

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 639.3.034.2; 575.174.015.3

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-1-68-75>

Поступило в редакцию 20.07.2020

Received 20.07.2020

**В. А. Лемеш¹, В. Ю. Агеец², А. Ю. Носова¹, В. Н. Кипень¹, А. И. Царь¹,
Т. А. Сергеева², Е. А. Савичева²**

¹*Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*²*Институт рыбного хозяйства, Минск, Республика Беларусь*

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИИ КАРПА (*CYPRINUS CARPIO CARPIO*), ВЫРАЩИВАЕМОГО В АКВАКУЛЬТУРЕ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

(Представлено академиком А. В. Кильчевским)

Аннотация. Представлена панель из 14 микросателлитных локусов (MFW1, MFW2, MFW6, MFW9, MFW10, MFW11, MFW13, MFW16, MFW20, MFW24, MFW26, MFW28, MFW29 и Cid0909), с помощью которых изучена генетическая структура карпа (*Cyprinus carpio carpio*) породы «Изобелинский», разводимой на территории Республики Беларусь. В исследование включены четыре отводки: две зеркальные («Смесь зеркальная», «Три прим») и две чешуйчатые («Смесь чешуйчатая», «Столин XVIII»).

Установлено, что порода карпа «Изобелинский» обнаруживает высокий уровень внутривидовой генетической вариативности. В исследованных микросателлитных локусах идентифицирован 231 аллель, причем 62 % от общего количества аллелей составляли редкие аллели с частотой встречаемости менее 5,0 %. Число эффективных аллелей (N_e) в локусах варьировало от 3,082 (MFW10) до 9,754 (MFW26). Индекс биоразнообразия Шеннона (H) составил $2,082 \pm 0,075$. Наибольшее значение показателя ожидаемой гетерозиготности (H_e) отмечено для локуса MFW26 (0,897), наименьшее – для локуса MFW10 (0,676).

Обнаружено, что большее генетическое разнообразие характерно для чешуйчатых отводок карпа «Смесь чешуйчатая» и «Столин XVIII». Наибольший суммарный процент редких аллелей определен для особей из отводки «Столин XVIII». Минимальные значения данного параметра выявлены для особей зеркального карпа отводок «Смесь зеркальная» и «Три прим».

Результаты свидетельствуют о достаточно высоком генетическом разнообразии четырех изученных отводок породы карпа «Изобелинский», установленном с помощью оптимально подобранных для анализа маркерных локусов, что дает возможность дифференцировать отводки между собой.

Ключевые слова: карп, *Cyprinus carpio carpio*, генетическое разнообразие, микросателлитные локусы, аллель

Для цитирования. Генетическая структура популяции карпа (*Cyprinus carpio carpio*), выращиваемого в аквакультуре в Республике Беларусь / В. А. Лемеш [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 1. – С. 68–75. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-1-68-75>

**Valentina A. Lemesh¹, Vladimir Yu. Ageyets², Aleksandra Yu. Nosova¹, Viachaslau N. Kipen¹,
Nastassia I. Tsar¹, Tat'yana A. Sergeeva², Ekaterina A. Savicheva²**

¹*Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*²*Fish Industry Institute, Minsk, Republic of Belarus*

GENETIC STRUCTURE OF THE CARP POPULATION (*CYPRINUS CARPIO CARPIO*) GROWN IN THE AQUACULTURE IN THE REPUBLIC OF BELARUS

(Communicated by Academician Alexander V. Kilchevsky)

Abstract. In this study, we presented a panel of 14 microsatellite loci (MFW1, MFW2, MFW6, MFW9, MFW10, MFW11, MFW13, MFW16, MFW20, MFW24, MFW26, MFW28, MFW29 and Cid0909), with which we studied the genetic structure of *Cyprinus carpio carpio* of the breed “Izobelinsky” in the Republic of Belarus. Four offshoots of carp were included in the study: two mirrorry (“Smes’ zerkal’naya”, “Tri prim”) and two scaly (“Smes’ cheshujchataya”, “Stolin XVIII”).

As a result, it was found that the carp breed “Izobelinsky” exhibits a high level of in-breed genetic variability. In the studied microsatellite loci, 231 alleles were identified, 62 % of the total number of alleles were rare alleles with a frequency of occurrence of less than 5.0 %. The number of effective alleles (N_e) at the loci ranged from 3.082 (MFW10) to 9.754 (MFW26). The Shannon biodiversity index (H) was 2.082 ± 0.075 . The highest value of the expected heterozygosity index (H_e) was noted for the MFW26 locus (0.897), the lowest – for the MFW10 locus (0.676).

The greatest genetic diversity is characteristic of the scaly carp “Smes’ cheshujchataya” and “Stolin XVIII”. The highest total percentage of rare alleles was determined for fishes from “Stolin XVIII”. The minimum values of this parameter were found for specimens of the carp “Smes’ zerkal’naya” and “Tri prim”.

The results of this study indicate a fairly high genetic diversity of four offshoots of the carp breed “Izobelinsky”, which was established using the marker loci optimally selected for analysis. This makes it possible to differentiate the layering among themselves.

Keywords: carp, *Cyprinus carpio carpio*, genetic diversity, microsatellite loci, allele

For citation: Lemesh V. A., Ageyets V. Yu., Nosova A. Yu., Kipen V. N., Tsar N. I., Sergeeva T. A., Savicheva E. A. Genetic structure of the carp population (*Cyprinus carpio carpio*) grown in the aquaculture in the Republic of Belarus. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 1, pp. 68–75 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-1-68-75>

Введение. Главной задачей рыбоводства является повышение эффективности выращивания и увеличение конкурентоспособности получаемой рыбной продукции за счет роста продуктивности и улучшения потребительских качеств. В Беларуси селекционная работа в карповодстве направлена на создание новых высокопродуктивных, конкурентоспособных пород, а также на формирование генофонда, позволяющего максимально использовать эффект гетерозиса при межпородных и межвидовых скрещиваниях.

Работа по созданию белорусской породы карпа «Изобелинский» начата в 1947 г. на основе местных маточных стад, хорошо приспособленных к естественным условиям обитания. Порода представлена четырьмя отводками: двумя зеркальными и двумя чешуйчатыми. Отличительными особенностями карпа данной породы является высокая потенциальная способность роста, повышенная резистентность к воспалениям плавательного пузыря, хорошая отзывчивость на корма, высокие вкусовые качества мяса.

Карпы породы «Изобелинский» используются как в чистопородном, межлинейном, межпородном скрещивании с карпами других пород и породных групп белорусской селекции, так и с импортированными породами. При получении высокопродуктивных гетерогенных кроссов в качестве материнской линии обязательно используют самок данной породы карпа, как наиболее приспособленной к местным условиям, что обеспечивает нормативную и даже сверхнормативную выживаемость потомства. В настоящее время карп породы «Изобелинский» входит в состав коллекционного племенного стада СПУ «Изобелино» и представлен в нем восьмым поколением и формируемым младшим ремонтom девятого поколения.

Генетическое разнообразие вида *Cyprinus carpio carpio* исследовано достаточно широко [1–5]. Наиболее изучены популяции карпа, обитающего как в естественных, так и в контролируемых условиях (аквакультура), на территории Польши [6]. В Республике Беларусь исследования, направленные на оценку генетического разнообразия карпа, выращиваемого в аквакультуре, ранее не проводились.

Целью работы является определение оптимальной панели микросателлитных локусов для изучения генетической структуры карпа (*Cyprinus carpio carpio*) породы «Изобелинский», разводимой на территории Республики Беларусь.

Материалы и методы исследования. В качестве материала для исследований использовали образцы плавников от четырех отводок карпа породы «Изобелинский», отобранных в селекционно-племенном участке «Изобелино» (д. Изобелино, Молодечненский район): зеркальные «Смесь зеркальная» (110 образцов) и «Три прим» (46 образцов), чешуйчатые «Смесь чешуйчатая» (70 образцов) и «Столин XVIII» (100 образцов).

ДНК выделяли, используя методику фенол-хлороформной и солевой экстракции [7] с модификациями.

Генетическое разнообразие оценивали по четырнадцати STR-локусам – MFW1, MFW2, MFW6, MFW9, MFW10, MFW11, MFW13, MFW16, MFW20, MFW24, MFW26, MFW28, MFW29 и Cid0909 [1; 8].

Статистический анализ данных проводили с использованием программ GenAIEx v.6.5 [9], Structure v.2.3.4 [10], Past v.3.17 [11] и Pophelper v1.0.10 [12].

Были рассчитаны показатели, характеризующие генетическую структуру карпа белорусской породы «Изобелинский»:

Na (среднее количество выявленных аллелей на локус) – показатель, который позволяет оценить аллельное разнообразие в популяции, основываясь на общем числе выявленных вариантов;

N_e (количество эффективных аллелей) – показатель, характеризующий распространенность аллелей, которые теоретически необходимы для достижения той же ожидаемой гетерозиготности, что и в изучаемой популяции; позволяет определить разнообразие с учетом частоты встречаемости аллелей по конкретному локусу;

H_o (наблюдаемая гетерозиготность) – показатель изменчивости (полиморфности) популяции, который описывает долю гетерозиготных генотипов в эксперименте;

H_e (ожидаемая гетерозиготность) – показатель, который описывает долю гетерозиготных генотипов, ожидаемых в равновесии Харди–Вайнберга [13];

I (индекс разнообразия Шеннона) – количественная мера, которая отражает, сколько различных типов (например, субпопуляций) имеются в наборе данных (популяции); индекс позволяет произвести статистическую оценку изучаемых выборок и оценить значимость различий между уровнями разнообразия [14];

F_{IS} (индивидуальный индекс фиксации) – позволяет оценить степень родственного спаривания особей в субпопуляции, отражает отклонения генотипических частот с точки зрения недостатка или избытка гетерозигот;

F_{ST} (индекс фиксации) – характеризует снижение гетерозиготности из-за ограничения миграции и генетического дрейфа между субпопуляциями и указывает на степень дивергенции субпопуляций с течением времени [15].

С использованием GenAlEx v.6.5 проведен расчет генетических дистанций по методу AMOVA. В программе Structure v.2.3.4 рассчитан критерий Q , который характеризует принадлежность каждой отдельной особи к соответствующему кластеру (субгруппе в пределах группы). С использованием веб-приложения PopHelper v1.0.10 (<http://pophelper.com>) произведена графическая интерпретация результатов, полученных в Structure v.2.3.4. В программе Past v.3.17 выполнено построение графика главных компонент на основе расчета генетических дистанций по методу AMOVA.

Результаты и их обсуждение. Порода карпа «Изабелинский» обнаруживает высокий уровень генетической вариабельности: в 14 исследованных микросателлитных локусах идентифицировали 231 аллель, в том числе 143 редких аллеля (с частотой встречаемости менее 5,0 %), что составляет 62 % от общего количества выявленных аллелей. Число эффективных аллелей (N_e) в локусах варьировало от 3,082 (MFW10) до 9,754 (MFW26), при среднем значении $6,152 \pm 0,487$ аллеля на locus. Индекс биоразнообразия Шеннона (I), рассчитанный для совокупности 14 STR-локусов, составил $2,082 \pm 0,075$, что указывает на среднюю сложность структуры популяции карпа породы «Изабелинский».

Наибольшее значение показателя наблюдаемой гетерозиготности (H_o) было отмечено для локуса MFW9 (0,819), наименьшее – для локуса MFW28 (0,438), при среднем значении $0,660 \pm 0,033$. Наибольшее значение показателя ожидаемой гетерозиготности (H_e) выявлено для локуса MFW26 (0,897), наименьшее – для локуса MFW10 (0,676), при среднем значении $0,823 \pm 0,015$.

Значение критерия Q , равное 75 % или выше, подтверждает принадлежность отдельной особи из исследуемой выборки карпа к одной из четырех отводок («Смесь чешуйчатая», «Столин XVIII», «Смесь зеркальная» и «Три прим»). На рис. 1 представлены результаты кластеризации для всех 326 особей карпа (расположены по порядку без сортировки по значению Q) в пределах четырех отводок ($K = 4$). Для каждой отводки (№ 1–4) имеются особенности. В пределах отводки № 1 «Смесь чешуйчатая» выявлены особи, относящиеся к трем субкластерам (соответствуют Cluster 1, 3 и 4). Особи в пределах отводки № 2 «Смесь зеркальная» также могут быть сгруппированы в два субкластера (соответствуют Cluster 2 и 3). В пределах отводки № 3 «Столин XVIII» наблюдается довольно гетерогенная структура: выявлены особи, относящиеся к альтернативным субкластерам, но с незначительной долей Q в пределах основного кластера, что не позволяет однозначно отнести особь к одному конкретному субкластеру. Генетическая структура отводки № 4 «Три прим» наиболее однородная: выявлены всего две особи из альтернативных субкластеров. Данный факт может быть следствием того, что изучаемые в рамках исследования отводки карпа породы «Изабелинский» имеют общее происхождение, но нельзя исключить и влияние иных факторов, например, давление искусственного отбора и/или немногочисленную генетически обедненную группу прародителей.

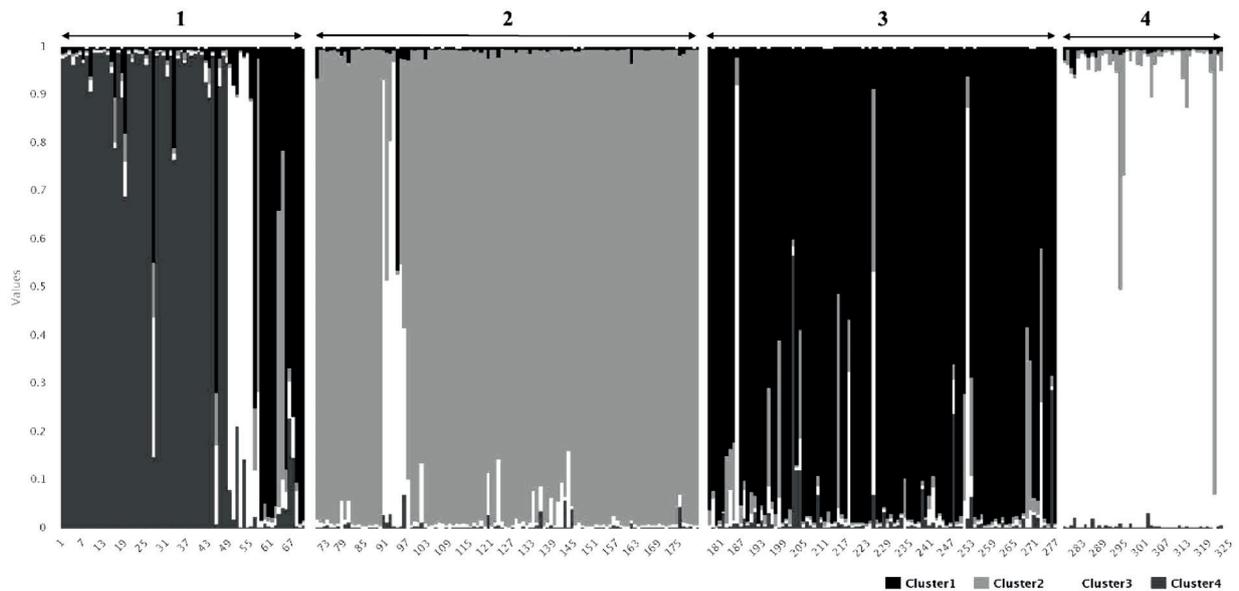


Рис. 1. Результаты анализа генетической структуры четырех отводок в породе карпа «Изобелинский» для $K = 4$: № 1 – «Смесь чешуйчатая», № 2 – «Смесь зеркальная», № 3 – «Столин XVIII»; № 4 – «Три прим» (ось X – идентификатор особи, ось Y – доля принадлежности к соответствующему кластеру)

Fig. 1. The results of the analysis of the genetic structure of the four offshoots of carp breed “Izobelinsky” for $K = 4$: no. 1 – “Smes’ cheshujchataya”, no. 2 – “Smes’ zerkal’naya”, no. 3 – “Stolin XVIII”, no. 4 – “Tri prim” (the X axis is the identifier of the individual, the Y axis is the share of belonging to the corresponding cluster)

На основании анализа генетических дистанций F_{ST} , рассчитанных по алгоритму AMOVA для 14 STR-локусов, построен график главных компонент (PCA, Principal Component Analysis), отражающий взаимное сходство или различие исследованных отводок карпа породы «Изобелинский» (рис. 2).

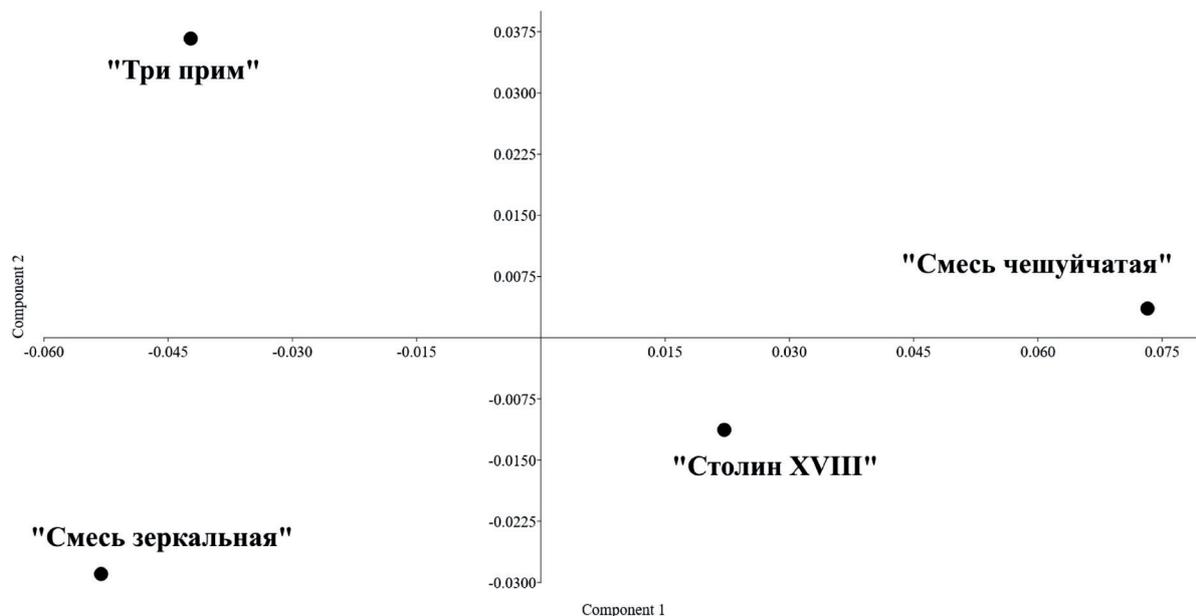


Рис. 2. Результаты анализа главных компонент (по совокупности 14 STR-локусов) четырех отводок в породе карпа «Изобелинский»

Fig. 2. The results of the analysis of the main components (a total of 14 STR-loci) of four offshoots in the carp breed “Izobelinsky”

Все группы (отводки) расположены на равномерном удалении друг от друга. Несмотря на генетическую близость исследуемых отводок карпа наблюдается довольно существенное различие по взаимному расположению их координат на графике главных компонент, на долю которых (первая и вторая компонента) приходится 87 % вариации признака. Причина подобных различий в большей степени обусловлена различиями в частоте распространенности аллелей в исследованных STR-локусах, а также наличием в исследованных отводках как редких, так и частных (встречаются только в одной из исследованных групп) аллелей.

Наибольший накопленный суммарный процент редких аллелей определен для особей из отводок чешуйчатого карпа «Столин XVIII» (177,6 %) и «Смесь чешуйчатая» (151,1 %). Значения данного параметра были примерно в 2 раза ниже для особей из отводок зеркального карпа «Смесь зеркальная» (69,7 %) и «Три прим» (75,0 %).

Для отводок карпа породы «Изабелинский» имелись также особенности и в количестве выявленных частных аллелей. Большее количество частных аллелей характерно для отводок чешуйчатого карпа. Среди особей из отводок зеркального карпа выявлены частные аллели только для особей из отводки «Три прим»: для локуса MFW16 аллель 172 – 7,3 %, для локуса MFW20 аллель 266 – 5,1 %. Среди особей из отводки «Смесь чешуйчатая» они определены для девяти локусов: MFW2, MFW6, MFW9, MFW10, MFW11, MFW16, MFW20, MFW26 и MFW29. Причем для локуса MFW2 аллель 171 выявлен в 7,3 %, для локуса MFW16 аллель 161 – в 8,7 % и для локуса MFW20 аллель 236 – в 10,0 %. Наибольшее количество частных аллелей определено для особей из отводки «Столин XVIII» – 48, что составляет 20,8 % от всех выявленных аллелей среди исследованных карпов породы «Изабелинский». В данной отводке для пяти STR-локусов частота распространенности некоторых аллелей составила более 5,0 %: для локуса MFW6 аллель 125 – 8,8 %, для локуса MFW9 аллель 237 – 6,5 %, для локуса MFW24 аллели 205 и 212 – 7,7 и 9,8 % соответственно, для локуса MFW28 аллели 276 и 300 – 9,2 и 6,3 % соответственно, для локуса MFW29 аллель 138 – 6,9 %.

Из 14 исследованных STR-локусов наибольшим потенциалом по дифференциации исследуемых отводок карпа породы «Изабелинский» обладают те, для которых рассчитанные значения F_{ST} являются максимальными (табл. 1). Наибольшие рассчитанные значения F_{ST} показаны для четырех STR-локусов: MFW28, MFW13, MFW11 и Cid0909.

Т а б л и ц а 1. Дифференцирующий потенциал STR-локусов (результаты анализа locus-by-locus AMOVA)

T a b l e 1. Differentiating potential of STR-loci (results of locus-by-locus AMOVA analysis)

Локус Locus	F_{ST}^*	p -уровень p -level	Локус Locus	F_{ST}	p -уровень p -level
MFW1	0,101	<0,001	MFW16	0,110	<0,001
MFW2	0,105	<0,001	MFW20	0,039	<0,001
MFW6	0,069	<0,001	MFW24	0,073	<0,001
MFW9	0,063	<0,001	MFW26	0,044	<0,001
MFW10	0,051	<0,001	MFW28 [#]	0,173	<0,001
MFW11 [#]	0,124	<0,001	MFW29	0,067	<0,001
MFW13 [#]	0,129	<0,001	Cid0909 [#]	0,121	<0,001

П р и м е ч а н и е: «*» – F_{ST} , коэффициент инбридинга субпопуляций относительно всей популяции, указывает на редукцию гетерозиготности из-за ограничения потока генов (миграции) и генетического дрейфа между субпопуляциями; «#» – выделены STR-локусы с максимальными значениями F_{ST} .

N o t e: «*» – F_{IS} , Fixation Index; «#» – STR loci with maximum F_{ST} values highlighted.

Для установления внутривидовой генетической подразделенности карпов породы «Изабелинский» необходимо также оценить значения показателей N_a , N_e , N_o , N_e , I и коэффициента F_{IS} (табл. 2). Исходя из данных показателей определено, что меньшим генетическим разнообразием отличаются особи из отводок зеркального карпа «Смесь зеркальная» и «Три прим». Наибольшее генетическое разнообразие выявлено для отводки чешуйчатого карпа «Столин XVIII».

Т а б л и ц а 2. Генетическая характеристика четырех отводок карпа породы «Изабелинский» по результатам генотипирования 14 STR-локусов

Table 2. Genetic characteristics of four offshoots of carp of the “Isobelinsky” breed based on the results of genotyping of 14 STR-loci

Показатель Index	Отводка Offshoot			
	«Смесь чешуйчатая» “Smes’ cheshujchataya”	«Столин XVIII» “Stolin XVIII”	«Смесь зеркальная» “Smes’ zerkal’naya”	«Три прим» “Tri prim”
Na	10,500 ± 0,954	13,286 ± 1,013	7,714 ± 0,722	7,071 ± 0,497
Ne	5,766 ± 0,622	6,286 ± 0,393	3,504 ± 0,342	4,078 ± 0,480
I	1,876 ± 0,129	2,054 ± 0,075	1,419 ± 0,078	1,516 ± 0,105
Ho	0,578 ± 0,059	0,744 ± 0,029	0,639 ± 0,048	0,605 ± 0,052
He	0,780 ± 0,038	0,832 ± 0,012	0,689 ± 0,021	0,697 ± 0,041
F _{IS}	0,280 ± 0,060	0,105 ± 0,033	0,079 ± 0,057	0,129 ± 0,053

При анализе данных литературы по оценке генетического разнообразия биологического вида *Cyprinus carpio carpio*, особи которого обитают в аквакультуре в различных регионах мира, установлено, что белорусская порода карпа «Изабелинский» характеризуется наибольшим значением среднего числа аллелей на locus Na (16,5) по сравнению с популяциями из России [3], Польши [6], Германии [2], Нидерландов [1], Китая [5], Вьетнама [4], Японии [2]. В целом, наблюдаемый уровень гетерозиготности (Ho) белорусской породы карпа соответствует таковому для большинства популяций из различных регионов. Вместе с тем для отводки «Столин XVIII» уровень Ho оказался выше, чем для большинства изученных популяций карпа. Данный факт подтверждает, что для этой отводки карпа характерны широкий спектр генетического разнообразия и, вследствие этого, высокий потенциал для селекционной работы.

Заключение. Дана оценка генетического разнообразия четырех отводок карпа (*Cyprinus carpio carpio*) породы «Изабелинский», разводимой на территории Республики Беларусь, по результатам генотипирования 14 STR-локусов. Проведенный анализ свидетельствует о том, что порода карпа «Изабелинский» обнаруживает высокий уровень внутривидовой генетической вариативности. В исследованных микросателлитных локусах идентифицирован 231 аллель, в том числе 143 редких аллеля, что составляет 61,9 % от общего количества выявленных аллелей. Число эффективных аллелей (Ne) в локусах варьировало от 3,082 до 9,754. Такое разнообразие представленных аллелей позволяет эффективно проводить генетическую паспортизацию и породную идентификацию карпа породы «Изабелинский». Индекс биоразнообразия Шеннона (I) составил 2,082, что демонстрирует среднюю сложность генетической структуры изученной породы карпа. Наибольшее значение показателя ожидаемой гетерозиготности (He) отмечено для локуса MFW26 (0,897), наименьшее – для локуса MFW10 (0,676). Высокий показатель ожидаемой гетерозиготности (He) свидетельствует о большей разрешающей способности маркера к локусу MFW26. Тем не менее, наличие редких аллелей по всем изученным локусам не позволяет уменьшить число маркеров, чтобы не снижать разрешающую способность используемого в исследовании подхода.

Обнаружено, что большее генетическое разнообразие характерно для чешуйчатых отводок карпа «Смесь чешуйчатая» и «Столин XVIII». Наибольший суммарный процент редких аллелей определен для особей из отводки «Столин XVIII». Для отводки «Столин XVIII» уровень Ho оказался выше, чем для большинства изученных популяций карпа.

Наблюдаемый уровень гетерозиготности (Ho) белорусской породы карпа «Изабелинский» соответствует таковому для большинства популяций из различных регионов. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высоком генетическом разнообразии четырех изученных отводок породы карпа «Изабелинский», установленном с помощью оптимально подобранных для анализа маркерных локусов, что дает возможность дифференцировать отводки между собой.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках мероприятия 24² «Разработать и внедрить технологию генетической сертификации представителей семейства Карповых (Cyprinidae) для формирования ремонтных групп и маточных стад» подпрограммы 1 «Инновационные биотехнологии–2020» ГП «Наукоёмкие технологии и техника» на 2016–2020 годы.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Acknowledgement. The work is performed within the framework of the task 24² “To develop and to introduce the genetic certification technology of the representatives of the carp family (Cyprinidae) into the formation of fish repair groups and broodstocks” of the subprogram 1 “Innovation biotechnologies–2020” of the State Program “High technologies and techniques” for the 2016–2020 years.

Список использованных источников

1. Microsatellite markers in common carp (*Cyprinus carpio* L.) / R. P. M. A Crooijmans [et al.] // *Animal Genetics*. – 1997. – Vol. 28, N 2. – P. 129–134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.1997.00097.x>
2. Genetic variability and structure of common carp (*Cyprinus carpio*) populations throughout the distribution range inferred from allozyme, microsatellite and mitochondrial DNA markers / K. Kohlmann [et al.] // *Aquatic Living Resources*. – 2003. – Vol. 16, N 5. – P. 421–431. [https://doi.org/10.1016/s0990-7440\(03\)00082-2](https://doi.org/10.1016/s0990-7440(03)00082-2)
3. Polymorphism of Microsatellite Markers in Russian Common Carp (*Cyprinus carpio* L.) Breeds / R. I. Ludanny [et al.] // *Russian Journal of Genetics*. – 2010. – Vol. 46, N 5. – P. 572–577. <https://doi.org/10.1134/s1022795410050108>
4. Thai, B. T. Genetic diversity of common carp (*Cyprinus carpio* L.) in Vietnam using four microsatellite loci / B. T. Thai, C. P. Burrige, Austin C. M. // *Aquaculture*. – 2007. – Vol. 269, N 1–4. – P. 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.05.017>
5. Microsatellite markers for parentage identification in Jian Carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) / Y. Gu [et al.] // *Hereditas* (Beijing). – 2012. – Vol. 34, N 11. – P. 1447–1455. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1005.2012.01447>
6. Genetic diversity of common carp (*Cyprinus carpio* L.) strains breed in Poland based on microsatellite, AFLP, and mtDNA genotype data / L. Napora-Rutkowska [et al.] // *Aquaculture*. – 2017. – Vol. 473. – P. 433–442. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.03.005>
7. Sambrook, J. *Molecular Cloning: A Laboratory Manual* / J. Sambrook, D. W. Russell. – 3rd ed. – New York, 2001.
8. A consensus linkage map of the grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) based on microsatellites and SNPs / J. Xia [et al.] // *BMC Genomics*. – 2010. – Vol. 11, N 1. – Art. 135. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-11-135>
9. Peakall, R. GenAlEx 6.5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research—an update / R. Peakall, P. E. Smouse // *Bioinformatics*. – 2012. – Vol. 28, N 19. – P. 2537–2539. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts460>
10. Pritchard, J. K. Inference of Population Structure Using Multilocus Genotype Data / J. K. Pritchard, M. Stephens, P. Donnelly // *Genetics*. – 2000. – Vol. 155, N 2. – P. 945–959.
11. Hammer, Ø. Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis / Ø. Hammer, D. A. T. Harper, P. D. Ryan // *Palaeontologia Electronica*. – 2001. – Vol. 4, N 1. – P. 1–9.
12. Francis, R. M. Pophelper: an R package and web app to analyse and visualize population structure / R. M. Francis // *Mol. Ecol. Resour.* – 2017. – Vol. 17, N 1. – P. 27–32. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12509>
13. Животовский, Л. А. Популяционная биометрия / Л. А. Животовский. – М., 1991. – 270 с.
14. Кононов, А. В. Генетическое и видовое разнообразие в исходных и инвазивных популяциях комплекса вредителей хвойных деревьев: жук-короед *P. proximus* (Coleoptera, Scolytidae) и его грибы-симбионты / А. В. Кононов. – Новосибирск, 2018. – 102 л.
15. Кузнецов, В. М. F-статистики Райта: Оценка и интерпретация / В. М. Кузнецов // *Проблемы биологии продуктивных животных*. – 2014. – № 4 – С. 80–104.

References

1. Crooijmans R. P. M. A., Van der Poel J. J., Groenen M. A. M., Bierbooms V. A. F., Komen J. Microsatellite markers in common carp (*Cyprinus carpio* L.). *Animal Genetics*, 1997, vol. 28, no. 2, pp. 129–134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.1997.00097.x>
2. Kohlmann K., Gross R., Murakaeva A., Kersten P. Genetic variability and structure of common carp (*Cyprinus carpio*) populations throughout the distribution range inferred from allozyme, microsatellite and mitochondrial DNA markers. *Aquatic Living Resources*, 2003, vol. 16, no. 5, pp. 421–431. [https://doi.org/10.1016/s0990-7440\(03\)00082-2](https://doi.org/10.1016/s0990-7440(03)00082-2)
3. Ludanny R. I., Chisanofova G. G., Prizenko V. K., Bogeruk A. K., Semyenova S. K. Polymorphism of Microsatellite Markers in Russian Common Carp (*Cyprinus carpio* L.) Breeds. *Russian Journal of Genetics*, 2010, vol. 46, no. 5, pp. 572–577. <https://doi.org/10.1134/s1022795410050108>
4. Thai T. B., Burrige C. P., Austin C. M. Genetic diversity of common carp (*Cyprinus carpio* L.) in Vietnam using four microsatellite loci. *Aquaculture*, 2007, vol. 269, no. 1–4, pp. 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.05.017>
5. Gu Y., Li C., Lu C. Y., Zheng X. H., Yu J. H., Sun X. W. Microsatellite markers for parentage identification in Jian Carp (*Cyprinus carpio* var. Jian). *Hereditas* (Beijing), 2012, vol. 34, no. 11, pp. 1447–1455. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1005.2012.01447>
6. Napora-Rutkowski L., Rakus K., Nowak Z., Szczygieł J., Pilarczyk A., Ostaszewska T., Irnazarow I. Genetic diversity of common carp (*Cyprinus carpio* L.) strains breed in Poland based on microsatellite, AFLP, and mtDNA genotype data. *Aquaculture*, 2017, vol. 473, pp. 433–442. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.03.005>

7. Sambrook J., Russell D. W. *Molecular Cloning: A Laboratory Manual*, 3rd ed., New York, 2001.
8. Xia J., Liu F., Zhu Z., Fu J., Feng J., Li J., Yue G. A consensus linkage map of the grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) based on microsatellites and SNPs. *BMC Genomics*, 2010, vol. 11, no. 1, art. 135. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-11-135>
9. Peakall R., Smouse P. E. GenALEX 6.5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research-an update. *Bioinformatics*, 2012, vol. 28, no. 19, pp. 2537–2539. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts460>
10. Pritchard J. K., Stephens M., Donnelly P. Inference of Population Structure Using Multilocus Genotype Data. *Genetics*, 2000, vol. 155, no. 2, pp. 945–959.
11. Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 2001, vol. 4, no. 1, pp. 1–9.
12. Francis R. M. Pophelper: an R package and web app to analyse and visualize population structure. *Molecular Ecology Resource*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 27–32. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12509>
13. Zhivotovskij L. A. *Population biometrics*. Moscow, 1991. 270 p. (in Russian).
14. Kononov A. V. *Genetic and species diversity in the original and invasive populations of a set of pests of coniferous trees: bark-beetle P. proximus (Coleoptera, Scolytidae) and its mushroom symbionts*. Novosibirsk, 2018. 102 p. (in Russian).
15. Kuznetsov V. M. Wright's F-statistics: estimation and interpretation. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh [Problems of Biology of Productive Animals]*, 2014, no. 4, pp. 80–104 (in Russian).

Информация об авторах

Лемеш Валентина Александровна – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.lemesh@igc.by.

Агеец Владимир Юльянович – д-р. с.-х. наук, профессор, директор. Институт рыбного хозяйства (ул. Стебенева, 22, 220024, Минск, Республика Беларусь). E-mail: belniirh@tut.by.

Носова Александра Юрьевна – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.nosova@igc.by.

Кипень Вячеслав Николаевич – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.kipen@igc.by.

Царь Анастасия Ивановна – мл. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.tsar@igc.by.

Сергеева Татьяна Александровна – заведующий лабораторией. Институт рыбного хозяйства (ул. Стебенева, 22, 220024, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tasergeeva@tut.by.

Савичева Екатерина Андреевна – мл. науч. сотрудник. Институт рыбного хозяйства (ул. Стебенева, 22, 220024, Минск, Республика Беларусь). E-mail: belniirh@tut.by.

Information about the authors

Lemesh Valentina A. – Ph. D. (Biology), Assistant professor, Head of the Laboratory. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.lemesh@igc.by.

Ageyets Vladimir Yu. – D. Sc. (Agrarian), Professor, Director. Fish Industry Institute (22, Stebenev Str., 220024, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: belniirh@tut.by.

Nosova Aleksandra Yu. – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.nosova@igc.by.

Kipen Viachaslau N. – Ph. D. (Biology), Senior researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.kipen@igc.by.

Tsar Nastassia I. – Junior researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.tsar@igc.by.

Sergeeva Tat'yana A. – Head of the Laboratory. Fish Industry Institute (22, Stebenev Str., 220024, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tasergeeva@tut.by.

Savicheva Ekaterina A. – Junior researcher. Fish Industry Institute (22, Stebenev Str., 220024, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: belniirh@tut.by.