



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
РЫБНОГО ХОЗЯЙСТВА И ОКЕАНОГРАФИИ»
Санкт-Петербургский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга»)

АННОТАЦИЯ
К НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЛЮТИКОВОЙ НАТАЛЬИ АЛЕКСЕЕВНЫ

ТЕМА: «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА
ЛИЧИНОК И СЕГОЛЕТОК СУДАКА В ИНДУСТРИАЛЬНОЙ
АКВАКУЛЬТУРЕ»

Шифр и наименование области науки: 1. Естественные науки
Шифр и наименование направления подготовки - группа научных
специальностей: 1.5. Биологические науки
Шифр и наименование научной специальности: 1.5.15. Экология

Отрасль науки: Биологические науки

Присваиваемая квалификация: Исследователь. Преподаватель-
исследователь

Научный руководитель: Меншуткин Владимир Васильевич, проф.,
доктор биологических наук

Научный руководитель: Лютиков Анатолий Анатольевич, кандидат
биологических наук

Санкт-Петербург

2025 г.

Актуальность

Судак *Sander lucioperca* – ценный и крупный представитель окуневых рыб, широко распространенный в Европе и Азии. Повсеместное снижение численности привело к изменению некоторых структурных популяционных показателей судака, что отрицательно сказывается на воспроизводстве этого вида, в том числе искусственном – возникают сложности с заготовкой производителей в природе для целей воспроизводства и рыбоводства.

Между тем судак является одним из самых сложных объектов пресноводной аквакультуры из-за очень мелких размеров личинок, их общей физиологической несформированности и высокой чувствительности. Считается, что личинки судака не могут переваривать и усваивать компоненты искусственного рациона и могут быть выращены исключительно с использованием зоопланктона, например, культивируемого – коловраток и науплий артемии. Однако кормление судака мелким зоопланктоном до сих пор не позволило разработать технологию выращивания, дающую стабильные результаты с высокой выживаемостью и равномерным ростом.

В комплексе это препятствует развитию личиночной аквакультуры судака и не позволяет использовать в этом секторе рыбоводства современные методы управления, такие как моделирование. Тем временем моделирование процессов выращивания объектов аквакультуры позволяет разработать бизнес-модель и технологическую схему рыбоводного процесса. Моделирование роста животных в аквакультуре может быть использовано в качестве инструмента управления производством, позволяющим прогнозировать размер особей на момент вылова, оценивать смертность, а также потребности в отдельных питательных веществах и комбикормах.

В случае с судаком возможность моделирования роста личинок появилась с разработкой в ГосНИОРХ отечественных искусственных стартовых кормов и получением относительно стабильных результатов выращивания судака индустриальным способом. К настоящему времени в научной литературе отсутствуют работы по моделированию роста и выращиванию судака в ранний период жизни – от вылупления до сеголеток. Это и определяет актуальность настоящего исследования.

В цели настоящей работы входило:

- исследовать существующие и разработать собственную модель роста рыб для описания и прогнозирования роста судака в первый год жизни в аквакультуре;
- подобрать наиболее подходящие модели для описания роста личинок и сеголеток судака;
- представить модель в виде компьютерного приложения для расчетов рыбоводных параметров культивирования личинок и сеголеток судака.

Задачами работы являлось:

- изучить особенности роста личинок и сеголеток судака в индустриальной аквакультуре, а также его основные параметры, такие как массу и длину личинок, абсолютную, относительную и удельную скорости роста, тепловой коэффициент роста;
- исследовать существующие модели роста рыб на предмет их применимости для описания и прогнозирования роста судака в первый год жизни в аквакультуре;
- на основе наиболее эффективных моделей разработать компьютерное приложение в виде модели-калькулятора для расчета и прогнозирования рыбоводных параметров, а также моделирования процессов выращивания личинок и сеголеток судака.

Теоретическая и практическая значимость представляемой научно-квалификационной работы заключается в том, что:

- полученные автором результаты могут быть использованы для развития теоретических основ разведения судака, в том числе в наиболее сложный период жизни рыбы – личиночный;

- проведенные исследования роста судака и параметров с ним связанных, реализованных в моделях, позволяют лучше понять закономерности роста личинок и сеголеток судака, помогут скорректировать технологию его выращивания в индустриальных условиях и повысить эффективность разведения;

- использование модели-калькулятора оптимизирует процесс выращивания судака за счет быстрого вариативного определения рыбоводных параметров (норм кормления, плотности посадки, температуры выращивания и т.д.) и прогнозирования результатов выращивания.

Научная новизна:

- впервые на основании проведенных исследований с использованием методов математического моделирования был описан рост личинок и сеголеток судака в индустриальной аквакультуре, а также подобраны модели, наилучшим образом описывающие процессы роста судака в первый год выращивания.

Результаты:

Личиночный рост судака (длины и массы) может быть охарактеризован как линейный, а у мальков/сеголеток – как сигмоидальный. Причины линейного роста на ранних этапах развития могут быть связаны с относительно стабильной температурой воды и отсутствием ярко выраженных морфофизиологических изменений у личинок судака. По достижении судаком средней индивидуальной массы около 150 мг у личинок происходит метаморфоз, после которого начинается мальковый этап развития. Молодь становится похожа на взрослую особь, происходит становление и функционирование пищеварительной системы, что в комплексе с другими изменениями в организме и повышением температуры воды до максимального значения (в пределах оптимума) обеспечивает ускорение роста.

В дальнейшем затухание темпов роста у сеголеток судака происходит из-за сезонного снижения температуры воды и связано также с изменением энергетического баланса между ростом и другими энергоёмкими процессами организма рыбы. В связи с неоднородностью роста личинок и мальков/сеголеток были подобраны модели, наилучшим образом описывающие процессы линейного и весового роста судака в первый год выращивания рыб в условиях индустриального рыбоводства. Всего было проанализировано 11 моделей роста, используемых в аквакультуре - трех-, четырех- и пятипараметрические логистические модели (M1, M2 и M3, соответственно), модель Гомпертца, модель фон Берталанфи (M5), обобщенная модель Вейбулла (Generalized Weibull) (M6), модель Яношека (Janoshek) (M7), модель Моргана Мерцера Флодина (Morgan Mercer Flodin) (M8), обобщенная модель Михаэлиса-Ментен (Generalized Michaelis-Menten) (M9), модель Шнута (Schnute) (M10), собственная линейная модель (M11).

Построение графиков и подгонка выбранных моделей осуществляли в Python (3.6.13), который является широко используемым программным обеспечением для моделирования с множеством функций и методов подгонки. Для анализа и интерпретации всех параметров использовался «curve_fit» модуля «scipy.optimize» в Python, принцип которого заключался в использовании нелинейного метода наименьших квадратов для реализации подгонки кривой.

Личиночный линейный и весовой рост судака наилучшим образом описывают четырех- и пятипараметрические логистические модели M2 и M3, соответственно, модели

фон Бергаланфи М5 и Яношека М7, Михаэлиса-Ментен М9 (только для линейного роста) и собственная модель М11 (пример кривой линейного роста личинок судака отображен на рисунке).

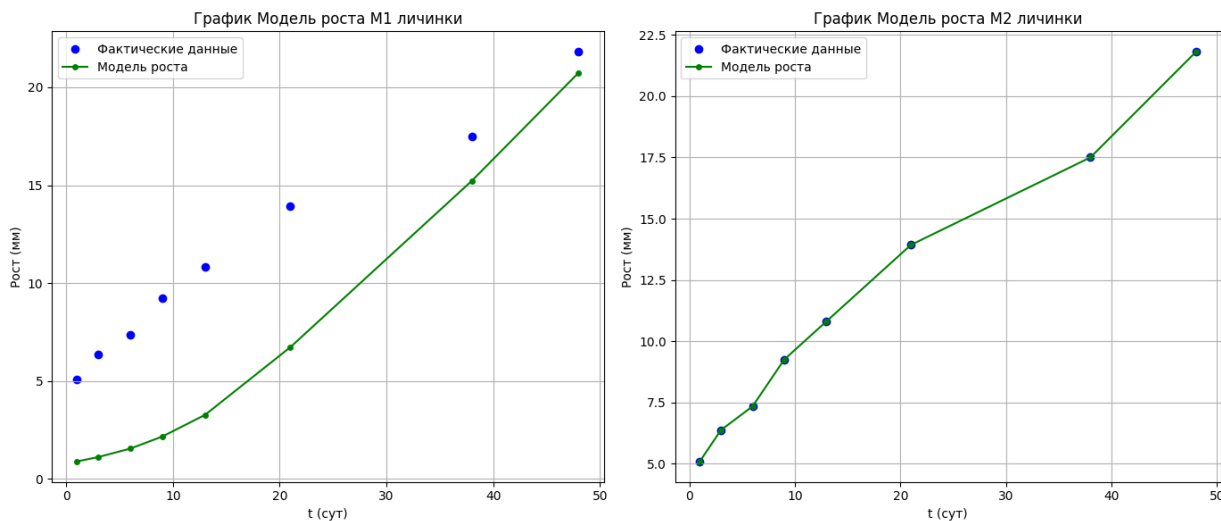


Рисунок. Построение кривой линейного роста (рост в длину, мм) личинок судака на примере логистических моделей с тремя (M1) и четырьмя (M2) параметрами.

Линейный рост мальков и сеголеток адекватно характеризуют логистические модели с относительно небольшим количеством параметров (трех- и четырехпараметрические – M1 и M2), трехпараметрическая модель Гомпертца (M4), четырехпараметрические модели Яношека (M7), Моргана Мерцера Флорина (M8) и Михаэлиса-Ментен (M9).

Кривую весового прироста мальков и сеголеток реалистично строят лишь три модели – логистическая модель с четырьмя параметрами (M2), модели фон Бергаланфи (M5) и Яношека (M7).

В целом, при исследовании роста личинок лучшим образом себя реализуют модели с бóльшим количеством параметров (если сравнивать трех- и четырехпараметрические модели). Так, рост личинок реалистично моделируют более 80% моделей с 4 и более параметрами. Рост мальков и сеголеток описывают 67% таких моделей, остальная доля приходится на модели с 3 параметрами.

Это подтверждается другими исследованиями роста рыб в аквакультуре. Так, Ваег et al. (2011) использовали 4-параметрическую модель Шнута для подгонки роста тюрбо *Psetta maxima* (от 5 г до 2000 г) и обнаружили, что это оптимальная модель с реалистичным коэффициентом роста. Lugert et al. (2016; 2017) также подтвердили, что четырехпараметрическая модель имеет преимущества при подгонке роста рыб и обладает большим потенциалом для моделирования роста в аквакультуре.

Однако, с одной стороны предполагается, что увеличение числа параметров приведёт к более высокому качеству соответствия, с другой стороны может иметь противоположный эффект увеличивая время итерации, т.е. привести к «переподгонке» (Anderson, Burnham, 2004; Lugert et al., 2019). Вероятно, этим можно объяснить увеличение времени итерации для эффективных моделей с четырьмя параметрами (M2 и M11) по сравнению с трехпараметрической моделью (M5).

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Рост личинок судака от начала питания до 150 мг является линейным, мальков и сеголеток – сигмоидальным;
2. Для описания линейного и весового роста личинок и сеголеток судака, а также весового роста личинок, наилучшим образом подходит четырехпараметрическая логистическая модель;
3. Линейный рост мальков и сеголеток наиболее адекватно описывает четырехпараметрическая модель Яношека;
4. Для точного описания личиночного роста судака необходимо использовать модели с большим количеством параметров, чем для описания роста мальков и сеголеток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследован рост судака в аквакультуре в первый год выращивания. Показано, что тенденция роста судака на ранних стадиях развития близка к линейной, мальков и сеголеток – к сигмоидальной.

Из 11 нелинейных моделей, в том числе широко используемых для моделирования роста в аквакультуре, была выбрана четырехпараметрическая логистическая модель в качестве оптимальной для описания линейного и весового роста личинок и сеголеток судака, а также весового роста личинок. Для прогнозирования линейного роста мальков и сеголеток наибольшим образом подходит четырехпараметрическая модель Яношека.

Четырехпараметрические модели в целом лучше подходят для эффективного и реалистичного описания роста судака в первый год жизни. Критерии оценки таких моделей имеют лучшие показатели, чем у трех- и пятипараметрических моделей. Это в комплексе с возможностью адекватно прогнозировать рост личинок и молоди, делает их наиболее перспективными в аквакультуре судака.

С выбором оптимальных моделей для описания линейного и весового роста судака от личинок до сеголеток стало возможным разработка программы-калькулятора, в которых наилучшие модели стали основой для рыбоводных расчетов. Подобная программа способна значительно упростить работу персонала рыбхоза, спрогнозировать конечную выживаемость и массу сеголеток, в том числе в условиях, отличных от тех, для которых модель была откалибрована. Также программа может быть основой для разработки рекомендаций и моделирования при создании судаковой фермы.