и включен в Красную книгу Международного союза охраны природы [5]. Данный вид стал первым из осетровых, успешно введенным в коммерческую аквакультуру и до сегодняшнего дня остается перспективным объектом разведения в искусственных условиях как в России, так и за рубежом [6]. В последние годы особенно популярным стало содержание и выращивание сибирского осетра в промышленных условиях, включая установки замкнутого водоснабжения, которые позволяют создавать и контролировать оптимальные условия для роста и развития рыб, необходимость которых возникает как в племенном, так и в товарном производстве [7].

Цвет мяса является одной из ключевых характеристик, определяющих товарный вид и, как следствие, привлекательность продукции для конечного потребителя. По этой причине цвет – одна из важнейших характеристик мясной продукции, вопрос исследования которой поднимается в странах с развитой мясной отраслью [8], [9].

Одним из направлений подобных исследований является поиск зависимостей между цветом мяса и характеристиками, анализ которых возможен прижизненно. Зависимости были обнаружены у ряда видов сельскохозяйственных животных с генетической [10] и паратипической [11] составляющими. При этом, была обнаружена наследуемость спектров цвета мяса [12].

Считается, что факторами среды, в наибольшей степени влияющими на цветовые характеристики мяса, являются условия кормления, возраст убоя и наличие предубойных стрессовых факторов [13]. Кроме того, отмечается влияние фактора породы и возраста животных [11]. Однако, взаимосвязь цвета мяса с индивидуальными характеристиками животных, получаемыми в рамках стандартных зоотехнических мероприятий (бонитировка), такими, как живая масса и прочие морфометрические показатели, также представляет интерес [14].

Оптические технологии, в частности мультиспектральная визуализация приобретают все большее значение в исследованиях и промышленных применениях для измерения показателей мяса и мясopодуkтов в режиме реального времени, которые позволяют получать более точные результаты, не разрушая мясо [15].

Нахождение зависимостей между индивидуальными характеристиками животных и элементами спектра цвета их мяса, с учётом наследуемости этих признаков, представляет интерес с селекционной точки зрения. Возможность достоверного прогноза цвета мяса без необходимости постубойного анализа откроет перспективы селекции на определенный оттенок мяса, который, в свою очередь, может быть сопряжен как с уникальными вкусовыми, так и с иными потребительскими качествами.

Целью исследования являлась оценка точности прогноза цвета мяса осетровых рыб на основании их бонитировочных (морфометрических) характеристик.

Для достижения обозначенной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) сформировать выборку из записей о морфометрических признаках и характеристиках цвета мяса по шкале $L^*a^*b^*$ (не менее 50 особей сибирского осетра ленской популяции);
- 2) рассчитать уровень корреляционной взаимосвязи между измеряемыми показателями и спектрометрическими параметрами цвета мяса;

3) построить модели линейной регрессии для оценки зависимости цветовых параметров мяса от морфометрических признаков рыб;

4) провести анализ полученных моделей и сформулировать вывод о точности прогноза в рамках примененного подхода.

Методы и принципы исследования

Материалом исследования были данные двух измерений и убойных показателей особей сибирского осетра ленской популяции ($n=50$), содержащихся в экспериментальной установке замкнутого водоснабжения (УЗВ) на базе ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста, мощностью до 1500 кг. Возраст рыбы на момент эксперимента составил 12 месяцев. Рыбы содержались при температуре 19–21 °С, среднее содержание растворенного кислорода составило 10 мг/л, плотность посадки – до 40 кг/м². Все технологические параметры, влияющие на рост, развитие, жизнеспособность рыбы (плотность посадки, водообмен, качество воды), находились в пределах нормы.

Для оценки динамики темпов роста и развития, каждой особи присваивали индивидуальный номер (мечение осуществлялось микрочипом Animal ID). Микрочип вводился внутримышечно под 3-4 жучку (костяной нарост, характерный для осетровых рыб) спинного отдела. Активация микрочипа производилась при помощи сканера RT-200.

Измерение морфометрических признаков проводилось одним оператором по 13 пластическим признакам в соответствии с методическими рекомендациями В. Д. Крыловой и Л. И. Соколова (1981) [16]. Линейные и криволинейные промеры исследуемых рыб определяли с помощью штангенциркуля ШЦ-II – 250 – 0,02 ГОСТ 166-89 (рис. 1) и измерительной ленты размером 150*2 см с нанесенной сантиметровой шкалой и миллиметровыми делениями с погрешностью ± 2 мм (рис.2).



Рисунок 1 - Измерение морфометрических признаков сибирского осетра при помощи штангенциркуля
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.1>

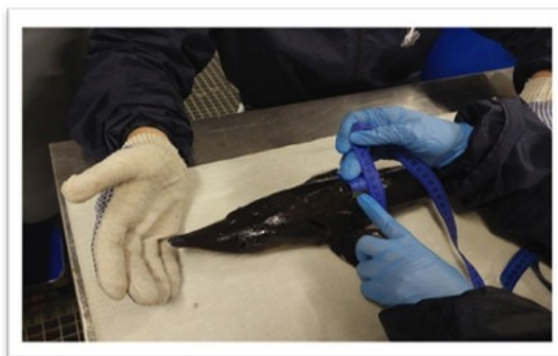


Рисунок 2 - Измерение морфометрических признаков сибирского осетра при помощи измерительной ленты
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.2>

Для определения индивидуальной массы тела каждую особь взвешивали на электронных весах Merteck M-ER 326 AFU-32.1 Post II LCD с точностью $\pm 2,5$ грамм ГОСТ OIML R 76-1-2011 «Весы неавтоматического действия. МП». Значение максимальной нагрузки 32 кг, минимальной 0,1 кг. (рис.3).



Рисунок 3 - Весы электронные Mertech M-ER
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.3>

Измерение цветовых характеристик мяса проводилось при помощи портативного спектрофотометра (колориметра) Konica Minolta CM-700d (рис. 3а). Данный прибор характеризует цветовые характеристики в рамках системы $L^*a^*b^*$, представляющей собой трехкоординатную модель, где $L^* \in [0, 100]$, где 0 – чёрный, 100 – белый; $a^* \in [-128, 127]$, где -128 – зеленый, 127 – пурпурный; $b^* \in [-128, 127]$, где -128 – голубой, 127 – жёлтый (рис. 3б) [17].

Определение цвета мяса производилось в пяти точках среза участка между 2-3 позвонком (рис. 4, 5). Затем для каждой особи определялось среднее значение по шкалам спектра, которые в дальнейшем использовались для анализа.

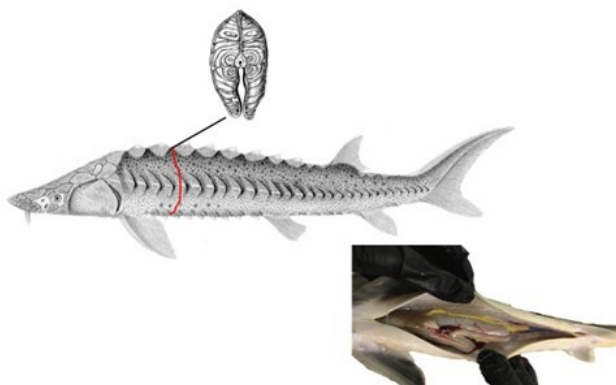


Рисунок 4 - Участок, на котором производилось взятие образца для определения цвета мяса
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.4>

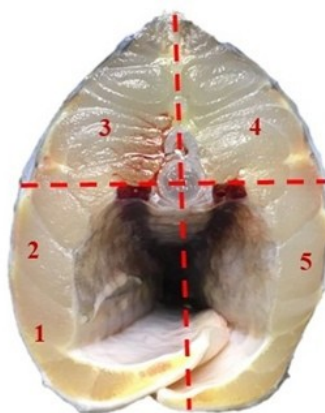


Рисунок 5 - Точки измерения цветового спектра мяса рыб
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.5>

Коэффициенты корреляции между признаками определялись по формуле Пирсона:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

где n – количество наблюдений (пар значений),

x_i и y_i – соответствующие значения двух переменных для каждого наблюдения,

\bar{x} , \bar{y} – средние значения переменных x и y , соответственно.

Уравнения множественной регрессии в общем виде имели форму:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon,$$

где y – независимая переменная (признак, для которого строится линейное уравнение), β_0 – свободный член уравнения, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ – коэффициенты регрессии для предикторов от 1 до p (признаков, влияние которых на независимую переменную оценивается в рамках уравнения), ε – остаток (разница между прогнозируемым на основе уравнения и наблюдаемым значениями).

Коэффициенты в уравнении линейной регрессии, таким образом, демонстрируют, насколько значение признака y меняется при изменении соответствующего предиктора на 1.

Для определения коэффициентов линейной регрессии в уравнениях использовался метод наименьших квадратов, сводившийся к решению системы уравнений:

$$(X^T X) \cdot \beta = X^T Y,$$

где X – матрица размером $n \times p$, где n – количество наблюдений, p – количество предикторов в уравнении,

$X^T X$ – матрица ковариации предикторов,

β – вектор коэффициентов размером $m \times 1$,

Y – вектор значений наблюдений размером $n \times 1$,

$X^T Y$ – матрица ковариации предикторов с зависимой переменной.

Решение, таким образом, имело вид:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

где $(X^T X)^{-1}$ – обратная матрица $X^T X$.

Обработка данных осуществлялась при помощи языка программирования R в среде разработки RStudio. Подбор уравнений линейной регрессии осуществлялся при помощи алгоритма пошаговой регрессии (stepwiseregression) на основе информационного критерия Акаике, реализованного в библиотеке MASS [18].

Основные результаты

Основные описательные характеристики морфометрии выборки приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Морфометрические характеристики сибирского осетра ленской популяции

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.6>

Признак [16]	Параметр			
	Среднее значение $M \pm m$	Размах значений		CV, %
		Min	Max	
Масса тела, г.	455,03±30,48	156,00	1404,00	47,37
Длина всей рыбы, см	58,85±0,64	48,00	69,00	7,67
Длина тела, см	46,92±0,52	38,00	54,00	7,88
Длина рыбы до конца средних лучей, см	49,6±0,55	40,00	58,00	7,81
Длина головы, см	12,54±0,12	10,50	14,50	6,59
Пектоцентрально-е расстояние, см	17,6±0,24	12,00	21,50	9,63
Вентроанальное расстояние, см	6,26±0,1	4,50	8,00	11,56
Длина хвостового стебля, см.	6,7±0,1	4,50	8,00	10,63
Наибольшая высота тела, см.	5,79±0,08	4,30	7,00	10,31
Толщина тела, см	4,8±0,09	3,30	6,20	12,69
Высота хвостового стебля, см	1,56±0,02	1,20	2,00	10,66
Обхват тела, см	17,84±0,25	13,50	22,50	9,88
Обхват	5,92±0,08	4,40	7,00	9,09

хвостового стебля, см				
--------------------------	--	--	--	--

Примечание: $n = 50$ шт.

Спектр осетрового мяса также был получен путем измерения 5-ти точек в разрезе 2 и 3 позвонка (рис.26). Цвет рыбного филе, в сравнение с мясом млекопитающих, имеет более светлый оттенок, относящийся к зелено-желтому спектру. Это также подтверждается исследованием цветовых характеристик мяса сибирского осетра и его помесей, проведенным Jankowska et al (2005) [19].

Полученные статистические параметры свидетельствуют о следующей общей картине спектра:

- Среднее значение яркости L^* составляет 52,44, что соответствует средней светлоте мяса.
- Значение красного цветового тона a^* равно -1,19. Это говорит о преобладании серо-зеленоватых оттенков.
- Значение желтого тона b^* составило 7,44. Это указывает на небольшую долю желтизны.
- Ошибки среднего арифметического находились в диапазоне 0,20...0,47, то есть данные достаточно однородные.

Разнообразие признаков, выраженное в коэффициентах вариации, демонстрирует картину, свидетельствующую о низкой вариабельности яркости мяса ($C_v = 6,38\%$), высокой вариабельности цветового тона a^* ($C_v = 120,03\%$) и средней вариабельности спектра b^* ($C_v = 42,45\%$). Высокая однородность показателей яркости мяса объясняется тем, что измерения осуществлялись в закрытом помещении при фиксированных условиях освещения, в то же время, высокий разброс значений красно-зеленого тона a^* свидетельствует о неразличимых вкраплениях крови в некоторых точках образцов, которыми был вызван наблюдаемый разброс значений.

Исходя из представленных статистических показателей следует, что цвет мяса характеризуется средней светлотой, серо-зеленоватым оттенком и небольшой долей желтизны. Полученные значения достаточно однородны, чтобы в дальнейшем использоваться в качестве эталонных.

Картини распределения, наблюдаемые по каждому спектру, представлены на рисунках 6-8.

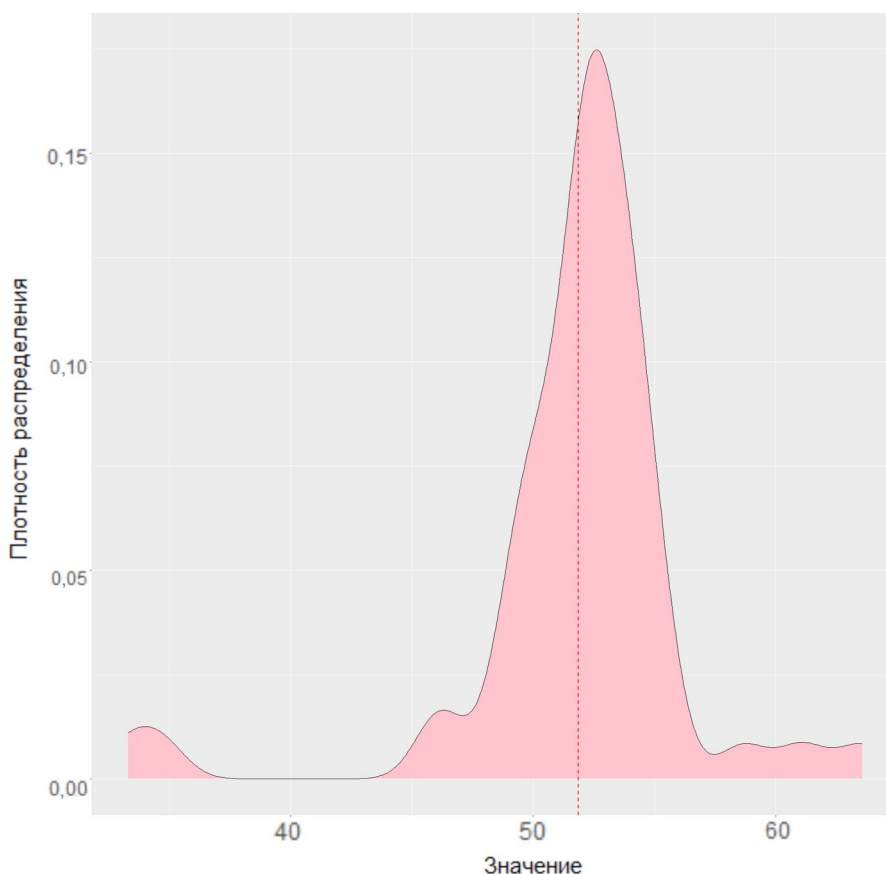


Рисунок 6 - Распределение значений спектра L^* в выборке

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.7>

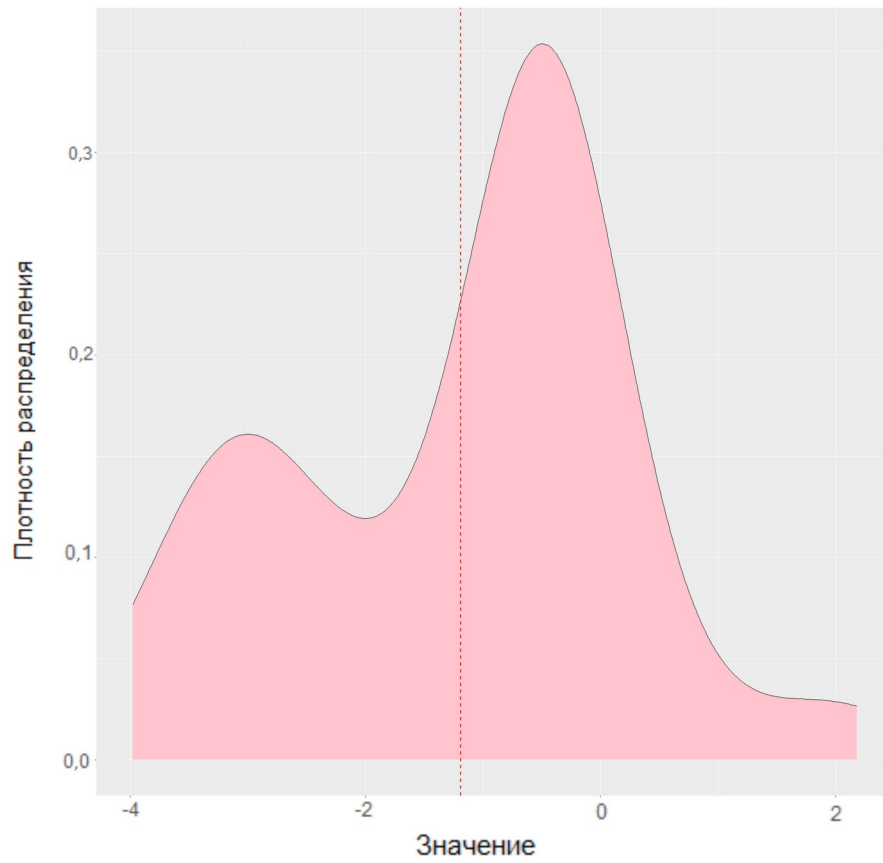


Рисунок 7 - Распределение значений спектра a* в выборке
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.8>

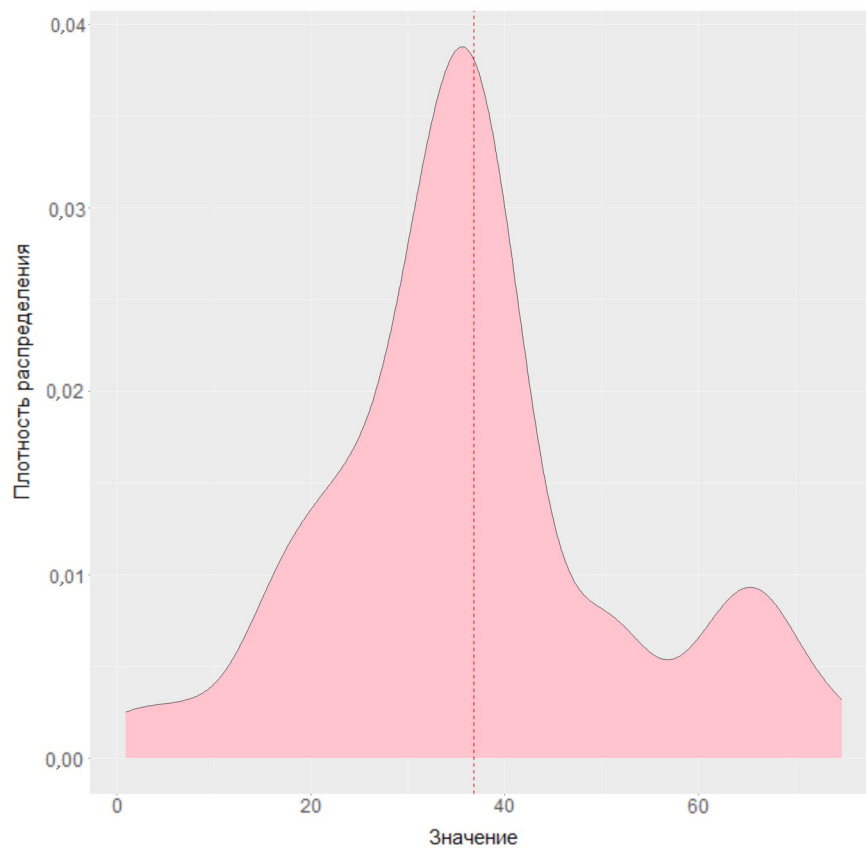


Рисунок 8 - Распределение значений спектра b* в выборке
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.9>

Наблюдаемая картина распределения по каждому спектру также подтверждает ранее сделанные выводы: в наибольшей степени нормальному распределению соответствует спектр L^* , в наименьшей – a^* .

Визуально распределение цвета образцов представлено на рисунке 9.

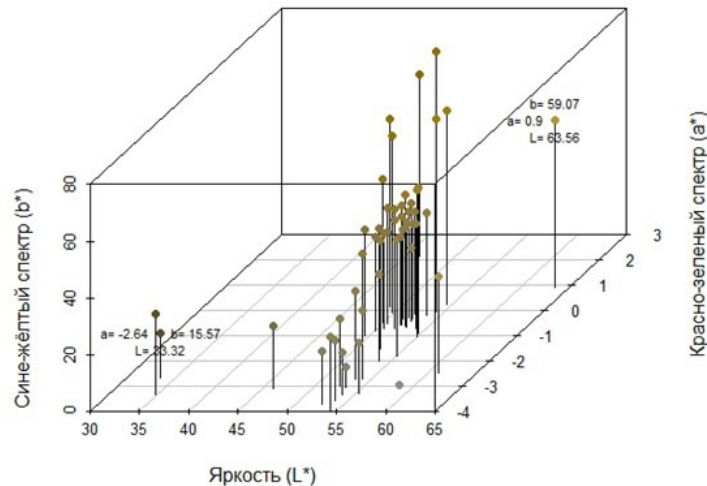


Рисунок 9 - Визуализация результатов измерения цвета филе осетровых в рамках модели цветового спектра CIELAB
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.10>

Небольшая выборка объясняется сложностью в получении необходимого материала. Осетр является ценной рыбой по своему качественному составу мяса и растет в производственных условиях 4-5 лет. В связи с чем, выборка клинически здоровых особей затруднительна для исследования убойных показателей и выборка данных может считаться репрезентативной. Исследуемая популяция сибирского осетра, в сравнение с литературными данными имеет более светлый цвет филе, спектрально насыщенного зеленовато-желтым оттенком. Предположительно, на данный аспект влияют, в первую очередь, происхождение осетровых, а также условия содержания в условиях замкнутого водоснабжения и кормления.

Были определены корреляционные взаимосвязи элементов $L^*a^*b^*$ -спектра с результатами морфометрии выборки осетровых, результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Взаимосвязи спектров системы CIELAB с морфометрическими показателями сибирского осетра ленской популяции

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.11>

Признак	Компонент спектра		
	L^*	a^*	b^*
Масса тела, г.	-0,06	0,71	0,75
Длина всей рыбы, см	-0,16	0,06	0,20
Длина тела, см	-0,07	0,10	0,25
Длина рыбы до конца средних лучей, см	-0,08	0,09	0,22
Длина головы, см	-0,18	0,04	0,23
Пектоцентрально-вентральное расстояние, см	0,03	0,16	0,20
Вентроанальное расстояние, см	-0,13	0,08	0,20
Длина хвостового стебля, см.	0,22	0,14	0,28
Наибольшая высота тела, см.	-0,18	0,16	0,30

Толщина тела, см	-0,13	0,20	0,39
Высота хвостового стебля, см	0,00	0,19	0,33
Обхват тела, см	-0,12	0,17	0,33
Обхват хвостового стебля, см	0,00	0,13	0,26

Исходя из результатов корреляционного анализа, можно сделать следующие выводы о корреляционных связях морфометрических показателей осетровых рыб и параметров L*a*b*-спектра цвета их мяса:

Диапазон коэффициентов корреляции варьировал в следующих пределах:

- для L*: от -0,18 до 0,22 (слабая отрицательная (с длиной головы) и положительная (с длиной хвостового стебля) корреляция);

- для a*: от 0,06 до 0,71 (незначительная (с длиной всей рыбы) и сильная положительная (с массой тела) корреляция);

- для b*: от +0,20 до +0,75 (слабая (с петковентральным и вентроанальным расстоянием) и сильная положительная (с массой тела) корреляция).

Из этого следует, что построение регрессионных моделей для показателей спектра цвета мяса на основе морфометрических признаков принципиально возможно. Предварительно, на основании корреляционного анализа можно сделать вывод, что в наибольшей степени L*- спектр будет прогнозироваться на основании характеристик, описывающих длину тела рыбы, а a* и b*- спектры в существенной степени будут зависеть от показателя убойной массы.

Характеристики полученных уравнений регрессии представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Основные параметры регрессионных уравнений

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.12>

Параметр	Признак		
	L*	a*	b*
Коэффициент детерминации R ²	0,424	0,579	0,597
Уровень достоверности (р-значение)	0,003	<0,001	<0,001

Малые значения р-критерия свидетельствуют о статистической значимости сформированных моделей. Коэффициент детерминации – это показатель, демонстрирующий долю объясненного моделью разнообразия значений признака, выражаемого параметром дисперсии. Таким образом, в наибольшей степени была объяснена дисперсия признака b*. В целом, значения коэффициентов детерминации находились на среднем уровне (R² = 0,424...0,597), из чего можно сделать вывод о необходимости дальнейшего пополнения выборки данных для достижения большей степени репрезентативности. Также стоит отметить, что доля дисперсии, объясненной взаимосвязями с морфометрическими характеристиками, не учитывает такие не задействованные в исследовании предикторы, как pH и внутренняя морфология. Важно также отметить, что в рамках исследования применялась методология линейной регрессии, не учитывающая случайную вариацию, обусловленную такими эффектами, как, например, возрастная группа или бассейн содержания.

Параметры остатков по каждому исследуемому элементу спектра представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Статистические параметры остатков моделей прогноза цветовых характеристик мяса

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.13>

Параметр	Признак		
	e(L*)	e(a*)	e(b*)
M±m	0,09±0,51	0,61±0,15	-0,36±1,43
Min...Max	-9,09...8,07	-2,25...2,56	-18,78...32,53
C _v , %	42,64	1,78	27,93

Исходя из полученных параметров можно сделать вывод, что наименьшее отклонение от нуля (стремление ошибки прогноза к нулю является одним из допущений, характеризующих линейные модели) в среднем демонстрировали ошибки прогноза признака L*, однако значение ошибки среднего, превосходившее этот параметр в несколько раз, свидетельствует о большом размахе вариации ошибки, что подтверждается абсолютными значениями, а также

коэффициентом вариации. Такие же выводы можно сделать по ошибкам прогноза признака b^* . Что касается значений красно-зеленой цветовой координаты (a^*), ошибки прогноза этой цветовой характеристики характеризовались наименьшим значением как ошибки среднего, так и размаха вариации, что свидетельствует о том, что модель, составленная для прогноза этой составляющей спектра, наиболее оптимально объясняла изменчивость из всех исследованных цветовых параметров.

Подбор моделей по критерию Акаике позволил сформировать следующие наиболее оптимальные модели для прогноза элементов спектра цвета мяса:

$$L^* = 62.61 - 1.47 \times BL + 1.84 \times PV + 6.58 \times pl_1 - 4.30 \times SC + 12.79 \times h + \varepsilon$$

$$a^* = -2.90 + 0.005 \times CW - 0.20 \times BL + 0.62 \times PV + \varepsilon$$

$$b^* = -25.74 + 0.05 \times CW + 2.18 \times CC + \varepsilon$$

где BL – длина всей рыбы, CW – масса тела, PV – пектоventральное расстояние, pl_1 – длина хвостового стебля, SC – толщина тела, h – высота хвостового стебля, CC – обхват тела, ε – остаток.

Сопоставление наблюдаемых и спрогнозированных на основе регрессионных моделей представлено на рисунках 10-12.

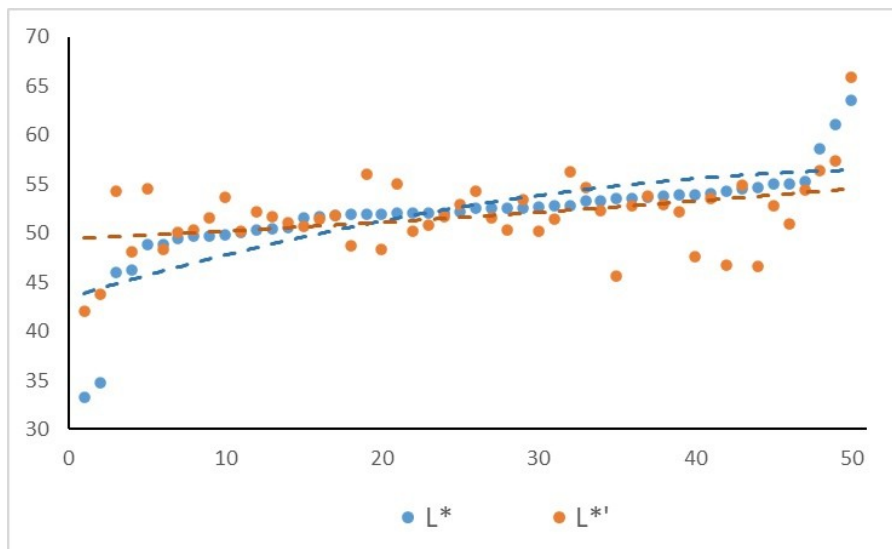


Рисунок 10 - Соотношение наблюдаемых (L^*) и спрогнозированных ($L^{*'}$) значений спектра L^*
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.14>

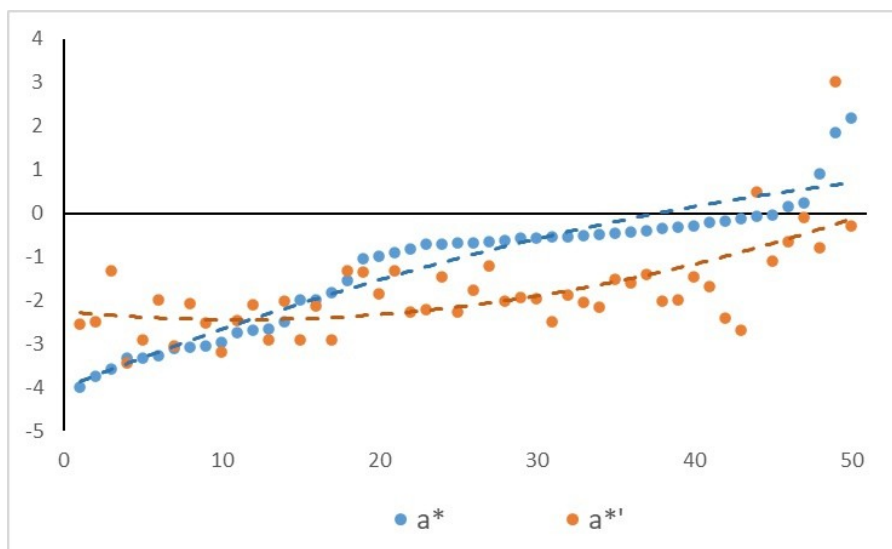


Рисунок 11 - Соотношение наблюдаемых (a^*) и спрогнозированных ($a^{*'}$) значений спектра a^*
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.15>

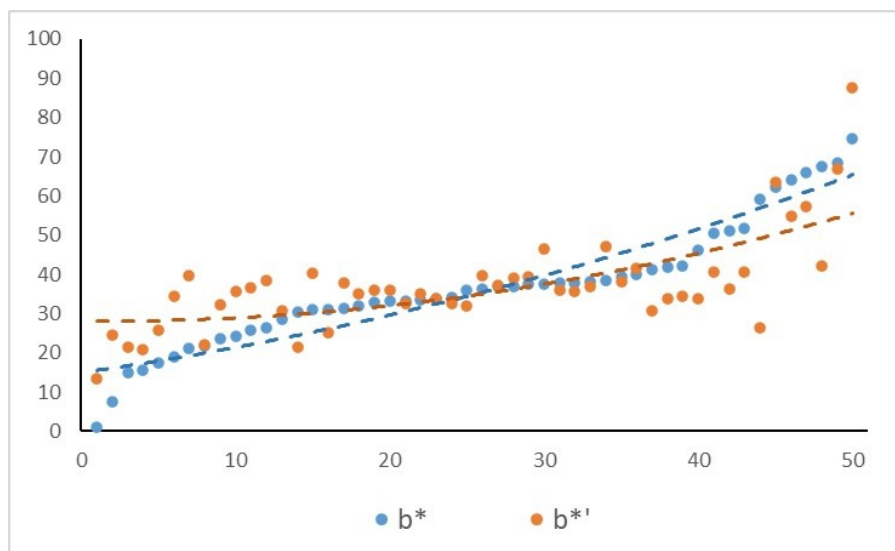


Рисунок 12 - Соотношение наблюдаемых (b^*) и спрогнозированных ($b^{*'}$) значений спектра b^*
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.16>

Соотношение полученных спрогнозированных значений с наблюдаемыми для всех трёх спектров свидетельствует о том, что отклонение при подобном размере выборки и уровне детерминации в моделях зачастую существенно, что подтверждает озвученный ранее тезис о необходимости увеличения выборки для достижения более надёжного результата.

Обсуждение

Достоверный прогноз цвета мяса на основании морфометрических признаков видится перспективным направлением для оценки характеристик продукции (филе рыбы) без необходимости проведения убоя животных. Подобная практика может представлять интерес для селекционных целей, однако, генетическая обусловленность цветовых характеристик мяса в разведении осетровых в России является малоизученным вопросом. Стоит отметить, что апробированная методология прогнозирования, примененная в исследовании, имеет ряд существенных ограничений по сравнению с более гибкими методами типа смешанных моделей. В частности, линейная регрессия предполагает линейную зависимость между предикторами и откликом и не учитывает возможные нелинейные эффекты, случайные вариации, коррелированность данных и отклонения от нормального распределения у остатков. Кроме того, линейные модели не дают достоверных интервалов прогноза и могут быть неустойчивы к выбросам данных. Все эти факторы снижают надежность и точность получаемых с помощью данного подхода прогнозов по сравнению со смешанными моделями, позволяющими более гибко учитывать особенности реальных данных. В свою очередь, ключевым недостатком смешанных моделей является их зависимость от количества и классифицируемости данных. Структура первичного материала, находившегося в распоряжении исследовательского коллектива, не имела ярко выраженной групповой структуры, а также характеризовалась небольшим объемом. В связи с этим, несмотря на перечисленные ограничения, в качестве методологии был выбран метод линейной регрессии.

Дальнейшая работа в направлении, обозначенном в нашем исследовании, при создании более репрезентативной выборки, позволит выявить как морфометрические признаки, так и эффекты, не связанные с линейным взаимодействием, на основании которых будет возможен более достоверный прогноз характеристик цвета мяса рыбы, как одного из важнейших показателей товарного вида продукции. Это позволит разработать генетические подходы к формированию племенного и товарного стада данного объекта аквакультуры.

Заключение

Проведенный корреляционный анализ продемонстрировал существенную степень взаимосвязанности хроматических характеристик мяса осетровых (координаты a^* и b^*) с промерами, характеризовавшими рост и развитие животного (длина и обхват тела, пектоцентрально-пектоцентральное расстояние, масса тела). Полученные значения являются свидетельством того, что также изменчивость изучаемых характеристик может объясняться возрастом животного, а ввиду наличия положительной зависимости с массой и длиной тела, можно прогнозировать, что в дальнейшем мясо в выборке будет более красных и желтых оттенков. Для ахроматической цветовой координаты (L^*) не было выявлено столь же существенных взаимосвязей, что было связано в первую очередь с низкой вариабельностью этого показателя.

Результативность применения методологии прогноза, основанного на линейной регрессии, главным образом выраженная в коэффициентах детерминации сформированных моделей, варьировала в пределах $R^2 = 0,424...0,597$. Подобные значения свидетельствуют о том, что модели хоть и не были идеально точны, всё же объясняли значительную долю изменчивости цветовых характеристик мяса осетровых рыб.

Финансирование

Средства федерального бюджета, код научной темы
FGGN-2022-0007, рег. номер в ЕГИСУ НИОКТР
123011700007-6.

Funding

Federal budget funds, scientific topic code FGGN-2022-0007,
reg. number 123011700007-6.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-
исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.17>

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.63.17>

Список литературы / References

- Gharibzahedi S.M.T. Effect of novel bioactive edible coatings based on jujube gum and nettle oil-loaded nanoemulsions on the shelf-life of Beluga sturgeon fillets / S.M.T. Gharibzahedi, S. Mohammadnabi // *International Journal of Biological Macromolecules*. — 2017. — Vol. 95. — P. 769–777. — DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.11.119.
- Karpinsky M.G. Review: The Caspian Sea benthos: Unique fauna and community formed under strong grazing pressure / M.G. Karpinsky // *Mar. Pollut. Bull.* — 2010. — Vol. 61. — P. 156–161. — DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.02.009.
- Webb M.A.H. Importance of environmental endocrinology in fisheries management and aquaculture of sturgeons / M.A.H. Webb, S.I. Doroshov // *General and Comparative Endocrinology*. — 2011. — Vol. 170. — P. 313–321. — DOI: 10.1016/j.ygcen.2010.11.024.
- Bronzi P. Sturgeon Meat and Caviar Production: Global Update 2017 / P. Bronzi, M. Chebanov, J. Michaels, et al. // *Journal of Applied Ichthyology*. — 2019. — Vol. 35. — P. 257–266. — DOI: 10.1111/jai.13870.
- Металлов Г.Ф. Влияние препарата Е-селен на рост и физиологические показатели гибрида русский осетр х ленский осетр / Г.Ф. Металлов, В.А. Григорьев, А.В. Ковалева [и др.] // *Вестник южного научного центра РАН*. — 2013. — Т. 9. — № 2. — С. 57-67.
- Bronzi P. Present and future sturgeon and caviar production and marketing: A global market overview / P. Bronzi, H. Rosenthal // *Journal of Applied Ichthyology*. — 2014. — Vol. 30. — P. 1536–1546.
- Ранделин Д.А. Изучение аномалий в строении тела и наружных органов ценных пород осетровых в условиях искусственного разведения / Д.А. Ранделин, А.И. Новокщенова, Ю.В. Кравченко // *Известия нижевожского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. — 2018. — № 4(52). — С. 251-256. — DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-36
- Белоус А.А. Цветовая характеристика мяса товарных гибридов – первые результаты / А.А. Белоус, А.А. Сермягин, Н.А. Зиновьева // *Труды КубГАУ*. — 2020. — № 86. — С. 140-145. — DOI: 10.21515/1999-1703-86-140-145.
- Tomasevic I. Recent advances in meat color research / I. Tomasevic, I. Djekic, M. Font-i-Furnols [et al.] // *Current Opinion in Food Science*. — 2021. — Vol. 41. — P. 81-87. — DOI: 10.1016/j.cofs.2021.02.012.
- Li B. Identification of candidate genes associated with porcine meat color traits by genome-wide transcriptome analysis / B. Li, C. Dong, P. Li [et al.] // *Scientific reports*. — 2016. — Vol. 6. — P. 35224. — DOI: 10.1038/srep35224.
- Красуля О.Н. Воздействие кавитационной активации рассола на цветовые характеристики охлажденной свинины / О.Н. Красуля, А.В. Смирнова, В.И. Богущ [и др.] // *Мясная индустрия*. — 2020. — № 5. — С. 45-48. — DOI: 10.37861/2618-8252-2020-5-45-48
- Ahmed R.O. Weighted Single-Step GWAS Identifies Genes Influencing Fillet Color in Rainbow Trout / R.O. Ahmed, A. Ali, R. Al-Tobasei et al. // *Genes (Basel)*. — 2022. — Vol.13. — P. 1331. — DOI: 10.3390/genes13081331.
- Carrasco-García A.A. Effect of stress during slaughter on carcass characteristics and meat quality in tropical beef cattle / A.A. Carrasco-García, V.T. Pardío-Sedas, G.G. León-Banda et al. // *Journal of Animal Science*. — 2020. — Vol. 33. — P. 1656-1665. — DOI: 10.5713/ajas.19.0804.
- Басонов О.А. Химический состав и пищевая ценность мяса осетровых рыб разных генотипов при промышленном производстве / О.А. Басонов, А.В. Судакова // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. — 2022. — № 2(58). — С. 178-184. — DOI: 10.18286/1816-4501-2022-2-178-184.
- Fan K.J. Applications of Fluorescence Spectroscopy, RGB- and MultiSpectral Imaging for Quality Determinations of White Meat: A Review / K.J. Fan, W.H. Su // *Biosensors (Basel)*. — 2022. — Vol.12. — P. 76. — DOI: 10.3390/bios12020076.
- Методические рекомендации по проведению морфологических исследований осетровых рыб и их гибридов / Сост. В.Д. Крылова, Л.И. Соколов. — Москва: ВНИРО, 1981. — 49 с.
- Горбунова Е.В. Компьютерное моделирование цвета мяса / Е.В. Горбунова, В.В. Коротаяев, Е.А. Ластовская // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. — 2014. — Т. 57. — № 12. — С. 64-65.
- Venables W.N. *Modern Applied Statistics with S* / W.N. Venables, B.D. Ripley. — New York: Springer, 2002. — 495 p.
- Jankowska B. Production value, Chemical Composition and Colour of Fillets of the Reciprocal Hybrid of Siberian Sturgeon with Green Sturgeon (acipenser Baeri Br × (acipenser Baeri × Acipenser Medirostrisayres) / B. Jankowska, R. Kolman, M. Szczepkowski et al. // *Czech Journal of Animal Science*. — 2005. — Vol. 50. — P. 220-225. — DOI: 10.17221/4160-cjas

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gharibzahedi S.M.T. Effect of novel bioactive edible coatings based on jujube gum and nettle oil-loaded nanoemulsions on the shelf-life of Beluga sturgeon fillets / S.M.T. Gharibzahedi, S. Mohammadnabi // *International Journal of Biological Macromolecules*. — 2017. — Vol. 95. — P. 769–777. — DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.11.119.
2. Karpinsky M.G. Review: The Caspian Sea benthos: Unique fauna and community formed under strong grazing pressure / M.G. Karpinsky // *Mar. Pollut. Bull.* — 2010. — Vol. 61. — P. 156–161. — DOI: 10.1016/j.marpollbul.2010.02.009.
3. Webb M.A.H. Importance of environmental endocrinology in fisheries management and aquaculture of sturgeons / M.A.H. Webb, S.I. Doroshov // *General and Comparative Endocrinology*. — 2011. — Vol. 170. — P. 313–321. — DOI: 10.1016/j.ygcen.2010.11.024.
4. Bronzi P. Sturgeon Meat and Caviar Production: Global Update 2017 / P. Bronzi, M. Chebanov, J. Michaels, et al. // *Journal of Applied Ichthyology*. — 2019. — Vol. 35. — P. 257–266. — DOI: 10.1111/jai.13870.
5. Metallov G.F. Vliyanie preparata E-selen na rost i fiziologicheskie pokazateli gibrida russkij osetr h lenskij osetr [Effect of E-selen on growth and physiological parameters of Russian sturgeon x Lena sturgeon hybrids] / G.F. Metallov, V.A. Grigor'ev, A.V. Kovaleva [et al.] // *Vestnik juzhnogo nauchnogo centra RAN [Bulletin of RAS Scientific Center]*. — 2013. — Vol. 9. — № 2. — P. 57-67. [in Russian]
6. Bronzi P. Present and future sturgeon and caviar production and marketing: A global market overview / P. Bronzi, H. Rosenthal // *Journal of Applied Ichthyology*. — 2014. — Vol. 30. — P. 1536–1546.
7. Randelin D.A. Izuchenie anomalij v stroenii tela i naruzhnyh organov cennyh porod osetrovyh v usloviyah iskusstvennogo razvedenija [Study of anomalies in body structure and external organs of valuable sturgeon species under artificial breeding conditions] / D.A. Randelin, A.I. Novokshhenova, Ju.V. Kravchenko // *Izvestija nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education]*. — 2018. — № 4(52). — P. 251-256. — DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-36 [in Russian]
8. Belous A.A. Cvetovaja karakteristika mjasa tovarnyh gibridov – pervye rezul'taty [Colour characterization of meat of commercial hybrids – first results] / A.A. Belous, A.A. Sermjagin, N.A. Zinov'eva // *Trudy KubGAU [Works of KubSAU]*. — 2020. — № 86. — P. 140-145. — DOI: 10.21515/1999-1703-86-140-145. [in Russian]
9. Tomasevic I. Recent advances in meat color research / I. Tomasevic, I. Djekic, M. Font-i-Furnols [et al.] // *Current Opinion in Food Science*. — 2021. — Vol. 41. — P. 81-87. — DOI: 10.1016/j.cofs.2021.02.012.
10. Li B. Identification of candidate genes associated with porcine meat color traits by genome-wide transcriptome analysis / B. Li, C. Dong, P. Li [et al.] // *Scientific reports*. — 2016. — Vol. 6. — P. 35224. — DOI: 10.1038/srep35224.
11. Krasulja O.N. Vozdejstvie kavitacionnoj aktivacii rassola na cvetovye karakteristiki ohlazhdennoj svininy [Effects of brine cavitation activation on colour characteristics of chilled pork meat] / O.N. Krasulja, A.V. Smirnova, V.I. Bogush [et al.] // *Mjasnaja industrija [Meat industry]*. — 2020. — № 5. — P. 45-48. — DOI: 10.37861/2618-8252-2020-5-45-48 [in Russian]
12. Ahmed R.O. Weighted Single-Step GWAS Identifies Genes Influencing Fillet Color in Rainbow Trout / R.O. Ahmed, A. Ali, R. Al-Tobasei et al. // *Genes (Basel)*. — 2022. — Vol.13. — P. 1331. — DOI: 10.3390/genes13081331.
13. Carrasco-García A.A. Effect of stress during slaughter on carcass characteristics and meat quality in tropical beef cattle / A.A. Carrasco-García, V.T. Pardío-Sedas, G.G. León-Banda et al. // *Journal of Animal Science*. — 2020. — Vol. 33. — P. 1656-1665. — DOI: 10.5713/ajas.19.0804.
14. Basonov O.A. Himicheskiy sostav i pishhevaja cennost' mjasa osetrovyh ryb raznyh genotipov pri promyshlennom proizvodstve [Chemical composition and nutritional value of sturgeon meat of different genotypes during industrial production] / O.A. Basonov, A.V. Sudakova // *Vestnik Ul'janovskoj gosudarstvennoj sel'skohozjajstvennoj akademii [Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy]*. — 2022. — № 2(58). — P. 178-184. — DOI: 10.18286/1816-4501-2022-2-178-184. [in Russian]
15. Fan K.J. Applications of Fluorescence Spectroscopy, RGB- and MultiSpectral Imaging for Quality Determinations of White Meat: A Review / K.J. Fan, W.H. Su // *Biosensors (Basel)*. — 2022. — Vol.12. — P. 76. — DOI: 10.3390/bios12020076.
16. Metodicheskie rekomendacii po provedeniju morfologicheskikh issledovanij osetrovyh ryb i ih gibridov [Methodological recommendations for morphological studies of sturgeon fish and their hybrids] / Compt. by V.D. Krylova, L.I. Sokolov. — Moscow: VNIRO, 1981. — 49 p. [in Russian]
17. Gorbunova E.V. Komp'yuternoe modelirovanie cveta mjasa [Computer modelling of meat colour] / E.V. Gorbunova, V.V. Korotaev, E.A. Lastovskaja // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie [Proceedings of universities]*. — 2014. — Vol. 57. — № 12. — P. 64-65. [in Russian]
18. Venables W.N. *Modern Applied Statistics with S* / W.N. Venables, B.D. Ripley. — New York: Springer, 2002. — 495 p.
19. Jankowska B. Production value, Chemical Composition and Colour of Fillets of the Reciprocal Hybrid of Siberian Sturgeon with Green Sturgeon (*acipenser Baeri* Br × (*acipenser Baeri* × *Acipenser Medirostrisayres*)) / B. Jankowska, R. Kolman, M. Szczepkowski et al. // *Czech Journal of Animal Science*. — 2005. — Vol. 50. — P. 220-225. — DOI: 10.17221/4160-cjas