



Научная статья/Research Article

УДК 636.1

DOI: 10.36718/1819-4036-2026-5-115-123

Лилия Владимировна Калинкова^{1✉}, Александр Витальевич Дубровин²

^{1,2}Всероссийский НИИ коневодства им. академика В.В. Калашникова, Рязань, Россия

²genlab.horses.ru@gmail.com

ПОЛИМОРФИЗМ ЛОКУСОВ EXTENSION И AGOUTI У НОВОАЛТАЙСКИХ ЛОШАДЕЙ

Цель исследования – определение генетической структуры новоалтайской породы по локусам *Extension* и *Agouti*, контролирующим пигментацию кожи и волос. Новоалтайская лошадь – порода продуктивного направления использования, разводимая табунным методом. На адаптивные качества табунных лошадей влияют многочисленные генетические факторы, в т. ч. гены, регулирующие пигментацию. Образцы волос с волосяными луковицами были собраны от 80 новоалтайских лошадей, разводимых в племенных хозяйствах Республики Алтай и Алтайского края. Образцы были генотипированы по локусам *Extension* и *Agouti* с использованием технологии PCR-RFLP. Статистическая обработка результатов проводилась с определением частоты встречаемости аллелей, показателей наблюдаемой гетерозиготности исследованных локусов и частоты встречаемости генотипов в популяции. Частота встречаемости в локусе *Extension* доминантного аллеля «Е» и рецессивного аллеля «е» составила 0,3875 и 0,6125 соответственно. В локусе *Agouti* частота встречаемости доминантного аллеля «А» равнялась 0,4875, а рецессивного аллеля «а» – 0,5125. Показатели наблюдаемой гетерозиготности составили 0,475 в локусе *Extension* и 0,500 в локусе *Agouti*. С учетом результатов тестирования по 2 локусам в исследованной группе животных было идентифицировано 9 различных вариантов генотипа, частота встречаемости которых варьировала от 0,2750 (генотип «Е/е, А/а») до 0,0375 (генотип «Е/Е, а/а»), что свидетельствует о высоком уровне полиморфизма в популяции. Наиболее популярной, основной в новоалтайской породе мастью была гнедая. Суммарная частота встречаемости в популяции четырех генотипов, ассоциированных с гнедой мастью, составила 0,4750.

Ключевые слова: домашние лошади, новоалтайская порода лошади, масти лошадей, *Extension*, *Agouti*

Для цитирования: Калинкова Л.В., Дубровин А.В. Полиморфизм локусов *Extension* и *Agouti* у новоалтайских лошадей // Вестник КрасГАУ. 2026. № 5. С. 115–123. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-5-115-123.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00105.

Liliya Vladimirovna Kalinkova^{1✉}, Alexander Vitalyevich Dubrovin²

^{1,2}All-Russian Research Institute of Horse Breeding named after Academician V.V. Kalashnikov, Ryazan, Russia

²genlab.horses.ru@gmail.com

POLYMORPHISM OF THE EXTENSION AND AGOUTI LOCI IN NOVO-ALTAI HORSES

The aim of this study was to investigate the genetic structure of the Novo-Altai breed at the Extension and Agouti loci, which control skin and hair pigmentation. The Novo-Altai horse is a productive breed kept in herds. The adaptive qualities of herd horses are influenced by numerous genetic factors, including genes regulating pigmentation. Hair samples with hair follicles were collected from 80 Novo-Altai horses bred on breeding farms in the Altai Republic and Altai Region. The samples were genotyped at the Extension and Agouti loci using PCR-RFLP technology. Statistical analysis of the results was carried out to determine the frequency of alleles, the observed heterozygosity of the studied loci, and the frequency of genotypes in the population. The frequency of the dominant allele "E" and the recessive allele "e" at the Extension locus was 0.3875 and 0.6125, respectively. At the Agouti locus, the frequency of the dominant allele "A" was 0.4875, and the recessive allele "a" was 0.5125. The observed heterozygosity values were 0.475 at the Extension locus and 0.500 at the Agouti locus. Taking into account the results of testing at 2 loci, 9 different genotype variants were identified in the studied group of animals, the frequency of which varied from 0.2750 (genotype "E/e, A/a") to 0.0375 (genotype "E/E, a/a"), indicating a high level of polymorphism in the population. The most popular basic coat color in the Novo-Altai breed was bay. The total frequency of the four genotypes associated with the bay coat colour in the population was 0.4750.

Keywords: domestic horses, Novoaltai horses, coat colours, Extension, Agouti

For citation: Kalinkova LV, Dubrovin AV. Polymorphism of the Extension and Agouti loci in Novo-Altai horses. *Bulletin of KSAU*. 2026;(5):115-123 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-5-115-123.

Funding: supported financially by Russian Science Foundation (project № 24-26-00105).

Введение. Новоалтайская лошадь – уникальная порода продуктивного направления использования, сложившаяся в конце XX в. как результат скрещивания кобыл местной алтайской породы с жеребцами специализированных тяжеловозных пород: русской, советской и литовской. В 2000 г. новоалтайская порода прошла официальную регистрацию. В настоящее время лошади этой породы разводятся животноводческими хозяйствами Алтайского края и Республики Алтай. Численность маточного поголовья составляет более 3 тысяч кобыл. Обширные пастбища и природно-климатические условия Горного Алтая идеально подходят для развития табунного коневодства. Традиции коневодства, основанного на табунном содержании животных, сохранялись местным населением с древних времен. Низкорослые и выносливые аборигенные алтайские лошади максимально приспособлены к суровым условиям содержания в табунах. При этом сформированная новоалтайская порода выгодно отличается от аборигенных алтайских лошадей скороспелостью, большей живой массой и лучшими мясными качествами при сохранении приспособленности к круглогодичному косячно-табунному содержанию на естественных пастбищах [1]. Изучение полиморфизма генов, лежащих в основе адаптивных признаков, важно для понимания того, как давление естественного и искусственного отборов формирует из-

менчивость, наблюдаемую среди различных популяций современных домашних лошадей. На адаптивные качества табунных лошадей влияют многочисленные генетические факторы. Немаловажную роль в этом могут играть гены, регулирующие пигментацию кожи и ее производных у животных.

Принято считать, что древние дикие лошади, ставшие предками всех современных домашних лошадей, вероятно, имели гнедо-саврасую масть, похожую на масть лошадей Пржевальского – единственного дикого вида, сохранившегося до наших дней [2]. В дикой природе группа лошадей гнедо-саврасой масти визуально не выделяется на фоне естественных ландшафтов, что обеспечивает дополнительную защиту от нападения хищных животных. В процессе одомашнивания лошадь трансформировалась в биологический вид, характеризующийся исключительно широким спектром вариаций мастей [3]. Проведенные генетиками исследования ДНК, полученной из сохранившегося биоматериала доисторических лошадей, показали, что многие генетические мутации, вызывающие разнообразие конских мастей, которое мы наблюдаем сегодня, быстро распространились в популяциях около 5000 лет назад, т. е. вскоре после одомашнивания [4]. Относительно быстрая эволюция механизмов регулирования пигментации у одомашненных лошадей привела к тому, что современные лошади демонстрируют

разнообразный набор фенотипов с широчайшей внутривидовой изменчивостью.

Окраску шерстного покрова у млекопитающих животных определяет пигмент меланин, содержащийся в виде пигментных гранул в волосах, коже и радужной оболочке глаза. Различают две формы меланина: эумеланин (черный пигмент) и феомеланин (красно-желтый пигмент) [2, 5]. Генетическая обусловленность вариаций окраса волос может оказывать влияние на биохимию образования пигмента, изменяя переключение между выработкой в меланоцитах эумеланина и феомеланина, а также регулировать наличие, форму, количество и расположение пигментных гранул [2]. Различные фенотипы по масти контролируются аллельными вариантами генов, которые первоначально возникли в результате случайных мутаций и впоследствии были отобраны человеком в ходе одомашнивания [6, 7].

В наше время известны многочисленные породы лошадей, в которых масть животных расценивается как один из ведущих селекционируемых признаков. В современном коннозаводстве доступно и широко применяется генетическое тестирование по генам, контролирующим пигментацию. В некоторых породах лошадей принята практика подбора родительских пар с учетом их генотипов с целью получения жеребят желаемой масти [2, 8]. К настоящему времени проведено множество исследований, идентифицирующих полиморфные варианты генов, связанных с широким спектром фенотипов пигментации у лошадей [3, 9, 10].

По информации D.P. Sponenberg и R.R. Bellone в большинстве современных пород лошадей наиболее распространена группа так называемых темных мастей, включая гнедую, рыжую и вороную [11]. Так, например, для новоалтайских лошадей характерны гнедая, рыжая различных оттенков и вороная масти. Наиболее часто среди домашних лошадей встречается гнедая масть, которая характеризуется коричневой окраской головы и корпуса в сочетании с черной окраской гривы, хвоста и конечностей ниже запястного и скакательного суставов. В большинстве пород, как правило, второй по частоте встречаемости после гнедой является рыжая масть [11]. Рыжая масть отличается равномерным окрасом головы, корпуса и конечностей в различные оттенки рыжего, при этом длинные защитные волосы (гривы и хвоста) могут быть окрашены так же, как покровные волосы, либо быть светлее. Вороная масть встреча-

ется сравнительно редко в большинстве пород лошадей и характеризуется равномерным черным окрасом головы, корпуса, конечностей, гривы и хвоста. Следует отметить, что для домашних лошадей характерно широкое разнообразие оттенков гнедой и рыжей мастей, что обусловлено действием многочисленных модифицирующих факторов, генетическая природа которых до конца не изучена [5, 11]. Гнедой фенотип может варьировать от светло-гнедой до темно-гнедой и караковой мастей. Рыжая масть может варьировать от светло-рыжей до темно-бурой. Часто фенотип гнедой и рыжей мастей модифицируется за счет появления примеси более темных волос, делая масть значительно темнее. У рыжих лошадей описан генетический фактор, действие которого осветляет защитные волосы гривы, хвоста и конечностей [5]. В коневодческих хозяйствах Российской Федерации рыжие лошади с осветленной гривой и хвостом часто встречаются в русской тяжеловозной породе, также эта масть наблюдается среди чистокровных арабских, тракененских и орловских рысистых лошадей. Также известен менее интенсивно пигментированный вариант вороной масти – так называемая «вороная в загаре», масть, при которой черные волосы имеют рыжеватый оттенок. Точная идентификация масти имеет важное значение при регистрации племенных лошадей. Иногда при описании животных бывает трудно отличить вороную в загаре масть от темно-гнедой или темно-рыжей. В этих случаях уточнить масть можно, прибегнув к генетическому тестированию [2].

Фенотипы гнедой, рыжей и вороной мастей у лошадей находятся в зависимости от взаимодействия генов двух локусов: Extension (E) и Agouti (A) [11].

Локус Extension связан с кодированием меланокортинового рецептора 1-го типа и его аллели определяют присутствие или отсутствие в волосах животных пигмента эумеланина. При этом наличие эумеланина в волосах наследуется как доминантный признак по отношению к его отсутствию. Известны два основных аллеля Extension: доминантный «E» и рецессивный «e», способные переключать меланогенез между выработкой эумеланина и феомеланина. Лошадь, гомозиготная по рецессивному аллелю локуса Extension (генотип «e/e»), имеет рыжую масть, так как у них в волосах присутствует только красно-желтый феомеланин вследствие подавления синтеза черного эумеланина [2, 5, 11]. В 1996 г. в научной литературе была описа-

на генетическая мутация, ответственная за рыжую масть у домашних лошадей, – однонуклеотидная замена в гене MC1R [12].

Локус Agouti у домашней лошади представлен двумя аллелями: доминантным «А» и рецессивным «а». Доминантный аллель «А» влияет на распределение эумеланина, значительно ограничивая его количество в покровных волосах лошади и позволяя ему накапливаться только в волосах нижней части конечностей, края ушей, гривы и хвоста, тем самым определяя фенотип гнедой масти. Рецессивный аллель «а» в гомозиготном состоянии не влияет на распределение эумеланина и в случае присутствия в генотипе лошади доминантного аллеля «Е» локуса Extension обуславливает у домашних лошадей вороную масть, характеризующуюся равномерной черной окраской волосяного покрова [2, 5, 11]. Мутация, ответственная за вороную масть у лошадей, представляет собой делецию размером в 11 п.н. в гене ASIP [13].

Совместное действие аллелей локусов Extension и Agouti отвечает за наиболее распространенные масти домашних лошадей (табл. 1) [2, 5, 11]. Гнедой фенотип может базироваться на четырех различных генотипах, так как его появление требует одновременного присутствия

в генотипе лошади доминантных аллелей «Е» и «А» локусов Extension и Agouti. Рыжий фенотип формируется в случае гомозиготности животного по рецессивному аллелю «е» локуса Extension. Рыжие лошади могут иметь три различных генотипа. Вороную масть имеют лошади, гомозиготные по рецессивному аллелю «а» локуса Agouti лишь в присутствии доминантного аллеля «Е» локуса Extension.

Гнедая масть у домашних лошадей доминирует над вороной и рыжей мастями. От двух гнедых родителей в зависимости от их генотипа можно получить жеребят гнедой, вороной и рыжей мастей. У вороной родительской пары могут рождаться вороные и рыжие жеребята, причем от двух вороных лошадей, гомозиготных по доминантному аллелю «Е» локуса Extension, рождаются только вороные жеребята. Рыжая масть домашних лошадей эпистатична ко всем прочим мастям, поэтому два рыжих родителя могут давать только рыжих жеребят [2]. Рецессивный аллель, ответственный за фенотип рыжей масти, может скрываться за фенотипом гнедых и вороных лошадей. Его наличие в генотипе можно обнаружить с помощью ДНК-теста, доступного коннозаводчикам с 1996 г. [9, 12].

Таблица 1

Взаимодействие генов локусов Extension и Agouti у домашней лошади
Interaction of genes of the Extension and Agouti loci in the domestic horse

Генотип / Genotype	Фенотип / Phenotype
E/E, A/A	Гнедая масть
E/E, A/a	
E/e, A/A	
E/e, A/a	
e/e, A/A	Рыжая масть
e/e, A/a	
e/e, a/a	
E/E, a/a	Вороная масть
E/e, a/a	

Распределение гнедых, рыжих и вороных лошадей в популяции зависит от частоты встречаемости аллелей локусов Extension и Agouti. Например, принято считать, что у большинства пород быстроаллюрных лошадей преобладает аллель «А». Известны породы лошадей, при разведении которых применяется строгий отбор по масти, что привело к элиминации определенных аллелей локусов Extension и Agouti в пределах этих пород. Например, в таких породах, как кливлендская гнедая и фризская, по

локусу Extension практически все лошади имеют генотип «E/E», при этом по локусу Agouti все кливлендские лошади имеют генотип «A/A», а все фризские лошади – генотип «a/a» [2]. При косячно-табунном методе содержания лошадей аборигенных пород, изменение частоты встречаемости аллельных вариантов генов, контролирующих пигментацию, может находиться под некоторым влиянием естественного отбора.

Цель исследования – определить генетическую структуру новоалтайской породы лошадей по локусам Extension и Agouti.

Задачи: определить частоту встречаемости аллелей в локусах Extension и Agouti у новоалтайских лошадей; установить наиболее типичные для породы генотипы.

Объекты и методы. Объектом исследования послужили лошади новоалтайской породы, разводимые в племенных коневодческих хозяйствах Республики Алтай и Алтайского края. Общая численность экспериментальной группы животных составила 80 голов. Для проведения генетических исследований полиморфизма локусов Extension и Agouti от лошадей были собраны биологические образцы – волосы с волосяными луковицами, выдернутые из гривы. Взятие проб у животных осуществлялось во время проведения зоотехнических мероприятий в табунах в соответствии с принципами, выраженными в Хельсинской декларации (Declaration of Helsinki).

Работа по генетическому тестированию проводилась на базе лабораторного оборудования центра коллективного пользования ФГБНУ

«ВНИИ коневодства имени академика В.В. Калашникова». Для экстракции ДНК был использован набор реагентов «ExtraGene™ DNA Prep 200» производства ООО «Лаборатория Изоген» (Москва, Россия). Тестирование проб ДНК проводилось по технологии PCR-RFLP с использованием методик и праймеров, описанных в научной литературе ранее (табл. 2).

Для обозначения аллелей в анализируемых локусах была использована общепринятая в иппологической литературе алфавитная номенклатура: «Е» – доминантный аллель локуса Extension, «е» – рецессивный аллель локуса Extension; «А» – доминантный аллель локуса Agouti, «а» – рецессивный аллель локуса Agouti [2, 5, 11].

Статистическая обработка результатов генотипирования лошадей проводилась с помощью программного обеспечения Microsoft Excel с определением частоты встречаемости аллелей, показателей наблюдаемой гетерозиготности в исследованных локусах и частоты встречаемости генотипов в популяции.

Таблица 2

**Последовательность праймеров, использованных для генотипирования
Primer sequences used for genotyping**

Локус / Loci	Последовательность праймеров / Primer sequence	Ссылка / Reference
Extension	F-CTGCACTCACCCATGTA R-GCAAGATTGCCATCTCCAGC	Калинкова Л.В. с соавт. [14]
Agouti	F-CTTTTGTCTCTCTTTGAAGCATTG R-GAGAAAGTCCAAGGCCTACCTTG	Rieder S. et al. [13]

Результаты и их обсуждение. Генетические исследования лошадей новоалтайской породы показали, что частота встречаемости в локусе Extension доминантного аллеля «Е» и рецессивного аллеля «е» составила 0,3875 и 0,6125 соответственно. В локусе Agouti частота встречаемости доминантного аллеля «А» равнялась 0,4875, а рецессивного аллеля «а» – 0,5125 (табл. 3). Для сравнения, у аборигенных лошадей якутской породы, разводимых табунным методом, частота встречаемости рецессивных (мутантных) аллелей в локусах Extension и Agouti отличалась и составляла 0,289 (для аллеля «е») и 0,600 (для аллеля «а») [15]. Частота встречаемости отдельных аллелей во вновь созданной породе может находиться в зависимости от генотипов животных исходных пород, а также от направленного действия отбора. Большая частота встречаемости рецес-

сивного аллеля «е» локуса Extension у новоалтайских лошадей объясняется, вероятно, тем, что в тяжеловозных породах, принявших участие при ее формировании, преобладает рыжая масть. Также следует учитывать, что табунные лошади якутской породы вынуждены выживать в более суровых природно-климатических условиях. Адаптивное значение пигментации у лошадей, содержащихся табунным методом, может быть обусловлено не только искусственным отбором, проводимым человеком, но и множеством различных давлений внешней среды, включая визуальную защиту от хищных животных, терморегуляцию, защиту от ультрафиолетового излучения.

Исследователи полагают, что среди лошадей, обитавших в дикой природе в далекой древности, был распространен один генотип – гомозиготный по диким (доминантным) аллелям

как в локусе Extension, так и в локусе Agouti [2, 4]. Созданные человеком многочисленные породы лошадей значительно различаются по частоте встречаемости мутантных (рецессивных) аллелей в локусах Extension и Agouti. В 2022 г. F. Avila, et al. представили данные по частоте встречаемости аллелей генов, контролирующих пигментацию у современных домашних лошадей, основанные на результатах генотипирования более 11 тысяч лошадей 28 различных пород [16]. Согласно этим данным, частота встречаемости рецессивного мутантного аллеля «e» локуса Extension варьировала от 0,76 (в группе американских пони) до 0,12 (в группе тяжеловозов першеронской породы). Наивысшие показатели частоты встречаемости рецессивного мутантного аллеля «a» локуса Agouti наблюдались у першеронов (0,99), в по-

роде цыганский ваннер (0,92), у лошадей скалистых гор (0,87), у тенесийских прогулочных лошадей (0,86) и в породе цыганский коб (0,82). Минимальные в рамках исследования показатели частоты встречаемости доминантного аллеля «A» в локусе Agouti были выявлены в чистокровной верховой породе лошадей (0,24) и у лошадей фьордской породы (0,24) [16]. Важно отметить, что во всех вышеперечисленных породах, за исключением чистокровной верховой, масть представляет собой важный селекционируемый признак, находящийся под давлением целенаправленного искусственного отбора. Например, в першеронской породе ведется интенсивный отбор по вороной и серой мастям, этим объясняется преобладание в породе доминантного аллеля «E» в локусе Extension и рецессивного аллеля «a» в локусе Agouti [16].

Таблица 3

Полиморфизм локусов Extension и Agouti в новоалтайской породе лошадей (n = 80)
Polymorphism of the Extension and Agouti loci in the Novo-Altai horse breed (n = 80)

Локус / Loci	Аллель / Allele	Частота встречаемости аллелей / Frequency of the alleles	Наблюдаемая гетерозиготность / Observed heterozygosity
Extension	E	0,3875	0,4750
	e	0,6125	
Agouti	A	0,4875	0,5000
	a	0,5125	

С учетом двух биаллельных локусов Extension и Agouti фенотипы гнедой, рыжей и вороной мастей могут контролироваться 9 различными вариантами генотипа (см. табл. 1). По результатам нашего исследования в группе из 80 протестированных новоалтайских лошадей были обнаружены все возможные 9 вариантов генотипа, что указывает на высокий уровень

разнообразия в породе (табл. 4). Аналогичное тестирование группы из 80 лошадей чистокровной арабской породы, проведенное нами ранее, показало наличие лишь 6 генотипов. При этом у исследованных арабских лошадей отсутствовали такие генотипы, как «E/E, A/a», «e/e, a/a» и «E/E, a/a», что обуславливает большую редкость вороной масти в породе [17].

Таблица 4

Генотипы новоалтайских лошадей по локусам Extension и Agouti (n = 80)
Genotypes of Novo-Altai horses for the Extension and Agouti loci (n = 80)

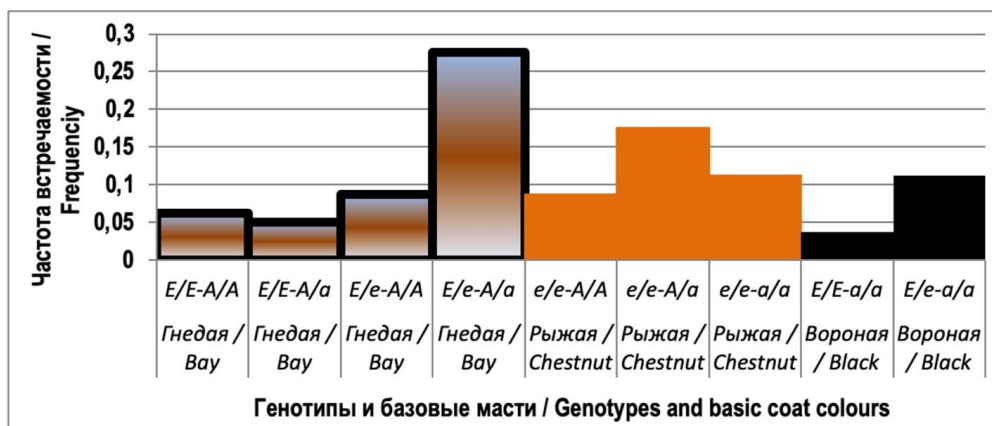
Генотип / Genotype	Число животных / Number of animals	Встречаемость генотипов в популяции / Frequency of the genotypes in the population
E/E, A/A	5	0,0625
E/E, A/a	4	0,0500
E/E, a/a	3	0,0375
E/e, A/A	7	0,0875
E/e, A/a	22	0,2750
E/e, a/a	9	0,1125
e/e, A/A	7	0,0875
e/e, A/a	14	0,1750
e/e, a/a	9	0,1125

По результатам настоящего исследования наиболее популярной в новоалтайской породе базовой мастью была гнедая. При этом чаще всего среди протестированных лошадей встречался гетерозиготный генотип «E/e, A/a» (27,50 % животных). Суммарная частота встречаемости в популяции новоалтайских лошадей четырех генотипов, ассоциированных с гнедой мастью, составила 0,4750 (рис.). Гнедая масть очень широко распространена в многочисленных породах лошадей различного географического происхождения [5, 11]. Считается, что эта масть преобладает среди лошадей большинства современных заводских быстроаллюрных пород, например в чистокровной верховой, стандартbredной и в группе полукровных спортивных.

Достаточно часто у протестированных новоалтайских лошадей (17,50 % поголовья) встречался генотип «e/e, A/a», ассоциированный с рыжей мастью. Суммарная частота встречаемости в популяции генотипов, определяющих рыжую масть, составила 0,3750.

Частота встречаемости в популяции новоалтайских лошадей двух генотипов, определяющих вороную масть, составила 0,1500. Генотип

«E/e, a/a» имели 11,25 % протестированных лошадей. Наименьшую частоту встречаемости в новоалтайской породе имел генотип «E/E, a/a», ассоциированный с вороной мастью (3,75 % протестированного поголовья). Нужно отметить, что генотип «E/E, a/a» считается исключительно редким для большинства пород лошадей. Интересно, что при этом он характерен для аборигенных лошадей Якутии, вынужденных выживать в суровых реалиях табунного содержания на Севере. Согласно результатам генотипирования, более 22 % лошадей якутской породы являются носителями генотипа «E/E, a/a», что, вероятно, может быть связано с его адаптивным преимуществом в северных условиях [15]. Также этот генотип преобладает в генофонде заводских пород, специализирующихся на получении лошадей вороной масти, например у фризгов, демонстрируя, как односторонний искусственный отбор, проводимый в заводских породах, может сопровождаться снижением генетического разнообразия вследствие увеличения частоты встречаемости отдельных аллелей, способствующих формированию желаемого фенотипа у животных [2].



Частота встречаемости различных генотипов по локусам Extension и Agouti у новоалтайских лошадей (n = 80)

Frequency of different genotypes at the Extension and Agouti loci in Novo-Altai horses (n = 80)

Заключение. Проведенное нами исследование генетической структуры новоалтайской породы лошадей по локусам Extension и Agouti показало, что частота встречаемости в них рецессивных (мутантных) аллелей «e» (локус Extension) и «a» (локус Agouti) составила 0,6125 и 0,5125 соответственно. С учетом двух биаллельных локусов в породе были выявлены все возможные 9 вариантов генотипов, частота

встречаемости которых варьировала от 0,2750 (генотип «E/e, A/a») до 0,0375 (генотип «E/E, a/a»). Суммарная частота встречаемости четырех генотипов, контролирующей гнедую масть, составила 0,4750. Суммарная частота встречаемости в породе генотипов, связанных с рыжей и вороной мастью, составила 0,3750 и 0,1500 соответственно.

Список источников

1. Калашников Р.В., Калашников В.В. Табунное коневодство России // Коневодство и конный спорт. 2011. № 5. С. 6–9. EDN: OWNZWD.
2. Bailey E.F., Brooks S.A. Horse genetics, 3rd edition. CABI, 2020.
3. Liu X., Peng Y., Zhang X., et al. Coloration in Equine: Overview of Candidate Genes Associated with Coat Color Phenotypes // *Animals*. 2024. Vol. 14, N 12. P. 1802. DOI: 10.3390/ani14121802. EDN: IPYHCV.
4. Ludwig A., Pruvost M., Reissmann M., et al. Coat color variation at the beginning of horse domestication // *Science*. 2009. Vol. 324, N 5926. P. 485. DOI: 10.1126/science.1172750. EDN: MNGRQZ.
5. Reissmann M. Die Farben der Pferde. Cadmos, 2009.
6. Librado P., Gamba C., Gaunitz C., et al. Ancient genomic changes associated with domestication of the horse // *Science*. 2017. Vol. 356, N 6336. P. 442–445. DOI: 10.1126/science.aam5298. EDN: XNKBSA.
7. Linderholm A., Larson G. The role of humans in facilitating and sustaining coat colour variation in domestic animals // *Seminars in Cell & Developmental Biology*. 2013. Vol. 24, N 6–7, P. 587–593. DOI: 10.1016/j.semcd.2013.03.015. EDN: RHFYAB.
8. Rieder S. Molecular tests for coat colours in horses // *Journal of Animal Breeding and Genetics*. 2009. Vol. 126, N 6. P. 415–424. DOI: 10.1111/j.1439-0388.2009.00832.x. EDN: MYOLBH.
9. Chowdhary B.P. Equine genomics. Wiley-Blackwell, 2013.
10. McFadden A., Vierra M., Martin K., et al. Spotting the Pattern: A review on white coat color in the domestic horse // *Animals*. 2024. Vol. 14, N 3. Art. 451. DOI: 10.3390/ani14030451 EDN: KFQRAP.
11. Sponenberg D.P., Bellone R. Equine color genetics. Willey-Blackwell, 2017.
12. Marklund L., Moller M.J., Sandberg K., et al. A missense mutation in the gene for melanocyte-stimulating hormone receptor (MC1R) is associated with the chestnut coat color in horses // *Mammalian Genome*. 1996. N 7. P. 895–899. DOI: 10.1007/s003359900264. EDN: GIOWPE.
13. Rieder S., Taourit S., Mariat D., et al. Mutations in the agouti (ASIP), the extension (MC1R), and the brown (TYRP1) loci and their association to coat color phenotypes in horses (*Equus caballus*) // *Mammalian Genome*. 2001. N 12. P. 450–455. EDN: ATDQSD.
14. Калинкова Л.В., Купцова Н.А. Генетическая характеристика российской популяции немецких классических пони по STR-локусам и генам, влияющим на масть // *Сельскохозяйственная биология*. 2024. Т. 59, № 6. С. 1108–1117. DOI: 10.15389/agrobiology.2024.6.1108rus. EDN: LEKVOG.
15. Калинкова Л.В., Зайцев А.М., Иванов Р.В. Генетическая структура локальной популяции лошадей якутской породы по генам MC1R, ASIP, DMRT3 и MSTN // *Сельскохозяйственная биология*. 2022. Т. 57, № 2. С. 272–282. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.2.272rus. EDN: DSAGID.
16. Avila F., Hughes S.S., Magdesian K.G., et al. Breed Distribution and Allele Frequencies of Base Coat Color, Dilution, and White Patterning Variants across 28 Horse Breeds // *Genes*. 2022. Vol. 13, N 9. Art. 1641. DOI: 10.3390/genes13091641. EDN: TYVXSK.
17. Калинкова Л.В. Изучение полиморфизма генов ASIP и MC1R у лошадей арабской породы // *Генетика и разведение животных*. 2020. № 2. С. 50–53. DOI: 10.31043/2410-2733-2020-2-50-53. EDN: PCRHUJ.

References

1. Kalashnikov RV, Kalashnikov VV. Herd horse breeding in Russia. *Konevodstvo i konnyi sport*. 2011;5:6-9 (In Russ.).
2. Bailey EF, Brooks SA. Horse genetics, 3rd edition. CABI, 2020.
3. Liu X, Peng Y, Zhang X, et al. Coloration in Equine: Overview of Candidate Genes Associated with Coat Color Phenotypes. *Animals*. 2024;14(12):1802. DOI: 10.3390/ani14121802. EDN: IPYHCV.
4. Ludwig A, Pruvost M, Reissmann M, et al. Coat color variation at the beginning of horse domestication. *Science*. 2009;324(5926):485. DOI: 10.1126/science.1172750. EDN: MNGRQZ.
5. Reissmann M. Die Farben der Pferde. Cadmos, 2009.

6. Librado P, Gamba C, Gaunitz C, et al. Ancient genomic changes associated with domestication of the horse. *Science*. 2017;356(6336):442-445. DOI: 10.1126/science.aam5298. EDN: XNKBSA.
7. Linderholm A, Larson G. The role of humans in facilitating and sustaining coat colour variation in domestic animals. *Seminars in Cell & Developmental Biology*. 2013;24(6-7):587-593. DOI: 10.1016/j.semcdb.2013.03.015. EDN: RHFYAB.
8. Rieder S. Molecular tests for coat colours in horses. *Journal of Animal Breeding and Genetics*. 2009;126(6):415-424. DOI: 10.1111/j.1439-0388.2009.00832.x. EDN: MYOLBH.
9. Chowdhary BP. Equine genomics. Wiley-Blackwell; 2013.
10. McFadden A, Vierra M, Martin K, et al. Spotting the Pattern: A review on white coat color in the domestic horse. *Animals*. 2024;14(3):451. DOI: 10.3390/ani14030451. EDN: KFQRAP.
11. Sponenberg DP, Bellone R. *Equine color genetics*. Wiley-Blackwell; 2017.
12. Marklund L, Moller MJ, Sandberg K, et al. A missense mutation in the gene for melanocyte-stimulating hormone receptor (MC1R) is associated with the chestnut coat color in horses. *Mammalian Genome*. 1996;7:895-899. DOI: 10.1007/s003359900264. EDN: GIOWPE.
13. Rieder S, Taourit S, Mariat D, et al. Mutations in the agouti (ASIP), the extension (MC1R), and the brown (TYRP1) loci and their association to coat color phenotypes in horses (*Equus caballus*). *Mammalian Genome*. 2001;12:450-455. DOI: 10.1007/s003350020017. EDN: ATDQSD.
14. Kalinkova LV, Kuptsova NA. Genetic characterization of the Russian population of German classic ponies by STR loci and genes affecting coat colour. *Agricultural Biology*. 2024;59(6):1108-1117 (In Russ.). DOI: 10.15389/agrobiol.2024.6.1108rus. EDN: LEKVOG.
15. Kalinkova LV, Zaitsev AM, Ivanov RV. Genetic structure of the local Yakutian horse population for genes MC1R, ASIP, DMRT3, and MSTN. *Agricultural Biology*. 2022;57(2):272-282 (In Russ.). DOI: 10.15389/agrobiol.2022.2.272rus. EDN: DSAGID.
16. Avila F, Hughes SS, Magdesian KG, et al. Breed distribution and allele frequencies of base coat color, dilution, and white patterning variants across 28 horse breeds. *Genes*. 2022;13(9):1641. DOI: 10.3390/genes13091641. EDN: TYVXSK.
17. Kalinkova LV. Study of polymorphism of the ASIP and MC1R genes in Arabian horses. *Genetics and breeding of animals*. 2020;2:50-53 (In Russ.). DOI: 10.31043/2410-2733-2020-2-50-53. EDN: PCRHUJ.

Статья принята к публикации 08.12.2025 / The article accepted for publication 08.12.2025.

Информация об авторах:

Лилия Владимировна Калинкова, ведущий научный сотрудник лаборатории генетики, кандидат сельскохозяйственных наук

Александр Витальевич Дубровин, заместитель директора, кандидат сельскохозяйственных наук

Information about the author:

Liliya Vladimirovna Kalinkova, Leading Researcher, Genetics Laboratory, Candidate of Agricultural Sciences

Alexander Vitalyevich Dubrovin, Deputy Director, Candidate of Agricultural Sciences

