



УДК 575.174.4

## Аквакультура

# Динамика природного полиморфизма русского осетра в Азовском море за двадцатилетний период использования ремонтно-маточных стад в искусственном воспроизводстве

А.Ш. Алимova<sup>1,2</sup>, А.В. Усатов<sup>1</sup>, Н.А. Небесихина<sup>2</sup>, Н.С. Мюге<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Азово-Черноморский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), ул. Береговая, 21в, Ростов-на-Дону, 344002

<sup>2</sup> Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванковского ЮФУ (ФГАОУ ВО «АБиБ ЮФУ»), пр-т Стачки, 194/1, Ростов-на-Дону, 344006

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО»), Окружной проезд, 19, Москва, 105187

E-mail: alimovaash@azniirkh.vniro.ru

SPIN-код: А.Ш. Алимova – 6035-2576; А.В. Усатов – 1644-8303; Н.С. Мюге – 1916-2289; Н.А. Небесихина – 3608-6240.

**Цель:** оценка влияния использования ремонтно-маточных стад русского осетра на уровень генетического полиморфизма выпускаемой молоди, а также анализ динамики аллельного состава популяции в Азовском море. **Используемые методы:** выполнен анализ полиморфизма по 5 микросателлитным (STR) локусам (Afug41, An20, AoxD161, AoxD165, Afug51) на двух выборках русского осетра: I. выловленных в Азовском море в 1999-2003 гг. (250 образцов, потомство от «диких» производителей) и II. отловленных в 2020-2024 гг. (250 образцов, потомство от производителей из сформированных РМС). **Новизна:** впервые представлены результаты сравнительного генетического анализа архивных (1999-2003 гг.) и современных (2020-2024 гг.) образцов русского осетра, а также проведена оценка временной стабильности генетической структуры популяции. **Результаты:** при сравнении результатов микросателлитного анализа двух выборок (потомков природного и искусственного происхождения) было выявлено, что среднее число аллелей на локус за 25-летний период не претерпело статистически достоверных изменений, однако при этом у выборки потомков искусственного воспроизводства значение среднего числа аллелей на особь незначительно снизилось (на 2,41%), а доля гомозигот в выборке потомков искусственного происхождения по отношению к природному возросла (0,05 и 0,07, соответственно). Показано, что аллельное разнообразие русского осетра азовской популяции сохраняется на стабильном уровне, однако при этом отмечено незначительное увеличение коэффициента инбридинга. **Практическая значимость:** результаты исследования указывают на высокую эффективность искусственного воспроизводства с точки зрения сохранения природного генетического разнообразия русского осетра, и могут быть использованы при проведении генетического мониторинга на осетровых рыболовных заводах, что позволит поддерживать генетическую гетерогенность потомства в долгосрочной перспективе.

**Ключевые слова:** русский осётр *Acipenser gueldenstaedtii*, аллель, STR-локус, генетическая изменчивость, инбридинг, гомозиготность.

## Dynamics of natural polymorphism of Russian sturgeon in the Sea of Azov over a twenty-year period of using broodstock in artificial reproduction

Aleksandra Sh. Alimova<sup>1,2</sup>, Aleksandr V. Usatov<sup>1</sup>, Natalya A. Nebesikhina<sup>2</sup>, Nikolai S. Muge<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Azov-Black Sea branch of VNIRO («AzNIIRKH»), 21 v, Beregovaya st., Rostov-on-Don, 344002, Russia

<sup>2</sup> D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology of Southern Federal University («AB&B SFEDU»), 194/1, Stachki Av., Rostov-on-Don, 344006, Russia

<sup>3</sup> Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography («VNIRO»), 19, Okruzhnoy proezd, Moscow, 105187, Russia

**The aim** is to assess the impact of using RBS Russian sturgeon on the level of genetic polymorphism in the released juveniles and on the dynamics of the allele composition of the population in the Sea of Azov. **Methods:** Polymorphism analysis was carried out at five microsatellite (STR) loci (Afug41, An20, AoxD161, AoxD165, Afug51) on two samples of Russian sturgeon: I. individuals captured in the Sea of Azov in 1999-2003 (250 samples, offspring of «wild» broodstock) and II. individuals captured in 2020-2024 (250 samples, offspring of broodstock from established RBS). **Novelty:** For the first time, comparative genetic analysis results are presented for archival (1999-2003) and contemporary (2020-2024) Russian sturgeon samples, along with an assessment of the temporal stability of the population's genetic structure. **Results:** Comparison of microsatellite data between the two samples (offspring of natural and artificially reproduced broodstock) showed that the mean number of alleles per locus did not change significantly over the 25-year period. However, in the sample of offspring from artificial reproduction, the mean number of alleles per individual decreased slightly (by 2.41%), and the proportion of homozygotes was higher compared to the wild-origin offspring (0.07 vs. 0.05, respectively). These results indicate that allele diversity in the Azov population of Russian sturgeon remains at a stable level, although a slight increase in the inbreeding coefficient was observed. **Practical significance:** The findings demonstrate the high efficiency of artificial reproduction in maintaining the natural genetic diversity of Russian sturgeon and can be applied in genetic monitoring at sturgeon hatcheries to ensure the long-term maintenance of offspring genetic heterogeneity.

**Keywords:** Russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii*, allele, STR loci, genetic variability, inbreeding, homozygosity.

## ВВЕДЕНИЕ

Русский осётр *Acipenser gueldenstaedtii* (Brandt et Ratzeburg, 1833) – проходной вид семейства осетровых (Acipenseridae), в прошлом важнейший промысловый вид для Азово-Черноморского бассейна. Исторически популяции азовских осетровых занимали второе место в мире по величине запасов и объёму вылова, уступая лишь Каспийскому морю [Реков, Чепурная 2018]. По данным учётных съёмов численность русского осетра ещё в 1989 году достигала 14 миллионов особей [Реков, 2002].

Во время нерестовых миграций старший возрастной состав азовской популяции русского осетра концентрировался в прибрежных зонах, а затем заходил в реку Дон и, в меньшей степени, в реку Кубань [Костюченко, 1955]. После зарегулирования основных путей нереста Цимлянской плотиной (1952 г.) и Федоровским гидроузлом (1964) численность русского осетра начала стремительно снижаться [Корнеев, Баскакова, 1984], вследствие нарушения условий естественного нереста. Необходимой мерой для компенсации недостатка молоди стало внедрение практики искусственного воспроизводства на осетровых рыбодоводных заводах (ОРЗ). Путём интенсивного развития промышленного осетроводства, был успешно компенсирован недостаток молоди от естественного нереста [Реков и др., 2004]. Однако, после развала СССР, массовое распространение получил незаконный, несообщаемый и нерегулируемый промысел (ННН-промысел), в результате чего популяции, в том числе и русского осетра, оказались под угрозой исчезновения [Васев и др., 2023]. С 2000 года промышленный лов осетровых рыб в Азово-Черноморском бассейне был официально запрещён, а русский осётр включён Приложение II CITES (Конвенция ООН «О международной торговле видами дикой фауны и флоры, находящимися под угрозой уничтожения»)¹ и Красный список Международного стандарта охраны природы (МСОП)².

Искусственное воспроизводство русского осетра в Азовском море ведётся с конца 50-х годов прошлого века, однако с начала 2000-х снижение численности русского осетра привело к тому, что заготовка производителей для искусственного воспроизводства из моря практически прекратилась, и на ОРЗ региона были сформированы ремонтно-маточные стада производителей [Мирзоян и др., 2023]. В настоящее время пополнение популяции происходит с использова-

нием маточных стад, выращенных «от икры» в заводских условиях [Бугаев и др., 2023]. Для минимизации эффекта инбридинга, который, как правило, сопровождается снижением продуктивности и плодовитости рыб, необходимо контролировать уровень генетической изменчивости производителей [Kincaid, 1983]. Более того, оценка внутривидовой генетической изменчивости имеет непосредственное значение для исследования микроэволюционных процессов и анализа генетического разнообразия в искусственно сформированных маточных стадах [Тимошкина др., 2010], и, как следствие, своевременного предотвращения утери уникальных аллелей (генотипов) [Ortega-Villaizán et al., 2011].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом исследования служили образцы тканей (печень, селезёнка, фрагменты плавника) русского осетра, выловленного в Азовском море. Для сравнительного анализа генетической изменчивости материал был разделён на две выборки. Выборка I включала производителей, выловленных во время нерестового хода из естественной среды в период 1999-2003 гг. Часть этой выборки была представлена domesticiрованными особями, которые впоследствии составили основу при формировании маточных стад на ОРЗ (период 2001-2003 гг.). Кроме того, важно подчеркнуть, что рассматриваемые выше особи выборки I были получены от рыб природной популяции, участвующих в искусственном воспроизводстве единожды. Выборка II включала разновозрастных рыб Азовского моря, выловленных в период 2020-2024 гг. Особи выборки II являются потомками производителей, выращенных от «от икры» в условиях искусственного воспроизводства и содержащихся в ремонтно-маточных стадах (РМС).

Генетические образцы отбирали двумя методами – посмертно (до 2001 года половые продукты получали «забойным» методом», при этом производили отбор генетического материала) и прижизненно (начиная с 2001 года) путём отсека фрагмента плавниковой каймы. В состав каждой выборки вошло по 250 проб. Образцы фиксировали 96%-ным этиловым спиртом, затем помещали в низкотемпературные (–70 °C) морозильные камеры. Вышеописанные пробы являются частью «Каталога коллекции тканей русского осетра для молекулярно-генетического анализа» Азово-Черноморского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), где каждому образцу присваивали идентификационный номер с информацией о месте вылова и набор рыбодоводно-биологических характеристик (УНУ «Биоресурсная коллекция ВБР»).

¹ *Acipenser gueldenstaedtii*. CITES Taxonomy Term: <https://cites.org/eng/taxonomy/term/5076>. 18.09.2025.

² *Acipenser gueldenstaedtii*. IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.fishbase.se/summary/4712>. 09.09.2025.

Выделение ДНК производили методом солевой экстракции с дополнительной очисткой хлороформом [Aljanabi, Martinez 1997]. Микросателлитный анализ выполняли с использованием пяти STR-локусов (AfuG41, An20, AoxD161, AoxD165, AfuG51) по ранее опубликованным протоколам [Барминцева, Мюге 2013]. Амплификацию проводили в режиме мультиплексной Touchdown-ПЦР на амплификаторах «Bio-Rad T100»<sup>3</sup> и «Bioer Gene Explorer»<sup>4</sup>. Продукты амплификации разделяли при помощи фрагментного анализа на генетическом анализаторе «Нанофор 05»<sup>5</sup>. Обработку исходных данных осуществляли с использованием программного пакета «Gene Marker»<sup>6</sup>. Статистическую обработку данных и расчёт популяционно-генетических показателей выполняли с применением надстройки Microsoft Office Excel. Анализ молекулярной дисперсии (AMOVA) проводили при помощи пакета «poppr» в среде «R-studio».<sup>7</sup> Оценку достоверности различий средних выполняли в программе «Past4» [Hammer et al., 2001].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные по результатам микросателлитного анализа изменчивости двух выборок (потомков природного и искусственного происхождения) представлены в табл. 1. Во всех исследованных локусах отмечен высокий уровень полиморфизма. Среди паттерна из пяти STR-локусов наибольшую изменчивость продемонстрировал локус AfuG41 (14-17 аллелей) и AfuG51 (12-16 аллелей), менее полиморфным отмечен локус An20 (8-11 аллелей).

Максимальное количество аллелей (Total  $N_a$ ) составило 65, минимальное – 57. Показатель среднего числа аллелей на локус за пятилетний период (Mean  $N_a$ /locus per 5 years) остался неизменным, несмотря на условную ограниченность генетического пула у выборки II. Полученные результаты свидетельствуют, что исходное маточное стадо, потомками которого являются особи выборки II, обладало достаточным уровнем генетической изменчивости для сохранения

общего аллельного разнообразия. Показатель среднего числа аллелей на особь за пять лет (Mean  $N_a$ /individual per 5 years) снизился на 2,41% (выборка I – 2,91 и выборка II – 2,84, соответственно), что может говорить о смещении частот встречаемости отдельных аллельных вариантов. Выявленная тенденция коррелирует с повышением доли гомозигот в выборке II (0,07) по сравнению с выборкой I (0,05) (см. табл. 2). Однако согласно t- и z-тестам достоверности различий средних, на данном этапе влияния искусственного воспроизводства, разницы значений Mean  $N_a$ /individual per 5 years и Mean AAAA,% per 5 years не достигли статистической значимости.

Уровень ожидаемой гетерозиготности  $H_e$  незначительно варьировал в пределах 0,97-0,98, в то время как показатель наблюдаемой гетерозиготности  $H_o$  демонстрировал более широкий разброс в значениях – от 0,87 до 0,97. Среднее значение наблюдаемой гетерозиготности (Mean  $H_o$  per 5 years) в выборке потомков природного происхождения составило 0,948, тогда как в искусственной оно равнялось 0,922. Отмечаем, что за прошедший 25-летний период данный показатель снизился на 2,74%, что также может подтверждать наличие генетического дрейфа, изменяющего частоты, а затем и вовсе приводящего к вымыванию отдельных аллельных вариантов. Более того, было выявлено, что коэффициент инбридинга  $F_{is}$  также был выше в выборке II (0,057>0,031), что указывает на рост дефицита гетерозигот.

Для более глубокого анализа полученных результатов, был проведён анализ частот встречаемости аллелей по каждому локусу (см. рис. 1).

Анализ распределения частот аллелей в локусе AoxD161 (рис. 1 а) показал, что выборке II наблюдается эффект «вымывания» редких аллелей (86 и 94 п.н.), в то время как доминантные варианты (122, 126, 130) сохраняют свои позиции. Среднечастотные аллели демонстрируют небольшие колебания, что указывает на перераспределение частот без существенного изменения структуры локуса. В локусе An20 (рис. 1 б) редкие аллели 149 и 177 п. н. демонстрируют тенденцию к снижению. В локусе AfuG51 (рис. 1 в) также отмечено снижение встречаемости низкочастотных аллелей 208, 276 и 284 п. н., при этом большую распространённость приобрели варианты 224, 252 и 268 п.н. В локусе AfuG41 (рис. 1 г) зарегистрирован самый широкий спектр аллельных вариантов (173-253 п.н.). В обеих выборках основная доля приходится на интервал 197-213 п. н. В выборке I преобладающие частоты отмечены для аллелей 197 п. н., 201 и 205 п.н. В выборке II частоты распределены более равномерно, при этом стали преобладать аллели 209 и 213 п.н.

<sup>3</sup> Bio-Rad Laboratories, USA. <https://www.bio-rad.com/en-nl/product/t100-thermal-cycler?ID=LGTWGIE8Z>. 05.10.2025.

<sup>4</sup> Bioer Technology, China. [https://en.bioer.com/en/InstrumentCenter/info\\_itemid\\_3434\\_lcid\\_117.html](https://en.bioer.com/en/InstrumentCenter/info_itemid_3434_lcid_117.html). 05.10.2025.

<sup>5</sup> ИАП РАН, Россия. <https://www.syntol.ru/catalog/oborudovanie-i-raskhodnye-materialy-dlya-ptsr-i-geneticheskogo-analiza/geneticheskij-analizator-nanofor-05.html>. 05.10.2025.

<sup>6</sup> Softgenetics, USA. <https://www.softgenetics.com/products/genemarker/>. 05.10.2025.

<sup>7</sup> RStudio: Integrated Development Environment for R. <https://www.r-project.org/conferences/user-2011/abstracts/180111-allairejj.pdf>. 05.10.2025.

**Таблица 1.** Генетическая изменчивость русского осетра бассейна Азовского моря по 5 микросателлитным локусам  
**Table 1.** Genetic variability of Russian sturgeon from the Azov Sea basin based on 5 microsatellite loci

Номер выборки	Год	<i>n</i>	<i>N<sub>a</sub></i> (AoxD161)	<i>N<sub>a</sub></i> (Afug41)	<i>N<sub>a</sub></i> (An 20)	<i>N<sub>a</sub></i> (Afug 51)	<i>N<sub>a</sub></i> (AoxD165)	Total <i>N<sub>a</sub></i>	Mean <i>N<sub>a</sub></i> /locus per 5 years	Mean <i>N<sub>a</sub></i> / individual per 5 years	t-тест ( <i>p</i> ≤ 0,05)
I	1999	50	12	14	9	13	13	61	12,4	2,91	0,52
	2000	50	12	15	8	15	11	61			
	2001	50	13	16	8	14	14	65			
	2002	50	11	13	9	15	13	61			
	2003	50	9	16	9	14	14	62			
II	2020	50	10	14	9	12	12	57	12,4	2,84	
	2021	50	11	16	10	16	11	64			
	2022	50	12	14	9	16	12	63			
	2023	50	13	17	9	14	12	65			
	2024	50	9	16	11	12	13	61			

Примечание: *n* – размер выборки; *N<sub>a</sub>* – число аллелей; Total *N<sub>a</sub>* – общее число аллелей за указанный год; Mean *N<sub>a</sub>*/locus per 5 years – среднее значение количества аллелей на локус за пятилетний период; Mean *N<sub>a</sub>*/individual per 5 year – среднее количество аллелей на особь за пятилетний период.

**Таблица 2.** Популяционно-генетические показатели русского осетра бассейна Азовского моря  
**Table 2.** Population genetic parameters of Russian sturgeon from the Sea of Azov

Номер выборки	Год	<i>n</i>	<i>H<sub>e</sub></i>	<i>H<sub>o</sub></i>	<i>F<sub>is</sub></i> per 5 years	Mean <i>H<sub>e</sub></i> per 5 years	Mean <i>H<sub>o</sub></i> per 5 years	<i>AAAB</i> , %	Mean <i>AAAB</i> , % per 5 years	<i>AAAA</i> , %	Mean <i>AAAA</i> , % per 5 years	z-тест ( <i>p</i> ≤ 0,05)
I	1999	50	0,98	0,92	0,031	0,978	0,948	0,22	0,18	0,08	0,05	0,35
	2000	50	0,97	0,94				0,18		0,06		
	2001	50	0,98	0,97				0,19		0,03		
	2002	50	0,98	0,96				0,13		0,04		
	2003	50	0,98	0,95				0,17		0,05		
II	2020	50	0,98	0,94	0,057	0,978	0,922	0,13	0,17	0,06	0,07	
	2021	50	0,98	0,94				0,19		0,06		
	2022	50	0,98	0,87				0,2		0,10		
	2023	50	0,97	0,92				0,16		0,08		
	2024	50	0,98	0,94				0,16		0,06		

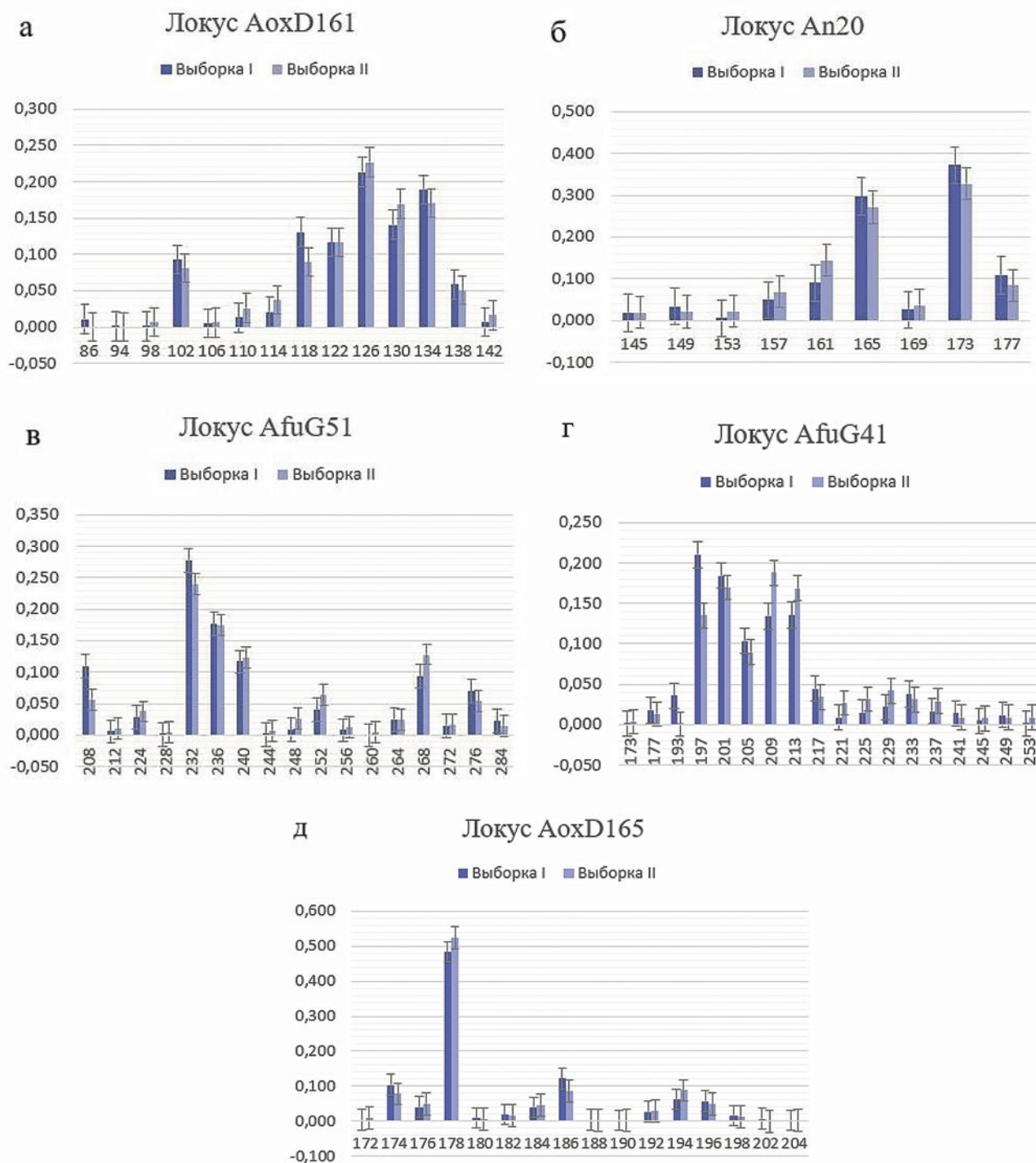
Примечание: *n* – размер выборки; *H<sub>e</sub>* – ожидаемая гетерозиготность; *H<sub>o</sub>* – наблюдаемая гетерозиготность; *F<sub>is</sub>* – коэффициент инбридинга, AAAB, % – доля слабых гетерозиготных генотипов; AAAA, % – доля гомозиготных генотипов

В локусе AoxD165 в двух выборках доминирующим является аллель размера 178 п. н., частота которого составляет 0,483 в выборке I и 0,524 в выборке II, соответственно. Аллельные варианты – 174 и 186 п.н. – продемонстрировали снижение частот встречаемости. Статистически значимые изменения частот по данным  $\chi^2$ -теста обнаружены только для трёх аллелей в следующих локусах: в локусе AfuG51 (аллель 208 п.н.) и в AfuG41 (аллель 193 и 197 п. н.). Результаты теста  $\chi^2$  для наиболее различающихся частотам аллелей представлены в табл. 3.

Проведённый анализ молекулярной дисперсии (AMOVA) показал, что подавляющая часть генетической вариации русского осетра (92,3 %) обусловлена различиями между отдельными особями в двух выборках (см. рис. 2).

Незначительная доля вариации (0,25 %) приходится на межгрупповые различия (между двумя исследованными выборками), тогда как 7,4% вариации связано с различиями между особями внутри выборок. Значение Phi-Population-total = 0,0025, что указывает на отсутствие значимой генетической дифференциации





**Рис. 1.** (а, б, в, г, д) – частоты встречаемости аллелей по пяти микросателлитным локусам в двух выборках азовской популяции русского осетра. Обозначения: по оси ординат обозначена частота аллеля в выборке, а по оси абсцисс – размер аллеля в п. н. а) локус AoxD161, б) ...

**Fig. 1.** Allele frequencies at five microsatellite loci in two samples of the Azov population of Russian sturgeon. Designations: the y-axis shows allele frequency in the sample, and the x-axis indicates allele size in base pairs (bp)

между исследованными выборками (см. табл. 4). В то же время показатели  $\Phi$ -samples-Population = 0,074 и  $\Phi$ -samples-total = 0,077 отражают умеренную внутрипопуляционную структуру, демонстрируя, что ос-

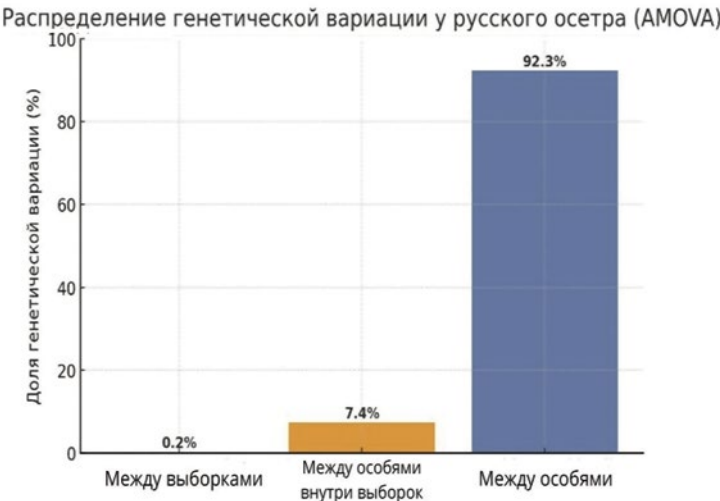
новная часть генетической вариации сосредоточена между особями внутри выборок, а не между ними.

Примечательно, что у русского осетра Каспийского моря ситуация на рыбоводных заводах более

**Таблица 3.** Изменение частот аллелей в выборках потомков природного (выборка I) и искусственного (выборка II) происхождения по пяти микросателлитным локусам с использованием  $\chi^2$ -теста

**Table 3.** Changes in allele frequencies in progeny samples of natural (sample I) and hatchery (sample II) origin at five microsatellite loci using the  $\chi^2$  test

Локус	Аллель	Частота I	Частота II	$\chi^2$	p-value ( $p < 0,05$ )
AoxD161	86	0,011	0,000	3,018	0,082
	102	0,093	0,081	0,229	0,632
	118	0,130	0,089	2,076	0,15
	134	0,189	0,171	0,217	0,641
An20	149	0,034	0,022	0,294	0,588
	177	0,109	0,084	0,83	0,362
AfuG51	208	0,110	0,056	5,095	<b>0,024</b>
	276	0,070	0,053	0,86	0,354
AfuG41	193	0,036	0,001	9,165	<b>0,0025</b>
	197	0,210	0,135	4,55	<b>0,033</b>
AoxD165	178	0,483	0,524	0,8	0,371
	186	0,121	0,087	1,374	0,241



**Рис. 2.** Результаты анализа молекулярной дисперсии (AMOVA) выборок потомков природного и искусственного происхождения

**Fig. 2.** Results of molecular variance analysis (AMOVA) of progeny samples of natural and artificial origin

**Таблица 4.** Результаты дисперсионного анализа с компонентами вариации и Phi-статистикой

**Table 4.** Results of analysis of variance with variance components and Phi-statistics

Компонент	Df	Sum Sq	Mean Sq / %	Примечание
Между выборками	1	15,11579	15,116 / 0,25%	Малый вклад
Между образцами внутри выборок	495	2463,79970	4,977 / 7,41%	Средний вклад
Внутри выборок	1491	5617,00000	3,767 / 92,34%	Наибольший вклад
Phi-samples-total	–	–	0,077	Малый размер эффекта
Phi-samples-Population	–	–	0,074	Малый размер эффекта
Phi-Population-total	–	–	0,0025	Очень малый эффект

Примечание: Df – степени свободы; Sum Sq – сумма квадратов отклонений (вариации); Mean Sq – средний квадрат.

благоприятна, по сравнению с Азовским [Secor et al. 2000]. Это объясняется тем, что сохранение генетического разнообразия и пополнение популяции обеспечивают семь осетровых заводов, в то время как в Азовском море основной вклад в поддержание русского осетра обеспечивает фактически лишь Донской осетровый завод. Среди семи ОРЗ Каспия, только у Волгоградского ОРЗ отмечена схожая с Азовским морем тенденция – на протяжении всех исследованных нерестовых кампаний наблюдается сокращение числа редких аллелей по всем анализируемым локусам, что авторы связывают с участием в оплодотворении большого числа особей заводского происхождения [Щербакова и др., 2023].

Однако важно подчеркнуть, что в силу особенностей геномной организации полиплоидных организмов, даже искусственно сформированные группы, происходящие от сравнительно небольшого числа производителей, не будут демонстрировать немедленного критического снижения генетического разнообразия вследствие инбридинга [Boscari et al., 2014]. Полиплоидия обеспечивает избыточность аллельного состава, что снижает вероятность проявления рецессивных мутаций и, как следствие, смягчает воздействие инбридинга на жизнеспособность популяции [Clo, Kolar, 2022]. С учётом того, что проведённое исследование охватывает лишь 25-летний период, зафиксированная тенденция представляет собой только начальный этап формирования популяции (первое поколение). Для полноценного понимания динамики генетического разнообразия и недопущения потенциальных последствий инбридинга необходимо продолжать систематический генетический мониторинг на протяжении следующих нескольких поколений. Кроме того, для обеспечения стабильности популяций в долгосрочной перспективе необходимо наладить обмен генетическим материалом между осетровыми хозяйствами региона, а также возобновить заготовку производителей из естественной среды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты сравнительного анализа микросателлитных данных показали, что за 25-летний период при переходе к искусственному воспроизводству от производителей из РМС генетическая изменчивость азовской популяции русского осетра сохранилась на прежнем уровне. Анализ AMOVA показал, что генетическая вариабельность в основном сконцентрирована внутри выборок, а различия между этими выборками минимальны, что также подтверждает факт сохранения генетической целостности популяции. Тем не менее, в выборке особей, чьи

родители были выращены в искусственных условиях, отмечен несущественный рост уровня инбридинга (снижение  $\text{Mean } N_a / \text{individual per 5 years}$ ,  $\text{Mean } H_o / \text{per 5 years}$ ), что подтверждается повышением доли гомозигот и коэффициента инбридинга  $F_{is}$ . Кроме того, зафиксировано статистически достоверное снижение частот редких аллельных вариантов в локусе AfuG51 и AfuG41.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

## Финансирование

Сбор и генотипирование производителей был проведён в рамках проведения прикладных научных исследований согласно государственному заданию ВНИРО № 076-00001-24-01. Анализ сравнительного генетического полиморфизма аквакультурных и природных рыб проведён при поддержке гранта Минобрнауки по развитию генетических технологий (Соглашение № 075-15-2025-479).

## ЛИТЕРАТУРА

- Барминцева А.Е., Мюге Н.С. 2013. Использование микросателлитных локусов для установления видовой принадлежности осетровых (Acipenseridae) и выявления особей гибридного происхождения // Генетика. Т. 49. № 9. С. 1093. DOI: 10.7868/S0016675813090020.
- Бугаев Л.А., небесихина Н.А., Алимova А.Ш., Гайдамаченко В.Н. 2023. Генетическое разнообразие производителей русского осетра из ремонтно-маточного стада Донского осетрового завода ФГБУ «Главрыбвод» в 2018-2023 гг. // Рациональная эксплуатация водных биологических ресурсов. Мат. Межд. науч.-техн. конф., Владивосток, 26-27 окт. 2023 г. Владивосток: Дальрыбвтуз. С. 140-146.
- Васев А.Б., Лужняк В.А., Баранова В.В. 2023. Результаты исследований азовских популяций осетровых рыб при осуществлении мониторинга промысла ставными орудиями лова у кубанского побережья // Водные биоресурсы и среда обитания. Т. 6. № 4. С. 68-78.
- Корнеев А.А., Баскакова Т.Е. 1984. Результаты размножения осетра в условиях зарегулирования стока Дона // Воспроизводство рыбных запасов Каспийского и Азовского морей. С. 54-62.
- Костюченко В.А. 1955. Биология и состояние промысла осетровых рыб Азовского моря перед зарегулированием стока рек // Труды ВНИРО. Т. 31. С. 174-187.
- Мирзоян А.В., Белоусов В.Н., Шевченко В.Н. 2023. Искусственное воспроизводство полупроходных видов рыб при разных сценариях развития гидрологической обстановки в Азовском море // Водные биоресурсы и среда обитания.

- тания. Т. 6. № 4. С. 91-108. DOI: 10.47921/2079-4418-2023-6-4-91-108.
- Реков Ю.И. 2002. Запасы азовских осетровых рыб: современное состояние и ближайшие перспективы // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоёмов Азово-Черноморского бассейна. Сб. науч. тр. (2000-2001 гг.). М.: Нацрыбресурсы. С. 265-272.
- Реков Ю.И., Тихонова Г.А., Чепурная Т.А. 2004. Перспективы восстановления запасов азовских проходных осетровых рыб за счёт естественного и искусственного воспроизводства // Проблемы естественного и искусственного воспроизводства рыб в морских и пресноводных водоёмах. Тез. докл. Межд. науч. конф. Ростов-на-Дону, 2004. Ростов-на-Дону: ЦВВР. С. 128-129.
- Реков Ю.И., Чепурная Т.А. 2018. Основные направления восстановления промысловых запасов азовских осетровых рыб // Актуальные вопросы рыболовства, рыбоводства (аквакультуры) и экологического мониторинга водных экосистем: мат. Межд. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию АзНИИРХ, Ростов-на-Дону, 11-12 дек. 2018 года. Ростов-на-Дону: АзНИИРХ. С. 211-214.
- Тимошкина Н.Н., Водолажский Д.И., Усатов А.В. 2010. Молекулярно-генетические маркеры в исследовании внутри- и межвидового полиморфизма осетровых рыб (*Acipenseriformes*) // Экологическая генетика. Т. 8. № 1. С. 12-24. DOI: 10.7868/S2072683X1001003X.
- Щербакова, В.Д., Барминцева А.Е., Сафронов А.С. 2023. Оценка генетического разнообразия стад русского осетра (*Acipenser gueldenstaedtii* Brandt, 1833) каспийской популяции семи осетровых рыбоводных заводов ФГБУ «Главрыбвод» // Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса. Мат. XI Межд. науч.-практ. конф. молодых учёных и специалистов, Санкт-Петербург, 25-26 сент. 2023 года. М.: ВНИРО. С. 243-245.
- Aljanabi S.M., Martinez I. 1997. Universal and rapid salt-extraction of high quality genomic DNA for PCR-based techniques // Nucleic Acids Research. V. 25. No. 20. P. 4692-4693. DOI: 10.1093/nar/25.22.4692.
- Birstein V.J., Bemis W.E., Waldman J. 1997. The threatened status of acipenseriform species: a summary // Sturgeon Biodiversity and Conservation / Eds. V.J. Birstein, W.E. Bemis, J. Waldman. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. P. 427-435. DOI: 10.1023/A:1007382724251.
- Boscari E., Gessner J., Piferrer F. 2014. Captive breeding programs based on family groups in polyploid sturgeon species // PLoS ONE. V. 9. No. 11. DOI: 10.1371/journal.pone.0110951.
- Clo J., Kolář F. 2022. Inbreeding depression in polyploid species: a meta-analysis // Biol Lett. V. 18. No. 12. DOI: 10.1098/rsbl.2022.0477.
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. V. 4. No. 1. P. 9. DOI: 10.26879/259.
- Kincaid H.L. 1983. Inbreeding in fish populations used for aquaculture // Aquaculture. V. 33. No. 1-4. P. 215-227. DOI: 10.1016/0044-8486(83)90402-7.
- Ortega-Villaizán M. del M., Noguchi D., Taniguchi N. 2011. Minimization of genetic diversity loss of endangered fish species captive broodstocks by means of minimal kinship selective crossbreeding // Aquaculture. V. 318. Iss. 1-2. P. 239-243. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2011.04.047.
- Secor D.H., Areffev V., Nikolaev A., Sharov A. 2000. Restoration of sturgeons: lessons from the Caspian Sea Sturgeon Ranching Programme // Fish and Fisheries. V. 1. No. 3. P. 215-230. DOI: 10.1111/j.1467-2979.2000.00021.x.

## REFERENCES

- Barmintseva A.E., Muge N.S. 2013. The use of microsatellite loci for species identification of sturgeons (*Acipenseridae*) and detection of hybrid individuals // Genetics. V. 49. No. 9. P. 1093. DOI: 10.7868/S0016675813090020. (In Russ.).
- Bugaev L.A., Nebesikhina N.A., Alimova A.Sh., Gaidamachenko V.N. 2023. Genetic diversity of Russian sturgeon broodstock from the repair-maternal stock of the Don Sturgeon Hatchery, FSBI «Glavrybvod» in 2018-2023 // Rational Use of Aquatic Biological Resources. Proc. Int. Sci-Tech. Conf., Vladivostok, 26-27 Oct. 2023. Vladivostok: Dalrybvvtuz. P. 140-146. (In Russ.).
- Vasev A.B., Luzhnyak V.A., Barinova V.V. 2023. Results of studies of Azov sturgeon populations during monitoring of the fishery using set fishing gear off the Kuban coast // Aquatic Bioresources and Environment. V. 6. No. 4. P. 68-78. (In Russ.).
- Korneev A.A., Baskakova T.E. 1984. Results of sturgeon reproduction under regulated flow conditions of the Don River // Reproduction of Fish Stocks in the Caspian and Azov Seas. P. 54-62. (In Russ.).
- Kostyuchenko V.A. 1955. Biology and state of the sturgeon fishery in the Sea of Azov before river flow regulation // Trudy VNIRO. V. 31. P. 174-187. (In Russ.).
- Mirzoyan A.V., Belousov V.N., Shevchenko V.N. 2023. Artificial reproduction of semi-anadromous fish species under different hydrological development scenarios in the Sea of Azov // Aquatic Bioresources and Environment. V. 6. No. 4. P. 91-108. DOI: 10.47921/2079-4418-2023-6-4-91-108. (In Russ.).
- Rekov Yu.I. 2002. Stocks of Azov sturgeon species: current status and near-term prospects // Main Problems of Fisheries and Protection of Fishery Water Bodies of the Azov-Black Sea Basin. Coll. Sci. Pap. (2000-2001). Moscow: Natsrybresursy. P. 265-272. (In Russ.).
- Rekov Yu.I., Tikhonova G.A., Chepurnaya T.A. 2004. Prospects for restoring stocks of Azov migratory sturgeon through natural and artificial reproduction // Problems of Natural and Artificial Reproduction of Fish in Marine and Freshwater Bodies. Abstr. Int. Sci. Conf. Rostov-on-Don, 2004. Rostov-on-Don: TsVVR. P. 128-129. (In Russ.).
- Rekov Yu.I., Chepurnaya T.A. 2018. Main directions for restoring commercial stocks of Azov sturgeon species // Current Issues of Fisheries, Fish Farming (Aquaculture) and Environmental Monitoring of Aquatic Ecosystems: Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. dedicated to the 90th anniversary of



- AzNIIRKH, Rostov-on-Don, 11-12 Dec. 2018. Rostov-on-Don: AzNIIRKH. P. 211-214. (In Russ.).
- Timoshkina N.N., Vodolazhsky D.I., Usatov A.V. 2010. Molecular genetic markers in the study of intra- and interspecific polymorphism of sturgeons (Acipenseriformes) // Ecological Genetics. V. 8. No. 1. P. 12-24. DOI: 10.7868/S2072683X1001003X. (In Russ.).
- Shcherbakova V.D., Barmintseva A.E., Safronov A.S. 2023. Assessment of genetic diversity in Russian sturgeon (Acipenser gueldenstaedtii Brandt, 1833) stocks of the Caspian population from seven sturgeon hatcheries of FSBI "Glavrybvod" // Modern Problems and Prospects for the Development of the Fisheries Complex. Proc. XI Int. Sci.-Pract. Conf. of Young Scientists and Specialists, St. Petersburg, 25-26 Sept. 2023. Moscow: VNIRO. P. 243-245. (In Russ.).
- Aljanabi S.M., Martinez I. 1997. Universal and rapid salt-extraction of high quality genomic DNA for PCR-based techniques // Nucleic Acids Research. V. 25. No. 20. P. 4692-4693. DOI: 10.1093/nar/25.22.4692.
- Birstein V.J., Bemis W.E., Waldman J. 1997. The threatened status of acipenseriform species: a summary // Sturgeon Biodiversity and Conservation / Eds. V.J. Birstein, W.E. Bemis, J. Waldman. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. P. 427-435. DOI: 10.1023/A:1007382724251.
- Boscari E., Gessner J., Piferrer F. 2014. Captive breeding programs based on family groups in polyploid sturgeon species // PLoS ONE. V. 9. No. 11. DOI: 10.1371/journal.pone.0110951.
- Clo J, Koldř F. 2022. Inbreeding depression in polyploid species: a meta-analysis // Biol Lett. V. 18. No. 12. DOI: 10.1098/rsbl.2022.0477.
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. V. 4. No. 1. P. 9. DOI: 10.26879/259.
- Kincaid H.L. 1983. Inbreeding in fish populations used for aquaculture // Aquaculture. V. 33. No. 1-4. P. 215-227. DOI: 10.1016/0044-8486(83)90402-7.
- Ortega-Villaizán M. del M., Noguchi D., Taniguchi N. 2011. Minimization of genetic diversity loss of endangered fish species captive broodstocks by means of minimal kinship selective crossbreeding // Aquaculture. V. 318. Iss. 1-2. P. 239-243. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2011.04.047.
- Secor D.H., Arefjev V., Nikolaev A., Sharov A. 2000. Restoration of sturgeons: lessons from the Caspian Sea Sturgeon Ranching Programme // Fish and Fisheries. V. 1. No. 3. P. 215-230. DOI: 10.1111/j.1467-2979.2000.00021.x.

Поступила в редакцию 03.10.2025 г.  
Принята после рецензий 17.10.2025 г.