

DOI: 10.37925/0039-713X-2026-3-4-9

УДК 636.4:636.082.2

Селекционный индекс в свиноводстве

М.В. СТРУЧАЛИН^{1,2,4}, кандидат биол. наук, гл. биоинформатик, e-mail: maksim@computebio.pro, А.В. ВИХОРЕВ¹, ст. биоинформатик, М.В. БЕЛОВА^{3,6}, начальник селекционно-генетического управления, А.И. РУДЬ^{3,6}, доктор с.-х. наук, руководитель научно-исследовательского отдела селекции животных, О.А. ГУСЕВ^{4,5}, кандидат биол. наук, вед. научный сотрудник, зав. лабораторией «Геномные и постгеномные технологии в животноводстве», руководитель группы «Молекулярная биометрия»,

¹ООО «Компьютбио» (Новосибирск),

²ФИЦ «Институт цитологии и генетики СО РАН» (Новосибирск),

³ООО «Башкирская мясная компания» (Республика Башкортостан, Благоварский р-н, с. Языково),

⁴ФГБНУ «Уфимский федеральный исследовательский центр РАН»,

⁵ООО «ЛИФТ Центр» (Москва),

⁶ФГБОУ ВО «Башкирский ГАУ» (Уфа)

В статье описаны принципы конструирования селекционного индекса. Приведены математические формулы для расчета весов селекционного индекса с использованием экономических весов селекционной цели, а также заданных селекционером целевых значений генетического прогресса. Показаны методы оценки точности индекса, селекционного ответа по индексу и генетические прогрессы по каждому признаку.

Ключевые слова: селекционный индекс, селекционная цель, племенная ценность, геномная селекция, BLUP.

Selection index in pig breeding

M. V. STRUCHALIN^{1,2,4}, candidate of biological sciences, chief bioinformatician, e-mail: maksim@computebio.pro, A. V. VIKHOREV¹, senior bioinformatician, M. V. BELOVA^{3,6}, head of the breeding and genetics department, A. I. RUD^{1,3,6}, doctor of agricultural sciences, head of the research department of animal breeding, O. A. GUSEV^{4,5}, candidate of biological sciences, leading researcher, head of the Genomic and Postgenomic Technologies in Animal Husbandry Department, leader of the Molecular Biometrics Group,

¹Computebio LLC (Novosibirsk), ²Institute of Cytology and Genetics SB RAS (Novosibirsk), ³Bashkir Meat Company LLC (Republic of Bashkortostan, Blagovarsky district, village Yazykovo), ⁴Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, ⁵LIFT Center LLC (Moscow), ⁶Bashkir State Agrarian University (Ufa)

The principles of constructing a selection index are described. Mathematical formulas are presented for calculating selection index weights using economic weights of the breeding objective, as well as breeder-specified target values of genetic gain. Methods are shown for evaluating index accuracy, the selection response to the index, and genetic progress for each trait separately.

Key words: selection index, breeding objective, breeding value, genomic selection, BLUP.

■ Введение

В свиноводстве селекция ориентирована на улучшение множества признаков. Можно использовать три метода подбора родительских пар при одновременной селекции нескольких признаков: независимые уровни выбраковки, последовательная селекция и селекционный индекс [14].

Независимые уровни выбраковки – это стратегия, при которой для каждого признака задают минимально допустимый уровень (порог) и кандидат выбраковывается при несоответствии хотя бы по одному из порогов.

При стратегии последовательной селекции в каждом поколении улучшается только один признак. После того как признак достиг целевого значения, переходят к улучшению следующего признака.

Селекционный индекс – это числовая оценка ценности животного, выраженная через линейную комбинацию его признаков или генетических компонент с учетом их экономической важности и генетических взаимосвязей.

В 1942 году было доказано, что для независимых признаков с одинаковой дисперсией, коэффициентом наследуемости и экономической важности ответ на селекцию при использовании селекционного индекса больше, чем ответ на селекцию при применении стратегии последовательной селекции. Причем эффективность селекционного индекса больше с коэффициентом пропорциональности $\sqrt{n}$, где n – количество признаков в селекционной цели [14, 15]. Также доказано, что эф-

фективность стратегии независимых уровней выбраковки находится между эффективностями последовательной селекции и селекционного индекса.

В 1992 году было предложено использовать комбинацию оцененных племенных ценностей (Estimated Breeding Value; EBV), полученных методом наилучшего линейного несмещенного прогнозирования (Best Linear Unbiased Prediction; BLUP), вместо комбинации признаков [29]. Величина EBV является более надежным показателем истинной генетической ценности животного, чем признак, который содержит значительную средовую компоненту. Это обеспечивает ранжирование, в большей степени соответствующее истинной генетической ценности и, как следствие, больший селекционный ответ.

Ограниченный селекционный индекс – это вариант классического селекционного индекса, в котором накладываются ограничения на ожидаемый генетический ответ по одному или нескольким признакам. Для построения ограниченного селекционного индекса используют три основных метода [28]: индекс Кемпторна [23], индекс Харвилла [22] и индекс Ямада [35]. Ограниченный селекционный индекс применяется для таких признаков, как многоплодие. Для этого признака селекция без ограничения приводит к снижению средней массы при рождении и росту доли поросят с низким весом и, как следствие, – к увеличению потерь [24].

В этой работе описаны принципы конструирования селекционного индекса. Приведены математические формулы для расчета весов селекционного индекса, точности индекса, селекционного ответа по индексу и отдельно по каждому признаку. Показано, как учитывать четыре пути наследования (свиноматка – свиноматка, свиноматка – хряк, хряк – свиноматка и хряк – хряк) для более точного расчета селекционного ответа.

Теория описана для общего случая, когда состав признаков в селекционной цели и индексе отличается. Кратко представлены многоэтапный селекционный индекс, оптимальный отбор по вкладам для минимизации роста инбридинга при максимизации генетического прогресса, а также биоэкономическая модель для оценки экономической важности признаков.

■ Цель исследования

Систематизировать и кратко изложить теоретические и методические основы построения селекционного индекса в свиноводстве, включая подходы к расчету весов индекса, исходя из экономических весов селекционной цели и заданных значений генетического прогресса, а также методы оценки точности индекса, ожидаемого селекционного ответа и генетического прогресса по отдельным признакам; дополнительно рассмотреть многоэтапный селекционный индекс, оптимальный отбор по вкладам как инструмент ограничения роста инбридинга и биоэкономическую модель как базу для обоснования значимости признаков в селекционной программе.

■ Материалы и методы

В настоящей работе сделан нарративный обзор публикаций по теории построения селекционного индекса в свиноводстве, включая подходы на основе экономических весов и заданного генетического прогресса.

Поиск литературы проводился в базах PubMed, Scopus, Web of Science и Google Scholar за период 1936–2026 годов – по состоянию на 24 февраля 2026 года. Публикации, на основе которых сформирован обзор, выявлялись с использованием целевого поиска по ключевым словам и анализа списков литературы в научных работах. Поиск осуществлялся преимущественно среди публикаций на английском языке. Ключевые поисковые термины включали следующие сочетания: breeding objective, aggregate genotype, economic weights, bioeconomic model, selection index, restricted selection index, desired gains, multistage selection, EBV, genomic selection, single-step, pig/swine и близкие по смыслу варианты.

■ Результаты исследования

Селекционная цель

Первый этап разработки селекционного индекса – это выбор селекционной цели. Селекционная цель (также используются термины «агрегированный генотип», «экономический генотип», «агрегированная племенная ценность») H выражается в виде линейной комбинации истинных племенных ценностей животного по всем экономически важным признакам, взвешенных на их экономические значения [16]. Математически селекционная цель выражается формулой:

$$H = \sum_{i=1}^n a_i g_i, \quad (1)$$

где a_i – экономический вес i -го признака, g_i – истинная племенная ценность животного по i -му признаку, n – количество признаков в селекционной цели.

Обычно работают только с аддитивной компонентой племенной ценности, потому что ее проще измерить, например методом BLUP. Экономические веса имеют размерность «рубли на единицу признака». Так как вес умножается на признак в формуле (1), то размерность селекционной цели выражена в рублях. Это означает, что каждое животное можно ранжировать в соответствии с его ценностью, выраженной в рублях, и выбирать для следующего поколения наиболее ценных животных.

Значения экономических весов зависят от набора признаков, которые входят в селекционную цель. Это означает, что экономический вес признаков будет меняться при изменении набора признаков в H . В селекционной цели определяющее значение имеет соотношение экономических весов (а не их абсолютные значения), поскольку умножение всех весов на одну и ту же константу меняет лишь шкалу индекса, но сохраняет ранжирование животных.

Поскольку достижение селекционной цели требует времени, набор признаков и экономические веса следует определять с учетом прогнозируемых параметров рынка. Экономические веса оценивают на основе биоэкономической модели предприятия. Экономически важные признаки, которые невозможно непосредственно измерить, также следует включать в селекционную цель [9].

На основе селекционной цели конструируют селекционный индекс, включающий признаки, которые возможно (и рентабельно) измерять и которые генетически коррелируют с признаками селекционной цели [12]. Поэтому состав признаков в селекционной цели может отличаться от состава признаков в селекционном индексе [29].

В коммерческом свиноводстве селекционный индекс, как правило, дополняют порогами по дефектам и экстерьеру [10, 25]. В случае трехпородного скрещивания, например ландрас х йоркшир → F1-свиноматка; F1-свиноматка х дюрк → товарный гибрид, возможно использовать два селекционных индекса: (1) для двух материнских пород ландрас и йоркшир и (2) для отцовской породы дюрк [8]. Также предложено применять отдельный селекционный индекс при отборе свиноматок для получения помесных ремонтных свинок F1 [1].

Селекционный индекс на основе экономических весов

Селекционная цель определяется истинными племенными ценностями по экономически важным признакам, однако измерить все такие признаки на практике часто невозможно. Поэтому для отбора используют селекционный индекс. В 1936 году для растений и в 1943 году для животных предложено использовать линейную комбинацию признаков – селекционный индекс – в качестве альтернативы селекционной цели [16, 31]:

$$I = \sum_{i=1}^m b_i X_i, \quad (2)$$

где I – селекционный индекс, m – количество признаков в селекционном индексе, b_i – вес племенной ценности признака i в селекционном индексе и X_i – измеренный признак i .

Количество признаков m в селекционном индексе может отличаться от числа истинных племенных ценностей признаков в селекционной цели H .

Признаки, которые трудно или нерентабельно измерять, заменяются на индикаторные признаки. Индикаторные признаки – признаки, которые имеют генетическую корреляцию с каким-либо из признаков селекционной цели. Например, признак «доля постного мяса» трудно измерить у животного прижизненно, однако известно, что он является комбинацией двух признаков – толщина шпика и глубина «мышечного глазка», которые объясняют 78% дисперсии признака [2]. Веса селекционного индекса оцениваются исходя из критерия максимизации корреляции между селекционным индексом и селекционной целью [33]:

$$b = P^{-1}Ga, \quad (3)$$

где P – $m \times m$ – матрица вариации-ковариации признаков, на диагонали которой расположены дисперсии признаков, а недиагональные элементы – ковариации между признаками, матрица G – $m \times n$ – вариационная-ковариационная матрица между измеренными признаками в I и племенными ценностями в H , вектор a – экономические веса в H . Длина вектора a равна n .

Если в селекционный индекс входят те же признаки, истинные племенные ценности которых используются в селекционной цели, то матрица G имеет размерность $n \times n$. В этом случае диагональные элементы матрицы G – это генетические дисперсии признаков, а недиагональные элементы – генетические ковариации между признаками селекционной цели.

Для увеличения точности отбора вместо признаков в селекционном индексе используются оцененные генетические компоненты EBV. В этом случае индекс записывается как [29]:

$$I^{EBV} = \sum_{i=1}^m b^{EBV}_i EBV_i, \quad (4)$$

где I^{EBV} – селекционный индекс на основе EBV, m – количество генетических компонентов (оцененных племенных ценностей) в геномном селекционном индексе, b^{EBV}_i – вес племенной ценности признака i в селекционном индексе и EBV_i – оцененная племенная ценность признака i .

Вес b^{EBV}_i оценивается по формуле:

$$b^{EBV} = G_{EBV,EBV}^{-1} G_{EBV,g} a, \quad (5)$$

где b^{EBV} – вектор весов геномного селекционного индекса, $G_{EBV,EBV}$ – вариационная-ковариационная $m \times m$ матрица оцененных племенных ценностей (EBV_i) в селекционном индексе I^{EBV} , $G_{EBV,g}$ – генетическая вариационная-ковариационная $m \times n$ матрица между EBV_i в селекционном индексе I^{EBV} и g_i в селекционной цели H .

Значения элементов матрицы $G_{EBV,EBV}$ зависят от точности оценки EBV. В случае, когда состав признаков в селекционном индексе совпадает с составом признаков в селекционной цели, то $G_{EBV,EBV} = G_{EBV,g}$ и веса в геномном селекционном индексе равняются экономическим весам в селекционной цели [29]:

$$b^{EBV} = G_{EBV,EBV}^{-1} G_{EBV,g} a = a. \quad (6)$$

Ковариация между I^{EBV} и H равняется:

$$\begin{aligned} cov(I^{EBV}, H) &= cov(b^{EBV \top} EBV, a^{\top} g) = \\ &= b^{EBV \top} cov(EBV, g) a = b^{EBV \top} G_{EBV,g} a, \end{aligned} \quad (7)$$

где g – истинная племенная ценность животного из формулы (1), а $b^{EBV \top}$ и $a^{\top}$ – транспонированные векторы весов селекционного индекса и экономических весов селекционной цели соответственно.

Подстановкой формулы (5) в формулу (7) получаем выражение ковариации между I^{EBV} и H без весов b^{EBV}_i в соответствии с главой Properties of the selection index [33]:

$$\begin{aligned} cov(I^{EBV}, H) &= b^{EBV \top} \cdot G_{EBV,g} \cdot a = \\ &= a^{\top} \cdot G_{EBV,g}^{\top} \cdot G_{EBV,EBV}^{-1} \cdot G_{EBV,g} \cdot a. \end{aligned} \quad (8)$$

Дисперсия селекционного индекса $\sigma^2_{I^{EBV}}$ в соответствии с главой Properties of the selection index рассчитывается по формуле [33]:

$$\begin{aligned} \sigma^2_{I^{EBV}} &= b^{EBV \top} \cdot G_{EBV,EBV} \cdot b^{EBV} = \\ &= a^{\top} \cdot G_{EBV,g}^{\top} \cdot G^{-1}_{EBV,EBV} \cdot G_{EBV,g} \cdot a. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8) и получаем следующее: ковариация между селекционным индексом и селекционной целью равняется дисперсии селекционного индекса:

$$cov(I^{EBV}, H) = \sigma^2_{I^{EBV}}. \quad (10)$$

Точность селекционного индекса измеряется как корреляция между I^{EBV} и H :

$$r_{I^{EBV}, H} = cor(I^{EBV}, H) = \frac{cov(I^{EBV}, H)}{\sigma_{I^{EBV}} \cdot \sigma_H} = \frac{\sigma^2_{I^{EBV}}}{\sigma_{I^{EBV}} \cdot \sigma_H} = \frac{\sigma_{I^{EBV}}}{\sigma_H}, \quad (11)$$

где $\sigma_H = \sqrt{a^T G_{g,g} a}$ – среднеквадратичное отклонение (квадратный корень из дисперсии) селекционной цели H , $G_{g,g}$ – матрица вариации-ковариации истинных племенных ценностей в H [6].

Из формулы (11) видно, что точность индекса зависит от σ_{iEBV} и σ_H , которые в свою очередь зависят от экономических весов a , ковариаций между EBV (отражено в матрице $G_{EBV,EBV}$) и ковариаций между EBV и g (отражено в матрице $G_{EBV,g}$). Таким образом, при фиксированных экономических весах для увеличения точности селекционного индекса необходимо повышать надежность оценки EBV (точность матриц $G_{EBV,EBV}$ и $G_{EBV,g}$).

Известно, что в случае, когда EBV получено в BLUP, то выполняется равенство $cov(EBV, g) = var(EBV)$ [6]. Таким образом, точность оценки равняется:

$$Reliability_i = cor(EBV_i, g_i)^2 = \frac{cov(EBV_i, g_i)^2}{var(EBV_i)var(g_i)} = \frac{var(EBV_i)^2}{var(EBV_i)var(g_i)} = \frac{var(EBV_i)}{var(g_i)}. \quad (12)$$

Величина $var(EBV_i)$ уменьшается со снижением точности оценки племенной ценности и достигает нуля при нулевой точности. Таким образом, в селекционном индексе EBV_i тем больше влияет на индекс, чем больше его вес в индексе и чем выше точность оценки EBV_i . В простейшем случае, когда в селекционной цели и селекционном индексе только один признак ($m=n=i=1$), то в соответствии с формулами (11) и (12) точность селекционного индекса равняется квадратному корню из надежности оценки племенной ценности: $r_{iEBV,H} = cor(EBV_i, g_i) = \sqrt{Reliability_i}$.

Селекционный ответ индекса – ожидаемое изменение среднего значения селекционного индекса у потомков – равняется [5, 33]:

$$R_{iEBV} = k \cdot \sigma_H \cdot r_{iEBV,H} = k \cdot \sigma_H \cdot \frac{\sigma_{iEBV}}{\sigma_H} = k \cdot \sigma_{iEBV}, \quad (13)$$

где $k = \frac{\phi(z_{1-p})}{p}$ – интенсивность селекции (p – порог отсечения, ϕ – функция плотности вероятности нормального распределения, z – порог усечения в стандартных единицах). Формула расчета k в языке программирования R: $k <- dnorm(qnorm(1-p))/p$. Некоторые значения k приведены в таблице ниже [11].

Таблица. Значения зависимости интенсивности селекции от порога отсека в нормальном распределении

Порог отсека p , %	Интенсивность, k
50,00	0,798
25,00	1,271
10,00	1,755
5,00	2,063
1,00	2,665
0,01	3,958

Удобнее использовать селекционный ответ на единицу времени:

$$\Delta G_{iEBV} = R_{iEBV} / L = k \cdot \sigma_{iEBV} / L, \quad (14)$$

где ΔG_{iEBV} – селекционный ответ индекса за единицу времени, L – поколенческий интервал – промежуток

времени от рождения животного, которого отобрали, чтобы стать следующим родителем, до рождения его потомка. Другими словами, L – средний возраст отобранного родителя в момент рождения его потомка.

Точности селекционных индексов, рассчитанные по формуле (11), и интенсивность селекции различаются для свиноматок и хряков, так как хряков требуется меньше для селекции. В этом случае селекционный ответ индекса за единицу времени записывается как:

$$\Delta G_{iEBV} = \frac{k^d \cdot \sigma_{iEBV}^d + k^s \cdot \sigma_{iEBV}^s}{L^d + L^s}, \quad (15)$$

где k^d и k^s – интенсивности селекции, σ_{iEBV}^d и σ_{iEBV}^s – среднеквадратичные отклонения селекционных индексов, L^d и L^s – поколенческие интервалы для свиноматок (обозначение d – dam – сверху символа) и хряков (обозначение s – sire – сверху символа) соответственно.

В общем случае необходимо рассматривать четыре пути наследования:

- 1) от хряка одного поколения к хряку следующего поколения (SS, sire – sire);
- 2) от свиноматки одного поколения к свиноматке следующего поколения (DD, dam – dam);
- 3) от свиноматки одного поколения к хряку следующего поколения (DS, dam – sire);
- 4) от хряка одного поколения к свиноматке следующего поколения (SD, sire – dam).

Также для каждого из путей матрица $G_{EBV,EBV}$ и, соответственно, точность селекционного индекса k , рассчитываемая по формуле (11), отличаются из-за разной точности оценки племенной ценности животных EBV . В этом случае селекционный ответ индекса за единицу времени равняется:

$$\Delta G_{iEBV} = \frac{R^{SS}_{iEBV} + R^{DD}_{iEBV} + R^{DS}_{iEBV} + R^{SD}_{iEBV}}{L^{SS} + L^{DD} + L^{DS} + L^{SD}}, \quad (16)$$

где R^{SS}_{iEBV} , R^{DD}_{iEBV} , R^{DS}_{iEBV} и R^{SD}_{iEBV} – селекционные ответы индекса для каждого из четырех путей наследования, L^{SS} , L^{DD} , L^{DS} и L^{SD} – поколенческие интервалы для каждого из путей наследования.

Генетический прогресс каждого признака в селекционной цели равняется [5, 33]:

$$R = k \cdot G^T_{EBV,g} \cdot b^{EBV} / \sigma_{iEBV}, \quad (17)$$

где R – вектор размером n , состоящий из значений генетических прогрессов каждого признака в селекционной цели H .

Для более точной оценки генетических прогрессов необходимо оценивать средний генетический прогресс в единицу времени по четырем путям наследования по аналогии с формулой (16).

Селекционный индекс на основе генетического прогресса

Веса селекционного индекса можно оценить, используя заданные селекционером целевые (пропорциональные) генетические изменения по признакам. Это удобно, например, когда отсутствуют оцененные с достаточной точностью экономические веса или специалисту требуется поддерживать определенный уровень генетического прогресса.

В этом случае применяется ограниченный селекционный индекс (restricted selection index). Этот индекс был разработан для ограничения генетического прогресса требуемых признаков, и впоследствии его теория была доработана для поддержания заданной скорости генетического прогресса.

Существует три основных метода построения ограниченного селекционного индекса: индекс Кемпторна [23], индекс Харвилла [22] и индекс Ямада [35].

Индекс Кемпторна максимизирует селекционную цель H при фиксировании изменения некоторых признаков на нуле.

Индекс Харвилла максимизирует селекционную цель H при желаемых изменениях для некоторых признаков.

Индекс Ямада используется для достижения заданного генетического прогресса по всем признакам. Также существует расширенный индекс Ямада, который позволяет задать для каждого признака нижний и верхний пороговые значения генетического прогресса таким образом, чтобы он в результате селекции держался в заданных рамках [20].

Далее описан подход Ямада для заданного селекционером генетического прогресса R [35]. Вектор весов геномного селекционного индекса равняется [21, 28, 33, 35]:

$$b^{EBV} = G^{-1}_{EBV,EBV} \cdot G_{EBV,g} \cdot (G^T_{EBV,g} \cdot G^{-1}_{EBV,EBV} \cdot G_{EBV,g})^{-1} \cdot R. \quad (18)$$

В случае, когда состав признаков в селекционном индексе совпадает с составом признаков в селекционной цели $G_{EBV,EBV} = G_{EBV,g}$, то формула (18) упрощается до [28]:

$$b^{EBV} = G^{-1}_{EBV,EBV} \cdot R. \quad (19)$$

В соответствии с формулой (6), веса в селекционном индексе b^{EBV} совпадают с экономическими весами в селекционной цели a в случае одинакового состава признаков в селекционном индексе и селекционной цели. В этом случае для расчета среднеквадратичного отклонения селекционной цели $\sigma_H = a^T G_{g,g} a$ необходимы только заданные генетические прогрессы R .

Далее по формуле (11) можно оценить теоретическую точность селекционного индекса. Стоит помнить, что, поскольку веса a оценены из заданного генетического прогресса вместо использования биоэкономической модели, это псевдоэкономические (нерыночные) веса. Сопоставление этих весов с рыночными может указать на возможную необходимость корректировки заданных значений генетического прогресса. Также необходимо учитывать, что R здесь – это желаемый генетический прогресс и является только целевым значением. Реальное значение R может отличаться.

Многоэтапный селекционный индекс

Многоэтапный селекционный индекс представляет собой обобщение классической теории селекционного индекса на ситуации, когда решение об отборе принимается последовательно в несколько стадий по мере поступления информации различной стоимости и точности. На ранних стадиях используют доступные массовые и относительно дешевые источники данных (например, ранние фенотипы, родословную, первичные EBV) для предотбора и сокращения числа кандидатов,

тогда как на последующих стадиях применяют более информативные, но дорогие измерения (например, генотипирование, тестирование на станции, потомство), формируя новый индекс на расширенном наборе данных и осуществляя окончательный отбор в уже условно (усеченной) отобранной подвыборке. Принципиальной особенностью многоэтапной схемы является максимизация ожидаемого генетического прогресса на единицу затрат на сбор данных [4, 7].

Оптимальный отбор с ограничением инбридинга

Оптимальный отбор по вкладам Optimum Contribution Selection (OCS) – это метод отбора племенных животных, который одновременно максимизирует генетический прогресс и ограничивает скорость инбридинга путем оптимизации вкладов генетического материала каждого отобранного кандидата в генетический пул следующего поколения. Метод был разработан для решения проблемы селекции по индексу, который максимизирует генетический прогресс, но может привести к чрезмерному использованию небольшого числа выдающихся производителей, что увеличивает инбридинг и снижает генетическое разнообразие [13, 27].

Биоэкономическая модель

Биоэкономическая модель в селекции – это формализованная модель производственной системы, в которой прибыль или маржинальный доход (выручка минус затраты) выражается как функция средних уровней ключевых биологических признаков и управленческих решений (кормление, выбраковка, воспроизводство), что позволяет количественно оценивать, как генетическое улучшение каждого признака изменяет экономический результат.

Первые детальные описания методов для получения экономических весов в свиноводстве сделаны в ряде исследований [9, 32] и внедрены в биоэкономические модели в ряде работ [19, 30].

Простой подход для получения экономических весов в свиноводстве, где использовалась независимая модель для каждого признака, описан в ряде исследований [3, 17, 18]. Гибкая биоэкономическая модель для разных производственных систем и программное обеспечение разработаны М. Wolfová [26, 34]. Данное программное обеспечение доступно бесплатно по запросу к этому автору.

■ Заключение

Практическое внедрение селекционного индекса на предприятии начинается с формализации селекционной цели H (набор целевых признаков и их экономические веса либо заданные направления генетических изменений) [16]. Далее рассчитываются веса селекционного индекса, который представляет собой линейную комбинацию EBV [29]. Для этого можно применять два подхода: с использованием экономических весов [29] и с применением целевых генетических прогрессов [21, 28, 33, 35].

Применение экономических весов – более предпочтительный метод, так как напрямую использует информацию о будущей прибыли, которую принесет животное. Однако для этого требуется разработать биоэкономическую модель для получения экономических весов [3, 9, 17–19, 30, 32].

Подход с целевыми генетическими изменениями удобен при отсутствии достоверных экономических ве-

сов. Перед расчетом весов селекционного индекса необходимо обеспечить качество входных EBV и провести оценку генетических дисперсий и генетических ковариаций между признаками. Запуск индекса в селекционную практику должен сопровождаться валидацией данных хозяйства: оценкой точности индекса [6], прогнозируемого ответа по индексу и ожидаемых коррелированных ответов по каждому признаку с последующим мониторингом генетических трендов [5, 33].

Для контроля инбридинга требуется встроить ограничение темпа инбридинга через, например, оптими-

зацию вкладов OCS [13, 27]. Селекционную цель и селекционный индекс необходимо регулярно обновлять при достижении целевых показателей и изменении экономических параметров [36].

Исследование выполнено в рамках программы мегагрантов Минобрнауки России по теме «Разработка эффективных инструментов для развития животноводства с использованием генетических технологий и анализа больших данных» (соглашение №075-15-2024-666 от 27.08.2024)

Литература

1. Мельникова Е.Е., Никитин С.А., Кабанов А.В., Сермягин А.А., Харитонов С.Н., Зиновьева Н.А. Использование селекционных индексов в разных системах разведения свиней материнских пород. Российская сельскохозяйственная наука, 2020. №4. С. 46–50. DOI: 10.31857/S2500262720040110.
2. Михайлов Н.В., Святогоров Н.А., Ковалев А.А. Как определить процент содержания мяса у живых свиней? Перспективное свиноводство: теория и практика, 2011. №4. С. 4.
3. Amer P.R., Ludemann C.I., Hermes S. Economic weights for maternal traits of sows, including sow longevity. J. Anim. Sci., 2014. Vol. 92. P. 5345–5357. DOI: 10.2527/jas.2014-7943.
4. Börner V., Teuscher F., Reinsch N. Optimum multistage genomic selection in dairy cattle. J. Dairy Sci., 2012. Vol. 95. №4. P. 2097–2107. DOI: 10.3168/jds.2011-4381.
5. Cerón-Rojas J.J., Crossa J. Efficiency of a constrained linear genomic selection index to predict the net genetic merit in plants. G3 (Bethesda), 2019. Vol. 9. №12. P. 3991–4003. DOI: 10.1534/g3.119.400677.
6. Cerón-Rojas J.J., Crossa J. The statistical theory of linear selection indices from phenotypic to genomic selection. Crop. Sci., 2022. Vol. 62. №2. P. 537–563. DOI: 10.1002/csc2.20676.
7. Cunningham E.P. Multi-stage index selection. Theor. Appl. Genet., 1975. Vol. 46. №1. P. 55–61. DOI: 10.1007/BF00264755.
8. DanBred. Brochure. 2019. URL: https://danbred.com/wp-content/uploads/2019/04/Brochure_New-4page_UK-EURO_A4_PRINT-1.pdf.
9. De Vries A.G. A model to estimate economic values of traits in pig breeding. Livest. Prod. Sci., 1989. Vol. 21. №1. P. 49–66. DOI: 10.1016/0301-6226(89)90020-1.
10. Dube B., Mulugeta S.D., Dzama K. Evaluating breeding objectives for sow productivity and production traits in Large White pigs. Livest. Sci., 2013. Vol. 157. №1. P. 9–19. DOI: 10.1016/j.livsci.2013.06.018.
11. Falconer D.S., Mackay T.F.C. Introduction to quantitative genetics. 4th ed. Harlow: Longman, 1996. 464 p.
12. Gjedrem T. A study on the definition of the aggregate genotype in a selection index. Acta Agric. Scand., 1972. Vol. 22. №1. P. 11–16. DOI: 10.1080/00015127209433456.
13. Grundy B., Villanueva B., Williams J.A. Dynamic selection procedures for constrained inbreeding and their consequences for pedigree development. Genet. Res., 1998. Vol. 72. №2. P. 159–168. DOI: 10.1017/S0016672398003474.
14. Hazel L.N., Lush J.L. The efficiency of three methods of selection. J. Heredity, 1942. Vol. 33. №11. P. 393–399. DOI: 10.1093/oxfordjournals.jhered.a105102.
15. Hazel L.N., Dickerson G.E., Freeman A.E. The selection index – then, now, and for the future. J. Dairy Sci., 1994. Vol. 77. №10. P. 3236–3251. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(94)77265-9.
16. Hazel L.N. The genetic basis for constructing selection indexes. Genetics, 1943. Vol. 28. №6. P. 476–490. DOI: 10.1093/genetics/28.6.476.
17. Hermes S., Kanis E., Eissen J.J. Economic weights for feed intake in the growing pig derived from a growth model and an economic model. J. Anim. Sci., 2003. Vol. 81. P. 895–903.
18. Hermes S., Ludemann C.I., Amer P.R. Economic weights for performance and survival traits of growing pigs. J. Anim. Sci., 2014. Vol. 92. P. 5358–5366. DOI: 10.2527/jas.2014-7944.
19. Houška L., Wolfová M., Fiedler J. Economic weights for production and reproduction traits of pigs in the Czech Republic. Livest. Prod. Sci., 2004. Vol. 85. №2–3. P. 209–221. DOI: 10.1016/S0301-6226(03)00128-3.
20. Itoh Y., Yamada Y. Selection indices for desired relative genetic gains with inequality constraints. Theor. Appl. Genet., 1988. Vol. 75. №5. P. 731–735. DOI: 10.1007/BF00265596.
21. Itoh Y., Yamada Y. Comparisons of selection indices achieving predetermined proportional gains. Genet. Sel. Evol., 1987. Vol. 19. №1. P. 69–82. DOI: 10.1186/1297-9686-19-1-69.
22. Kemp C.D., Harville D.A. Index selection with proportionality constraints. Biometrics, 1975. Vol. 31. №1. P. 223–225. DOI: 10.2307/2529722.
23. Kempthorne O., Nordskog A.W. Restricted selection indices. Biometrics, 1959. Vol. 15. №1. P. 10–19.
24. Knap P.W., Knol E.F., Sørensen A.C. et al. Genetic and phenotypic time trends of litter size, piglet mortality, and birth weight in pigs. Front. Anim. Sci., 2023. Vol. 4. Article 1218175. DOI: 10.3389/fanim.2023.1218175.
25. Knap P.W. Pig breeding goals in competitive markets//Proceedings of the 10th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production (WCGALP). Vancouver: Canada, 2014. P. 8901.
26. Krupa E., Krupová Z., Wolfová M., Žáková E. Estimation of economic values for traits of pig breeds in different breeding systems: II. Model application to a three-way crossing system. Livest. Sci., 2017. DOI: 10.1016/j.livsci.2017.09.018.
27. Meuwissen T.H. Maximizing the response of selection with a predefined rate of inbreeding. J. Anim. Sci., 1997. Vol. 75. №4. P. 934–940. DOI: 10.2527/1997.754934x.
28. Satoh M. Characteristics of restricted selection indices and geometrical interpretation of restricted breeding values. J. Anim. Breed. Genet., 2024. Vol. 141. №3. P. 353–363. DOI: 10.1111/jbg.12845.
29. Schneeberger M., Barwick S.A., Crow G.H., Hammond K. Economic indices using breeding values predicted by BLUP. J. Anim. Breed. Genet., 1992. Vol. 109. P. 180–187. DOI: 10.1111/j.1439-0388.1992.tb00395.x.
30. Serenius T., Muhonen P. Economic values of pork production related traits in Finland. Agric. Food Sci., 2007. Vol. 16. №2. P. 79–88. DOI: 10.2137/145960607782219364.
31. Smith H.F. A discriminant function for plant selection. Ann. Eugen., 1936. Vol. 7. №3. P. 240–250. DOI: 10.1111/j.1469-1809.1936.tb02143.x.
32. Tess M.W., Bennett G.L., Dickerson G.E. Simulation of genetic changes in life cycle efficiency of pork production. I. A bioeconomic model. J. Anim. Sci., 1983. Vol. 56. №2. P. 336–363.
33. Weller J.I. Economic aspects of animal breeding. Dordrecht: Springer, 1994.
34. Wolfová M., Wolf J., Krupová Z., Krupa E., Žáková E. Estimation of economic values for traits of pig breeds in different breeding systems: I. Model development. Livest. Sci., 2017. Vol. 205. P. 79–87. DOI: 10.1016/j.livsci.2017.09.019.
35. Yamada Y., Yokouchi K., Nishida A. Selection index when genetic gains of individual traits are of primary concern. Jpn. J. Genet., 1975. Vol. 50. №1. P. 33–41. DOI: 10.1266/jgg.50.33.
36. Pig333. Breeding goals have a positive impact on your profit. URL: https://www.pig333.com/company_news/breeding-goals-have-a-positive-impact-on-your-profit_14285.