

## ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ ГИДРОБИОНТОВ

## PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY OF HYDROCOLE

Научная статья

УДК 639.3.03:574.24

<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-1-111-119>

### Влияние малых концентраций парааминобензойной кислоты на жизнеспособность чира *Coregonus nasus* (Pallas, 1776) на ранних стадиях онтогенеза

Илья Алексеевич Котов<sup>1\*</sup>, Ирина Владимировна Пак<sup>2</sup>,  
Людмила Леонидовна Сергиенко<sup>3</sup>, Олег Владимирович Трофимов<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>Тюменский государственный университет,  
Тюмень, Россия, [i.a.kotov@utmn.ru](mailto:i.a.kotov@utmn.ru)\*

<sup>3</sup>Тюменский филиал (Госрыбцентр) Всероссийского научно-исследовательского института  
рыбного хозяйства и океанографии,  
Тюмень, Россия

**Аннотация.** Целью настоящей работы является изучение способности парааминобензойной кислоты (ПАБК) влиять на жизнеспособность ценного вида сиговых рыб – чира (*Coregonus nasus* (Pallas, 1776)) на ранних стадиях развития. Обработка икры сразу же после оплодотворения проводилась растворами ПАБК в малых концентрациях (0,01; 0,005; 0,001; 0,0005; 0,0001; 0,00005; 0,00001 %) в течение 2 и 4 часов. Контроль ПАБК не обрабатывался. Показано увеличение выхода предличинки во всех вариантах опытов. Лучшие показатели были отмечены в вариантах с 0,00005 % раствором ПАБК, где выход предличинки на 23,3 % превышал показатель в контроле. Подращивание личинок в течение 34 дней также подтвердило положительное действие ПАБК. При обработке оплодотворенной икры раствором ПАБК в концентрации 0,00005 % выживаемость мальков увеличивается на 5,9 %, а средняя масса – на 5,1 мг в сравнении с контролем. Лучшие результаты по подращиванию личинок были получены в варианте опытов с 0,0001 % раствором ПАБК: выживаемость мальков была на 15,6 % выше, чем в контроле; средняя масса опытных мальков превышала массу мальков в контроле на 8,6 мг. Цитогенетический анализ показал, что обработка икры ПАБК уменьшает частоту хромосомных нарушений у чира в 1,5–2,0 раза в сравнении с контролем на стадии гастролы. Эти результаты свидетельствуют о том, что ПАБК способствует увеличению выживаемости и скорости роста чира на ранних стадиях развития, что может быть использовано для повышения эффективности заводского воспроизводства рыб.

**Ключевые слова:** чир, парааминобензойная кислота (ПАБК), эмбрионы, предличинки, подращивание личинок, мальки, выживаемость, скорость роста, хромосомные нарушения

**Для цитирования:** Котов И. А., Пак И. В., Сергиенко Л. Л., Трофимов О. В. Влияние малых концентраций парааминобензойной кислоты на жизнеспособность чира *Coregonus nasus* (Pallas, 1776) на ранних стадиях онтогенеза // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 1. С. 111–119. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-1-111-119>.

Original article

### Effect of low concentrations of para-aminobenzoic acid on viability of broad whitefish *Coregonus nasus* (Pallas, 1776) at early stages of ontogeny

Ilya A. Kotov<sup>1\*</sup>, Irina V. Pak<sup>2</sup>, Lyudmila L. Sergienko<sup>3</sup>, Oleg V. Trofimov<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>Tyumen State University,  
Tyumen, Russia, [i.a.kotov@utmn.ru](mailto:i.a.kotov@utmn.ru)\*

<sup>3</sup>All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography (Tyumen branch),  
Tyumen, Russia

**Abstract.** The research aims to study the capability of para-aminobenzoic acid (PABA) to impact the resiliency of a valuable species of cisco fishes – broad whitefish (*Coregonus nasus* (Pallas, 1776)) – at the early stages of development. Immediately upon fertilization the fish roe was treated with PABA solutions in low concentrations of 0,01; 0,005; 0,001; 0,0005; 0,0001; 0,00005; 0,00001 during 2 and 4 hours. The control group was not treated with PABA. The study revealed an increase in sack fry output in all experimental variations. The best indications were registered in variations with 0.00005% PABA solution that produced the sac fry output 23.3% higher than an indication in the control group. The subsequent breeding of alevins during 34 days period also confirmed the positive impact of PABA. The treatment of fertilized roe with PABA solution in concentration of 0.00005% increases the alevin survivability by 5.9%, the alevin average weight increases by 5.1 mg. in comparison with the control group. The best results in fry breeding were acquired in the experimental variation with 0.0001% PABA solution: the alevin survivability was by 15.6% higher than in the control group; an average weight of tested alevins exceeded an average weight of alevins in the control group by 8.6 mg. Cytogenetic analysis showed that the treatment of roe with PABA decreases the rates of chromosomal distortions of broad whitefish by 1.5-2 times in comparison with the control group on the gastrula stage. These results demonstrate the ability of PABA to increase both the survivability and the growth speed of broad whitefish on its early stages of ontogenesis, which can be used in raising the efficiency of industrial fish reproduction.

**Keywords:** broad whitefish, para-aminobenzoic acid (PABA), embryos, prelarvae, larvae rearing, fry, survival, growth rate, chromosomal abnormalities

**For citation:** Kotov I. A., Pak I. V., Sergienko L. L., Trofimov O. V. Effect of low concentrations of para-aminobenzoic acid on viability of Chir *Coregonus nasus* (Pallas, 1776) early stages of ontogeny. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry.* 2022;1:111-119. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-1-111-119>.

### Введение

В настоящее время общепризнанным фактом является то, что эффективность производства продукции аквакультуры во многом зависит от способов использования разнообразных генетических ресурсов. Эффективные технологии воспроизводства рыбных запасов должны быть разработаны на основе изучения генетической и эпигенетической регуляции таких важных признаков аквакультуры, как устойчивость к болезням и стрессам, скорость роста, урожайность, репродуктивные характеристики, поведение. Активно обсуждаются возможности использования геномики, протеомики и транскриптомики в повышении эффективности аквакультуры [1].

Большое внимание привлекает использование эпигенетических факторов в аквакультуре: показано влияние эпигенетических факторов на повышение продуктивности, регуляцию соотношения полов, мышечную массу личинок, качество спермы у рыб [2–6]; отмечена роль эпигенетических факторов в формировании сердечно-сосудистой, мышечной, неврологической систем у личинок рыб [7]; рассматриваются варианты программирования питания с помощью измененного рациона у маточного стада леща и его влияние на качество икры, рост и развитие потомства [8]. Однако наряду с этими подходами высокоэффективными могут быть и ненаследственные способы увеличения важнейших характеристик аквакультуры: продуктивности и устойчивости рыб – через фенотипическую активацию с использованием генетически активных веществ. Среди многочисленных групп биологически активных соединений выделяется группа генетически активных веществ, усиливающих процессы репарации (восстановления) – репарагенов. Среди известных репарагенов наибольшее внимание уже давно привлекает парааминобензойная кислота (ПАБК). По сравнению с другими генетически активными веществами ПАБК не образует валентных связей с генетическим субстратом и ферментами и, тем не менее,

усиливает переход генетического материала в сторону возросшей репарации [9, 10]. Известно, что ПАБК повышает устойчивость к болезням, увеличивает продуктивность растений, влияет на жизнеспособность рыб на ранних стадиях развития, увеличивает противовоспалительную активность; стимулирует выработку интерферона у мышей, влияет на газообмен и температуру тела у крыс-альбиносов, влияет на процессы апоптоза конъюнктивы и эпителия роговицы взрослых крыс *in vivo* после гипобарической гипоксии, стимулирует рост и развитие кур [11–20]. В исследованиях, проведенных на двух видах сиговых рыб рода *Coregonus* – пыжьяне *C. lavaretus pidschian* (Gmelin) и пеляди *C. peled* (Gmelin), – была показана способность ПАБК стабилизировать развитие зародышей, полученных из икры низкого качества [16]. В основе этого процесса лежит способность ПАБК образовывать комплексы с широким набором ферментов, увеличивая объем ферментативной репарации [9, 10]. В ранних работах была показана способность ПАБК влиять на дисконъюгацию и спирализацию хромосом, образовывать комплексы с хромосомами, блокируя возникновение хромосомных перестроек [21].

Возможность фенотипической коррекции эмбриогенеза с помощью ПАБК является интересной задачей, которую лучше всего решать, используя такой объект, как чир (*Coregonus nasus* (Pallas, 1776)), который среди разных видов сиговых рыб отличается генетической нестабильностью в период эмбрионального развития [22–24].

Целью настоящей работы является изучение способности ПАБК влиять на жизнеспособность чира (*Coregonus nasus* (Pallas, 1776)) на ранних стадиях онтогенеза.

### Задачи:

1. Изучить ПАБК в качестве фактора повышения жизнеспособности и скорости роста чира на ранних стадиях развития.

2. Оценить способность ПАБК к уменьшению частоты спонтанных хромосомных нарушений у чира в период эмбриогенеза.

### Материал и методика

Экспериментальные работы по воздействию ПАБК на рыб проводили с октября по июнь 2014–2018 гг. Объектом исследований служил чир (*Coregonus nasus* (Pallas, 1776)). Половозрелых рыб отлавливали в районе их нерестилищ (р. Ляпин, 63°39'53" с. ш., 64°14'26" в. д.), сбор половых продуктов осуществляли от текущих производителей. Партии икры, собранной от нескольких самок, осеменяли спермой нескольких самцов и тщательно перемешивали. Опытты с чиром были заложены на р. Ляпин во время промышленной заготовки икры сиговых рыб и затем переведены на Тобольский рыбобродный завод (г. Тобольск Тюменской области).

Было осуществлено 2 постановки опытов: 2 и 4 ч воздействия, в каждой постановке по 2 производственных серии (повторы для получения статистически достоверного результата), использовалась икра разных самок.

Первые серии опытов заключались в том, что икру сразу же после оплодотворения делили на 8 вариантов: 7 опытных вариантов выдерживали в растворах ПАБК разной концентрации (0,01; 0,005; 0,001; 0,0005; 0,0001; 0,00005; 0,00001 %), контрольный не обрабатывали ПАБК. Растворы ПАБК готовили на теплом физиологическом растворе (70 °С) Рингера–Локка, перед употреблением охлаждали до температуры отцеженных половых продуктов (+1,0–+1,2 °С). Для первых двух серий опытов время обработки (экспозиция) составила 2 ч. Затем обработанную икру промывали водой и закладывали на инкубацию в аппараты Вейса. Температура воды в аппаратах за период инкубации составляла в среднем +1,2 °С. Последующие серии опытов были аналогичными, различие заключалось в том, что время обработки икры ПАБК составило 4 ч.

Личинок из контрольного и опытных вариантов высаживали в производственные проточные лотки для подращивания в количестве 2 500 шт. в каждом варианте опыта при кормлении артемиями (*Artemia*

*salina*). Через 34 дня мальков подсчитывали, затем взвешивали по 50 шт. из каждого варианта.

Цитогенетическую обработку зародышей чира проводили по стандартной ацето-орсеиновой методике [25]. Фиксировали зародыши на стадии гастрюлы в фиксаторе Карнуа. Для окрашивания препаратов использовали орсеин фирмы «Merck» (Германия), цитогенетический анализ проводили при увеличении 10 (окуляра) × 100 (объектива) с использованием микроскопа Axiostar plus фирмы Zeiss (Германия).

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета прикладных программ Statistica.

### Результаты и обсуждение

Среди сиговых рыб, промышленное воспроизводство которых осуществляется заводским способом, чир отличается крайне низкой жизнеспособностью в период эмбрионального развития [26–28]. Считается, что возможная причина этого заключается в нестабильности кариотипа, что проявляется в повышенной частоте спонтанных хромосомных нарушений у этого вида [22–24]. Отмечается резкое сокращение численности обского чира в последние 30 лет (в 6 раз) [29].

Способность ПАБК стабилизировать развитие эмбрионов пыхьяна и пеляди, полученных из икры низкого качества [16], указывает на возможность фенотипической коррекции генотипа в эмбриогенезе в направлении нормализации с помощью этого генетически активного соединения. Рыбоводная практика показывает, что отрицательные особенности генотипа у рыб проявляются в форме гибели эмбрионов в периоды прохождения критических стадий в развитии, когда происходят резкие преобразования морфогенетических функций в сторону их усложнения и расширения. У рыб таковыми являются стадии гастрюляции и предличиночный этап (при вылуплении эмбрионов из оболочек).

В табл. 1 приведены результаты получения личинок чира с использованием ПАБК в различных концентрациях путем обработки оплодотворенной икры при экспозиции 2 ч.

Таблица 1

Table 1

### Результаты инкубации икры чира после обработки оплодотворенной икры ПАБК в разных концентрациях при экспозиции 2 ч

### The results of incubation of broad whitefish eggs after fertilized eggs treatment with PABA in different concentrations under 2-hour exposure

Концентрация ПАБК, %	Количество оплодотворенной икры, тыс. шт.	% развивающейся икры на стадии бластулы	Получено предличинок	
			тыс. шт.	в % от развивающейся икры
Первая серия опытов				
0,01	12,43	91,2 ± 1,15	5,77	50,2 ± 0,46
0,005	16,24	92,6 ± 1,07	8,58	57,9 ± 0,37*
0,001	17,82	95,5 ± 0,84	10,01	59,2 ± 0,34*
0,0005	17,36	93,3 ± 1,02	11,20	69,1 ± 0,30*
0,0001	18,44	96,1 ± 0,79*	11,24	63,4 ± 0,32*

Окончание табл. 1

End of table 1

Концентрация ПАБК, %	Количество оплодотворенной икры, тыс. шт.	% развивающейся икры на стадии бластулы	Получено предличинков	
			тыс. шт.	в % от развивающейся икры
Первая серия опытов				
0,00005	17,63	93,3 ± 1,02	11,24	68,3 ± 0,31*
0,00001	18,05	94,4 ± 0,93	11,28	66,2 ± 0,31*
Контроль	23,40	92,4 ± 1,08	10,58	48,9 ± 0,34
Вторая серия опытов				
0,005	11,50	93,4 ± 1,02	6,77	63,2 ± 0,41*
0,001	16,16	95,1 ± 0,88	11,55	75,1 ± 0,28*
0,0005	16,66	94,9 ± 0,89	12,70	80,3 ± 0,25*
0,0001	17,99	96,3 ± 0,77	13,72	79,2 ± 0,24*
0,00005	14,22	96,3 ± 0,77	11,94	84,6 ± 0,23*
0,00001	18,05	96,2 ± 0,78	14,47	80,1 ± 0,23*
Контроль	75,86	95,1 ± 0,88	43,57	57,4 ± 0,17

\* Различие с контролем статистически достоверно на уровне  $p < 0,01$ .

Из анализа данных следует, что в двух сериях опытов процент развивающихся зародышей на стадии бластулы был высоким. Данный факт свидетельствует о том, что пониженная эмбриональная жизнеспособность не является результатом пониженной оплодотворяющей способности зрелых половых продуктов, а определяется факторами, проявляющимися после прохождения зародышами стадии бластулы. Обработка оплодотворенной икры ПАБК в семи концентрациях от 0,00001 до 0,01 % при экспозиции 2 ч положительно повлияла на жизнеспособность эмбрионов. Результаты в последовательных сериях опытов повторяются, что свидетельствует о достоверности данных. В контроле было заложено значительно больше оплодотворенной

икры (в 7–8 раз), и выход в абсолютных значениях (тыс. шт.) выше, чем в вариантах с ПАБК, но сравнение проводилось по относительным показателям, по выходу в %. И в первой серии опытов преимущество опытных вариантов над контрольным (по выходу предличинков в % от развивающейся икры) колебалось в среднем от 1,3 до 20,2 %, во второй серии – от 5,8 до 27,2 %. Наименьший эффект отмечен в вариантах с применением ПАБК в самой высокой концентрации – 0,01 %, поэтому ее исключили из второй серии опытов. В диапазоне концентраций от 0,005 до 0,00001 % эффективность применения ПАБК проявилась примерно в равной степени.

При увеличении экспозиции до 4 ч результаты инкубации икры чира были аналогичными (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

**Результаты инкубации икры чира после обработки оплодотворенной икры ПАБК в разных концентрациях при экспозиции 4 ч**

**The results of incubation of broad whitefish eggs after fertilized eggs treatment with PABA in different concentrations under 4-hour exposure**

Концентрация ПАБК, %	Количество оплодотворенной икры, тыс. шт.	% развивающейся икры на стадии бластулы	Получено предличинков	
			тыс. шт.	в % от развивающейся икры
Первая серия опытов				
0,01	8,00	84,9 ± 1,45*	3,85	56,7 ± 0,56*
0,005	11,85	94,9 ± 0,89	6,54	58,1 ± 0,43*
0,001	9,94	95,4 ± 0,85*	6,27	66,0 ± 0,42*
0,0005	11,27	94,5 ± 0,93	7,89	74,1 ± 0,35*
0,0001	9,26	94,3 ± 0,94	5,54	63,4 ± 0,45*
0,00005	20,14	95,9 ± 0,81*	11,08	57,3 ± 0,33*
0,00001	21,81	94,0 ± 0,97	12,39	60,4 ± 0,31*
Контроль	89,11	90,8 ± 1,18	41,10	50,8 ± 0,17
Вторая серия опытов				
0,005	9,81	94,0 ± 0,97	5,43	58,9 ± 0,47*
0,001	17,06	95,8 ± 0,81	10,60	67,8 ± 0,32*
0,0005	17,19	93,0 ± 1,04	11,70	73,1 ± 0,29*
0,0001	17,16	93,8 ± 0,98	11,20	69,6 ± 0,30*
0,00005	17,98	94,2 ± 0,95	11,37	67,1 ± 0,31*
0,00001	17,76	95,3 ± 0,86	11,73	69,3 ± 0,30*
Контроль	79,77	95,1 ± 0,88	43,57	57,4 ± 0,17

\* Различие с контролем статистически достоверно на уровне  $p < 0,0$ .

В первой серии опытов преимущество опытных вариантов с ПАБК по выходу предличинок (в % от развивающейся икры) над контрольным колеба-

лось в среднем в пределах 5,9–23,3 %, в другой серии – в пределах – 1,5–15,7 %.

Результаты подращивания личинок приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Table 3

**Результаты подращивания в течение 34 дней личинок чира, полученных из икры, обработанной ПАБК после оплодотворения при экспозиции 2 ч**

**The results of rearing within 34 days of broad whitefish larvae obtained from roe treated with PABA after fertilization under 2-hour exposure**

Концентрация ПАБК, %	Посажено личинок, шт.	Получено мальков		Масса мальков, мг**( $\bar{x} \pm m_x$ )
		шт.	в % от личинок	
Первая серия опытов				
0,005	2 500	2 190	87,6 ± 0,50*	31,9 ± 0,94
0,001		2 325	93,0 ± 0,37*	35,1 ± 0,88
0,0005		2 310	92,4 ± 0,39*	35,6 ± 0,70
0,0001		2 380	95,2 ± 0,31*	35,2 ± 0,90
0,00005		2 160	86,4 ± 0,52*	39,0 ± 0,90*
0,00001		2 265	90,6 ± 0,43*	36,7 ± 0,88*
Контроль		1 902	76,1 ± 0,69	32,8 ± 1,05
Вторая серия опытов				
0,005	2 500	1 600	64,0 ± 0,85	42,1 ± 1,42
0,001		1 720	68,8 ± 0,79*	52,9 ± 2,03
0,0005		1 680	67,2 ± 0,81*	52,7 ± 1,86
0,0001		1 740	69,6 ± 0,78*	58,2 ± 2,25*
0,00005		1 760	70,4 ± 0,77*	58,7 ± 2,12*
0,00001		1 610	64,4 ± 0,84*	56,1 ± 2,03
Контроль		1 530	61,2 ± 0,88	47,2 ± 1,94

\* Различие с контролем статистически достоверно на уровне  $p < 0,01$ ; \*\* в каждом варианте опыта взвешено по 50 мальков.

Таблица 4

Table 4

**Результаты подращивания в течение 34 дней личинок чира, полученных из икры, обработанной ПАБК после оплодотворения при экспозиции 4 ч**

**The results of rearing within 34 days of broad whitefish larvae obtained from roe treated with PABA after fertilization under 4-hour exposure**

Концентрация ПАБК, %	Посажено личинок, шт.	Получено мальков		Средняя масса мальков, мг**( $\bar{x} \pm m_x$ )
		шт.	в % от личинок	
Первая серия опытов				
0,005	2 500	2 035	81,4 ± 0,61*	37,0 ± 1,09
0,001		2 065	83,4 ± 0,58*	41,6 ± 0,97*
0,0005		2 105	84,2 ± 0,56*	37,2 ± 1,11
0,0001		2 145	85,8 ± 0,53*	37,1 ± 1,14
0,00005		2 050	82,0 ± 0,60*	38,7 ± 0,96*
0,00001		1 985	79,4 ± 0,64*	34,4 ± 1,00
Контроль		1 902	76,1 ± 0,69	33,6 ± 1,27
Вторая серия опытов				
0,005	2 500	1 810	72,4 ± 0,74*	52,8 ± 1,71
0,001		1 692	67,7 ± 0,80*	58,5 ± 1,75*
0,0005		1 805	72,2 ± 0,75*	55,1 ± 1,76*
0,0001		1 920	76,8 ± 0,68*	56,7 ± 1,68*
0,00005		1 881	75,2 ± 0,70	52,2 ± 1,45
0,00001		1 780	71,2 ± 0,76*	52,8 ± 1,93
Контроль		1 530	61,2 ± 0,88	48,1 ± 1,84

\* Различие с контролем статистически достоверно на уровне  $p < 0,01$ ; \*\* в каждом варианте опыта взвешено по 50 мальков.

Kotov I. A., Pak I. V., Sergejko L. L., Trofimov O. V. Effect of low concentrations of paraiminobenzoic acid on viability of Chir Coregonus nasus (Pallas, 1776) early stages of ontogeny

Влияние ПАБК проявилось в ранний постэмбриональный период в преимуществе по жизнеспособности подопытных мальков над контрольными. При экспозиции действия ПАБК 2 и 4 ч в опытных вариантах было получено в среднем 1,2 раза больше мальков, чем в контрольных. Положительное действие ПАБК проявилось не только в повышении жизнеспособности рыб, но и в увеличении скорости роста мальков. Как видно из табл. 3, в первой серии опытов наиболее эффективными были самые низкие концентрации ПАБК (0,00005 и 0,00001 %), при воздействии которых масса мальков оказалась выше в 1,19–1,11 раза, чем в контрольном варианте. Во второй серии опытов максимальное увеличение массы тела в сравнении с контролем (в 1,23–1,24 раза)

отмечено в вариантах с концентрациями ПАБК 0,0001 и 0,00005 %. При увеличении экспозиции до 4 ч в других вариантах опытов отмечено достоверное увеличение массы тела рыб. В первой серии опытов увеличение массы тела в 1,15–1,23 раза отмечено в вариантах с концентрациями ПАБК 0,00005 и 0,001 % соответственно, во второй серии опытов – в трех вариантах – 0,001, 0,0005 и 0,0001 % – отмечено увеличение массы в сравнении с контролем в 1,20; 1,14 и 1,17 раз соответственно.

Цитогенетический анализ зародышей чира на стадии гастрюлы выявил снижение частоты хромосомных перестроек во всех вариантах с ПАБК при экспозиции 2 и 4 ч (табл. 5).

Таблица 5

Table 5

**Встречаемость клеток с хромосомными нарушениями у зародышей чира на стадии гастрюлы в опытах с воздействием ПАБК на оплодотворенную икру**

**Occurrence of cells with chromosomal abnormalities in broad whitefish embryos at the gastrula stage in experiments with PABA treatment of fertilized eggs**

Концентрация ПАБК, %	Просмотрено зародышей, шт.	Количество просмотренных клеток, шт.	Средняя частота аномальных митозов на один зародыш, %
Экспозиция 2 ч			
0,005	20	2 766	10,22 ± 0,48*
0,001	21	3 180	10,98 ± 0,30*
0,0005	20	2 920	12,09 ± 0,37*
0,0001	18	2 730	10,47 ± 0,34*
0,00005	16	2 434	9,27 ± 0,35*
0,00001	18	2 389	9,94 ± 0,44*
Экспозиция 4 ч			
0,005	20	3 734	19,58 ± 0,55*
0,001	20	3 340	14,96 ± 0,34*
0,0005	20	3 136	14,69 ± 0,40*
0,0001	16	2 474	18,87 ± 0,41*
0,00005	18	2 805	18,77 ± 0,54*
0,00001	16	2 370	19,92 ± 0,51*
Контроль	20	3 112	29,25 ± 1,04

\* Различие с контролем статистически достоверно на уровне  $p < 0,01$ .

При экспозиции 2 ч наибольший эффект ПАБК был отмечен в варианте с 0,00005 % концентрацией ПАБК, при экспозиции 4 ч – при концентрации 0,0005 %. Не было выявлено зависимости цитогенетического эффекта ПАБК от ее концентрации и длительности обработки икры (экспозиции). Воздействие ПАБК на зародышевые клетки чира приводит к снижению частоты хромосомных нарушений в 1,5–2 раза в сравнении с контролем.

Проведенные исследования свидетельствуют об эффективности предложенного подхода – увеличении важнейших характеристик аквакультуры – жизнеспособности и продуктивности – через фенотипическую активацию с использованием генетически активного вещества – ПАБК. Известно, что данное соединение обладает высокой модификационной способностью, высоким потенциа-

лом взаимодействия с хромосомами и ферментами, с которыми ПАБК связывается и активизирует процессы репарации [9, 10, 12, 20, 30]. Так как объектом взаимодействия ПАБК в репарагенезе является генетический материал, становится понятной способность ПАБК эффективно восстанавливать хромосомные нарушения и оказывать положительное влияние на жизнеспособность и скорость роста чира на ранних стадиях развития.

**Выводы**

1. Использование малых концентраций ПАБК повышает выживаемость чира на ранних стадиях развития. Обработка оплодотворенной икры растворами ПАБК позволяет увеличить скорость роста чира в ранний постэмбриональный период. Максимальный эффект отмечен при использовании концентраций ПАБК 0,00005 и 0,0001 %.

2. Обработка икры ПАБК уменьшает частоту хромосомных нарушений на стадии гастрюлы

у чира, повышая генетическую стабильность рыб в эмбриональный период.

#### Список источников

1. Abdelrahman H., Elhady V., Warren A., Allen S. et al. Aquaculture genomics, genetics and breeding in the United States: current status, challenges, and priorities for future research // BMC Genomics. 2017. V. 18:191. P. 2–23. DOI 10.1186/s12864-017-3557-1.
2. Campos C., Valente L. M. P., Conceição L. E. C., Engrola S., Sousa V., Fernandes J., Rocha E. Incubation temperature induces changes in muscle cellularity and gene expression in Senegalese sole (*Solea senegalensis*) // Gene. 2012. V. 516 (2). P. 209–217. DOI: 10.1016/j.gene.2012.12.074.
3. Cabrita E., Martínez-Páramo S., Gavaia P. J., Riesco M. F., Sarasquete C., Herraez P., Robles V., Valcarce D. G. Factors enhancing fish sperm quality and emerging tools for sperm analysis // Aquaculture. 2014. V. 432 (20). P. 389–401. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2014.04.034.
4. Budd A. M., Banh Q. Q., Domingos J. A., Jerry D. R. Sex control in fish: Approaches, challenges and opportunities for aquaculture // Journal of Marine Science and Engineering. 2015. V. 3 (2). P. 329–355. DOI: 10.3390/jmse3020329.
5. Gavery M. R., Roberts S. B. Epigenetic considerations in aquaculture // PeerJ. 2017. V. 12, Article number e4147. PubMed 29230373. DOI:10.7717/peerj.4147.
6. Granada L., Lemos M. F. L., Cabral H. N., Bossier P., Novais S. C. Epigenetics in aquaculture - the last frontier // Reviews in Aquaculture. 2018. V. 10 (4). P. 994–1013. DOI: 10.1111/raq.12219.
7. Burggren W., Blank T. Physiological study of larval fishes: Challenges and opportunities // Scientia Marina. 2009. V. 73 (1). P. 99–110. DOI: 10.3989/scimar.2009.73s1099.
8. Izquierdo M. S., Turkmen S., Montero D. et al. Nutritional programming through broodstock diets to improve utilization of very low fishmeal and fish oil diets in gilthead sea bream // Aquaculture. 2015. N. 449. P. 18–26. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2015.03.032.
9. Pannonort И. А. Значение генетически активных соединений в фенотипической реализации признаков и свойств // Химический мутагенез в селекционном процессе. М.: Наука, 1987. С. 3–52.
10. Pannonort И. А. Действие ПАБК в связи с генетической структурой // Химические мутагены и парааминобензойная кислота в повышении урожайности сельскохозяйственных растений. М.: Наука, 1989. С. 3–37.
11. Udalov Yu. F. The mechanism of the action of para-aminobenzoic acid on the organism - Report 1. The effect of administration of para-aminobenzoic acid on the gas exchange and temperature of the body // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 1963. V. 54 (4). P. 1138–1141. DOI: 10.1007/BF00784616.
12. Шангин-Березовский Г. Н., Молодкин С. А., Рыхлацкая О. С., Адамов В. Я. Сравнительное изучение действия НДММ и ПАБК в опытах по стимуляции развития кур // Химический мутагенез и качество сельскохозяйственной продукции. М.: Наука, 1983. С. 252–257.
13. Дроздовская Л. Н. Влияние фолиевой кислоты и ПАБК на жизнеспособность дрозофилы // Химический мутагенез в повышении продуктивности сельскохозяйственных растений. М.: Наука, 1984. С. 220–223.
14. Эйгес Н. С. Влияние ПАБК на сорта озимой пшеницы в условиях производственного опыта // Химические мутагены и парааминобензойная кислота в повышении урожайности сельскохозяйственных растений. М.: Наука, 1989. С. 38–64.
15. Боле Н. А., Липовыцина Т. П., Воробьева Т. Г. Влияние ПАБК на рост и развитие яровой пшеницы, ячменя, овса и гороха // Химические мутагены и парааминобензойная кислота в повышении урожайности сельскохозяйственных растений. М.: Наука, 1989. С. 86–94.
16. Цой П. М., Сергиенко Л. Л. Эффективность применения парааминобензойной кислоты при воспроизводстве холодноводных рыб рода *Coregonus* // Вopr. ихтиологии. 1992. Т. 32 (1). С. 186–190.
17. Sagone Jr. A. L., Husney R. M., Bruce Davis W. Bio-transformation of para-aminobenzoic acid and salicylic acid by PMN // Free Radical Biology and Medicine. 1993. N. 14 (1). P. 27–35. DOI: 10.1016/0891-5849(93)90506-P.
18. Akberova S. I., Tazulakhova E. B., Musaev-Galbinur P. I., Leontyeva N. A., Stroeva O. G. Para-aminobenzoic acid, an interferon inducer // Antibiotiki i Khimioterapiya. 1999. V. 44 (4). P. 17–20.
19. Goodwin P. H., Trueman C., Loewen S. A., Tazhoor R. Variation in the responsiveness of induced resistance against *Pseudomonas syringae* pv. tomato by *Solanum lycopersicum* treated with para-aminobenzoic acid // Physiological and Molecular Plant Pathology. 2018. V. 104. P. 31–39. DOI: 10.1016/j.pmpp.2018.08.007.
20. Markitantova Y. V., Akberova S. I., Ryabtseva A. A., Stroeva O. G. The Effect of para-Aminobenzoic Acid on Apoptosis Processes in the Adult Rat Conjunctiva and Corneal Epithelium in vivo after Hypobaric Hypoxia // Biology Bulletin. 2018. V. 45 (3). P. 226–234. DOI: 10.1134/S1062359018020061.
21. Pannonort И. А., Дроздовская Л. Н. Эффект дисконъюгации и спирализации гигантских хромосом под воздействием парааминобензойной кислоты // Докл. АН СССР. 1978. Т. 243 (4). С. 1062–1065.
22. Пак И. В. Цитогенетический подход оценки стабильности развития природных популяций сиговых рыб // Онтогенез. 2004. Т. 35. № 1. С. 37–40.
23. Pak I. V., Moiseenko T. I., Sergienko L. L., Chitaeva E. A. Cytogenetic biomarkers for the assessment of the influence of pollution on natural fish populations // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2012. V. 85. P. 82–87. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.07.026>.
24. Пак И. В., Моисеенко Т. И., Сергиенко Л. Л., Читаева Е. А., Хорошавин В. Ю. Изменчивость цитогенетических показателей сиговых рыб Обь-Иртышского бассейна // Экология. 2013. № 4. С. 310–312. DOI: 10.7868/S0367059713030098.
25. Цой П. М., Сергиенко Л. Л., Пак И. В. Хромосомная мутабельность у сиговых рыб из речных и озерных экосистем Обь-Иртышского бассейна // Генетика. 2013. Т. 49 (4). С. 310–312.
26. Кузьмин А. Н. Половое созревание и анализ нарушений гаметогенеза у самцов чира при выращивании их в прудах и озерах Северо-Запада СССР // Вopr. ихтиологии. 1970. Т. 10 (1). С. 69–83.
27. Белоусов И. Ю., Леонов А. Г. О рыбоводном качестве икры чира // Тез. докл. Четвертого Всесоюз. совещ.

по биологии и биотехнике разведения сиговых рыб (Вологда, ноябрь 1990). Л.: 1990. С. 116–117.

28. Буланов Д. П., Семенова О. Б. Рыбоводно-биологическая характеристика производителей чира, выращенных в прудах ЦЭС «Ропша» // Биологические основы разведения сиговых рыб в водоемах Европейской части СССР. Л.: 1982. С. 21–29.

## References

1. Abdelrahman H., Elhady V., Warren A., Allen S. et al. Aquaculture genomics, genetics and breeding in the United States: current status, challenges, and priorities for future research. *BMC Genomics*, 2017, vol. 18:191, pp. 2-23. DOI 10.1186/s12864-017-3557-1.

2. Campos C., Valente L. M. P., Conceição L. E. C., Engrola S., Sousa V., Fernandes J., Rocha E. Incubation temperature induces changes in muscle cellularity and gene expression in Senegalese sole (*Solea senegalensis*). *Gene*, 2012, vol. 516 (2), pp. 209-217. DOI: 10.1016/j.gene.2012.12.074.

3. Cabrita E., Martínez-Páramo S., Gavaia P. J., Riesco M. F., Sarasquete C., Herraes P., Robles V., Valcarce D. G. Factors enhancing fish sperm quality and emerging tools for sperm analysis. *Aquaculture*, 2014, vol. 432 (20), pp. 389-401. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2014.04.034.

4. Budd A. M., Banh Q. Q., Domingos J. A., Jerry D. R. Sex control in fish: Approaches, challenges and opportunities for aquaculture. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2015, vol. 3 (2), pp. 329-355. DOI: 10.3390/jmse3020329.

5. Gavery M. R., Roberts S. B. Epigenetic considerations in aquaculture. *PeerJ*, 2017, vol. 12, Article number e4147. PubMed 29230373. DOI:10.7717/peerj.4147.

6. Granada L., Lemos M. F. L., Cabral H. N., Bossier P., Novais S. C. Epigenetics in aquaculture - the last frontier. *Reviews in Aquaculture*, 2018, vol. 10 (4), pp. 994-1013. DOI: 10.1111/raq.12219.

7. Burggren W., Blank T. Physiological study of larval fishes: Challenges and opportunities. *Scientia Marina*, 2009, vol. 73 (1), pp. 99-110. DOI: 10.3989/scimar.2009.73s1099.

8. Izquierdo M. S., Turkmen S., Montero D., et al. Nutritional programming through broodstock diets to improve utilization of very low fishmeal and fish oil diets in gilthead sea bream. *Aquaculture*, 2015, no. 449, pp. 18-26. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2015.03.032.

9. Rappoport I. A. Znachenie geneticheskii aktivnykh soedinenii v fenotipicheskoi realizatsii priznakov i svoistv [Significance of genetically active compounds in phenotypic realization of traits and properties]. *Khimicheskii mutagenез v selektsionnom protsesse*. Moscow, Nauka Publ., 1987. Pp. 3-52.

10. Rappoport I. A. Deistvie PABK v sviazi s geneticheskoi strukturoi [Action of PABA in connection with genetic structure]. *Khimicheskii mutagenез v selektsionnom protsesse*. Moscow, Nauka Publ., 1989. Pp. 3-37.

11. Udalov Yu. F. The mechanism of the action of para-aminobenzoic acid on the organism - Report 1. The effect of administration of para-aminobenzoic acid on the gas exchange and temperature of the body. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 1963, vol. 54 (4), pp. 1138-1141. DOI: 10.1007/BF00784616.

12. Shangin-Berezovskii G. N., Moloskin S. A., Rykhletskaia O. S., Adamov V. Ia. Sravnitel'noe izuchenie deistviia NDMM i PABK v opytakh po stimulatsii razvitiia kur [Comparative study of action of NDMM and PABA in

29. Богданов В. Д., Москаленко И. П. Динамика структуры нерестового стада чира р. Северной Сосьвы // Аграр. вестн. Урала. 2012. № 6 (98). С. 57–60.

30. Серова Р. Я., Серегина Н. И., Броки А. Стимулирующее действие парааминобензойной кислоты при обработке клубней картофеля // Химический мутагенез в повышении продуктивности сельскохозяйственных растений. М.: Наука, 1984. С. 171–174.

experiments to stimulate chicken development]. *Khimicheskii mutagenез i kachestvo sel'skokhoziaistvennoi produktsii*. Moscow, Nauka Publ., 1983. Pp. 252-257.

13. Drozdovskaia L. N. Vliianie folievoi kisloty i PABK na zhiznesposobnost' drozofily [Effect of folic acid and PABA on viability of *Drosophila*]. *Khimicheskii mutagenез v povyshenii produktivnosti sel'skokhoziaistvennykh rastenii*. Moscow, Nauka Publ., 1984. Pp. 220-223.

14. Eiges N. S. Vliianie PABK na sorta ozimoi pshenitsy v usloviakh proizvodstvennogo opyta [Influence of PABA on varieties of winter wheat under conditions of production experience]. *Khimicheskii mutagenез i paraaminobenzoinaia kislota v povyshenii urozhainosti sel'skokhoziaistvennykh rastenii*. Moscow, Nauka Publ., 1989. Pp. 38-64.

15. Bome N. A., Lipovtyna T. P., Vorobeva T. G. Vliianie PABK na rost i razvitie iarvoi pshenitsy, iachmenia, ovsy i gorokha [Influence of PABA on growth and development of spring wheat, barley, oats and peas]. *Khimicheskii mutagenез i paraaminobenzoinaia kislota v povyshenii urozhainosti sel'skokhoziaistvennykh rastenii*. Moscow, Nauka Publ., 1989. Pp. 86-94.

16. Tsoi R. M., Sergienko L. L. Effektivnost' primeneniia paraaminobenzoinoi kisloty pri vosproizvodstve kholodnovodnykh ryb roda *Coregonus* [Effectiveness of using para-aminobenzoic acid in reproduction of cold-water fish *Coregonus*]. *Voprosy ikhtiologii*, 1992, vol. 32 (1), pp. 186-190.

17. Sagone Jr. A. L., Husney R. M., Bruce Davis W. Biotransformation of para-aminobenzoic acid and salicylic acid by PMN. *Free Radical Biology and Medicine*, 1993, no. 14 (1), pp. 27-35. DOI: 10.1016/0891-5849(93)90506-P.

18. Akberova S. I., Tazulakhova E. B., Musaev-Galbinur P. I., Leontyeva N. A., Stroeva O. G. Para-aminobenzoic acid, an interferon inductor. *Antibiotiki i Khimioterapiya*, 1999, vol. 44 (4), pp. 17-20.

19. Goodwin P. H., Trueman C., Loewen S. A., Tazhoor R. Variation in the responsiveness of induced resistance against *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* by *Solanum lycopersicum* treated with para-aminobenzoic acid. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2018, vol. 104, pp. 31-39. DOI: 10.1016/j.pmpp.2018.08.007.

20. Markitantova Y. V., Akberova S. I., Ryabtseva A. A., Stroeva O. G. The Effect of para-Aminobenzoic Acid on Apoptosis Processes in the Adult Rat Conjunctiva and Corneal Epithelium in vivo after Hypobaric Hypoxia. *Biology Bulletin*, 2018, vol. 45 (3), pp. 226-234. DOI: 10.1134/S1062359018020061.

21. Rappoport I. A., Drozdovskaia L. N. Effekt diskon'yugatsii i spiralizatsii gigantских khromosom pod vozdeistviem paraaminobenzoinoi kisloty [Effect of disjunction and spiralization of giant chromosomes under influence of para-aminobenzoic acid]. *Doklady AN SSSR*, 1978, vol. 243 (4), pp. 1062-1065.

22. Pak I. V. Tsitogeneticheskii podkhod otsenki stabil'nosti razvitiia prirodnnykh populatsii sigovykh ryb [Cyto-



genetic approach to assessing stability of developing natural populations of whitefish]. *Ontogenez*, 2004, vol. 35, no. 1, pp. 37-40.

23. Pak I. V., Moiseenko T. I., Sergienko L. L., Chitaeva E. A. Cytogenetic biomarkers for the assessment of the influence of pollution on natural fish populations. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, vol. 85, pp. 82-87. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.07.026>.

24. Pak I. V., Moiseenko T. I., Sergienko L. L., Chitaeva E. A., Khoroshavin V. Iu. Izmenchivost' tsitogeneticheskikh pokazatelei sigovykh ryb Ob'-Irtyskского basseina [Variability of cytogenetic parameters of whitefishes of Ob-Irtysk basin]. *Ekologiya*, 2013, no. 4, pp. 310-312. DOI: 10.7868/S0367059713030098.

25. Tsoi R. M., Sergienko L. L., Pak I. V. Khromosomnaia mutabil'nost' u sigovykh ryb iz rechnykh i ozernykh ekosistem Ob'-Irtyskского basseina [Chromosomal mutability in whitefish from river and lake ecosystems of Ob-Irtysk basin]. *Genetika*, 2013, vol. 49 (4), pp. 310-312.

26. Kuz'min A. N. Polovoe sozrevanie i analiz narushenii gametogeneza u samtsov chira pri vyrashchivanii ikh v prudakh i ozerakh Severo-Zapada SSSR [Puberty and analysis of gametogenesis disturbances in male broad whitefish when grown in ponds and lakes of North-West part of the USSR]. *Voprosy ikhtiologii*, 1970, vol. 10 (1), pp. 69-83.

27. Belousov I. Iu., Leonov A. G. O rybovodnom kachestve ikry chira [On fish-breeding quality of whitefish caviar]. *Tezisy dokladov Chetvertogo Vsesoiuznogo soveshchaniia po biologii i biotekhnike razvedeniia sigovykh ryb (Vologda, noiabr' 1990)*. Leningrad, 1990. Pp. 116-117.

28. Bulanov D. P., Semenova O. B. Rybovodnobiologicheskaiia kharakteristika proizvoditelei chira, vyrashchennykh v prudakh TsES «Ropsha» [Fish-breeding and biological characteristics of spawners of whitefish grown in ponds of Central Experimental Station Ropsha]. *Biologicheskie osnovy razvedeniia sigovykh ryb v vodoemakh Evropeiskoi chasti SSSR*. Leningrad, 1982. Pp. 21-29.

29. Bogdanov V. D., Moskalenko I. P. Dinamika struktury nerestovogo stada chira r. Severnoi Sos'vy [Dynamics of structure of broad whitefish spawning stock in Northern Sosva River]. *Agrarnyi vestnik Urala*, 2012, no. 6 (98), pp. 57-60.

30. Serova R. Ia., Seregina N. I., Broksh A. Stimuliruiushchee deistvie paraaminobenzoinoi kisloty pri obrabotke klubnei kartofelia [Stimulating effect of paraaminobenzoic acid in treatment of potato tubers]. *Khimicheskii mutagenез v povyshenii produktivnosti sel'skokhoziaistvennykh rastenii*. Moscow, Nauka Publ., 1984. Pp. 171-174.

Статья поступила в редакцию 14.05.2021; одобрена после рецензирования 08.02.2022; принята к публикации 10.03.2022  
The article is submitted 14.05.2021; approved after reviewing 08.02.2022; accepted for publication 10.03.2022

#### Информация об авторах / Information about the authors

**Илья Алексеевич Котов** – ассистент кафедры экологии и генетики; Тюменский государственный университет; Тюмень, ул. Володарского, 6; i.a.kotov@utmn.ru

**Ирина Владимировна Пак** – доктор биологических наук, профессор; заведующий кафедрой экологии и генетики; Тюменский государственный университет; Тюмень, ул. Володарского, 6; pakiv57@mail.ru

**Людмила Леонидовна Сергиенко** – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник; Тюменский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (Госрыбцентр); Тюмень, ул. Одесская, 33; i.a.kotov@utmn.ru

**Олег Владимирович Трофимов** – кандидат биологических наук; доцент кафедры экологии и генетики; Тюменский государственный университет; Тюмень, ул. Володарского, 6; oleg\_v\_trofimov@mail.ru

**Iliia A. Kotov** – Assistant of the Department of Ecology and Genetics; Tyumen State University; Tyumen, Volodarsky street, 6; i.a.kotov@utmn.ru

**Irina V. Pak** – Doctor of Biology, Professor; Head of the Department of Ecology and Genetics; Tyumen State University; Tyumen, Volodarsky street, 6; pakiv57@mail.ru

**Lyudmila L. Sergienko** – Candidate of Biology; Senior Researcher; All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography, Tyumen branch (Gosrybtsentr); Tyumen, Odessa street, 33; i.a.kotov@utmn.ru

**Oleg V. Trofimov** – Candidate of Biology; Assistant Professor of the Department of Ecology and Genetics; Tyumen State University; Tyumen, Volodarsky street, 6; oleg\_v\_trofimov@mail.ru

