

sperm injection using tail-cut spermatozoa / B. Wang [et al] // *Zygote*. – 2003. – Vol. 11. – P. 219–227. – DOI: 10.1017/s0967199403002260.

10. Условия подготовки ооцитов крупного рогатого скота к проведению микроманипуляций вне организма / А. И. Ганджа [и др.] // *Зоотехническая наука Беларуси : сб. науч. тр. – Жодино, 2022. – Т. 57, ч. 1 : Генетика, разведение, селекция, биотехнология размножения и воспроизводство. Технология кормов и кормления, продуктивность. – С. 60-68. – DOI: 10.47612/0134-9732-2022-57-1-60-68.*

11. Условия подготовки сперматозоидов быков для проведения интрацитоплазматической инъекции / Л. Л. Леткевич [и др.] // *Зоотехническая наука Беларуси : сб. науч. тр. – Жодино, 2023. – Т. 58, ч. 1 : Генетика, разведение, селекция, биотехнология размножения и воспроизводство. Технология кормов и кормления, продуктивность. – С. 102-110.*

Поступила 8.02.2024 г.

УДК 636.4.082.12:004

К.В. НЕВАР

БИОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СЕЛЕКЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СЕЛЕКЦИОНИРУЕМЫХ ПРИЗНАКОВ ПОПУЛЯЦИИ ПЛЕМЕННЫХ СВИНЕЙ

*Научно-практический центр национальной академии наук Беларуси
по животноводству, г. Жодино, Республика Беларусь*

В статье представлены материалы исследований, целью которых было разработать биометрические модели и провести расчёт селекционно-генетических параметров селекционируемых признаков популяции племенных свиней. На основании дисперсионного анализа системных факторов среды разработаны оптимальные уравнения прогноза (биометрические модели) развития селекционируемых признаков племенных свиней. В ходе дисперсионного анализа фиксированных факторов репродуктивных признаков свиноматок материнских пород установлено, что средние значения всех признаков в разрезе факторов имели значительные различия по всем исследуемым вариантам моделей. На основе разработанных оптимальных статистических моделей, описывающих развитие селекционируемых признаков, определены компоненты общей дисперсии, а также наследуемая (аддитивная) генетическая часть общей фенотипической изменчивости – коэффициенты наследуемости.

Ключевые слова: дисперсионный анализ, племенная ценность, биометрические модели, BLUP, племенное свиноводство.

**BIOMETRIC MODELS AND SELECTION-GENETIC
PARAMETERS OF SELECTABLE TRAITS OF BREEDING
PIG POPULATION**

*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of
Belarus for Animal Breeding, Zhodino, Republic of Belarus*

The article contains the materials of research, the purpose of which was to develop biometric models and to carry out the calculation of selection-genetic parameters of selectable traits of breeding pig population. Based on variance analysis of systemic environmental factors, optimal forecast equations (biometric models) for the development of selectable traits of breeding pigs were elaborated. In the course of variance analysis of fixed factors of reproductive traits of maternal breed sows, it was found that the average values of all traits in the context of factors had significant differences in all studied variants of models. On the basis of the developed optimal statistical models describing the development of selectable traits, the components of the total variance, as well as the inherited (additive) genetic part of the total phenotypic variability - inheritance coefficients - were determined.

Keywords: variance analysis, breeding value, biometric models, BLUP, pedigree pig breeding.

Введение. Расчёт племенной (генетической) ценности свиней является неотъемлемой частью селекционных программ генетического улучшения популяции. Любое животное в популяции имеет абсолютную фенотипическую ценность (y), которая может быть выражена как отклонение от популяционной средней μ и обозначена условным символом P :

$$P = y - \mu$$

Фенотипическое проявление признака у животного определяется генетическими факторами и факторами окружающей среды и может быть описано следующей моделью [1]:

Фенотип (P) = генетические эффекты (G) + средовые эффекты (U)

Генетические эффекты (G) включают аддитивные эффекты генов (A), эффекты доминирования (D) и эпистаза (I), средовые эффекты (U) – систематические факторы внешней среды (B) и случайные средовые факторы (E).

Принимая во внимание составляющие генетических и средовых факторов, модель фенотипической ценности животного по признаку y можно записать следующим образом:

$$y = \mu + A + D + I + B + E$$

Аддитивная генетическая ценность A (или a) или средний эффект генов, полученных от родителей, является истинной племенной ценностью. В практическом животноводстве селекция проходит по рассчитанным оценкам племенной генетической ценности (EBV – estimating breeding values), которые могут быть получены из различных источников информации (собственной продуктивности, продуктивности предков и (или) потомков и др.) [2].

Henderson C.R. разработал методологию, названную лучшим линейным несмещенным прогнозом (BLUP), позволяющую оценивать фиксированные эффекты и племенную ценность одновременно [3]. Если родственные связи между оцениваемыми животными включены в процедуру расчёта, то метод BLUP эквивалентен селекционному индексу с дополнительной способностью эффективно оценить и стандартизировать данные оценки признаков племенной ценности на фиксированные эффекты. В отсутствие фиксированных эффектов BLUP идентичен селекционному индексу, используемому для прогноза все известные родственные связи пробанда [4].

На основе данных, полученных при расчёте уравнения смешанной модели (Mixed Model Equations, ММЕ), можно проводить селекцию (отбор) в оцениваемой популяции. Разработка смешанной модели оценки животных методом BLUP проводится с учётом условий, характерных для страны, отдельных регионов и даже племенных ферм, может быть отдельно по каждому блоку признаков (репродуктивные, откормочные, мясные), так и с одновременным учетом всех селекционируемых признаков. Поэтому нельзя использовать в селекции (отборе) животных, оценка которых получена на другой популяции [3].

Следует различать статистический метод BLUP и модель, которая используется для описания данных. Метод представляет собой способ расчёта, учитывающий в оцениваемых значениях влияние причинных факторов. Модель причинные факторы, оказывающие влияние на продуктивность [5].

Для расчёта племенной ценности животного на основе BLUP используются различные модели. Старейшей формой учёта является так называемая отцовская модель (BLUP SM), в которой племенная ценность рассчитывается только для хряков, имеющих потомков. В оценке племенной ценности используются данные о продуктивности всех потомков одного отца. Недостатком данного способа является отсутствие учёта влияния матерей потомков. Если каждый хряк спаривается со случайными свиноматками, это не так существенно. Однако если хряк спаривается только с лучшими свиноматками, то доля свиноматок в продуктивности потомства будет приписываться исключительно хряку,

следствием чего могут быть искажённые значения племенной ценности [5].

Более совершенной формой учета явилась отцовская модель с матрицей родства, в которой при расчёте племенной ценности хряка учитывается информация о его отце, братьях и других родственниках в соответствии со степенью родства. Это привело к существенному повышению точности оценки племенной ценности, прежде всего для животных, имеющих мало потомков. Кроме того, такая модель позволила существенно снизить влияние уровня спаривания, так как доля собственных потомков в полученном значении племенной ценности стала несколько ниже.

Наиболее современной и эффективной формой BLUP оценки племенной ценности является так называемая модель животного (BLUPAM). В такой модели для каждого животного, будь то хряк или свиноматка, или потомок, решается уравнение. Так как каждое животное представлено своим собственным уравнением, не происходит потери информации. Кроме того, уровень спаривания перестаёт играть роль [5].

Эволюция метода BLUP для расчёта истинной племенной (генетической ценности) обусловлена устойчивым увеличением вычислительной мощности и развилась от простых моделей, например основанной на прогнозировании по данным родителей, к более сложным моделям, таким как BLUP AM, материнские, многомерные и случайные модели регрессии.

Метод наилучшего линейного несмещённого прогноза (BLUP) по настоящее время считается наиболее теоретически обоснованным методом, позволяющим с минимальной ошибкой оценить племенные (генетические) качества оцениваемых животных. Данная методология прошла целый ряд усовершенствований от модели «отцов» BLUP SM, к модели «животного» BLUP AM и в настоящее время является традиционным методом оценки племенной (генетической) ценности сельскохозяйственных животных в большинстве стран мира [2, 3, 5, 6, 7].

Цель работы – разработать биометрические модели и провести расчёт селекционно-генетических параметров селекционируемых признаков популяции племенных свиней.

Материал и методика исследований. Расчёты проведены на основе сформированной на предыдущем этапе исследований базы данных оценки по собственной продуктивности отцовских и материнских пород и репродуктивных признаков материнских пород по следующим признакам продуктивности: среднесуточный прирост от рождения до живой массы 100 кг, количество сосков, толщина шпика, содержание

постного мяса, многоплодие, многоплодие скорректированное, живая масса гнезда при рождении, количество поросят при отъёме, вес гнезда при отъёме.

Дисперсионный анализ выполнен с использованием статистической среды R для определения значимости фиксированных эффектов методом ANOVA [8].

Цель дисперсионного анализа – разложить общую фенотипическую изменчивость признака на компоненты: изменчивость, вызванную воздействием учтенных в биометрической модели факторов, и остаточную изменчивость, возникшую под влиянием всех неучтенных факторов.

Каждое наблюдение используется для одновременной оценки всех факторов и их взаимодействий. Влияние фактора признаётся значимым, если соответствующая ему выборочная дисперсия значимо отличается от дисперсии воспроизводимости, обусловленной случайными ошибками [9].

Для оценки компонентов дисперсии определяется оптимальная статистическая модель, описывающая развитие селекционируемых признаков для конкретной популяции в конкретной среде, так как влияние среды уникально в конкретном времени и месте, а генетическая изменчивость для признака может различаться в разных популяциях.

Информационные критерии (AIC, BIC) используются как меры относительного качества статистических моделей с учётом используемого количества оцениваемых параметров и основаны на компромиссе между точностью и сложностью модели [9]. Критерий выбора оптимальной модели – информационный критерий Акаике (AIC), согласно которому выбирается модель, минимизирующая значение статистики. Минимальное значение Байесовского информационного критерия (BIC) соответствует наилучшей модели. Информационные критерии рассчитывались в среде R.

Исследуемые фиксированные факторы: «Пол», «Порода», «Хозяйство (страна) рождения», «Хозяйство собственник», «Год теста», «Хозяйство-Год-Сезон», «Хозяйство-Год» для признаков собственной продуктивности; «Порода», «Хозяйство», «Номер опороса», «Год опороса», «Хозяйство-Год-Сезон», «Хозяйство-Год». Фактор «Хозяйство-Год-Сезон» для признаков продуктивности создан путём объединения хозяйства (страны) рождения, года и сезона тестирования, для репродуктивных признаков сформирован путём объединения хозяйства, года и сезона опороса. Рассматривались четыре сезона тестирования или опороса: зима (декабрь-февраль), весна (март-май), лето (июнь-август), осень (сентябрь-ноябрь).

Для расчёта генетической и случайной изменчивости и

наследуемости селекционируемых признаков материнских пород свиней на основе оптимальных смешанных линейных моделей использована программа для оценки компонентов дисперсии AIREMLF90 пакета программ BLUPF90 [10].

Алгоритм AI (AI REML) – это итерационный метод, для которого требуются начальные значения компонентов дисперсии. В первом раунде алгоритм создаёт новые значения на основе начальных. В последующем раунде новые значения берутся из предыдущих. Ожидается, что после нескольких итераций значения будут достаточно близки к оценкам компонентов дисперсии. AIREMLF90 принимает тот же файл параметров, что и BLUPF90.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Проведён дисперсионный анализ системных факторов среды, разработаны оптимальные уравнения прогноза (биометрические модели) развития селекционируемых признаков племенных свиней.

В результате выполненного дисперсионного анализа (ANOVA) по признакам собственной продуктивности отцовских пород (таблица 1) установлено, что фактор «Порода» и «Год теста» не повлияли на признак количество сосков и фактор «Порода» не оказал влияние на признак содержание постного мяса: $p\text{-value}=0,3594$. По остальным признакам все исследуемые факторы значимо влияли на фенотипическое проявление всех признаков продуктивности (таблица 1).

Таблица 1 – Дисперсионный анализ влияния факторов среды на формирование признаков собственной продуктивности отцовских пород

Факторы модели	Среднесуточный прирост				Количество сосков			
	df	SSq	F-критерий	P (>F)	df	SSq	F-критерий	P (>F)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пол	1	22408	4,889	0,027	1	58,72	184,852	0,0001
Порода	1	316650	69,091	0,0001	1	0,11	0,348	0,5548
Хозяйство (страна) рождения	4	117446	6,407	0,0001	5	7,51	4,725	0,0001
Хозяйство собственник	1	45642	9,9588	0,001	2	6,46	10,171	0,0001
Год теста	11	3504927	69,523	0,0001	11	4,97	1,422	0,1559
Хозяйство-Год-Сезон	33	689577	4,5594	0,0001	72	28,06	1,227	0,1
ХозяйствоГод	-	-	-	-	10	5,58	1,747	0,1
Факторы модели	Толщина шпика				Содержание постного мяса			
	df	SSq	F-критерий	P (>F)	df	SSq	F-критерий	P (>F)

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пол	1	14851	8563,247	0,0001	1	69,35	55,881	0,0001
Порода	1	2352	779,771	0,0001	1	1,04	0,841	0,3594
Хозяйство (страна) рождения	4	57679	8314,489	0,0001	3	365,57	98,189	0,0001
Хозяйство собственник	2	57333	16529,366	0,0001	1	73,06	58,870	0,0001
Год теста	11	209	10,969	0,0001	11	186,40	13,654	0,0001
Хозяйство-Год-Сезон	72	395	3,161	0,0001	33	173,47	4,236	0,0001
Хозяйство-Год	10	92	4,973	0,0001	-	-	-	-

Таблица 2 – Дисперсионный анализ влияния факторов среды на формирование признаков собственной продуктивности материнских пород

Факторы модели	Среднесуточный прирост				Количество сосков			
	df	SSq	F-критерий	P (>F)	df	SSq	F-критерий	P (>F)
Пол	1	4137237	1882,42	0,0001	1	50,9	107,108	0,0001
Порода	4	17659367	2008,73	0,0001	4	521,1	273,988	0,0001
Хозяйство (страна) рождения	14	10813233	351,426	0,0001	15	2344,2	328,653	0,0001
Хозяйство собственник	3	183524	27,834	0,0001	3	0,006	0,0035	1
Год теста	14	4853867	157,749	0,0001	14	311,6	46,802	0,0001
Хозяйство-Год-Сезон	187	12708582	30,922	0,0001	239	1323,1	11,642	0,0001
Факторы модели	Толщина шпика				Содержание постного мяса			
	df	SSq	F-критерий	P (>F)	df	SSq	F-критерий	P (>F)
Пол	1	59234	23272,265	0,0001	1	10254	4632,233	0,0001
Порода	3	1996117	261417,28	0,0001	2	22314	5040,162	0,0001
Хозяйство (страна) рождения	13	91698	2771,306	0,0001	12	88889	3346,323	0,0001
Хозяйство собственник	2	126	24,773	0,0001	2	23	5,2033	0,001
Год теста	14	13172	369,639	0,0001	14	13898	448,454	0,0001
Хозяйство-Год-Сезон	183	42432	91,100	0,0001	137	30378	100,171	0,0001

Проведённый дисперсионный анализ фиксированных факторов репродуктивных признаков свиноматок материнских пород показал, что средние значения всех признаков в разрезе факторов имели значительные различия по всем исследуемым вариантам моделей.

На основе расчёта информационных критериев по различным вариантам выбраны оптимальные варианты моделей, имеющие

минимальный критерий. Для выбора оптимальной модели протестировано для каждого признака собственной продуктивности отцовских и материнских пород 12 статистических моделей с различными комбинациями фиксированных факторов. Для репродуктивных признаков проанализировано 20 моделей с различными комбинациями факторов и регрессии на номер опороса. Модели с комбинированным фактором «Хозяйство-Год-Сезон» оказались предпочтительней моделей с фактором «Хозяйство-Год».

Для признаков собственной продуктивности отцовских пород среднесуточный прирост, толщина шпика, содержание постного мяса определена следующие регрессионная модель – формула (4):

$$y_{ijklmp} = S_j + B_k + H_l + F_m + HYS_p + a_i + e_{ijklmp} \quad (4)$$

Модель для признака количество сосков – формула (5):

$$y_{ijklmn} = S_j + B_k + H_l + F_m + Y_n + a_i + e_{ijklmn} \quad (5)$$

где $y_{ijklmnp}$ – продуктивность i -ого животного, j -ого пола, k -ой породы, l -ого хозяйства (страны) рождения, m -ого хозяйства собственника, n -го года тестирования, p -го хозяйство-год-сезон

S_j – эффект пола (фиксированный);

B_k – эффект породы (фиксированный);

H_l – эффект хозяйства (страны) рождения (фиксированный);

F_m – эффект хозяйства собственника (фиксированный);

Y_n – эффект года теста (фиксированный);

HYS_p – фиксированный эффект хозяйство-год-сезон

a_i – эффект i -ого животного (рандомизированный);

e_{ijklmn} – эффект неучтенных факторов.

Для признаков собственной продуктивности материнских пород среднесуточный прирост, толщина шпика, содержание постного мяса определены регрессионные модели – уравнение (6):

$$y_{ijklmp} = S_j + B_k + H_l + F_m + HYS_p + a_i + e_{ijklmp} \quad (6)$$

Для признака количество сосков – формула (7):

$$y_{ijklp} = S_j + B_k + H_l + HYS_p + a_i + e_{ijklp} \quad (7)$$

где $y_{ijklmnp}$ – продуктивность i -ого животного, j -ого пола, k -ой породы, l -ого хозяйства (страны) рождения, m -ого хозяйства собственника, n -го года тестирования, p -го хозяйство-год-сезон;

S_j – эффект пола (фиксированный);

B_k – эффект породы (фиксированный);

H_l – эффект хозяйства (страны) рождения (фиксированный);

F_m – эффект хозяйства собственника (фиксированный);

Y_n – эффект года теста (фиксированный);

HYS_p – фиксированный эффект хозяйство-год-сезон

a_i – эффект i -ого животного (рандомизированный);

e_{ijklmn} – эффект неучтённых факторов.

Для всех репродуктивных признаков материнских пород определена следующая оптимальная модель – формула (8):

$$y_{ikmnp} = B_k + F_m + R_t + Y_n + HYS_p + a_i + e_{ikmnp} \quad (8)$$

где y_{ikmnp} – продуктивность i -ого животного, k -ой породы, m -ого хозяйства, n -ого года опороса, p -ого фактора хозяйство-год-сезон;

B_k – эффект породы (фиксированный);

F_m – эффект хозяйства собственника (фиксированный);

R_t – эффект номера опороса (фиксированный);

Y_n – эффект года опороса (фиксированный);

HYS_p – фиксированный эффект хозяйство-год-сезон;

a_i – эффект i -ого животного (рандомизированный);

e_{ikmnp} – эффект неучтённых факторов.

На основе разработанных моделей будут рассчитаны общая генотипическая и средовая изменчивость, а затем выполнена генетическая оценка BLUP AM.

По установленной для каждого признака оптимальной модели проведен расчет аддитивной и случайной вариации, и на их основе рассчитан коэффициент наследуемости (таблица 3).

Таблица 3 – Селекционно-генетические параметры и коэффициенты наследуемости селекционируемых признаков

Признак	Однопризнаковая биометрическая модель	σ_a^2	σ_e^2	h^2
1	2	3	4	5
признаков собственной продуктивности отцовских пород				
Среднесуточный прирост	$y_{ijklmp} = S_j + B_k + H_l + F_m + HYS_p + a_i + e_{ijklmp}$	1600,7	3091,2	0,34
Количество сосков	$y_{ijklmn} = S_j + B_k + H_l + F_m + Y_n + a_i + e_{ijklmn}$	0,03472	0,26915	0,11
Толщина шпика	$y_{ijklmp} = S_j + B_k + H_l + F_m + HYS_p + a_i + e_{ijklmp}$	0,0506	1,6355	0,03
Содержание постного мяса	$y_{ijklmp} = S_j + B_k + H_l + F_m + HYS_p + a_i + e_{ijklmp}$	0,25924	0,97263	0,21
собственной продуктивности материнских пород				
Среднесуточный прирост	$y_{ijklmp} = S_j + B_k + H_l + F_m + HYS_p + a_i + e_{ijklmp}$	550,38	1727,4	0,24
Количество сосков	$y_{ijklp} = S_j + B_k + H_l + HYS_p + a_i + e_{ijklp}$	0,07523	0,3724	0,17
Толщина шпика	$y_{ijklmp} = S_j + B_k + H_l + F_m + HYS_p + a_i + e_{ijkl}$	0,34671	2,0942	0,14
Содержание постного мяса	$y_{ijklmp} = S_j + B_k + H_l + F_m + HYS_p + a_i + e_{ijklmp}$	0,89684	1,4062	0,39

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5
репродуктивных признаков материнских пород				
Многопло- дие, гол	$y_{ikmtnp} = B_k + F_m + R_t + Y_n +$ $HYS_p + a_i + e_{ikmtnp}$	0,49592	7,5888	0,06
Многоплодие корр., гол	$y_{ikmtnp} = B_k + F_m + R_t + Y_n +$ $HYS_p + a_i + e_{ikmtnp}$	0,48734	7,5726	0,06
Масса гнезда, кг	$y_{ikmtnp} = B_k + F_m + R_t + Y_n +$ $HYS_p + a_i + e_{ikmtnp}$	2,1061	10,335	0,17
Кол-во к отъ- ёму, гол.	$y_{ikmtnp} = B_k + F_m + R_t + Y_n +$ $HYS_p + a_i + e_{ikmtnp}$	0,012027	1,1089	0,01
Масса гнезда к отъёму пе- ресч., кг	$y_{ikmtnp} = B_k + F_m + R_t + Y_n +$ $HYS_p + a_i + e_{ikmtnp}$	10,054	151,07	0,06

Установлено, что наибольшими коэффициентами наследуемости характеризуются признаки среднесуточного прироста – 0,34 и 0,24 для отцовских и материнских пород, а также признак содержания постного мяса у материнских пород – 0,39.

Коэффициенты наследуемости репродуктивных признаков были низкими до 0,06, исключение составил признак массы гнезда, величина которого составила 0,17.

Заключение. Проведён дисперсионный анализ системных факторов среды, разработаны оптимальные уравнения прогноза (биометрические модели) развития селекционируемых признаков племенных свиней.

В результате дисперсионного анализа (ANOVA) по признакам собственной продуктивности отцовских пород установлено, что фактор «Порода» и «Год теста» не повлияли на признак количество сосков и фактор «Порода» не оказал влияние на признак содержание постного мяса: $p\text{-value}=0,3594$. По остальным признакам все исследуемые факторы значимо влияли на фенотипическое проявление всех признаков продуктивности. Для признаков собственной продуктивности материнских пород только фактор «Хозяйство собственник» не оказал влияние на признак «количество сосков». По остальным факторам установлено их значимое влияние на все признаки продуктивности.

В ходе дисперсионного анализа фиксированных факторов репродуктивных признаков свиноматок материнских пород установлено, что средние значения всех признаков в разрезе факторов имели значительные различия по всем исследуемым вариантам моделей.

На основе расчёта информационных критериев по различным вариантам выбраны оптимальные варианты моделей, имеющие минимальный критерий. Для признаков собственной продуктивности отцовских

пород среднесуточный прирост, толщина шпика, содержание постного мяса в модели вошли фиксированные эффекты пола, породы, хозяйства (страны) рождения, хозяйства собственника, хозяйство-год-сезон. Для признака количество сосков – эффект пола, породы, хозяйства (страны) рождения, хозяйства собственника, года теста. Для признаков собственной продуктивности материнских пород среднесуточный прирост, толщина шпика, содержание постного мяса определены регрессионные модели со следующими фиксированными факторами: пол, порода, хозяйство (страна) рождения, хозяйство собственника, хозяйство-год-сезон. Для признака количество сосков – пол, порода, хозяйство (страна) рождения, хозяйство-год-сезон. Для всех репродуктивных признаков материнских пород в модель вошли следующие фиксированные факторы: порода, хозяйство собственник, номер опороса, год опороса, хозяйство-год-сезон.

На основе разработанных оптимальных статистических моделей, описывающих развитие селекционируемых признаков, определены компоненты общей дисперсии, а также наследуемая (аддитивная) генетическая часть общей фенотипической изменчивости – коэффициенты наследуемости.

Литература

1. Кузнецов, В. М. Основы научных исследований в животноводстве / В. М. Кузнецов. – Киров, 2006. – 568 с.
2. Mrode, R. A. Linear models for the prediction of animal breeding values / R. A. Mrode ; CABInternational. – 2nd ed. – Wallingford, 2005. – 368 p.
3. Henderson, C. R. Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model / C. R. Henderson // *Biometrics*. – 1975. – Vol. 31. – P. 423–447.
4. Dekkers, J. C. M. Design and optimization of animal breeding programmes / J. C. M. Dekkers, J. P. Gibson // *Semantic Scholar [Electronic Resource]*. – 2005. – Access mode: <https://www.semanticscholar.org/paper/DESIGN-AND-OPTIMISATION-OF-ANIMAL-BREEDING-Dekkers-Gibson/591bcf6478161ffe40c3596d7f831a42fa0c5b00>
5. Современные генетические методы в селекции свиней / Н. А. Зиновьевой [и др.]. – Дубровицы : ВИЖ, 2011. – 72 с.
6. Schaeffer L.R. Estimation of Variance Components in Animal Breeding / L. R. Schaeffer [et al.] // *Short Course, July 19-23, Iowa State University, USA, 2004*.
7. Кузнецов, В. М. Методы племенной оценки животных с введением в теорию BLUP / В. М. Кузнецов. – Киров, 2003. – 358 с.
8. Кабаков, Р. И. R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R / Р. И. Кабаков ; пер. с англ. П. А. Волковой. – Москва : ДМК Пресс, 2014. – 588 с.
9. Мاستицкий, С. Э. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R / С. Э. Мاستицкий, В. К. Шитиков. – Москва : ДМК-пресс, 2015. – 496 с.
10. Masuda, Y. Introduction to BLUPF90 suite programs / Y. Masuda. – Access mode: https://masuday.github.io/blupf90_tutorial/index.html

Поступила 20.03.2024 г.