

УДК 639.3.05

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2024-386-9-77-81

Ю.С. Щербаков ✉

О.А. Николаева

В.И. Тыщенко

Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста», Пушкин, Санкт-Петербург, Россия

✉ yura.10.08.94.94@mail.ru

Поступила в редакцию: 28.04.2024
Одобрена после рецензирования: 12.08.2024
Принята к публикации: 28.08.2024

© Щербаков Ю.С., Николаева О.А., Тыщенко В.И.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2024-386-9-77-81

Yuri S. Shcherbackov ✉

Olga A. Nikolaeva

Valentina I. Tyshchenko

Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding — Branch of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Pushkin, St. Petersburg, Russia

✉ yura.10.08.94.94@mail.ru

Received by the editorial office: 28.04.2024
Accepted in revised: 12.08.2024
Accepted for publication: 28.08.2024

© Scherbakov Y.S., Nikolaeva O.A., Tyshchenko V.I.

Изучение динамики относительной экспрессии гена EGR1 у радужной форели в разных тканях

РЕЗЮМЕ

Цель данного исследования — изучение динамики относительного уровня экспрессии гена EGR1 в тканях радужной форели в разном возрасте. Ген EGR1 кодирует белок, который функционирует как регулятор транскрипции генов, задействованных в процессах митогенеза и дифференцировки клеток. Для исследования была взята рандомизированная выборка рыб ($n = 15$) возраста 6, 12 и 18 месяцев. Для оценки уровня экспрессии гена EGR1, расположенного на 14-й хромосоме, был взят ген, кодирующий глюкозо-6-фосфатдегидрогеназу (G6PD). Анализ уровня относительной экспрессии гена EGR1 в тканях прямой кишки выявил значительные различия в разный возрастной период радужной форели. Экспрессия в тканях прямой кишки в возрасте 6 мес. была максимальной, а в возрасте 12 мес. — минимальной, но достоверных различий не было установлено ($p = 0,2648$). В результате анализа изменений уровня относительной экспрессии гена EGR1 в тканях сердца радужной форели в разном возрасте установлено, у группы рыб возраста 6 мес. уровень экспрессии был максимальным в сравнении с группами 12 мес. и 18 мес. ($p < 0,01$). Полученные результаты свидетельствуют о важной роли белка EGR1 как транскрипционного фактора в росте и развитии рыбы. Накопление массы происходит наиболее интенсивно именно в раннем возрасте (до 6 мес.), и этот процесс, вероятно, обусловлен повышенной транскрипцией гена EGR1. Наличие отрицательных корреляций между экспрессией изучаемого гена в сердце и рядом размерно-весовых показателей указывает на роль других транскрипционных факторов, влияющих на формирование таких показателей.

Ключевые слова: радужная форель, ген, EGR1, экспрессия генов, РНК

Для цитирования: Щербаков Ю.С., Николаева О.А., Тыщенко В.И. Изучение динамики относительной экспрессии гена EGR1 у радужной форели в разных тканях. *Аграрная наука*. 2024; 386(9): 77–81. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-386-9-77-81>

Study of the dynamics of relative expression of the EGR1 gene in rainbow trout in different tissues

ABSTRACT

The purpose of this study was to study the dynamics of the comparative level of expression of the EGR1 gene in the tissues of rainbow trout at different ages. The EGR1 gene encodes a transcription factor that influences the transcription of a large number of genes from both the 5-bar and 3-bar ends of genes. A random sample of fish aged 6, 12 and 18 months was taken for the study. To assess the expression level of the EGR1 gene, located on 14 chromosomes, a housekeeping gene was taken: G6PD. A comparative analysis of the expression level of the EGR1 gene in rectal tissues revealed a significant change in different age periods of rainbow trout. Expression in the tissues of the rectum at the age of 6 months was maximal, and at the age of 12 months it was minimal, but no significant differences were found ($p = 0.2648$). As a result of the analysis of changes in the level of relative expression of the EGR1 gene in the heart tissues of rainbow trout at different ages, it was found that in the group of fish aged 6 months, the expression level was maximum at the stage of 12 and 18 months ($p < 0.01$). As a result of the study, a correlation between the size and weight parameters of rainbow trout and the level of gene expression in different eras and in different countries was established. Expression dynamics at different ages in rainbow trout were also determined.

Key words: rainbow trout, gene, EGR1, gene expression, RNA

For citation: Shcherbackov Y.S., Nikolaeva O.A., Tyshchenko V.I. Study of the dynamics of relative expression of the EGR1 gene in rainbow trout in different tissues. *Agrarian science*. 2024; 386(9): 77–81 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-386-9-77-81>

Введение/Introduction

Выращивание радужной форели в аквакультуре представляет собой эффективное решение при производстве рыбной продукции, так как позволяет выращивать на одной площади большее количество особей. Высокая плотность посадки обеспечивает ряд технологических преимуществ такого способа ведения хозяйства по сравнению с использованием естественных водоемов [1].

Несмотря на очевидные положительные стороны искусственного разведения рыб, доля России в мировом производстве продуктов рыбоводства составляет всего 0,33% [2]. Эффективное ведение рыбного хозяйства возможно при использовании пород рыб, адаптированных к таким условиям. В частности, в области форелеводства выведен целый ряд пород радужной форели, обеспечивающих высокую продуктивность.

В последние годы большое внимание уделяется молекулярно-генетическим технологиям, направленным на изучение организации генома рыб, выявления связи фенотипа с кишечной микробиотой, определением адаптивного потенциала и т. д. [3].

Наряду с исследованиями полного генома на предмет выявления ассоциаций однонуклеотидных полиморфизмов (SNPs) с продуктивными признаками рыбы продолжают исследования отдельных генов. Вклад некоторых генов у рыб в формирование фенотипа значительно выше, чем у млекопитающих, в связи с этим изучение генетики рыб является актуальной задачей. Известно, что гены, детерминирующие факторы транскрипции, обладают плейотропным эффектом, продукты этих генов регулируют экспрессию многих генов. Таким образом, исследование структуры и функций генов, связанных с морфогенезом рыб, является перспективным путем получения новых знаний, которые можно использовать как в фундаментальной науке, так и в прикладных работах [4, 5].

Ген реакции раннего роста 1 (*EGR1*) регулирует транскрипцию генов, участвующих в ответных реакциях на факторы роста и повреждение ДНК, участвует в процессах выживания, пролиферации и гибели клеток и иммунном ответе [6]. Уже достаточно давно известно, что этот ген у рыб имеет высокую степень гомологии с геном *EGR1* мышей, крыс и человека, за исключением повторяющегося нуклеотидного триплета, кодирующего на N-концевом участке соответствующий белок [7].

Ген *EGR1* кодирует транскрипционный фактор, оказывающий влияние на транскрипцию большого числа генов как с 5-штрих, так и с 3-штрих конца генов. Более того, установлено, что около 9000 аннотированных генов содержат по крайней мере один комплементарный к данному гену участок в промоторной части [8]. В частности, выявлена роль гена в окулогенезе у рыб при формировании хрусталика и дифференциации клеток сетчатки. Мутации в гене привели к задержке в развитии глаз [3]. Ген *EGR1* имеет высокую гомологию с участками генов, вовлеченных в передачу сигналов в синапсах нервных окончаний [9]. Такие функциональные особенности белковых продуктов гена определяют его важность в поведении рыб в социальном аспекте.

Например, было установлено, что мутации в гене, снижающие его экспрессию, приводят к нарушениям социального поведения и ориентирования в пространстве у костистых рыб [10, 11]. Очевидно, нарушение социального поведения форели неизбежно негативно

скажется на формировании живой массы при разведении рыбы. Это связано с нарушениями ориентации особей во время кормления, потерей естественных взаимоотношений между индивидуумами в популяции.

Исследования *EGR1* проводили в основном на модельном объекте (zebrafish) [7, 12], поэтому изучение экспрессии гена у коммерчески выращиваемых пород форелевых рыб в аквакультуре представляет особый интерес.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Биологический материал был собран в Федеральном селекционно-генетическом центре рыбоводства (п. Ропша, Ленинградская обл., Россия) в 2022 году.

Для исследования была выбрана форель радужная (*Oncorhynchus mikiss* W.) породы Рофор (рис. 1).

Для анализа относительной экспрессии гена *EGR1* были взяты экземпляры рыбы разных возрастов (6 мес., 12 мес. и 18 мес.) по 5 штук в каждой группе. Образцы мышечной ткани, ткани сердца и прямой кишки были зафиксированы в РНК-стабилизирующем растворе («Евроген», Россия) (от 5 особей в каждой группе). От каждой особи были сняты метрические показатели (масса тела, г; длина по Смитсу, см; длина до конца чешуйчатого покрова, см; длина головы, см; высота тела, см; мышечная масса, г; масса кишечника, г; масса сердца, г) с помощью мерной доски и угольной линейки (рис. 2)¹.

Рис. 1. Самка радужной форели породы Рофор. Фото автора
Fig. 1. Female rainbow trout of the Rofor breed. Photo by the author



Рис. 2. Мерная доска и угольная линейка для снятия метрических показателей у рыб. Фото автора
Fig. 2. Measuring board and carbon ruler for taking metric measurements of fish. Photo by the author



¹ Голод В.М., Никандров В.Я., Терентьева Е.Г., Шиндавина Н.И. Методическое пособие «Селекционно-племенная работа с радужной форелью». Санкт-Петербург. 1995; 27.

Перед работой каждую особь погружали в воду с добавлением небольшого количества эфирного масла гвоздики².

Измельчение образцов ткани проводилось на гомогенизаторе BertinPrecellys 24 (BertinTechnologies, Италия) в пробирках с укрепленными стенками и металлическими шариками диаметром 2 мм. Выделение тотальной РНК выполняли с помощью коммерческого набора «ЛИРА+» от компании «Биолабмикс» («Биолабмикс», Россия) согласно инструкции производителя. Полученные образцы РНК хранили в низкотемпературной морозильной камере (DW-HL528SA, Meling, Китай) при температуре -80 °С. Все манипуляции с РНК проводились на льду для недопущения распада молекулы. Концентрацию и качество РНК оценивали с помощью спектрофотометра NanoDrop 2000C Thermo Fisher (Thermo Scientific, США).

Для оценки относительного уровня экспрессии использовали метод ПЦР в режиме реального времени с обратной транскрипцией (ОТ-ПЦР-РВ). Синтез КДНК из полученных образцов РНК осуществляли с помощью раствора: 500 нг/мл РНК, 1 мкл ДНКазы согласно инструкции производителя, 1 мкл буфера MgCl₂ и объем раствора доводили до 9 мкл водой, свободной от РНКаз и ДНКаз. Полученный раствор инкубировали в твердотельном термостате ТТ-2 («ДНК-Технология», Россия) 30 минут при температуре 37 °С. Для остановки действия ДНКазы в раствор добавляли 1 мкл 50 миллимольного раствора ЭДТА и инкубировали 10 мин. при температуре 65 °С. После этого к полученному раствору добавляли по 1 мкл прямого и обратного праймера и инкубировали 2 мин. при 70 °С. Ревертазу использовали от компании «Биолабмикс» (г. Москва, Россия). По протоколу производителя был подготовлен микс, содержащий 0,5 мкл ревертазы, 3,5 буфера, объем доводили водой, свободной от РНКаз и ДНКаз, до 8 мкл. К раствору, содержащему РНК, добавляли 10 мкл полученного микса с ревертазой. Амплификацию проводили в соответствии с протоколом: 60 мин. 42 °С, 10 мин. 70 °С.

Для оценки уровня экспрессии гена *EGR1*, расположенного на 14-й хромосоме, был взят ген «домашнего

хозяйства» *G6PD* [1] (табл. 1). Ген *G6PD* участвует в углеводном обмене и метаболизме глюкозы. Праймеры к генам «домашнего хозяйства» и гену *EGR1* представлены в таблице 1.

Для проведения ПЦР в режиме реального времени использовали коммерческий набор 5X qPCRmix-HS SYBR от компании «Евроген» (SYBRGreen, Россия).

Перед постановкой ПЦР в режиме реального времени полученные образцы КДНК разбавлялись в 5 раз. Реакционную смесь готовили согласно протоколу производителя. Конечный объем готового раствора составлял 12,5 мкл. Каждый образец ставился в трех повторностях.

Для проведения ПЦР в режиме реального времени использовался прибор CFX96 Touch (Bio-Rad, США).

Расчет экспрессионных изменений проводился относительно образца КДНК, который был синтезирован из образцов РНК мышечной ткани рыб. Протокол проведения реакции амплификации образцов КДНК: 95,0 °С 5 мин., 40 циклов: 95 °С 15 сек., 60,0 °С 15 сек. и детекция сигнала 72,0 °С 30 сек.

Экспрессионные изменения гена *EGR1* рассчитывали с помощью метода ddCt (delta delta Cycle threshold), разработанного К.Ж. Livak и др. [13] по формуле:

$$ddCt = 2^{-((CtG6pd - Ctref) - (CtEGR1 - Ctref))}$$

Статистически обработанные данные представлены в виде: среднее значение ± стандартное отклонение. Для оценки статистически значимой разницы использовался критерий Краскела — Уоллиса³. Полученные результаты были визуализированы в программе Microsoft Excel (США). Для проведения корреляционного анализа использовался критерий Спирмена⁴.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В результате анализа экспрессионных изменений гена *EGR1* в тканях прямой кишки выявили динамику падения экспрессии с возрастом у радужной форели (рис. 3).

Уровень относительной экспрессии в возрасте 6 мес. был максимальным, а в возрасте 18 мес. — минимальным, но достоверных различий не было выявлено ($p = 0,2648$).

Анализируя корреляционные связи (табл. 2), была выявлена высокая положительная корреляция (0,945) экспрессии гена *EGR1* в ткани прямой кишки с относительной экспрессией в тканях сердца у группы 12-месячного возраста ($p < 0,05$).

Таблица 1. Последовательности праймеров *G6PD* и *EGR1*

Table 1. Primers for housekeeping gene *G6PD* and *EGR1*

№ п/п	Название	Последовательность	Т отжига, °С
1	<i>G6PD</i>	F-TCAAAGAGGGTCGGTTTCCG R-ACCATCCCTCTCCTCTCC	60
2	<i>EGR1</i>	F-CAGGTGCCTATGCGAAGCA R-AAATGCATGCAGATGGCTTGG	60

Таблица 2. Корреляционные связи уровня относительной экспрессии гена *EGR1* в тканях прямой кишки с некоторыми размерно-весовыми показателями рыб

Table 2. Correlation of the level of relative expression of the *EGR1* gene in rectal tissues with some size and weight indicators of fish

Показатель	Возраст рыбы		
	6 мес.	12 мес.	18 мес.
2- ^{ddCt} (сердце)	0,227	0,945*	0,646
Масса, г	0,424	0,331	0,128
Длина по Смитсу, см	0,559	0,394	-0,594
Длина тела до конца чешуйчатого покрова, см	0,545	0,399	0,824
Длина головы, см	0,655	0,197	-0,841
Высота тела, см	-0,078	0,377	0,669
Толщина тела, см	-0,070	0,572	0,792
Масса сердца, г	0,256	0,344	0,012
Масса прямой кишки, г	0,744	0,830	0,104

Примечание: * $p < 0,05$.

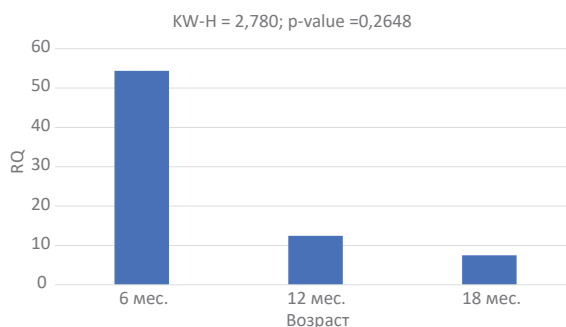
² При работе руководствовались правилами Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях ETS № 123 (Страсбург, 18 марта 1986 года).

³ <https://birdyx.ru/blog/show/kruskal-wallis-test>

⁴ <https://medstatistic.ru/methods/methods9.html>

Рис. 3. Уровень относительной экспрессии гена *EGR1* в тканях прямой кишки у рыб разного возраста.

Fig. 3. The level of relative expression of the *EGR1* gene in rectal tissues in fish of different ages



Остальные данные не были достоверно значимыми. Хотя значения корреляций в основном были положительными, некоторые показатели были близки к 0 (высота тела и толщина тела с экспрессией гена *EGR1* в прямой кишке в группе особей в возрасте 6 мес., масса сердца и масса прямой кишки с экспрессией гена в прямой кишке в группе особей в возрасте 18 мес.).

Высокий отрицательный коэффициент корреляции был между показателями длины головы и длины по Смитсу с экспрессией гена *EGR1* в тканях прямой кишки (-0,841 и -0,594).

Рис. 4. Уровень относительной экспрессии гена *EGR1* в тканях сердца у рыб разного возраста

Fig. 4. The level of relative expression of the *EGR1* gene in heart tissues of fish of different ages

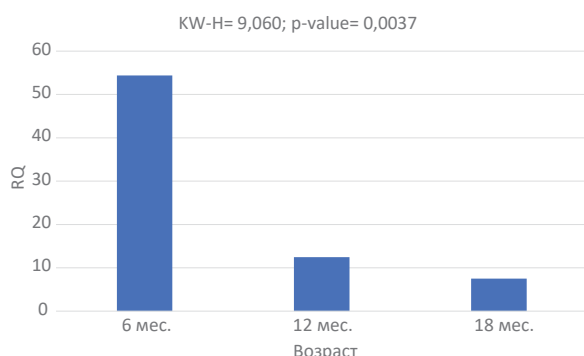


Таблица 3. Корреляционные связи уровня относительной экспрессии гена *EGR1* в тканях сердца с некоторыми размерно-весовыми показателями рыб

Table 3. Correlation of the level of relative expression of the *EGR1* gene in heart tissues with some size and weight indicators of fish

Показатель	Возраст рыбы		
	6 мес.	12 мес.	18 мес.
	2 ^{-delta delta} Cycle threshold сердца		
2 ^{-ddCt} (прямая кишка)	0,227	0,945*	0,646
Масса, г	0,901*	0,388	-0,636
Длина тела по Смитсу, см	0,772	0,433	-0,722
Длина тела до конца чешуйчатого покрова, см	0,763	0,424	0,132
Длина головы, см	0,861	0,355	-0,951*
Высота тела, см	0,794	0,471	-0,007
Толщина тела, см	0,899*	0,665	0,196
Масса сердца, г	0,817	0,397	-0,590
Масса прямой кишки, г	0,554	0,803	-0,675

Примечание: * $p < 0,05$.

В результате анализа изменений уровня относительной экспрессии гена *EGR1* в тканях сердца радужной форели в разном возрасте установлено: у группы рыб возраста 6 мес. уровень экспрессии гена *EGR1* был максимальным в сравнении с особями возраста 12 мес. и 18 мес. (рис. 4) ($p < 0,01$).

Анализ корреляционных связей относительного уровня экспрессии гена *EGR1* в ткани сердца с некоторыми размерно-весовыми показателями рыб представлен в таблице 3.

В результате анализа корреляций была выявлена отрицательная зависимость уровня относительной экспрессии гена *EGR1* с показателями «масса тела» и «толщина тела» в возрасте особи 6 мес. ($p < 0,05$). Кроме того, была отмечена положительная корреляция между экспрессией гена в прямой кишке и экспрессией гена в тканях сердца (0,945) при $p < 0,05$ в возрасте особи 12 мес.

Высокая отрицательная корреляция отмечена между длиной головы и экспрессией в тканях сердца (-0,951, $p < 0,05$) в возрасте 18 мес. Кроме того, в возрасте 18 мес. была отрицательная корреляция между массой тела и длиной тела по Смитсу с экспрессией в тканях сердца. В остальных случаях отмечается положительный коэффициент корреляции, однако достоверных данных не было.

Выводы/Conclusions

Сравнительный анализ экспрессионных изменений гена *EGR1* у радужной форели породы Рофор в разном возрасте в тканях сердца и прямой кишке выявил, что относительный уровень экспрессии гена *EGR1* снижался в тканях сердца у рыб, снижался с возрастом и к 18 мес. имел минимальное значение ($p < 0,05$).

Эти данные можно объяснить важной ролью белка *EGR1* как транскрипционного фактора в росте и развитии рыбы. Накопление массы происходит наиболее интенсивно именно в раннем возрасте (до 6 мес.), и этот процесс, вероятно, обусловлен повышенной транскрипцией гена *EGR1*. Наличие отрицательных корреляций между экспрессией изучаемого гена в сердце и рядом размерно-весовых показателей указывает на роль других транскрипционных факторов, влияющих на формирование таких показателей. Относительный уровень экспрессии гена *EGR1* в тканях прямой кишки с возрастом снижался, однако достоверных данных получено не было.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа проведена в рамках выполнения научных исследований Министерства науки и высшего образования РФ по теме ГЗ № 124020200114-7.

FUNDING

The study was funded by scientific research of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic No 124020200114-7.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Макоедов А.Н., Матишов Г.Г., Пономарева Е.Н. Мировые тенденции пользования водными биоресурсами. *Вестник Российской академии наук*. 2023; 93(2): 179–190. <https://doi.org/10.31857/S086958732301005X>
- Труба М.А. Развитие пресноводной аквакультуры в России: состояние и перспективы отрасли. *Экономика сельского хозяйства России*. 2022; (10): 66–70. <https://doi.org/10.32651/2210-66>
- Zhang L., Cho J., Ptak D., Leung Y.F. The Role of *egr1* in Early Zebrafish Retinogenesis. *PLoS ONE*. 2013; 8(2): e56108. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056108>

REFERENCES

- Makoedov A.N., Matishov G.G., Ponomareva E.N. World Trends in the Use of Aquatic Biological Resources. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. 2023; 93(2): 179–190 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S086958732301005X>
- Truba M.A. Development of freshwater aquaculture in Russia: state and prospects of the industry. *Economics of Agriculture of Russia*. 2022; (10): 66–70 (in Russian). <https://doi.org/10.32651/2210-66>
- Zhang L., Cho J., Ptak D., Leung Y.F. The Role of *egr1* in Early Zebrafish Retinogenesis. *PLoS ONE*. 2013; 8(2): e56108. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056108>

4. Duclot F, Kabbaj M. The Role of Early Growth Response 1 (EGR1) in Brain Plasticity and Neuropsychiatric Disorders. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*. 2017; 11: 35. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2017.00035>
5. Arora S. *et al.* Egr1 regulates the coordinated expression of numerous EGF receptor target genes as identified by ChIP-on-chip. *Genome Biology*. 2008; 9: R166. <https://doi.org/10.1186/gb-2008-9-11-r166>
6. Deguchi T., Fujimori. K.E., Kawasaki T., Xianghai L., Yuba S. Expression patterns of the Egr1 and Egr3 genes during medaka embryonic development. *Gene Expression Patterns*. 2009; 9(4): 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.gep.2008.12.004>
7. Drummond I.A., Rohwer-Nutter P., Sukhatme V.P. The Zebrafish egr1 Gene Encodes a Highly Conserved, Zinc-Finger Transcriptional Regulator. *DNA and Cell Biology*. 1994; 13(10): 1047–1055. <https://doi.org/10.1089/dna.1994.13.1047>
8. Ma Z.-G. *et al.* IRX2 regulates angiotensin II-induced cardiac fibrosis by transcriptionally activating EGR1 in male mice. *Nature Communications*. 2023; 14: 4967. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40639-6>
9. Никипелов В.И., Бардуков Н.В., Харзинова В.Р., Грозеску Ю.Н., Зиновьева Н.А. Характеристика микросателлитных локусов и их полиморфизма у акакультурной стерляди (*Acipenser ruthenus*). *Генетика и разведение животных*. 2023; (2): 5–13. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2023-2-5-13>
10. Tallafuss A. *et al.* Egr1 Is Necessary for Forebrain Dopaminergic Signaling during Social Behavior. *eNeuro*. 2022; 9(2): 0035–22.2022. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0035-22.2022>
11. Зуева М.С., Мирошникова Е.П., Аринжанов А.Е., Киякова Ю.В. Современные исследования по изучению микробиома кишечника рыб. *Животноводство и кормопроизводство*. 2023; 106(2): 198–213. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-2-198>
12. Kress S., Wullmann M.F. Correlated basal expression of immediate early gene *egr1* and tyrosine hydroxylase in zebrafish brain and downregulation in olfactory bulb after transitory olfactory deprivation. *Journal of Chemical Neuroanatomy*. 2012; 46(1–2): 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2012.09.002>
13. Livak K.J., Schmittgen T.D. Analysis of Relative Gene Expression Data Using Real-Time Quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta C_T}$ Method. *Methods*. 2001; 25(4): 402–408. <https://doi.org/10.1006/meth.2001.1262>

ОБ АВТОРАХ

Юрий Сергеевич Щербаков

кандидат биологических наук, младший научный сотрудник
yura.10.08.94.94@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6434-6287>

Ольга Анатольевна Николаева

младший научный сотрудник
trantoburito@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3828-1111>

Валентина Ивановна Тыщенко

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
tinatvi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4964-9938>

Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных — филиал Федерального исследовательского центра животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, Московское шоссе, 55А, Пушкин, Санкт-Петербург, 196601, Россия

4. Duclot F, Kabbaj M. The Role of Early Growth Response 1 (EGR1) in Brain Plasticity and Neuropsychiatric Disorders. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*. 2017; 11: 35. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2017.00035>
5. Arora S. *et al.* Egr1 regulates the coordinated expression of numerous EGF receptor target genes as identified by ChIP-on-chip. *Genome Biology*. 2008; 9: R166. <https://doi.org/10.1186/gb-2008-9-11-r166>
6. Deguchi T., Fujimori. K.E., Kawasaki T., Xianghai L., Yuba S. Expression patterns of the Egr1 and Egr3 genes during medaka embryonic development. *Gene Expression Patterns*. 2009; 9(4): 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.gep.2008.12.004>
7. Drummond I.A., Rohwer-Nutter P., Sukhatme V.P. The Zebrafish egr1 Gene Encodes a Highly Conserved, Zinc-Finger Transcriptional Regulator. *DNA and Cell Biology*. 1994; 13(10): 1047–1055. <https://doi.org/10.1089/dna.1994.13.1047>
8. Ma Z.-G. *et al.* IRX2 regulates angiotensin II-induced cardiac fibrosis by transcriptionally activating EGR1 in male mice. *Nature Communications*. 2023; 14: 4967. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40639-6>
9. Nikipelov V.I., Bardukov N.V., Kharzinova V.R., Grozesku Yu.N., Zinovieva N.A. Characterization of microsatellite loci and their polymorphism in the aquaculture sterlet (*Acipenser ruthenus*). *Genetics and breeding of animals*. 2023; (2): 5–13 (in Russian). <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2023-2-5-13>
10. Tallafuss A. *et al.* Egr1 Is Necessary for Forebrain Dopaminergic Signaling during Social Behavior. *eNeuro*. 2022; 9(2): 0035–22.2022. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0035-22.2022>
11. Zueva M.S., Miroshnikova E.P., Arinzhonov A.E., Kilyakova Yu.V. Modern research on the study of the intestinal microbiome of fish. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023; 106(2): 198–213 (in Russian). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-2-198>
12. Kress S., Wullmann M.F. Correlated basal expression of immediate early gene *egr1* and tyrosine hydroxylase in zebrafish brain and downregulation in olfactory bulb after transitory olfactory deprivation. *Journal of Chemical Neuroanatomy*. 2012; 46(1–2): 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2012.09.002>
13. Livak K.J., Schmittgen T.D. Analysis of Relative Gene Expression Data Using Real-Time Quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta C_T}$ Method. *Methods*. 2001; 25(4): 402–408. <https://doi.org/10.1006/meth.2001.1262>

ABOUT THE AUTHORS

Yuri Sergeevich Shcherbackov

Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher
yura.10.08.94.94@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6434-6287>

Olga Anatolyevna Nikolaeva

Junior Researcher
trantoburito@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3828-1111>

Valentina Ivanovna Tyshchenko

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher
tinatvi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4964-9938>

The All-Russian Scientific Research Institute of Genetics and Breeding of Farm Animals is a branch of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 55A Moscow highway, Pushkin, St. Petersburg, 196601, Russia