

ДИНАМИКА РОСТА И РАЗВИТИЯ АКВАКУЛЬТУРНОЙ СТЕРЛЯДИ (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758), РАЗВОДИМОЙ В УСЛОВИЯХ УСТАНОВКИ ЗАМКНУТОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ*

В.И. НИКИПЕЛОВ[✉], А.К. НИКИПЕЛОВА, Н.В. БАРДУКОВ, А.А. БЕЛОУС, А.А. СЕРМЯГИН, В.Р. ХАРЗИНОВА, П.И. ОТРАДНОВ, А.П. ГЛЕБОВ, И.В. ГУСЕВ, Н.А. ЗИНОВЬЕВА

Стерлядь (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758), характеризующаяся ранним половым созреванием и высокой выживаемостью в условиях интенсивного выращивания, — один из основных объектов товарного осетроводства. Важное значение в селекции и генетике объектов товарной аквакультуры имеет определение корреляций между живой массой и морфологическими признаками, поскольку это позволяет оценить, насколько тесно связаны между собой количественные признаки на уровне фенотипа (наблюдаемые характеристики), и понять, как изменения одного признака могут влиять на другие. В этом сообщении впервые уделено внимание особенностям аллометрического роста стерляди волжской популяции в аквакультуре и предложено уравнение, описывающее этот рост, которое может быть использовано для совершенствования программ селекционно-племенной работы. Нашей целью было определение динамики роста и развития стерляди (*A. ruthenus*) волжской популяции в установке замкнутого водоснабжения (УЗВ). Исследования проводили в ФГБНУ ФИЦ животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста на стерляди генерации апреля 2022 года ($n = 62$). Рыба содержалась в бассейне площадью 3,14 м² с ихтиомассой 20–25 кг/м². У особей измеряли живую массу (W , г) и 11 морфологических показателей: L — абсолютная длина (см); l — промысловая длина (см), L_2 — длина рыбы до конца средних лучей хвостового плавника (см); HL — длина головы (см); PV — пектоцентрально-анальное расстояние (см); VA — вентроанальное расстояние (см); pl_1 — длина хвостового стебля (см); H — наибольшая высота тела (см), h — высота хвостового стебля (см); GC — обхват тела (см), Cc — обхват хвостового стебля (см). Учет показателей проводили в начале эксперимента в возрасте 1 год 5 мес (Бн) и в четыре возрастных периода с интервалом между измерениями 5–7 мес — в 1 год 7 мес (Б1), 2 года 2 мес (Б2), 2 года 7 мес (Б3) и 3 года 2 мес (Б4). Для оценки интенсивности роста и развития определяли показатели удельной интенсивности роста (SGR) за период и удельного прироста длины тела (SLR) за период. Для характеристики экстерьера рыбы рассчитывали индекс упитанности по Фультону (KF) и индекс прогонистости (Q). С увеличением возраста наблюдалось достоверное ($p < 0,01$) снижение как удельной скорости роста с 0,370 до 0,042 г%/сут, так и удельного прироста длины тела с 1,05 до 0,10 мм%/сут, что, по всей видимости, отражает перестройку физиологических процессов в организме, связанных с переходом в стадию полового созревания. Показана относительно большая изменчивость живой массы ($C_v = 19,7-30,4\%$) по сравнению с морфометрическими показателями ($C_v = 5,7-14,9\%$). Результаты дисперсионного анализа показали высокую степень индивидуальной изменчивости ($R^2_t = 0,223$; min—max 0,048—0,537), что свидетельствует о возможности проводить селекционную работу по этим признакам. Морфометрические показатели находились в умеренной и высокой корреляционной зависимости с показателем живой массы рыбы ($r = 0,49-0,93$; $p \leq 0,05$). Разработаны уравнения, которые позволяют с высокой точностью (коэффициент детерминации $R^2 = 0,877-0,941$) определять массу рыбы на основании морфометрических показателей. Наиболее предпочтительными предикторами оказались H ($R^2 = 0,941$), h ($R^2 = 0,916$) и L_2 ($R^2 = 0,903$). Их следует рассматривать в качестве перспективных при разработке методов бесконтактного определения живой массы стерляди на основе машинного зрения и алгоритмов машинного обучения. Полученные данные могут быть использованы для разработки и совершенствования программ селекционно-племенной работы со стерлядью при разведении в установках замкнутого водоснабжения.

Ключевые слова: стерлядь, живая масса, морфометрические показатели, аллометрический рост, коэффициент корреляции.

Виды рыб семейства осетровых, обладающие высокими потребительскими свойствами мяса и икры, рассматриваются как один из ценных ресурсов обеспечения человека высококачественными, здоровыми и безопасными продуктами питания (1, 2). Однако большинство видов этого

* Исследования поддержаны Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Федеральная научно-техническая программа развития генетических технологий на 2019–2030 годы, соглашение № 075-15-2025-469).

семейства, обитающие в естественных водоемах, находятся под угрозой исчезновения, в связи с чем аквакультура осетровых приобретает особое значение, будучи как источником получения пищевой продукции, так и инструментом сохранения биоразнообразия (3).

Современное состояние осетроводства в России характеризуется положительной динамикой развития, чему способствуют благоприятные экономические условия и повышение рентабельности производства (4). Однако эффективность товарного выращивания осетровых в значительной степени зависит от правильного выбора объектов выращивания, что определяется их видовыми биологическими особенностями (5). Как известно, различные виды осетровых существенно различаются по ряду ключевых биологических показателей: темпам роста, срокам созревания, продуктивным характеристикам (6).

Особый интерес для интенсивного выращивания в условиях аквакультуры представляет стерлядь (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758) — самый мелкий представитель семейства осетровых, который характеризуется ранним половым созреванием и высокой выживаемостью в условиях интенсивного выращивания (7, 8). Стерлядь служит модельным объектом для изучения вопросов кормления и физиологии рыб в условиях аквакультуры, также стерлядь требовательна к качеству воды и может служить его индикатором (9, 10). В 2008 году на базе филиала ВНИРО была выведена одомашненная форма стерляди породы СТЕР-1 (код 9463262, включена в Госреестр селекционных достижений в 2008 году). В исследованиях Т.Г. Петровой с соавт. (11) отмечаются достоверные различия между двумя селекционными поколениями волжской стерляди в Конаковском филиале ФГУП Всероссийский НИИ пресноводного рыбного хозяйства. В возрасте 50 сут они уже различались по меристическим (число брюшных жучек) и пластическим признакам (в % от длины тела — максимальная высота тела, пектоventральное расстояние, длина брюшных плавников, длина основания анального плавника; в % от длины головы — длина рыла, расстояние от конца рыла до хрящевого свода рта), при том что популяции выращивались в одинаковых условиях (11). В 2012 году Т.Г. Петрова с соавт. (12) сравнили популяции волжской и дунайской стерляди, и на ранних этапах преимущество в жизнеспособности оказалось у волжской стерляди.

Скорость роста — важнейший хозяйственно полезный признак стерляди. Исследование особенностей роста в динамике позволяет установить оптимальные параметры для выращивания этого вида рыб в условиях аквакультуры (13-15). Важное значение в селекции и генетике объектов товарной аквакультуры имеет определение корреляций между живой массой и морфологическими признаками, поскольку это позволяет оценить, как тесно связаны между собой количественные признаки на уровне фенотипа (наблюдаемые характеристики), и понять, как изменения одного признака могут влиять на другие (16, 17). Кроме того, морфологические показатели рассматриваются в качестве возможных предикторов для определения пола рыб. Описание размера и формы головы с помощью метода геометрической морфометрии может быть использовано в качестве неинвазивного метода определения пола у осетровых (18).

Однако в источниках литературы имеется лишь ограниченная информация о росте и развитии стерляди в условиях аквакультуры. Так, сравнительные исследования дикой и аквакультурной популяций стерляди, ведущей происхождение от дунайской популяции (в районе Будапешта), в возрасте 200 сут при отсутствии достоверных различий в массе тела показало большую вариабельность этого показателя в дикой популяции ($145,8 \pm 38,4$

против $111,2 \pm 15,7$ г). Индекс упитанности Фультона был статистически значимо ($p < 0,01$) выше у особей дикой популяции ($0,42 \pm 0,06$) по сравнению с аквакультурной ($0,30 \pm 0,02$) (19). Из 15 оцениваемых морфометрических признаков три — общая длина, стандартная длина (длина тела) и наибольшая высота тела характеризовались наиболее высокой корреляцией с живой массой (коэффициент корреляции Пирсона составил соответственно $r = 0,98$; $r = 0,99$ и $r = 0,96$) и находились в сильной зависимости по отношению друг к другу ($r = 0,99$), вследствие чего эти признаки могут использоваться для мониторинга динамики роста рыбы. Все три показателя с высокой точностью рассчитываются на основании живой массы с использованием разработанных уравнений (19).

Польскими учеными в условиях аквакультуры был изучен рост молоди стерляди, которую получали из оплодотворенной икры, импортированной из рыбоводческого хозяйства «Рыбное» (Московская обл.). В возрасте 180 сут стерлядь имела массу 94,9 г, общую длину 290,6 см, характеризовалась значением индекса Фультона 0,3867. Удельная скорость роста с увеличением возраста молоди снижалась с 7,45 % (в период с 30-х до 60-х сут) до 1,31 % общей длины в сутки (в период с 150-х до 180-х сут) (6). Абсолютная длина аквакультурной стерляди, ведущей происхождение от природной популяции реки Дунай на территории Словакии, в возрасте 1-го, 2-х, 3-х и 4-х лет составляла соответственно 25,0; 35,0; 40,0 и 44,0 см, в то время как в природной популяции реки Дунай — 19,5-25,2, 28,7-33,2, 33,8-38,6 и 37,7-41,3 см (6).

Мониторинг живой массы рыбы в процессе выращивания имеет определяющее значение для оптимизации условий ее содержания и рационов кормления (20). Точное и достоверное определение массы рыбы позволяет исключить как избыточное, так и недостаточное кормление, что способно оказать негативное влияние на накопление массы и статус здоровья (21, 22).

Для снижения трудозатрат оператора все более широкое применение в аквакультуре в последние годы находят машинное зрение и алгоритмы машинного обучения для прогнозирования массы рыбы на основании измерений морфологических показателей (20, 23). Первым шагом в разработке таких алгоритмов становится выбор морфометрических признаков, которые служат наиболее точными предикторами массы рыб в разные возрастные периоды.

Следует также отметить, что получение данных об особенностях роста рыб в различные возрастные периоды и о связи роста с морфологическими показателями становятся особенно актуальными для программ селекционно-племенной работы, основанных на использовании ДНК-маркеров (24, 25) и геномных методов оценки племенной ценности (26).

В настоящем сообщении при определении динамики роста и развития стерляди волжской популяции в условиях установки замкнутого водоснабжения (УЗВ) впервые было уделено внимание особенностям аллометрического роста рыб.

Нашей целью было изучение возрастной динамики роста и развития стерляди (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758) волжской популяции, выращиваемой в условиях аквакультуры, для совершенствования программ селекционно-племенной работы и разработка уравнения аллометрического роста.

Методика. Исследования проводили в ФГБНУ ФИЦ животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста на стерляди волжской популяции генерации апреля 2022 года ($n = 62$), разводимой в УЗВ. Рыба содержалась

в бассейне площадью 3,14 м² с ихтиомассой 20-25 кг/м², что соответствует общепринятым рыбоводным нормативам для выращивания рыбы в УЗВ. Температура воды 21±1 °С стабильно поддерживалась. Концентрация растворенного кислорода в среднем составляла 10,8 мг/л и не опускалась ниже 9 мг/л в течение всего периода выращивания. Гидрохимические параметры (концентрации аммония, нитритов, нитратов и рН) не превышали установленных предельно допустимых показателей для выращивания осетровых рыб (27). Кормление происходило круглогодично комбикормом DIBAQ ESTURIOM HMD («DIBAQ Aquaculture», Испания) с диаметром гранулы 4,5 мм следующего состава: сырой протеин — 45 %, сырой жир — 14 %, сырая клетчатка — 3 %, зола — 8 %, кальций (Ca) — 1,2 %, фосфор (P) — 0,36 %.

В процессе выращивания проводили измерение живой массы (W, г) с точностью ±2,5 г с использованием электронных весов M-ER 326 AFU-32.1 («Mertech Equipment», Южная Корея) и 11 морфологических показателей, используя общепринятую методику (28). Всего было проведено пять бонитировок по вышеназванным показателям — в начале эксперимента в возрасте 1 год 5 мес (Бн) и в четыре возрастных периода с интервалом между измерениями 5-7 мес: в возрасте 1 год 7 мес (Б1), 2 года 2 мес (Б2), 2 года 7 мес (Б3) и 3 года 2 мес (Б4). Измерения проводил один оператор с помощью штангенциркуля ШЦ-II-250-0,02 (ГОСТ 166-89. М., 1989) и измерительной ленты 150×2 см с нанесенной сантиметровой шкалой и миллиметровыми делениями с погрешностью ±2 мм.

Результаты дисперсионного анализа показали близкую к нулевой степень влияния факторов пола и происхождения (хозяйства — поставщика племенного материала) стерляди на изучаемые показатели (коэффициент детерминации R²_f = 0,005, доверительный интервал ДИ = 0,000...0,010 для признака пола; R²_f = 0,007, ДИ = 0,000...0,032 для происхождения), в связи с чем при анализе эти факторы не учитывали.

Для характеристики скорости роста рыбы определяли среднесуточный прирост живой массы (GR) и среднесуточный прирост длины тела (LR) по следующим формулам:

$$GR = \frac{W_n - W_{(n-1)}}{t},$$

где GR — прирост живой массы, г/сут, W_n — живая масса в изучаемый период, г, W_(n-1) — живая масса в предыдущий период, г, t — продолжительность периода, сут;

$$LR = \frac{L_n - L_{(n-1)}}{t},$$

где LR — прирост длины тела, см/сут, L_n — абсолютная длина тела рыбы в изучаемый период, см, L_(n-1) — абсолютная длина тела рыбы в предыдущий период, см, t — продолжительность периода, сут.

Сопоставимые значения интенсивности роста в разные возрастные периоды получали, определяя удельную скорость роста (SW) и удельный прирост длины (SL), как было предложено М. Prokeš с соавт. (6):

$$SGR = \frac{\ln(W_k) - \ln(W_n)}{t} \times 100,$$

где SGR — удельная скорость роста, г%/сут, W_к — конечная живая масса, г, W_н — начальная живая масса, г, t — период выращивания, сут;

$$SLR = \frac{\ln(L_k) - \ln(L_n)}{t} \times 100,$$

где SLR — удельный прирост длины тела, см%/сут, L_к — конечная абсолютная длина, см, L_н — начальная абсолютная длина, см, t — период выращивания, сут.

Для характеристики экстерьера рыбы рассчитывали индексы (29)

упитанности по Фультону (K_F) и прогонистости (Q):

$$K_F = \frac{W}{l^3} \times 100,$$

где W — живая масса, г, l — промысловая длина рыбы, см;

$$Q = \frac{l}{H},$$

где l — промысловая длина рыбы, см, H — максимальная высота тела, см.

Более высокие значения Q указывали на более вытянутое (прогонистое) тело у рыбы.

Чтобы оценить изменчивость изучаемых показателей, рассчитывали коэффициент вариации как отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению признака, выраженное в процентах. Для оценки влияния факторов «происхождение», «пол», «особь», «возраст» на изучаемые параметры выполняли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с использованием функции `aov()`, реализованной в программном языке R.

Для характеристики связи длины тела и роста использовали формулу изометрического роста (30):

$$W = aL^b,$$

где W — живая масса, г, L — абсолютная длина, см, a — пересечение линии регрессии, b — наклон линии регрессии. При $b \approx 3$ рост имеет изометрический характер, при котором наблюдается пропорциональное увеличение живой массы и длины тела рыбы. Значения $b > 3$ указывают на положительный аллометрический рост, при котором пропорция смещена в сторону большего увеличения живой массы, и, напротив, значения $b < 3$ свидетельствуют об отрицательном аллометрическом росте, который характеризуется большим увеличением длины, чем живой массы (31).

Для описания взаимосвязи живой массы с морфометрическими показателями в изучаемых группах аквакультурной стерляди, а также для оценки сопряженности показателя живой массы стерляди в разном возрасте рассчитывали коэффициенты корреляции Пирсона.

Описательные статистические показатели рассчитывали с применением R-пакетов `dplyr` (<https://habr.com/ru/companies/otus/articles/811581/>) и `psych` (<https://www.rdocumentation.org/packages/psych/versions/2.5.3>). Результаты представлены в виде средних (M) и стандартных ошибок средних ($\pm SEM$). Для оценки достоверности выявленных различий между группами использовали t -тест Стьюдента.

Результаты. На рисунке 1 представлена схема морфологических показателей стерляди, которые оценивали в работе.

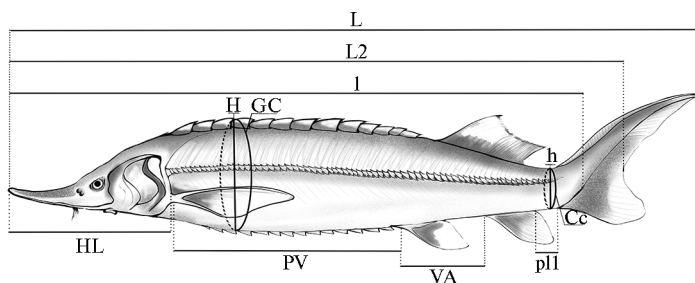


Рис. 1. Схема морфометрических показателей стерляди (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758): L — абсолютная длина, см; l — промысловая длина, см; $L2$ — длина рыбы до конца средних лучей хвостового плавника, см; HL — длина головы, см; PV — пекто-вентральное расстояние (расстояние от основания грудного плавника до анального отверстия), см; VA — вентроанальное расстояние (расстояние от основания анального плавника до анального отверстия), см; $p11$ — длина хвостового стебля, см; H — наибольшая высота тела, см; h — высота хвостового стебля, см; GC — обхват тела, см; Cc — обхват хвостового стебля, см.

В процессе выращивания аквакультурной стерляди, разводимой в установке замкнутого водоснабжения, наблюдался поступательный рост как живой массы, так и значений морфологических показателей, характеризующих размер и форму тела рыбы (табл. 1). Скорость роста была наибольшей в более раннем возрасте (Б1 и Б2), после чего поступательно снижалась (Б3 и Б4). Скорость прироста длины тела поступательно снижалась с увеличением возраста рыбы. Общая длина стерляди в возрасте 2 лет 2 мес и 3 лет 2 мес составила соответственно 60,5 и 66,7 см, что превышало значения показателя у аквакультурной стерляди, ведущей свое происхождение от дикой популяции, выловленной в реке Дунай на территории Словакии, — соответственно 35,0 и 40,0 см (6).

1. Живая масса и значения 11 морфометрических показателей у аквакультурной стерляди (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758) волжской популяции генерации апреля 2022 года, разводимой в условиях установки замкнутого водоснабжения, в зависимости от возраста ($n = 62$, $M \pm SEM$; ФГБНУ ФИЦ животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста)

Показатель	Возрастной период				
	Бн	Б1	Б2	Б3	Б4
Возраст	1 год 5 мес	1 год 7 мес	2 года 2 мес	2 года 7 мес	3 года 2 мес
W	505,9±12,7	642,6±18,3	1129,7±37,6	1400,5±54,1	1514,2±54,6
GR	—	2,17±0,13 ^{a,e}	2,32±0,15 ^{b,f}	1,68±0,15 ^{c,e,f}	0,58±0,06 ^{a,b,c}
L	48,7±0,4	52,0±0,4	60,5±0,6	65,4±0,6	66,7±0,7
LR	—	0,53±0,02 ^{a,b,c}	0,40±0,02 ^{a,d,e}	0,30±0,02 ^{b,d,f}	0,06±0,01 ^{c,d,e,f}
l	40,1±0,3	45,9±0,4	54,1±0,5	57,7±0,6	58,8±0,6
L2	42,9±0,3	42,9±0,4	50,3±0,4	53,5±0,5	54,8±0,6
HL	9,3±0,1	9,7±0,1	11,6±0,1	12,4±0,1	13,2±0,1
PV	16,0±0,2	16,9±0,2	20,8±0,2	22,0±0,3	22,6±0,3
VA	6,2±0,1	6,4±0,1	8,3±0,1	8,8±0,1	8,8±0,2
p11	5,6±0,1	6,0±0,1	6,4±0,1	6,9±0,1	7,2±0,1
H	17,0±0,2	18,3±0,2	23,1±0,3	24,5±0,4	24,9±0,3
h	5,7±0,1	6,0±0,1	7,5±0,1	8,0±0,1	8,1±0,1
GC	4,3±0,0	4,8±0,1	6,0±0,1	6,5±0,1	6,4±0,1
Cc	1,6±0,0	1,7±0,0	2,1±0,0	2,3±0,0	2,3±0,0
KF	0,78±0,01 ^{a,b,c,e}	0,66±0,01 ^{a,d,f,g}	0,70±0,01 ^{b,f}	0,71±0,01 ^{c,g}	0,73±0,01 ^{d,e}
Q	2,37±0,01 ^a	2,52±0,01 ^{a,b,c,d}	2,36±0,02 ^b	2,37±0,02 ^c	2,37±0,02 ^d

Примечание. W — живая масса, г; GR — скорость роста, г/сут; L — абсолютная длина, см; LR — прирост длины тела рыбы, мм/сут; l — промысловая длина, см, L2 — длина рыбы до конца средних лучей хвостового плавника, см; HL — длина головы, см; PV — пектоцентрально-анальное расстояние, см; VA — вентроанальное расстояние, см; p11 — длина хвостового стебля, см; H — наибольшая высота тела, см; h — высота хвостового стебля, см; GC — обхват тела, см; Cc — обхват хвостового стебля, см; KF — индекс упитанности по Фултон; Q — индекс прогонистости. Прочерки означают, что данные для указанного возрастного периода отсутствуют.

^{a,b,c,d} и ^{e,f,g} Различия между группами, маркированными одинаковыми надстрочными буквами, статистически значимы соответственно при $p < 0,01$ и $p < 0,05$.

Мы наблюдали достоверно ($p < 0,01$; $p < 0,05$) более высокие значения индекса упитанности в возрасте Бн по сравнению с другими периодами. Это можно рассматривать как указание на то, что наращивание мышечной массы в возрасте 1 год 5 мес проходило более интенсивно по отношению к росту осевого скелета. В возрасте Б1, наблюдались достоверно ($p < 0,01$ и $p < 0,05$) меньшие значения индекса упитанности по сравнению с остальными периодами. Можно полагать, что в этом возрасте в основном формировался осевой скелет при относительно меньшем наращивании мышечной массы. В возрасте Б2 значения индекса упитанности повышались, после чего оставались на том же уровне в возрасте Б3 и Б4, что указывает на аналогичный характер массонакопления и прироста длины тела в период с 2 лет 2 мес до 3 лет 2 мес. В возрасте Б1 наблюдались достоверно ($p < 0,01$) более высокие значения индекса прогонистости по сравнению с другими периодами. Вероятно, в это время происходило главным образом удлинение позвоночного столба при относительно меньшем росте ребер. В остальные возрастные периоды достоверных различий в значениях индекса прогони-

стости выявлено не было, что указывает на пропорциональный прирост длины и высоты тела.

Как следует из данных об интенсивности роста стерляди, оцененной по показателям удельной скорости роста и удельного прироста длины тела (рис. 2), с увеличением возраста рыбы наблюдалось достоверное ($p < 0,01$) снижение обоих показателей. Это, по всей видимости, было следствием перестройки физиологических процессов в организме рыб, связанных с переходом от стадии роста в стадию полового созревания. Полученные нами значения удельной скорости роста в возрасте 1 год 7 мес, 2 года 2 мес, 2 года 7 мес и 3 года 2 мес (0,370; 0,267; 0,124 и 0,042 г%/сут) оказались сопоставимы с показателями у аквакультурной стерляди рыбзавода Velký Dvůr («Pohořelice, Inc.», Польша), выращиваемой в стандартных условиях, которые в возрасте 2 и 3 лет составляли соответственно около 0,33 и 0,10 г%/сут (6).

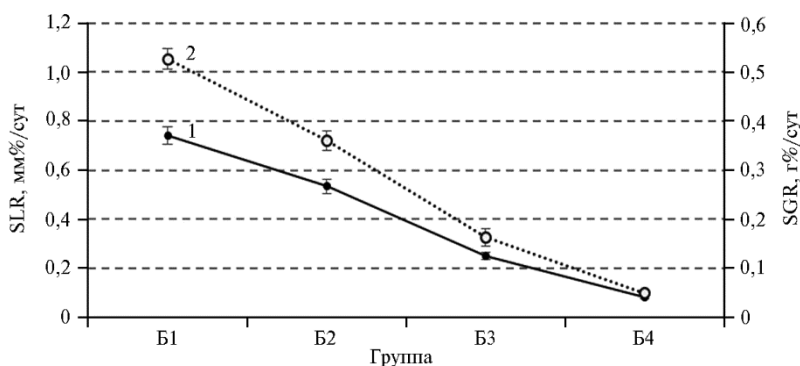


Рис. 2. Средние значения удельной скорости роста (1) и удельного прироста длины тела (2) у аквакультурной стерляди (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758) волжской популяции генерации апреля 2022 года, разводимой в условиях установки замкнутого водоснабжения, в зависимости от возраста: Б1 — возраст 1 год 7 мес, Б2 — 2 года 2 мес, Б3 — 2 года 7 мес, Б4 — 3 года 2 мес ($n = 62$, ФГБНУ ФИЦ животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста). В качестве пределов погрешностей указаны значения стандартной ошибки

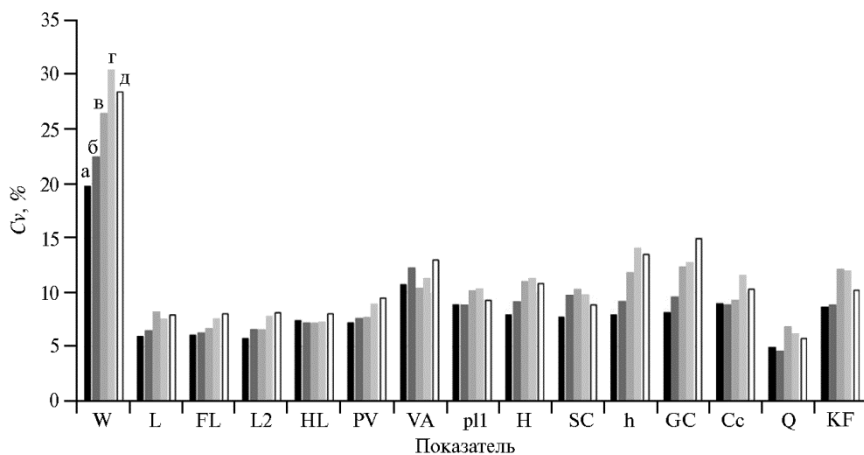


Рис. 3. Вариабельность показателей, характеризующих рост и развитие аквакультурной стерляди (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758) волжской популяции генерации апреля 2022 года, разводимой в условиях установки замкнутого водоснабжения, в зависимости от возраста: а — 1 год 5 мес (Бн), б — возраст 1 год 7 мес (Б1), в — 2 года 2 мес (Б2), г — 2 года 7 мес (Б3), д — 3 года 2 мес (Б4); W — живая масса, г; GR — скорость роста, г/сут; L — абсолютная длина, см; LR — прирост длины тела рыбы, мм/сут; l — промысловая длина, см; L2 — длина рыбы до конца средних лучей хвостового плавника, см; HL — длина головы, см; PV — пекто-вентральное расстояние, см; VA — вентроанальное расстояние, см; p11 — длина хвостового стебля, см;

H — наибольшая высота тела, см; h — высота хвостового стебля, см; GC — обхват тела, см; Cc — обхват хвостового стебля, см; Q — индекс прогонистости; K_F — индекс упитанности по Фультону; C_v — коэффициент вариации, % (ФГБНУ ФИЦ животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста).

Следует отметить, что живая масса рыбы характеризовалась относительно большей изменчивостью (C_v = 19,7-30,4 %) по сравнению с морфометрическими показателями (C_v = 5,7-14,9 %), что указывает на большее влияние условий внешней среды на прирост живой массы тела по сравнению показателями, характеризующими размеры и форму рыбы. В качестве тенденции можно указать на увеличение для большинства показателей значений C_v с возрастом рыбы (рис. 3).

Для определения статистической значимости влияния изменчивости учетных факторов (эффект происхождения, пола, индивидуальных особенностей особи и возраста) был проведен дисперсионный анализ (табл. 2).

2. Результаты дисперсионного анализа влияния различных факторов на изменчивость живой массы и морфометрических показателей аквакультурной стерляди (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758) волжской популяции генерации апреля 2022 года, разводимой в условиях установки замкнутого водоснабжения (ФГБНУ ФИЦ животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста)

Показатель	Достоверность влияния факторов, R ² _f				R ²
	происхождение	пол	особь	возраст	
W	0,000	0,016***	0,224***	0,628***	0,868
GR	0,001	0,048***	0,176	0,317***	0,541
SGR	0,001	0,018***	0,050	0,617***	0,686
L	0,006***	0,006***	0,187***	0,729***	0,929
LR	0,000	0,018***	0,067	0,552***	0,637
SLR	0,000	0,012**	0,048	0,623**	0,684
l	0,001*	0,005***	0,145***	0,796***	0,947
L2	0,001	0,007***	0,232***	0,682***	0,922
HL	0,021***	0,006***	0,167***	0,759***	0,953
PV	0,000	0,007***	0,182***	0,726***	0,916
VA	0,002*	0,011***	0,248***	0,62***	0,881
p11	0,001	0,002	0,360***	0,466***	0,828
H	0,001	0,008***	0,262***	0,585***	0,861
h	0,003*	0,010***	0,209***	0,681***	0,898
GC	0,000	0,006**	0,235***	0,623***	0,864
Cc	0,000	0,008***	0,202***	0,666***	0,876
K _F	0,023***	0,009**	0,482***	0,22***	0,734
Q	0,000	0,006*	0,537***	0,170***	0,713
В среднем	0,003	0,011	0,223	0,581	0,817
min-max	0,000-0,023	0,002-0,048	0,048-0,537	0,170-0,796	0,541-0,953

Примечание. R²_f — частный коэффициент детерминации, R² — коэффициент детерминации; W — живая масса, г; GR — скорость роста, г/сут; SGR — удельная скорость роста, г%/сут; L — абсолютная длина, см; LR — прирост длины тела рыбы, мм/сут; SLR — удельный прирост длины тела, мм%/сут; l — промысловая длина, см; L2 — длина рыбы до конца средних лучей хвостового плавника, см; HL — длина головы, см; PV — пектоцентрально-анальное расстояние, см; VA — вентроанальное расстояние, см; p11 — длина хвостового стебля, см; H — наибольшая высота тела, см; h — высота хвостового стебля, см; GC — обхват тела, см; Cc — обхват хвостового стебля, см; K_F — индекс упитанности по Фультону; Q — индекс прогонистости.

*, ** и *** Соответственно p < 0,05, p < 0,01 и p < 0,001.

Проанализированная совокупность факторов была статистически значима и детерминировала существенную долю изменчивости для большинства изучаемых показателей. Так, общий коэффициент детерминации варьировал в зависимости от признака от 0,541 (скорость роста) до 0,953 (длина головы) при средней детерминированности изменчивости всех признаков 0,817. Наибольшая доля изменчивости была обусловлена фактором «возраст» (R²_f = 0,581; 0,170-0,796), что подтверждает очевидную зависимость роста и развития от возраста. Относительно высокий вклад в изменчивость изучаемых показателей фактора «особь» (R²_f = 0,223; 0,048-0,537) свидетельствует о высокой степени индивидуальной изменчивости, позволяющей судить о возможности ведения селекционной работы по этому признаку.

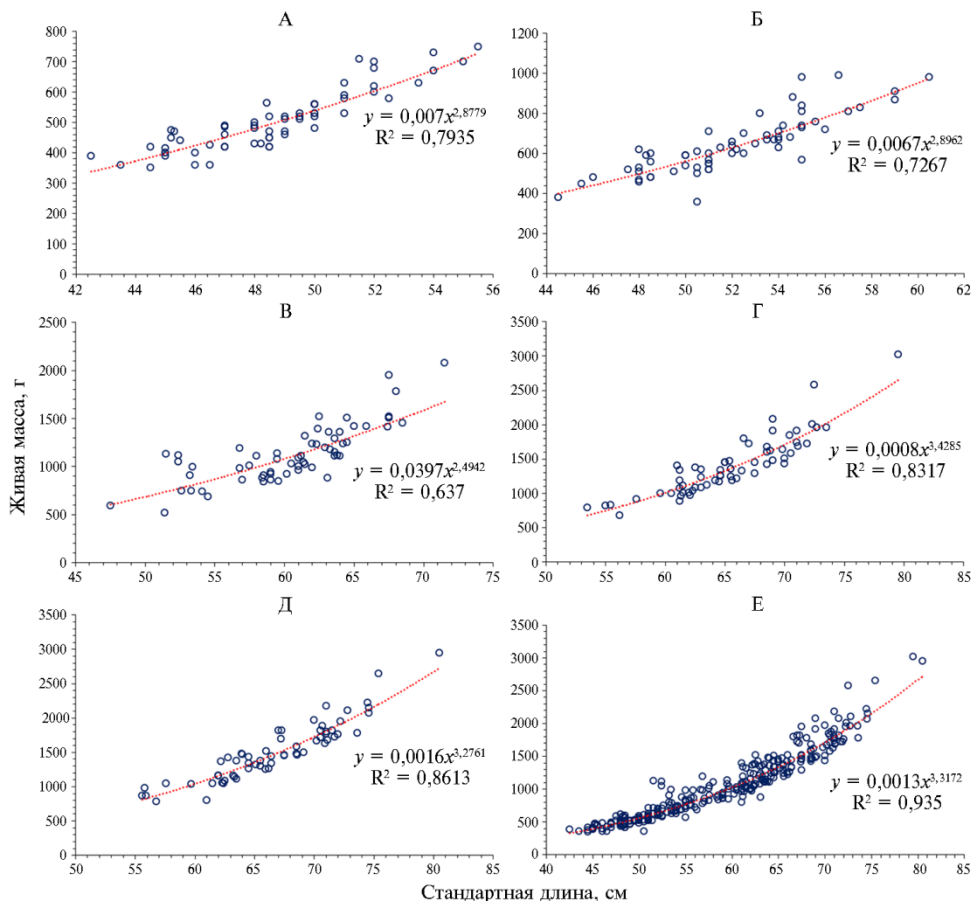


Рис. 4. Связь живой массы и длины тела у аквакультурной стерляди (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758) волжской популяции генерации апреля 2022 года, разводимой в условиях установки замкнутого водоснабжения, в зависимости от возраста: А — Бн (1 год 5 мес), Б — Б1 (1 год 7 мес), В — Б2 (2 года 2 мес), Г — Б3 (2 года 7 мес), Д — Б4 (3 года 2 мес), Е — вся выборка; R^2 — коэффициент детерминации (ФГБНУ ФИЦ животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста).

В разные возрастные периоды отмечался неодинаковый характер связи массы тела и размера тела рыбы (рис. 4). В более раннем возрасте (1 год 5 мес, 1 год 7 мес) тип роста приближался к изометрическому (соответственно $b = 2,88$ и $b = 2,90$), что указывало на пропорциональный прирост живой массы и размера тела рыбы. В возрасте 2 лет 2 мес наблюдался отрицательный аллометрический рост ($b = 2,49$), при котором происходило относительно большее увеличение длины тела по сравнению с приростом массы. Вероятно, в этом возрасте преимущественно формировался осевой скелет. В более старшем возрасте (Б3 и Б4) рост характеризовался положительной аллометрией ($b = 3,42$ и $b = 3,27$), что указывало на повышенное накопление живой массы тела по отношению к росту скелета. Положительный аллометрический рост, наблюдаемый в целом за весь период эксперимента ($b = 3,32$) свидетельствовал об оптимальных условиях выращивания рыбы в УЗВ.

Корреляционная зависимость между морфометрическими показателями и живой массой рыбы была от умеренной до высокой ($r = 0,49-0,93$, $p \leq 0,001$) (табл. 3). Меньшие значения коэффициента корреляции в различные возрастные периоды были отмечены для длины головы ($r = 0,54-0,69$), вентроанального расстояния ($r = 0,43-0,73$) и длины хвостового стебля

($r = 0,63-0,73$), что делает их менее предпочтительными предикторами живой массы рыбы. Остальные морфометрические показатели находились в высокой положительной корреляционной зависимости с живой массой рыбы в различные возрастные периоды ($r = 0,80-0,96$), за исключением длины хвостового стебля в возрасте 1 года 7 мес, для которого значение коэффициента корреляции было ближе к умеренному ($r = 0,60$).

3. Характеристика взаимосвязи живой массы и морфометрических показателей у аквакультурной стерляди (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758) волжской популяции генерации апреля 2022 года, разводимой в условиях установки замкнутого водоснабжения, в зависимости от возраста (ФГБНУ ФИЦ животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста)

Показатель	Коэффициент корреляции r				
	Бн	Б1	Б2	Б3	Б4
L	0,89	0,86	0,80	0,89	0,92
l	0,89	0,92	0,89	0,90	0,93
L2	0,92	0,92	0,86	0,89	0,91
HL	0,54	0,57	0,69	0,69	0,73
PV	0,81	0,85	0,88	0,87	0,89
VA	0,49	0,43	0,66	0,73	0,80
pl1	0,65	0,63	0,70	0,73	0,78
H	0,93	0,95	0,96	0,95	0,96
h	0,88	0,60	0,92	0,93	0,94
GC	0,87	0,82	0,91	0,93	0,87
Cc	0,88	0,81	0,86	0,87	0,85

Примечание. Бн — 1 год 5 мес, Б1 — возраст 1 год 7 мес, Б2 — 2 года 2 мес, Б3 — 2 года 7 мес, Б4 — 3 года 2 мес; L — абсолютная длина, см; l — промысловая длина, см; L2 — длина рыбы до конца средних лучей хвостового плавника, см; HL — длина головы, см; PV — пектоцентрально-анальное расстояние, см; VA — вентроанальное расстояние, см; pl1 — длина хвостового стебля, см; H — наибольшая высота тела, см; h — высота хвостового стебля, см; GC — обхват тела, см; Cc — обхват хвостового стебля, см.

4. Уравнения, описывающие связь морфометрических показателей и живой массы у аквакультурной стерляди (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758) волжской популяции генерации апреля 2022 года, разводимой в условиях установки замкнутого водоснабжения (ФГБНУ ФИЦ животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста)

Морфометрический показатель (x)	Уравнение	R ²
L	$y = 57,021x - 2306,1$	0,8916
l	$y = 58,948x - 1985,1$	0,8856
L2	$y = 77,903x - 2767,5$	0,9025
PV	$y = 151,05x - 1936,4$	0,8906
H	$y = 123,33x - 1617,9$	0,9414
h	$y = 364,57x - 1533,7$	0,9161
GC	$y = 423,67x - 1330,4$	0,8989
Cc	$y = 1366,4x - 1684,4$	0,8773

Примечание. y — живая масса рыбы, x — морфометрический показатель; L — абсолютная длина, см; l — промысловая длина, см; L2 — длина рыбы до конца средних лучей хвостового плавника, см; HL — длина головы, см; PV — пектоцентрально-анальное расстояние, см; VA — вентроанальное расстояние, см; pl1 — длина хвостового стебля, см; H — наибольшая высота тела, см; h — высота хвостового стебля, см; GC — обхват тела, см; Cc — обхват хвостового стебля, см; R² — коэффициент детерминации.

Как было установлено (табл. 4, рис. 5) на примере двух показателей, характеризующихся наиболее высокими значениями коэффициента детерминации, разработанные нами уравнения позволяют с высокой точностью ($R^2 = 0,877-0,941$) определять живую массу рыбы на основании морфометрических показателей. Наиболее предпочтительными предикторами, оказались наибольшая высота тела ($R^2 = 0,941$), высота хвостового стебля ($R^2 = 0,916$) и длина рыбы до конца средних лучей хвостового плавника ($R^2 = 0,903$). Полагаем, что эти показатели следует рассматривать в качестве наиболее перспективных при разработке методов бесконтактного определения живой массы стерляди на основе машинного зрения и алгоритмов машинного обучения.

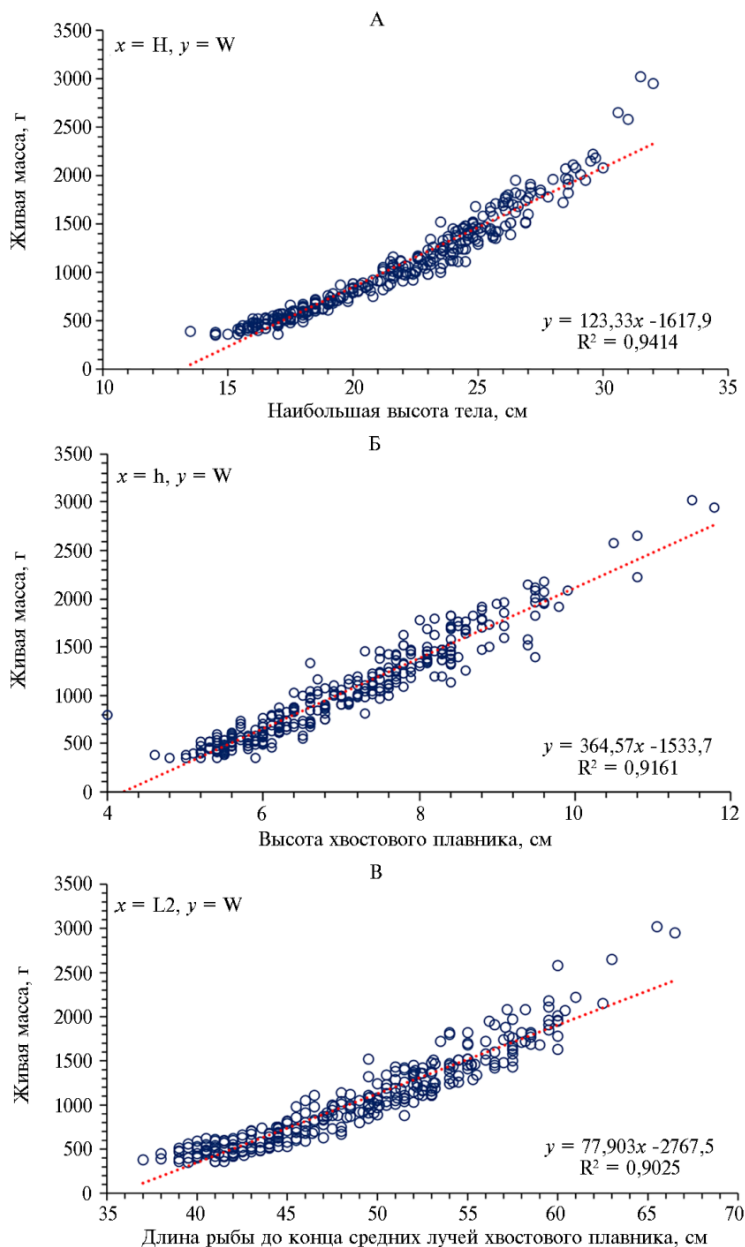


Рис. 5. Связь живой массы и морфометрических показателей, характеризующихся наиболее высокими значениями коэффициента детерминации, у аквакультурной стерляди (*Acipenser ruthenus*, Linnæus, 1758) волжской популяции генерации апреля 2022 года, разводимой в условиях установки замкнутого водоснабжения: R^2 — коэффициент детерминации; H — наибольшая высота тела, см (А); h — высота хвостового стебля, см (Б); L2 — длина рыбы до конца средних лучей хвостового плавника, см (В) (ФГБНУ ФИЦ животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста).

Эффективность селекционной работы во-многом определяется как можно более ранним отбором особей, обладающих улучшенными хозяйственно полезными качествами. Как отмечалось выше, важнейшим селекционным признаком у стерляди служит живая масса. С целью определения наиболее раннего возраста прогнозирования массы стерляди мы рассчитали коэффициенты ранговой корреляции для живой массы в разном возрасте, а также для тесно сопряженного с ним признака стандартной длины тела ($r = 0,80-0,92$, $p < 0,01$) (табл. 5).

5. Коэффициенты корреляции для показателей живой массы и стандартной длины тела у аквакультурной стерляди (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758) волжской популяции генерации апреля 2022 года, разводимой в условиях установки замкнутого водоснабжения, в разном возрасте (ФГБНУ ФИЦ животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста)

Группа	Бн	Б1	Б2	Б3	Б4
Бн		0,95	0,49	0,38	0,35
Б1	0,95		0,47	0,35	0,33
Б2	0,57	0,62		0,94	0,89
Б3	0,57	0,59	0,86		0,97
Б4	0,51	0,51	0,81	0,98	

Примечание. Бн — возраст 1 год 5 мес, Б1 — 1 год 7 мес, Б2 — 2 года 2 мес, Б3 — 2 года 7 мес, Б4 — 3 года 2 мес; над диагональю — коэффициент корреляции Пирсона для показателя живой массы рыбы, под диагональю — коэффициент корреляции Пирсона для показателя стандартной длины рыбы.

Значения живой массы и стандартной длины тела стерляди в начале эксперимента (возраст 1 год 5 мес) находились в высокой положительной корреляции со значениями этих показателей в возрасте 1 год и 7 мес ($r = 0,95$), в то время как их значения в эти возрастные периоды были относительно слабо сопряжены с последующими возрастными периодами (Б2, Б3 и Б4): соответственно $r = 0,33-0,49$ и $r = 0,51-0,62$ (см. табл. 5). С другой стороны, наблюдалась высокая положительная корреляция между Б2, Б3 и Б4 как по показателю живой массы ($r = 0,89-0,97$), так и стандартной длины рыбы ($r = 0,81-0,98$). Из 15 особей с наиболее высокой живой массой («лучшие») в возрасте 1 год 5 мес и 1 год 7 мес только 26,7-46,6 % особей остались в группе лучших в последующие возрастные периоды. Аналогично, из 15 особей с наименьшей живой массой («худшие») в возрасте 1 год 5 мес и 1 год 7 мес в группе худших осталось 33,3-46,7 % особей. Напротив, из 15 особей, попавших в группы лучших и худших в возрасте 2 года 2 мес, принадлежность к соответствующей группе в последующие возрастные периоды сохранили соответственно 80,0-86,7 и 80,0-100,0 % особей.

М. Prokeš с соавт. (6) на молоди и взрослых особях стерляди, разводимых в Чешской Республики, показали, что в период развития молоди (от 0+ до 5+) удельная скорость роста (SGR) последовательно снижалась с 17,67 до 0,05 %. В период развития взрослых особей (от 6+ до 13+) SGR колебался от 0,0191 до 0,0562, среднее значение составляло 0,0410 %. Кроме того, представлены данные о состоянии массы тела и соотношении длины и массы (6). Период взросления начинался в среднем в возрасте от 4 до 5 лет, что подтверждает полученные нами результаты (см. рис. 2).

Необходимость изучения соотношения живой массы и длины тела (аллометрический рост) обусловлена внутривидовой специфичностью объектов товарной аквакультуры. Оценка аллометрического роста позволяет установить темпы роста в разные возрастные периоды — с личиночной стадии (32-34) и далее по годам развития и набора массы (34) для определения оптимального возраста товарного созревания. Это, в свою очередь, дает возможность оптимизировать как товарное производство, так и селекционно-племенную работу. Также изучение аллометрического роста представляет интерес для выявления онтогенетических сдвигов метаболизма стерляди (35).

Таким образом, в изученной выборке аквакультурной стерляди с увеличением возраста наблюдалось достоверное ($p < 0,01$) снижение как удельной скорости роста с 0,370 до 0,042 г%/сут, так и удельного прироста длины тела (с 1,05 до 0,10 мм%/сут). Показана относительно большая изменчивость живой массы ($C_v = 19,7-30,4$ %) по сравнению с морфометри-

ческими показателями ($Cv = 5,7-14,9 \%$). Результаты дисперсионного анализа показали высокую степень индивидуальной изменчивости ($R^2_f = 0,223$; min-max 0,048-0,537). Морфометрические показатели находились в умеренной и высокой корреляционной зависимости с показателем живой массы рыбы ($r = 0,49-0,93$; $p \leq 0,05$). Разработанные уравнения позволяют с высокой точностью (коэффициент детерминации $R^2 = 0,877-0,941$) определять массу рыбы на основании морфометрических показателей. Наиболее предпочтительными предикторами оказались H ($R^2 = 0,941$), h ($R^2 = 0,916$) и $L2$ ($R^2 = 0,903$). Их следует рассматривать в качестве перспективных при разработке методов бесконтактного определения живой массы стерляди на основе машинного зрения и алгоритмов машинного обучения. Отбор стерляди по живой массе в возрасте 1 год 5 мес—1 год 7 мес для использования в воспроизводстве недостаточно эффективен с связи с последующим изменением характера роста в более старшем возрасте. Для повышения эффективности селекции необходимо внедрение технологий оценки племенной ценности, основанных на использовании BLUP, а также маркерной и геномной селекции.

ФГБНУ Федеральный исследовательский центр
животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста,
142132 Россия, Московская обл., г.о. Подольск, пос. Дубровицы, 60,
e-mail: vladnikipelovvij@mail.ru ✉, nikipelova_aminavij@mail.ru,
bardukv-nikolajj@mail.ru, belousa663@gmail.com, alex_sermyagin85@mail.ru,
veronika0784@mail.ru, deriteronard@gmail.com, glebov74@rambler.ru,
igorgusev@mail.ru, n_zinovieva@mail.ru

Поступила в редакцию
24 июня 2025 года
Принята к публикации
4 августа 2025 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2025, V. 60, № 6, pp. 1055-1070

DYNAMICS OF GROWTH AND DEVELOPMENT OF AQUACULTURE STERLET (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758) BRED IN A CLOSED WATER SUPPLY SYSTEM

V.I. Nikipelov[✉], A.K. Nikipelova, N.V. Bardukov, A.A. Belous, A.A. Sermyagin,
V.R. Kharzinova, P.I. Otradnov, A.P. Glebov, I.V. Gusev, N.A. Zinovieva

Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 60, pos. Dubrovitsy, Podolsk District, Moscow Province, 142132 Russia, e-mail vladnikipelovvij@mail.ru (✉ corresponding author), nikipelova_aminavij@mail.ru, bardukv-nikolajj@mail.ru, belousa663@gmail.com, alex_sermyagin85@mail.ru, veronika0784@mail.ru, deriteronard@gmail.com, glebov74@rambler.ru, igorgusev@mail.ru, n_zinovieva@mail.ru

ORCID:

Nikipelov V.I. orcid.org/0009-0008-6411-2454
Nikipelova A.K. orcid.org/0009-0002-8248-7555
Bardukov N.V. orcid.org/0000-0002-5497-2409
Belous A.A. orcid.org/0000-0001-7533-4281
Sermyagin A.A. orcid.org/0009-0005-2386-1289

Kharzinova V.R. orcid.org/0000-0003-3418-2511
Otradnov P.I. orcid.org/0000-0002-1153-5815
Glebov A.P. orcid.org/0000-0002-1570-3839
Gusev I.V. orcid.org/0000-0002-5843-2688
Zinovieva N.A. orcid.org/0000-0003-4017-6863

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Federal Scientific and Technical Program for the Development of Genetic Technologies for 2019-2030, Agreement No. 075-15-2025-469).

Final revision received June 24, 2025

doi: 10.15389/agrobiol.2025.6.1055eng

Accepted August 04, 2025

Abstract

Sterlet (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758), characterized by early sexual maturity and high survival rates under intensive farming conditions, is one of the main species in commercial sturgeon farming. Determining correlations between live weight and morphological traits is crucial in the selection and genetics of commercial aquaculture species, as this allows us to assess the close relationship between quantitative traits at the phenotype level (observable characteristics) and understand how changes in one trait can influence others. In this study, we first focused on the allometric growth characteristics of sterlet from the Volga population during our investigation of the growth and development dynamics of sturgeon reared in a recirculating aquaculture system. The aim of the work was to study the dynamics of growth and development of the Volga sterlet (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus,

1758) population grown in aquaculture in order to improve selection and breeding programs in the age aspect and to develop an equation for allometric growth. The studies were conducted at the Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry on the Volga sterlet population of the April 2022 generation ($n = 62$) bred in a recirculating aquaculture system (RAS). The fish were kept in a tank with an area of 3.14 m² at an ichthyomass of 20-25 kg/m². Live weight (W, g) and eleven morphological parameters were determined: L — absolute length (cm); l — commercial length (cm), L2 — fish length to the end of the middle rays of the caudal fin (cm); HL — head length (cm); PV — pectoventral distance (cm); VA — ventroanal distance (cm); pl1 — caudal peduncle length (cm); H — greatest body depth (cm), h — caudal peduncle height (cm); GC — body girth (cm), Cc — caudal peduncle girth (cm). The parameters were recorded at five ages: at the beginning of the experiment at the age of 1 year 5 months (Bn) and at four age periods with an interval of 5-7 months between measurements: at the age of 1 year 7 months (B1), 2 years 2 months (B2), 2 years 7 months (B3) and 3 years 2 months (B4). To characterize the intensity of growth and development, the specific growth rate (SGR) for the period and the specific length gain (SLR) for the period were determined. To characterize the fish's exterior, the Fulton condition index (KF) and the elongation index (Q) were calculated. With increasing age, a significant ($p < 0.01$) decrease was observed in both the specific growth rate from 0.370 to 0.042 g%/day and the specific body length gain (from 1.05 to 0.10 mm%/day), which apparently reflects changes in the physiological processes in the fish body associated with the transition to sexual maturity. A relatively large variability in live weight ($C_v = 19.7-30.4\%$) was demonstrated compared to morphometric parameters ($C_v = 5.7-14.9\%$). The results of the analysis of variance showed a high degree of individual variability ($R^2_f = 0.223$; min-max = 0.048-0.537), which indicates the possibility of conducting selection work on these traits. Morphometric parameters were in moderate and high correlation dependence with the live weight of fish ($r = 0.49-0.93$). Equations have been developed that allow for high-precision (determination coefficient $R^2 = 0.877-0.941$) determination of fish weight based on morphometric parameters. The most preferable predictors turned out to be H ($R^2 = 0.941$), h ($R^2 = 0.916$) and L2 ($R^2 = 0.903$). They should be considered as the most promising in the development of methods for contactless determination of sterlet live weight based on machine vision and machine learning algorithms. The data obtained can be used to develop and improve breeding programs for sterlet reared in recirculating aquaculture systems.

Keywords: sterlet, live weight, morphometric parameters, allometric growth, correlation.

REFERENCES

1. Berezina V.V. *Bazis*, 2018, 2(4): 16-19 (in Russ.).
2. Vasilyeva L.M., Elhetawy A.I.Gh., Sudakova N.V., Astafyeva S.S. History, current status and prospects of sturgeon aquaculture in Russia. *Aquaculture Research*, 2019, 50: 979-993 (doi: 10.1111/are.13997).
3. Bronzi P., Chebanov M., Michaels J.T., Wei Q., Rosenthal H., Gessner J. Sturgeon meat and caviar production: global update 2017. *J. Appl. Ichthyol.*, 2019, 35: 257-266 (doi: 10.1111/jai.13870).
4. Podushka S.B. *Ribnoe khozyaystvo*, 2024, 5: 93-104 (doi: 10.36038/0131-6184-2024-5-93-104) (in Russ.).
5. Vasil'eva L.M., Sudakova N.V., Pishchenko E.V. *Ribovodstvo i ribnoe khozyaystvo*, 2024, 12: 93-104 (doi: 10.33920/sel-09-2412-01) (in Russ.).
6. Prokeš M., Baruš V., Mareš J., Peňáz M., Baránek V. Growth of sterlet *Acipenser ruthenus* under experimental and farm conditions of the Czech Republic, with remarks on other sturgeons. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2011, 59(6): 281-290 (doi: 10.11118/actaun201159060281).
7. Volosnikov G.I. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, 2(64): 67-72 (in Russ.).
8. Mihailov S.A., Mihoc N.A., Lalescu D., Grozea A. Polyculture of the pikeperch (*Sander lucioperca*) into recirculating aquaculture system, with sterlet (*Acipenser ruthenus*) or European catfish (*Silurus glanis*) — a preliminary study. *Research Journal of Agricultural Science*, 2017, 49(4): 193-198.
9. Abdollahpour H, Falahatkar B, Van Der Kraak G. The effects of long-term thyroxine administration on hematological, biochemical and immunological features in sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*). *Aquaculture*, 2021, 544: 737065 (doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.737065).
10. Van Rees C.B., Waylen K.A., Schmidt-Kloiber A., Thackeray S.J., Kalinkat G., Martens K., Domisch S., Lillebø A.I., Hermoso V., Grossart H.-P., Schinegger R., Declerck K., Adriaens T., Denys L., Jarić I., Janse J.H., Monaghan M.T., Wever A.D., Geijzenborffer I., Adamescu M.C., Jähnig S.C. Safeguarding freshwater life beyond 2020: recommendations for the new global biodiversity framework from the European experience. *Conservation Letters*, 2021, 14(1): e12771 (doi: 10.1111/conl.12771).

11. Petrova T.G., Kozovkova N.A., Kushnirova S.A. V sbornike: *Porodi i odomashnennie formi osetrovikh rib (Acipenseridae)* /Pod redaktsiey A.K. Bogeruka [In: Breeds and domesticated forms of sturgeon fish (*Acipenseridae*). A.K. Bogeruk (ed.)]. Moscow, 2008: 33-43 (in Russ.).
12. Petrova T.G., Kozovkova N.A., Kushnirova S.A. *Voprosi ribolovstva*, 13(3), 2012: 546-553 (in Russ.).
13. Ryabova G.D., Klimonov V.O., Afanas'ev K.I., Vyshkvartsev D.I., Moskaleichik F.F., Rubtsova G.A. Variation in morphometric and genetic characteristics of stellate sturgeon juveniles raised at different densities. *Russian Journal of Genetics*, 2006, 42(2): 182-191 (doi: 10.1134/S1022795406020128).
14. Furdean S., Lalescu D., Mihailov S.A., Grozea A. Growth dynamic of the main morphological traits in a sterlet (*Acipenser ruthenus*) population reared into recirculating aquaculture system, from 2 to 6 months old. *Research Journal of Agricultural Science*, 2017, 49(4): 128-134.
15. Mammaev M.A., Shikhshabekov M.M., Mirzakhanov M.K., Mammaeva L.M. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*, 2018, 3: 78-82 (in Russ.).
16. Agleev I.N., Bushov A.V., Isaev Yu.M. *Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2020, 1(49): 117-123 (doi: 10.18286/1816-4501-2020-1-117-123) (in Russ.).
17. Jafari Pastaki N., Abdollahpour H., Falahatkar B. Developmental responses of sterlet (*Acipenser ruthenus*) to temperature modulation with insights into intestinal and morphological traits. *Sci. Rep.*, 2025, 15(1): 18170 (doi: 10.1038/s41598-025-02566-y).
18. Balazadeh K., Litvak M.K. Using geometric morphometrics for sex determination on adult shortnose sturgeon (*Acipenser brevirostrum*). *Aquaculture*, 2018, 487: 89-96 (doi: 10.1016/j.aquaculture.2017.12.047).
19. Smederevac-Lali M. Comparison of morphological characters between wild and cultured sterlet (*Acipenser ruthenus* L.). *Slovenian Veterinary Research*, 2012, 49(4): 177-184.
20. Hamzaoui M., Aoueileiny M.O.-E., Romdhani L., Bouallegue R. Optimizing XGBoost performance for fish weight prediction through parameter pre-selection. *Fishes*, 2023, 8(10): 505 (doi: 10.3390/fishes8100505).
21. Føre M., Frank K., Norton T., Svendsen E., Alfredsen J.A., Dempster T., Eguiraun H., Watson W., Stahl A., Sunde L.M., Schellewald C., Skøien K.R., Alver M.O., Berckmans D. Precision fish farming: a new framework to improve production in aquaculture. *Biosystems Engineering*, 2018, 173: 176-193 (doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014).
22. Wang Y., Yu X., Liu J, An D., Wei Y. Dynamic feeding method for aquaculture fish using multi-task neural network. *Aquaculture*, 2022, 551: 737913 (doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.737913).
23. Hao M., Yu H., Li D. The measurement of fish size by machine vision — a review. In: *Computer and computing technologies in agriculture IX. CCTA 2015. IFIP advances in information and communication technology*, vol. 479. D. Li, Z. Li (eds.). Springer, Cham, 2016: 15-32 (doi: 10.1007/978-3-319-48354-2_2).
24. Pisarenko N.B., Bardukov N.V., Nikipelov V.I., Nikipelova A.K., Kharzinova V.R., Zinovieva N.A. Analysis of SNP (400 C > A) in the IGF1 gene for associations with size and weight indicators of sterlet (*Acipenser ruthenus*, Linnaeus, 1758). *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2024, 59(4): 680-691 (doi: 10.15389/agrobiology.2024.4.680rus).
25. Kharzinova V.R., Volkova V.V., Nikipelov V.I., Dotsev A.V., Barmintseva A.E., Bardukov N.V., Nikipelova A.K., Abdelmanova A.S., Myuge N.S., Zinovieva N.A. Characterization of the genetic structure in aquaculture and wild sterlet (*Acipenser ruthenus* Linnaeus, 1758) populations based on microsatellite analysis. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2024, 59 (4): 666-679 (doi: 10.15389/agrobiology.2024.4.666rus).
26. Song H., Dong T., Wang W., Yan X., Geng C., Bai S., Hu H. GWAS enhances genomic prediction accuracy of caviar yield, caviar color and body weight traits in sturgeons using whole-genome sequencing data. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(17): 9756 (doi: 10.3390/ijms25179756).
27. Chebanov M.S., Galich E.V., Chmir' Yu.N. *Rukovodstvo po razvedeniyu i virashchivaniyu osetrovikh rib* [Guide to breeding and growing sturgeon fish]. Moscow, 2004 (in Russ.).
28. Krilova V.D., Sokolov L.I. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu morfologicheskikh issledovaniy osetrovikh rib i ikh gibridov: metod. rekom. M.*, 1981 (in Russ.).
29. Shlenkina T.M., Shlenkin A.K. *Nauchno-metodicheskiy elektronniy zhurnal «Kontsept»*, 2016, 26: 406-410 (in Russ.).
30. Huxley J.S. Relative growth and formtransformation. *Proc. Biol. Sci.*, 1950, 137(889): 465-469 (doi: 10.1098/rspb.1950.0055).
31. Bulat D. *Ichthyofauna of the Republic of Moldova: threats, trends and rehabilitation recommendations. Monograph*. Foxtrot Publishing House, Chişinău, MO, 2017 (doi: 10.53937/9789975890700).
32. Xu B., Li D., Wei K., Zhu X., Xu J., Ma B. Allometric growth patterns and ontogenetic development during early larval stages of *Schizothorax waltoni* regan and *Percocypris retrodorslis* in Southwest China. *Water*, 2023, 15(4): 824 (doi: 10.3390/w15040824).
33. Moshayedi F., Eagderi S., Zargarian P., Iri M. Morphological development and body shape

change of sterlet (*Acipenser ruthenus*) using geometric morphometric technique during early development. *Aquatics Nutrition and Biochemistry*, 2015, 2: 1-10.

34. Eagderi S., Poorbagher H., Moshayedi F., Hosseini S.V. Morphological development and allometric growth patterns of *Acipenser persicus* Borodin, 1897 (Actinopterygii, Acipenseridae) during early development. *International Journal of Aquatic Biology*, 2017, 5(3): 201-207. (doi: 10.22034/ijab.v5i3.312).
35. Kim D.I. Ontogenetic phase shifts in metabolism and intraspecific scaling in a non-teleost fish, the sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*). *Hydrobiology*, 2025, 4(3): 24 (doi: 10.3390/hydrobiology4030024).