

Разведение животных

Рубрика

doi.org/10.31043/2410-2733-2023-4-23-30

УДК 639.2/.3 ; 577.218

О. А. Николаева, Н. В. Дементьева

Направление развития аквакультуры лососевых в мире

Аннотация.

Рост населения Земли предполагает поиск альтернативных источников полноценного питания человека. Одним из таких направлений является развитие аквакультуры. Мировая аквакультура, как и другие отрасли сельского хозяйства, прошла этапы своего становления начиная от ведения хозяйства примитивными методами до использования средств современных технологий. Лососеводство занимает важное место в промышленном рыбоводстве, а объемы выращиваемой продукции увеличиваются каждый год. Данный обзор кратко характеризует основные вехи развития аквакультуры лососевых рыб, описывает тренды, по которым велись селекционные программы, и отображает генетические подходы, направленные на использование в рыбоводстве. Внедрение генетических методов в селекцию лососевых рыб зависит от уровня развития стран, где находятся рыбоводные хозяйства. За рубежом накоплен большой опыт инвестиционной политики, направленный на создание и введение проектов до завершающей (эксплуатационной) стадии внедрения методов молекулярной генетики в лососеводство, в том числе с использованием геномной селекции. В то время как в России только обсуждается концепция генетических улучшений в аквакультуре. В настоящем обзоре важное место отводится обобщению накопленного материала о генетических методах исследования лососевых рыб, а также направлениях применения генетических маркеров в лососеводстве. Обсуждаются проблемы поиска кандидатных генов, локусов количественных признаков (QTL), связанных с набором мышечной массы и устойчивостью рыб к заболеваниям. Показываются направления и способы решения селекционных задач. Интенсивное развитие научных подходов к развитию аквакультуры за рубежом является вектором для постановки целей расширения инвестиций бизнеса в развитие молекулярно-генетических подходов к селекции лососевых рыб в России.

Ключевые слова: Лососевые рыбы; аквакультура; мышечная масса; локусы количественных признаков; гены-кандидаты.

Авторы:

Николаева О. А. – e-mail: helgaanikolaeva@gmail.com;

Дементьева Н. В. – кандидат биологических наук; e-mail: dementevan@mail.ru.

Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста» (ВНИИГРЖ); 196601, Россия, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Московское шоссе, д. 55 а.

Введение. Пластичность рыб семейства Лососевых открывает широкий спектр возможностей их промышленного выращивания. При использовании последних достижений селекции можно дифференцировать представителей семейства по интересующим хозяйственно-полезным признакам и оптимальным значениям продуктивных показателей. Благодаря внедрению в животноводческую практику достижений генетических технологий появилась возможность с высокой точностью детерминировать участки генома, ответственные за конкретные признаки. В этом обзоре мы суммируем наши знания об этапах развития аквакультуры лососевых рыб, обозначим их актуальное состояние и опишем основные селекционные и генетические направления ее развития.

Этапы развития аквакультуры лососевых. Рыбы из семейства лососевых (от лат. *Salmonidae*) являются важным пищевым объектом человека еще со времен палеолита. Сохранившиеся исторические доказательства свидетельствуют о том, что лососи имели огромное значение для экономик государств Евразии и Северной Америки. К сожалению, в настоящее время популяция лососевых существенно сократилась, и на них ведется ограниченный промысел. Хотя добыча тихоокеанских лососей всё еще остаётся важной отраслью экономики ряда стран [1].

В прошлых столетиях по мере развития транспортной логистики появлялась возможность расселять представителей семейства лососевых в водоемы разных регионов с благоприятными

климатическими условиями. Наиболее подходящими для вселенцев оказались экосистемы с бедной ихтиофауной, где был низкий уровень конкуренции. Таким образом, лососи-интродуценты были акклиматизированы во многих регионах, в том числе в водных резервуарах, где уже обитали виды-эндемики того же семейства [2].

Наряду с промыслом, который продолжал истощать запасы лососей из естественных источников, были предприняты попытки искусственного воспроизводства. Новатором в строительстве рыбного завода на территории России стал русский ихтиолог Врасский Владимир Павлович, который заложил основы промышленного рыбоводства и разработал «сухой» или «русский» способ оплодотворения икры, позволяющий добиться почти 100 % оплодотворения икры. Благодаря этой технологии многие страны мира создавали высокорентабельные прудовые хозяйства [3].

Однако строительство, эксплуатация и мелиорация прудов, а также кормление рыб предполагало большие расходы. Другим витком развития явилось становление пастбищной аквакультуры лососевых рыб, которая оказалась менее затратной. Пастбищное лососеводство включает в себя этапы искусственного оплодотворения, закладку и инкубацию икры, выпуск молоди лососей и затем их вылов после нагула. Лососи возвращаются в то место, откуда они ушли на нагул (так называемый хоуминг). Пастбищное рыбоводство популярно во многих странах, этим способом из семейства *Salmonidae* выращивается горбуша (*O. gorbushca*), кета (*O. keta*), нерка (*O. nerka*), кижуч (*O. kisutch*), чавыча (*O. tshawytscha*), сима (*O. masou*) [4].

Для некоторых локаций существуют разные альтернативы ведения рыбохозяйственной деятельности, что находит своё подтверждение в рыбоводно-биологическом обосновании. Но иногда гидрологические характеристики естественных акваторий имеют такие особенности, которые без изменений ландшафта могут подойти для ведения рыбохозяйственной деятельности. Так, на морских заливах (фьордах) с 1970 г. положено начало садкового лососеводства. Это стало важной частью экономики Норвегии, Чили, а также популярно в Шотландии, Ирландии, Канаде. Практика ведения садкового лососеводства была перенята отечественными рыбоведами от норвежцев. Но морское садковое лососеводство на территории РФ не увенчалось успехом, поскольку здесь практически нет незамерзающих фьордов [5].

Современным и масштабируемым на сегодняшний день является повсеместное внедрение

установок замкнутого водообеспечения (УЗВ). Это действительно один из самых доступных по размещению способов ведения рыбоводства. Благодаря УЗВ появилась возможность выращивать тех гидробионтов, для жизнедеятельности которых человек сам настраивает оптимальные условия. Однако эти мероприятия требуют финансовых, технических затрат, а также квалифицированный персонал по обслуживанию рыбного комплекса. Тем не менее, строительство установок замкнутого водоснабжения набирает обороты во всем мире. Объектами полноцикловых хозяйств являются: радужная форель (*O. mykiss*), атлантический лосось (*S. salar*), таймень (*H. hucho*), гольцы (*Salvelinus*) [6].

На сегодня все из вышеперечисленных способов разведения рыб семейства *Salmonidae* остаются актуальными. Согласно отчета The Food and Agriculture Organization (FAO) продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН о мировом производстве аквакультурных видов рыб [7] видно, что в пресноводной аквакультуре из лососевых наиболее масштабным является выращивание радужной форели *Oncorhynchus mykiss*. Объемы ее производства возросли более чем в 2 раза с 340,4 тыс. тонн (2010) до 739,5 тыс. тонн. А в сводных данных по морской аквакультуре заслуженно занимает лидирующие позиции производство атлантического лосося *Salmo salar*. Объемы его выращивания существенно увеличивались с 895.7 тыс. тонн (2010) каждый год, и к 2020 году это значение достигло 2719,6 тыс. тонн. Другие лососевые-объекты морской аквакультуры — кижуч *Oncorhynchus kisutch* и радужная форель достигли примерно 220 тыс. тонн на 2020 год, что тоже является показательным, так как марикультура кижуча встречается только в Чили, а радужная форель — это преимущественно объект пресноводной аквакультуры.

Селекционные программы сыграли важную роль в том, что форель и лосось заняли значимое место в мировой аквакультуре. Наиболее экономически важными являются ростовые признаки и поэтому используются в качестве критерия отбора. Связь между геномной и фенотипической вариацией помогает производителям лучше понять генетические основы полезных признаков и предоставить соответствующую информацию для планирования стратегий, чтобы сделать селекционные программы более эффективными.

1. Селекционно-племенная работа по фенотипическим признакам. Успешное разведение лососевых, как правило, осуществляет-

ся при наличии собственного маточного стада пород рыб, адаптированных под климатические зоны и с заданными показателями по темпу роста и половому созреванию, определяемому по градусо-дням. Селекционными усилиями были выведены наиболее распространенные линии атлантического лосося и породы радужной форели: Адлер, Камлоопс, форель Дональдсона, стальноголовый лосось, Рофор, Росталь, Ропшинская золотая. Породы форели выводились путем гибридизации разных видов, например, радужная форель и стальноголовый лосось с получением породы Адлер [3].

Современная индустрия аквакультуры направлена на повышение эффективности роста мышечной массы. Однако на практике состав рыбной тушки сильно смещен в сторону отложения липидов, а не белков. Это обусловлено диетой, которую предлагают современные производители рыбных комбикормов. В работе Declan Tobin, Antti Kaune et.al была проверена гипотеза о высоком потенциале диеты с высоким содержанием белка и низким содержанием липидов по сравнению с современной диетой с нормальным содержанием белка и высоким содержанием липидов [8]. Результаты спектрофотометрии белков и липидов и корреляционный анализ по исследуемым группам показали, что процентное содержание белка в теле имеет высокий коэффициент наследуемости, в то время как липидный компонент имеет экзогенное влияние и подвержен колебаниям [9]. Известно, что филе рыб, которые были выращены на кормах с высоким содержанием жиров, сильнее подвержено посмертному ухудшению качества мяса, так как при дистрибуции в охлажденном виде происходит окисление липидов [10]. Для современного потребителя предоставляется выбор из продукции лососеводства по таким критериям как насыщенность, оттенок цвета, текстура и плотность филе, интенсивность испещрения миоцеллами (белыми прожилками), «маслянистость» и т.д. Цвет филе и плотность получают путем подбора диеты с определенной концентрацией астаксантина [11], улучшение качества филе достигается с помощью добавления в рацион витаминов и других нутриентов [12].

2. Генетические подходы в селекции лососевых. В настоящее время существует проблема сборки генома лососевых рыб. Эволюционно так сложилось, что лососевые рыбы подвергались механизму репродуктивной изоляции, которая возникла как побочный результат для предотвращения негативных последствий межвидовой гибридизации. Также у лососевых, как и у других

видов костистых рыб, повышенная частота хромосомных мутаций, вследствие чего у них развита система репарации и компенсации мутаций. Системы онтогенетической адаптации лососевых сделали это семейство фенотипически высокопластичным. Таким образом, все системы стабилизации генофонда лососевых способствовали повышенной изменчивости кариотипов и возникновению надстроек, дубликатов в геноме [13, 14]. Эти особенности значительно усложнили работу по изучению и сборке полного генома лососевых.

Вначале молекулярные биологи для определения последовательности нуклеотидов использовали популярный метод дзизокситерминаторов (метод Фредерика Сэнгера). На следующем этапе секвенирование транскриптома стало быстрым и эффективным средством для обнаружения генов и разработки генетических маркеров. Хотя большое количество (258 973) экспрессируемых меток последовательностей (EST) находится в открытом доступе, природа дублированного генома радужной форели препятствует сборке и усложняет аннотацию. Решить эту задачу позволил проект 454-*pyrosequencing*. Так, в работе Salem M., Rexroad C. удалось с помощью секвенирования удвоенного гаплоидного транскриптома радужной форели расширить библиотеку нуклеотидных последовательностей, что облегчило сборку генома радужной форели [15]. Это, в свою очередь, сделало доступнее подбор генетических маркеров для микрочипов [16]. Известно, что гены, отвечающие за рост мышечной массы, представляют значительный интерес для выявления маркеров, дальнейшего их использования в маркерной селекции и интеграции результатов селекции в товарное выращивание рыб. Некоторые исследования нацелены на обнаружение целых сетей генов, связанных генетическими узлами и ответственных за пролиферативный рост клеток, в том числе мышечных. В полногеномном поиске ассоциаций Dianelys G. Guangtu G. et. al. провели идентификацию локусов, влияющих на выход филе в процентном отношении, и обнаружили сеть окон на различных хромосомах (Omy5, Omy9, Omy17, Omy 27), где сосредоточена наибольшая доля дисперсии для определенного признака [17].

Несмотря на то, что количественные признаки, к которым относится рост мышечной массы, носят полигенную природу [17], многие исследования посвящены изучению роли конкретного гена-кандидата, экспрессия которого происходит на этапе эмбриогенеза или в ходе онтогенеза. Гены-кандидаты обычно выбираются на основе предварительных знаний об их роли в регуляции

конкретных метаболических путей, влияющих на определенный количественный признак [18]. В исследованиях генов-кандидатов предполагаемые гены сначала проверяются на наличие полиморфизмов, и изучается статистическая ассоциация между конкретными аллелями и фенотипическим выражением интересующего признака. Если обнаруживаются значительные ассоциации, это рассматривается как доказательство того, что ген либо непосредственно участвует в генетическом контроле признака, либо функциональный полиморфизм находится достаточно близко к маркеру, так что эти два локуса находятся в неравновесии по сцеплению [19, 20].

Активно экстраполируются накопленные данные о генах, оказывающих влияние на пролиферативный рост клеток животных и человека, на развитие базы генетических данных рыб. По мнению авторов, перспективными для изучения являются такие как: фактор роста плеiotропин *ptn* [21]; Тирозин-протеинфосфатаза *T* регулятор роста и различных клеточных процессов, включая рост клеток, дифференцировку, митотический цикл [22]; ген, стимулирующий гормон роста *grtp1b* [23]; ген *azin1b*, который кодирует белок, играющий роль в росте клеток, и поддерживает гомеостаз организма [24]; *c1n1 contactin 1* [25] и многие другие. Также активно изучается действие миостатина, а точнее возможности нивелирования его действия для более высокого выхода мышечной массы, как это было получено для КРС и модельных объектов (например, *Mus musculus*) [26, 27].

Значительную роль в генетических исследованиях занимает изучение инсулина и инсулиноподобных факторов роста (ИФР). Company R., Astolab A. et.al. выявили ИФР, которые соответствуют видовым различиям в темпах роста рыб. Также авторами установлено повышение уровня гормона соматолактина в период увеличения размера рыбы по мере роста [28].

Для успешного накопления товарной массы рыбы необходимо контролировать здоровье поголовья. Как известно, многие заболевания рыб развиваются под влиянием стресс-факторов [29], было изучено, что ответ на раздражители при хроническом стрессе имеет также генетическую природу. Предложены локусы предположительных QTL влияющих на формирование и уровень гормона стресса — кортизола, механизм его выработки и подавления [30].

Закладка продуктивных качеств формируется еще на ранних этапах развития икры и молоди рыбы. Исследования экспрессии кандидатных генов на разных стадиях раннего развития рыб

раскрывают их роль в регуляции эмбриогенеза. Примером решающего эмбрионального и зародышевого развития у рыб имеет ген *IGF2BP3*, который кодирует консервативный РНК-связывающий белок. Он играет важную роль во время раннего эмбрионального развития и зародышевой линии, стабилизируя синцитиальный слой желтка у ранних эмбрионов [31]. Zhang Y., Wang L., et al. продемонстрировали в своей работе влияние гена *zTfpi-2* на развитие сердечно-сосудистой системы, мозга рыб и гемопоэза в целом. Они установили, что нокдаун *zTfpi-2* может привести к аномалиям в развитии рыб и в конечном итоге к летальному исходу. Найденные в этом исследовании маркерные гены могут быть использованы в контроле кардиогенеза [32] и помогут в реализации стратегий лечения сердечно-сосудистых и гемопоэтических заболеваний [33].

Заключение. Ведение аквакультуры лососевых рыб является отражением потребностей, вызванных ростом населения планеты и развитием технологий, которые претерпели значительную модернизацию за последнее время. Современное рыбоводство отличается не только большими мощностями, но и стремится к повышению качества продукции выращиваемых гидробионтов. С помощью селекции по фенотипическим признакам людям удалось, проводя искусственный отбор, получить жизнеспособных в неволе и продуктивных особей, чье выращивание и размножение происходит под контролем человека. Вопросы генетических улучшений, которые стоят перед аквакультурой лососевых рыб, используют современные подходы геномной селекции и другие методы молекулярной генетики. Молекулярные биотехнологии в аквакультуре лососевых направлены на повышение продуктивности, выход филе и его качество, решение проблем здоровья рыб. Пути решения этих вопросов направлены через исследование генома, поиск генов, создание панели маркеров, которые помогут проводить искусственный отбор особей по обоснованным генетическим параметрам. Рыбоводы смогут выращивать лососевых рыб с менее жирным филе или, наоборот, с богатой липидами мышечную массу, смогут влиять на консистенцию филе, цвет, смогут формировать товарные нефертильные стада, отличающиеся большей навеской, не прибегая к методам облучения, и многое другое.

Предполагается, что в будущем панели генетических маркеров станут доступными в рыбоводстве. Это позволит предупредить многие проблемы и минимизировать экономические затраты на производство ценного белка.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования РФ (ГЗ № № 0445-2021-0010).*

Литература

1. Bou M. Gene expression profile during proliferation and differentiation of rainbow trout adipocyte precursor cells / M. Bou, J. Montfort et al. // BMC Genomics. – 2017. – V. 18. – P. 347-367.
2. Карпевич А. Ф., Акклиматизация и культивирование лососевых рыб-интродуцентов / Агапов В. С., Магомедов Г. М., Карпевич А. Ф. - М.: ВНИРО, 1991. – 206 с.: ISBN 5-85382-091-5.
3. Артамонова В. С., Махров А. А. Генетические методы в лососеводстве: от традиционной селекции до нанобиотехнологий. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. – 128 с.: ил. ISBN 978-5-9907572-0-2.
4. Максимова Е. Пастбищное рыбководство: тенденции и перспективы // Рыбная сфера. – 2014. – Т. 2(10). – С. 16-19.
5. Halwart M. Cage aquaculture / Soto D., Arthur J. R. – Rome: Viale delle Terme di Caracalla, 2010. – 299 с.: ISBN 978-92-5-405801.
6. Брайнбалле Я. Руководство по аквакультуре в установках замкнутого водоснабжения – Копенгаген: AKVA GROUP Denmark, 2010. – 69 с.
7. FAO. 2022. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation. Rome, FAO. DOI: 10.4060/cc0461en.
8. Tobin D. Fat or lean? The quantitative genetic basis for selection strategies of muscle and body composition traits in breeding schemes of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / A. Kause, E. A. Mantysaari et al. // Aquaculture. – 2006. – V. 261. – P. 510-521. DOI: 10.1016/j.aquaculture. 2006.07.023.
9. Ali A. Genome-wide identification of loci associated with growth in rainbow trout / A. Ali, A. Rafet et al. // BMC Genomics. – 2020. – V. 209. – P. 21-37. DOI: 10.1186/s12864-020-6617-x.
10. Scaife J. R. Influence of α -tocopherol acetate on the short- and long-term storage properties of fillets from Atlantic salmon *Salmo salar* fed a high lipid diet / J. R. Scaife, G. E. Onibi et al. // Aquaculture Nutrition. – 2001. – V. 6(1). – P. 65-71. DOI: 10.1046/j.1365-2095.2000.00128.x.
11. Christiansen R. Assessment of flesh colour in Atlantic salmon, *Salmo salar* L. / R. Christiansen, G. Struksnæs et al. // Aquaculture Research. – 1995. – V. 26(5). – P. 311-321.
12. Ruff N. The effect of dietary vitamin E and C level on market-size turbot (*Scophthalmus maximus*) fillet quality / N. Ruff, R. D. FitzGerald et al. // Aquaculture Nutrition. – 2003. – V. 9(2). – P. 91-103.
13. O'Malley K. G. Quantitative Trait Loci for Spawning Date and Body Weight in Rainbow Trout: Testing for Conserved Effects Across Ancestrally Duplicated Chromosomes / K. G. O'Malley, T. Sakamoto et al. // Journal of Heredity. – 2003. – V. 94. – P. 273-284. DOI: 10.1093/jhered/esg067.
14. Pasquier J. Gene evolution and gene expression after whole genome duplication in fish: the PhyloFish database / J. Pasquier, J. Cabau et al. // BMC Genomics. – 2016. – V. 17. – P. 368-378.
15. Salem M. Characterization of the rainbow trout transcriptome using Sanger and 454-pyrosequencing approaches / M. Salem, C. E. Rexroad et al. // BMC Genomics. – 2010. – V. 11. – P. 564 – 574.
16. Salem M. Genome-Wide Association Analysis With a 50K Transcribed Gene SNP-Chip Identifies QTL Affecting Muscle Yield in Rainbow Trout / M. Salem, R. Al-Tobasei et al. // Frontiers in genetic. – 2018. – V. 9. – P. 387-401. DOI: 10.3389/fgene.2018.00387.
17. Dianelys G. Genome-Wide Association Study for Identifying Loci that Affect Fillet Yield, Carcass, and Body Weight Traits in Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) / G. Dianelys, G. Guangtu et al. // Frontiers in genetic. – 2016. – V. 7. – P. 203-217. DOI: 10.3389/fgene. 2016.00203.
18. Wringe B. F. Growth-related quantitative trait loci in domestic and wild rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / B. F. Wringe, R. H. Devlin et al. // BMC Genomics. – 2010. – V. 11. – P. 63-77.
19. De-Santis Ch. Candidate growth genes in finfish – where should we be looking? / Ch. De-Santis, R. Jerry Dean // Aquaculture. – 2007. – V. 272. – P. 22-38. DOI: 10.1007/s 10126-010-9277-z.
20. Vilhena R. Genome-wide association analysis for body weight identifies candidate genes related to development and metabolism in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / R. Vilhena, R. Neto et al. // Molecular Genetics and Genomics. – 2019. – V. 294. – P. 563–571. DOI: 10.1007/s00438-018-1518-2.

21. Fukada M. Protein tyrosine phosphatase receptor type Z is inactivated by ligand-induced oligomerization / M. Fukada, A. Fujikawaa et al. // Federation of European Biochemical Societies. – 2006. – V. 580. – P. 4051-4056. DOI: 10.1016/j.febslet.2006.06.041.
22. Boni Ch. A Comprehensive Review of Receptor-Type Tyrosine-Protein Phosphatase Gamma (PTPRG) Role in Health and Non-Neoplastic Disease / Ch. Boni, C. Laudanna, C. Sorio // Biomolecules. – 2022. – V. 12. – P. 84-100. DOI: 10.3390/biom12010084.
23. Xiong G. Growth-related expressed sequence tag-sample sequence repeats (EST-SSRS) screen of Mud Ivory Whelk (*Babylonia Lutosa*) through transcriptome sequencing / G. Xiong, P. Wang et al. // Applied Ecology and Environmental Research. – 2020. – V. 18(2). – P. 3471-3482.
24. Haws W. Analyses of binding partners and functional domains for the developmentally essential protein Hmx3a/HMX3 / W. Haws, S. England et al. // Scientific reports. – 2023. – V. 13. – P. 1151-1164.
25. Haenisch Ch. The neuronal growth and regeneration associated Cntn1 (F3/F11/Contactin) gene is duplicated in fish: expression during development and retinal axon regeneration / Ch. Haenisch, H. Diekmann et al. // Mol. Cell. Neurosci. – 2025. – V. 28. – P. 361-437. DOI: 10.1016/j.mcn.2004.04.013.
26. Garikipati D. K. Identification, characterization, and quantitative expression analysis of rainbow trout myostatin-1a and myostatin-1b genes / D. K. Garikipati, S. A. Gahr, B. D. Rodgers // Journal of Endocrinology. – 2006. – V. 190. – P. 879-888. DOI: 10.1677/joe.1.06866.
27. Suarez-Bregua P. Promoter Architecture and Transcriptional Regulation of Musculoskeletal Embryonic Nuclear Protein 1b (mustn1b) Gene in Zebrafish / P. Suarez-Bregua, Chien Ch.-ju et al. // Developmental Dynamics. – 2017. – V. 246. – P. 992-1000. DOI: 10.1002/dvdy.24591.
28. Company R. Somatotrophic regulation of fish growth and adiposity: growth hormone (GH) and somatolactin (SL) relationship / R. Company, A. Astola et al. // Comparative Biochemistry and Physiology Part C. – 2001. – V. 130(4). – P. 435-445. DOI: 10.1016/s1532-0456(01)00269-1.
29. Головина Н. А. Ихтиопатология / Стрелков Ю. А., Воронин В. Н., Головин П. П., Евдокимова В. Б., Юхименко Л. Н. – М.: Мир, 2003. – 448 с.: ISBN 5-03-003596-6.
30. Drew R. E. Detection of QTL influencing cortisol levels in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / R. E. Drew, H. Schwabl et al. // Aquaculture. – 2007. – V. 272. – P. 183-194.
31. Vong Y. H. The RNA-binding protein Igf2bp3 is critical for embryonic and germline development in zebrafish / Y. H. Vong, L. Sivashanmugam et al. // PLOS Genetics. – 2021. – V. 17. – P. 17-44.
32. Zhang Y. Tissue factor pathway inhibitor-2: A novel gene involved in zebrafish central nervous system development / Y. Zhang, L. Wang et al. // Developmental Biology. – 2013. – V. 381. – P. 38-49.
33. Zhang Ya. Tissue factor pathway inhibitor-2 is critical in zebrafish cardiogenesis / Ya. Zhang, H. Wang et al. // Biochemical and Biophysical Research Communications. – 2015. – V. 456. – P. 827-833.

Nikolaeva O., Dementyeva N.

Direction of salmon aquaculture development in the world

Abstract.

The growth of the world's population implies the search for alternative sources of nutrition. One such area is the development of aquaculture. The world aquaculture, as well as other branches of agriculture, has gone through stages of its formation from farming by primitive methods to use of modern technologies. Salmon farming occupies an important place in industrial fish farming, and the volume of farmed products is increasing every year. This review summarises the main milestones in the salmon aquaculture industry, describes the trends that have guided breeding programmes and shows the genetic approaches that have been used in fish farming. The introduction of genetic methods in salmonid fish breeding depends on the level of development of the countries where fish farms are located. Abroad there is a great experience of investment policy aimed at creation and introduction of projects up to the final (operational) stage of introduction of molecular genetics methods into salmon breeding, including the use of genomic selection. While in Russia the concept of genetic

improvements in aquaculture is only being discussed. In this review an important place is given to generalisation of the accumulated material on genetic methods of salmonid fish research, as well as directions of application of genetic markers in salmon farming. The issues of searching for candidate genes, quantitative trait loci (QTL) associated with gaining muscle weight and fish resistance to diseases are discussed. The directions and ways of solving breeding problems are shown. Intensive development of scientific approaches to aquaculture development abroad is a vector for setting goals to expand business investment in the development of molecular genetic approaches to salmonid fish breeding in Russia.

Key words: *Salmonid fishes; aquaculture; muscle mass; quantitative trait loci; candidate genes.*

Authors:

Nikolaeva O. – e-mail: Helgaanikolaeva@gmail.com;

Dementieva N. – PhD (Biol. Sci.); e-mail: dementevan@mail.ru.

Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding – Branch of the L. K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry, 196601, Russian, St. Petersburg, Pushkin, Tyarlevo, Moskovskoe sh. 55a.

References

1. Bou M. Gene expression profile during proliferation and differentiation of rainbow trout adipocyte precursor cells / M. Bou, J. Montfort et al. // BMC Genomics. – 2017. – V. 18. – P. 347-367.
2. Karpevich A. F., Acclimatization and cultivation of salmon fish-intracacent / Agapov V. S., Magomedov G. M., Karpevich A. F.-M.: NIRO, 1991. – 206 p.: ISBN 5-85382-091 -5.
3. Artamonova V.S., Makhrov A. A. Genetic methods in salmon breeding: from traditional selection to nanobiotics. – M.: Partnership of the scientific publications of the KMK, 2015. – 128 p.: Ill. ISBN 978-5-907572-0-2.
4. Maksimova E. Pastbishzny fish farming: trends and prospects // Fish sphere. – 2014. – V. 2 (10). – P. 16-19.
5. Halwart M. Cage aquaculture / Soto D., Arthur J.R. -. Rome: Viale delle Terme di Caracalla, 2010. – 299 p.: ISBN 978-92-5-405801.
6. Brinballa Y. Aquaculture Guide to closed water supply units - Copenhagen: Akva Group Denmark, 2010. – 69 p.
7. FAO. 2022. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation. Rome, FAO. /doi: 10.4060/cc0461en.
8. Tobin D. Fat or lean? The quantitative genetic basis for selection strategies of muscle and body composition traits in breeding schemes of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / A. Kause, E. A. Mantysaari et al. // Aquaculture. – 2006. – V. 261. – P. 510-521. DOI: 10.1016/j.aquaculture. 2006.07.023.
9. Ali A. Genome-wide identification of loci associated with growth in rainbow trout / A. Ali, A. Rafet et al. // BMC Genomics. – 2020. – V. 209. – P. 21-37. DOI: 10.1186/s12864-020-6617-x.
10. Scaife J. R. Influence of α -tocopherol acetate on the short- and long-term storage properties of fillets from Atlantic salmon *Salmo salar* fed a high lipid diet / J. R. Scaife, G. E. Onibi et al. // Aquaculture Nutrition. – 2001. – V. 6(1). – P. 65-71. DOI: 10.1046/j.1365-2095.2000.00128.x.
11. Christiansen R. Assessment of flesh colour in Atlantic salmon, *Salmo salar* L. / R. Christiansen, G. Struksnæs et al. // Aquaculture Research. – 1995. – V. 26(5). – P. 311-321.
12. Ruff N. The effect of dietary vitamin E and C level on market-size turbot (*Scophthalmus maximus*) fillet quality / N. Ruff, R. D. FitzGerald et al. // Aquaculture Nutrition. – 2003. – V. 9(2). – P. 91-103. DOI: 10.1046/j.1365-2095.2003.00230.x.
13. O'Malley K. G. Quantitative Trait Loci for Spawning Date and Body Weight in Rainbow Trout: Testing for Conserved Effects Across Ancestrally Duplicated Chromosomes / K. G. O'Malley, T. Sakamoto et al. // Journal of Heredity. – 2003. – V. 94. – P. 273-284. DOI: 10.1093/jhered/esg067.
14. Pasquier J. Gene evolution and gene expression after whole genome duplication in fish: the PhyloFish database / J. Pasquier, J. Cabau et al. // BMC Genomics. – 2016. – V. 17. – P. 368-378. DOI: 10.1186/s12864-016-2709-z.
15. Salem M. Characterization of the rainbow trout transcriptome using Sanger and 454-pyrosequencing approaches / M. Salem, C. E. Rexroad et al. // BMC Genomics. – 2010. – V. 11. – P. 564 – 574. DOI: 10.1186/1471-2164-11-564.

16. Salem M. Genome-Wide Association Analysis With a 50K Transcribed Gene SNP-Chip Identifies QTL Affecting Muscle Yield in Rainbow Trout / M. Salem, R. Al-Tobasei et al. // *Frontiers in genetic.* — 2018. — V. 9. — P. 387-401. DOI: 10.3389/fgene.2018.00387.
17. Dianelys G. Genome-Wide Association Study for Identifying Loci that Affect Fillet Yield, Carcass, and Body Weight Traits in Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) / G. Dianelys, G. Guangtu et al. // *Frontiers in genetic.* — 2016. — V. 7. — P. 203-217. DOI: 10.3389/fgene.2016.00203.
18. Wringe B. F. Growth-related quantitative trait loci in domestic and wild rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / B. F. Wringe, R. H. Devlin et al. // *BMC Genomics.* — 2010. — V. 11. — P. 63-77.
19. De-Santis Ch. Candidate growth genes in finfish — where should we be looking? / Ch. De-Santis, R. Jerry Dean // *Aquaculture.* — 2007. — V. 272. — P. 22-38. DOI: 10.1007/s10126-010-9277-z.
20. Vilhena R. Genome-wide association analysis for body weight identifies candidate genes related to development and metabolism in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / R. Vilhena, R. Neto et al. // *Molecular Genetics and Genomics.* — 2019. — V. 294. — P. 563–571. DOI: 10.1007/s00438-018-1518-2.
21. Fukada M. Protein tyrosine phosphatase receptor type Z is inactivated by ligand-induced oligomerization / M. Fukada, A. Fujikawaa et al. // *Federation of European Biochemical Societies.* — 2006. — V. 580. — P. 4051-4056. DOI: 10.1016/j.febslet.2006.06.041.
22. Boni Ch. A Comprehensive Review of Receptor-Type Tyrosine-Protein Phosphatase Gamma (PTPRG) Role in Health and Non-Neoplastic Disease / Ch. Boni, C. Laudanna, C. Sorio // *Biomolecules.* — 2022. — V. 12. — P. 84-100. DOI: 10.3390/biom12010084.
23. Xiong G. Growth-related expressed sequence tag-sample sequence repeats (EST-SSRS) screen of Mud Ivory Whelk (*Babylonia Lutosa*) through transcriptome sequencing / G. Xiong, P. Wang et al. // *Applied Ecology and Environmental Research.* — 2020. — V. 18(2). — P. 3471-3482. DOI: 10.15666/aeer/1802_34713482.
24. Haws W. Analyses of binding partners and functional domains for the developmentally essential protein Hmx3a/HMX3 / W. Haws, S. England et al. // *Scientific reports.* — 2023. — V. 13. — P. 1151-1164. DOI: 10.1038/s41598-023-27878-9.
25. Haenisch Ch. The neuronal growth and regeneration associated Cntn1 (F3/F11/Contactin) gene is duplicated in fish: expression during development and retinal axon regeneration / Ch. Haenisch, H. Diekmann et al. // *Mol. Cell. Neurosci.* — 2025. — V. 28. — P. 361-437. DOI: 10.1016/j.mcn.2004.04.013.
26. Garikipati D. K. Identification, characterization, and quantitative expression analysis of rainbow trout myostatin-1a and myostatin-1b genes / D. K. Garikipati, S. A. Gahr, B. D. Rodgers // *Journal of Endocrinology.* — 2006. — V. 190. — P. 879-888. DOI: 10.1677/joe.1.06866.
27. Suarez-Bregua P. Promoter Architecture and Transcriptional Regulation of Musculoskeletal Embryonic Nuclear Protein 1b (mustn1b) Gene in Zebrafish / P. Suarez-Bregua, Chien Ch.-ju et al. // *Developmental Dynamics.* — 2017. — V. 246. — P. 992-1000. DOI: 10.1002/dvdy.24591.
28. Company R. Somatotrophic regulation of fish growth and adiposity: growth hormone (GH) and somatotactin (SL) relationship / R. Company, A. Astola et al. // *Comparative Biochemistry and Physiology Part C.* — 2001. — V. 130(4). — P. 435-445. DOI: 10.1016/s1532-0456(01)00269-1.
29. Golovina N.A. I ichthyopathology / Strelkov Yu. A., Voronin V.N., Golovin P.P., Evdokimova V. B., Yukhimenko L. N. - M., Mir, 2003. — 448 p.: ISBN 5-03-003596-6.
30. Drew R. E. Detection of QTL influencing cortisol levels in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / R. E. Drew, H. Schwabl et al. // *Aquaculture.* — 2007. — V. 272. — P. 183-194. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2007.08.025.
31. Vong Y. H. The RNA-binding protein Igf2bp3 is critical for embryonic and germline development in zebrafish / Y. H. Vong, L. Sivashanmugam et al. // *PLOS Genetics.* — 2021. — V. 17. — P. 17-44. DOI: 10.1371/journal.pgen.1009667.
32. Zhang Y. Tissue factor pathway inhibitor-2: A novel gene involved in zebrafish central nervous system development / Y. Zhang, L. Wang et al. // *Developmental Biology.* — 2013. — V. 381. — P. 38-49. DOI: 10.1016/j.ydbio.2013.06.018.
33. Zhang Ya. Tissue factor pathway inhibitor-2 is critical in zebrafish cardiogenesis / Ya. Zhang, H. Wang et al. // *Biochemical and Biophysical Research Communications.* — 2015. — V. 456. — P. 827-833. DOI: 10.1016/j.bbrc.2014.12.017.