

---

**ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ, ОБЗОРЫ**

---

УДК 001.18:636.2.082:612.013

DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.2.5-42

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ В ИЗУЧЕНИИ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ  
ВЫСОКОУДОЙНЫХ КОРОВ: КОНЦЕПЦИИ, МОДЕЛИ, АНАЛИЗ ДАННЫХ\***

Черепанов Г.Г.

*ВНИИ физиологии, биохимии и питания животных – филиал ФНЦ животноводства  
– ВИЖ им. ак. Л.К. Эрнста, Боровск Калужской обл., Российская Федерация*

Сокращение продолжительности продуктивной жизни высокоудойных коров на протяжении ряда лет остаётся одной из наиболее важных проблем в молочном скотоводстве. Цель данной работы – систематизация методологических подходов и результатов их использования на стыке между поисковыми фундаментальными и прикладными исследованиями в области оценки, прогнозирования и повышения жизнеспособности высокопродуктивного молочного скота. Основные разделы: теоретические основы исследования динамики выбытия коров из дойного стада; определение параметров выживаемости в реальных популяциях (в том числе, в популяциях, неоднородных по параметрам жизнеспособности); анализ динамики надоев молока по последовательным лактациям; прогнозирование биоэкономической эффективности производства молока с учётом показателей выживаемости и продуктивности коров. При анализе динамики выживаемости использован оригинальный алгоритм численного интегрирования распределения Гомпертца с использованием дискретной шкалы времени, удобный для проведения серийных расчётов с учётом особенностей реальных объектов. По результатам исследования предложены количественные тесты для применения в системах разведения и воспроизводства высокопродуктивных коров: 1) для оценки потенциала жизнеспособности – параметр, обратный относительному выбытию на первой лактации; 2) для прогнозирования продолжительности хозяйственного использования – функциональная взаимосвязь между продолжительностью продуктивной жизни и потенциалом жизнеспособности. На основе анализа эмпирического материала и литературных данных сделано заключение, что продолжительность продуктивной жизни коров в значительной степени определяется потенциалом жизнеспособности, сформированным в период, предшествующий началу лактационной деятельности, т.е. в периоды пре- и постнатального онтогенеза и в процессе выращивания ремонтного молодняка. Поэтому для продления срока продуктивной жизни необходимо увеличивать «начальную» величину жизнеспособности за счёт мониторинга физиологического статуса матерей для устранения неблагоприятных отклонений в состоянии эмбрионального и плодного развития и в периоды, предшествующие наступлению репродуктивной зрелости. Новизна этого подхода состоит в переносе акцентов от борьбы с «болезнями продуктивности» к вопросам их профилактики на основе исключения факторов риска на всех этапах онтогенеза, создания адаптивных систем кормления, внедрения новых методов медицинской интроскопии, дистанционной диагностики и физиологического мониторинга, а также поддержания комфортных условий (welfare) эксплуатации высокопродуктивных животных. В конечном счёте, целью воспроизводства молочного скота должно быть получение популяций высокоудойных коров со сбалансированным развитием молочных желез и висцеральных систем, обеспечивающих оптимальный уровень синтеза компонентов молока, исключая возникновение метаболических дисфункций и снижение качества молочной продукции.

*Ключевые слова: молочные коровы, жизнеспособность, продолжительность продуктивной жизни, моделирование, прогнозирование*

*Проблемы биологии продуктивных животных, 2020, 2: 5-42*

---

\* Предпубликация. Расширенный вариант предполагается опубликовать в виде методических указаний или монографии.

## СОДЕРЖАНИЕ:

1. Введение
2. Теоретические основы исследования динамики выбытия коров из дойного стада
  - 2.1. Математический анализ выживаемости в однородных популяциях
  - 2.2. Численное моделирование с использованием дискретной шкалы времени
  - 2.3. Вычислительные эксперименты
3. Определение параметров выживаемости в реальных популяциях
  - 3.1. Субпопуляции коров чёрно-пёстрой породы Ленинградского типа
  - 3.2. Популяции коров пяти пород США
  - 3.3. Определение параметров выживаемости по данным регистрации выбытия по разным причинам
  - 3.4. Анализ выживаемости в популяциях, неоднородных по параметрам жизнеспособности
4. Анализ динамики надоев молока по последовательным лактациям
5. Прогнозирование биоэкономической эффективности производства молока с учётом показателей выживаемости и продуктивности коров
6. Общее обсуждение и рекомендации

### 1. Введение

Эффективность производства молока зависит от многих факторов, в т.ч. от затрат на выращивание нетелей и первотелок, генетического потенциала их продуктивности, динамики суточных удоев, темпа обновления стада, уровня технологических затрат, конъюнктуры цен на продукцию и корма. В практических условиях в каждом хозяйстве ежегодно реализуется одно из множества возможных сочетаний соответствующих параметров, поэтому общие закономерности функционирования всей системы производства молочного сырья на эмпирическом уровне выявить трудно. Анализ проводится обычно по итогам года, а долговременные факторы воспроизводства, оборота стада и селекции, требующие взгляда «с птичьего полёта», упускаются из виду. Вследствие длительного игнорирования этих вопросов появляются такие проблемы, как нехватка ремонтных телок, повышенное выбытие дойных коров и сокращение общей численности поголовья. Как правило, в основе этих проблем лежит антагонизм высокой продуктивности и жизнеспособности коров (Прошина, Лоскутов, 2011; Сельцов и др., 2012; Miglior et al., 2017; Britt et al., 2018). Наличие такого антагонизма является серьёзной проблемой в совершенствовании методов селекции, разведении и воспроизводства высокопродуктивного молочного скота.

Вопросами, связанными с длительностью продуктивной жизни коров, в странах с развитым животноводством на протяжении ряда лет занимаются исследователи, использующие сложный математический аппарат, разработанный для целей селекции (Ducrocq et al., 1988; Ducrocq, Casella, 1996; Roxström et al., 2003). С другой стороны, признаётся, что прямая селекция на длительность продуктивной жизни не эффективна, а различия между животными по продуктивному долголетию в значительной степени зависят от условий содержания, кормления и воспроизводства (Faust, 1993; De Vries et al., 2010). Продуктивное долголетие – это показатель, имеющий сложную структуру, обусловленную в значительной степени общей системой воспроизводства стада (Сельцов и др., 2012), и в последние годы проводятся исследования, направленные на поиск наиболее эффективных критериев оценки и оптимизации этого показателя.

В области биологии продолжительности жизни животных и человека к настоящему времени накоплен огромный массив разнообразных эмпирических данных и попыток их теоретического осмысления, поэтому необходимо создавать предпосылки для совместной работы представителей разных научных дисциплин – физиологов, биохимиков, генетиков, специалистов по биоинформатике и математическому моделированию (Новосельцев и др., 2004; Яшин, Украинцева, 2004; Голубев, 2009). В большинстве этих работ используются математические модели разной степени сложности, однако ценную информацию могут подчас давать даже простые «бесформульные» расчётные модели (De Vries, 2003).

Поэтому представляется целесообразным, используя данные производственного учёта и результаты научных исследований, разрабатывать вычислительные инструменты (модели, алгоритмы, количественные тесты), не требующие применения сложного математического

аппарата, для использования в системах управления производственными процессами в молочном секторе животноводства. Это даст возможность в дальнейшем (после доработки и апробации) решать задачи многовариантного анализа и технологического прогноза путём многократного «прогона» этих моделей непосредственно специалистами - технологами, т.е. анализа *in silico* больших массивов оперативных производственных данных.

Цель данной работы – систематизация методологических подходов и результатов их использования на стыке между поисковыми фундаментальными и прикладными исследованиями в области оценки, прогнозирования и повышения жизнеспособности высокопродуктивного молочного скота.

## 2. Теоретические основы исследования динамики выбытия коров из дойного стада

### 2.1. Математический анализ выживаемости в однородных популяциях

Экспоненциальное снижение жизнеспособности в период после достижения возраста репродуктивной зрелости организмов имеет фундаментальный характер, причем связанные с этим феноменом механизмы действуют в основном однотипно у разных видов. На это указывает и отсутствие на кривых интенсивности выбытия коров участков с какими-либо переломами общей тенденции (если не рассматривать такие случаи, как эпизоотии, борьба с лейкозом и другие аномалии), поэтому можно предположить, что геронтологические факторы действуют, начиная с первых же лактаций. Кроме того, экспоненциально возрастающая временная динамика частоты отклонений и отказов в работе свойственна вообще всем сложно организованным системам, в том числе машинам и механизмам, на чем основана теория их надежности (Weibull, 1951; Гаврилов, Гаврилова, 1991). С этой точки зрения не столь важно, с чем связана выбраковка – с заболеванием животного или с решением владельца стада элиминировать животных с недостаточно хорошими показателями продуктивности и воспроизводства.

В течение длительного времени в демографических исследованиях считалось, что интенсивность смертности  $y(t)$  - относительное количество умерших за некоторый отрезок времени, делённое на величину этого отрезка и число особей, доживших до начала этого отрезка, у человека и большинства животных, оцениваемая в группе сверстников, пропорциональна экспоненциальной функции от возраста (для человека приблизительно в период от 20 до 80 лет) с постоянным коэффициентом в показателе экспоненты. Это чисто стохастический механизм, из которого следует эмпирически полученное дифференциальное уравнение, известное как функция Гомпертца (Гомпертц, 1825).

$$y(t) = \frac{dN(t)}{dt * N(t)} = B * \exp(c * t) \quad (1)$$

где  $t$  – непрерывная переменная времени (возраст)  $N(t)$  – текущая численность когорты,  $B$  и  $c$  – константы.

Хотя длительность хозяйственного использования продуктивных животных (продолжительность продуктивной жизни, *length of productive life, longevity, herd life*) определяется не их физической смертностью, а их вынужденным выбытием из стада, общие закономерности, характеризующие признак выживаемости, весьма схожи и для такого стада, и для популяций лабораторных животных, и для человека. С другой стороны, поскольку это соотношение фактически является не функцией, а дифференциальным уравнением, описывающим распределение вероятности выбытия в генетически однородной когорте, при исследовании реальных объектов, в частности, популяций лактирующих коров, возникает несколько вопросов, требующих специального исследования.

Во-первых, для прогнозирования динамики выживаемости необходимо получить решение этого уравнения, т.е. проинтегрировать его для получения функции  $N(t)$  в явном виде для оценки среднего возраста, времени существования когорты и других параметров. При этом возникает необходимость проведения достаточно сложных аналитических преобразований для «привязки» этого уравнения с учётом особенностей реальных популяций.

Немаловажным представляются также вопросы, связанные с учётом возможной гетерогенности популяций по параметрам выживаемости. В селекции сельскохозяйственных животных традиционно уделяется большое внимание вопросам, связанным с генетическим разнообразием популяций (гетерозиготность, генетические дистанции и др.), поскольку генетическое разнообразие снимает негативные эффекты инбредной депрессии. С другой стороны, вопросы, связанные с гетерогенностью популяций молочного скота по параметрам выживаемости, находятся, фактически, лишь на стадии постановки и осознания проблемы. В соответствии с классическими представлениями, появление любой патологии, приводящей к выбраковке коров, носит вероятностный характер, и в общем стаде формируются случайные потоки животных, переходящих из одного состояния в другое (Михайленко, 2015). Альтернативный вариант интерпретации – стадо неоднородно по выживаемости, т.е. состоит из нескольких групп с сильно различающимися значениями средней и максимальной продолжительности хозяйственного использования. Согласно этой концепции, такие группы в каждом стаде представляют собой остатки когорты с разным уровнем жизнеспособности (*viability*), при этом внутри групп «работает» обычный вероятностный механизм выбытия.

Этот аспект биомедицины в современном животноводстве становится всё более актуальным в связи с тем, что организм высокопродуктивных животных в критические периоды раздоя испытывает такие же перегрузки, которые у людей практикуются лишь в спорте высших достижений. Но в этой области для формирования контингента рекорсменов проводятся длительные анализы и испытания, и по их результатам «отсеиваются» сотни и тысячи претендентов, не подходящих по функциональным и конституциональным параметрам. Такое отсеивание не применяется для продуктивных животных, селекция молочного скота пока ведётся, в основном, по удою, статям и формам вымени, молодняк идёт «потоком» на воспроизводство стада, а по мере повышения его продуктивности снижается жизнеспособность, увеличивается выбраковка, страдает качество и безопасность получаемой продукции.

В настоящее время, при наличии общих сведений о средней по популяции продуктивности животных, нет чёткого представления о таких понятиях, как потенциал продуктивности, генетическая уникальность и резерв жизнеспособности, недостаточно данных по оценке принадлежности особи к различным популяционным группам. Отсутствие фундаментальных знаний, стратегий и тактик сохранения генетических ресурсов животных и их рационального использования препятствует согласованным действиям на региональном и федеральном уровнях по управлению пороодообразовательными и производственными процессами (Марзанов, 2007; Кузнецов, 2012, 2013; Черепанов, Марзанов, 2016). В частности, необходимо найти критерии для отбора родителей по показателям жизнеспособности и продуктивности потомства на возможно более ранней стадии, так как успешность селекции, в особенности для малопродуктивных животных, сильно зависит от величины межгенерационного интервала.

Поскольку существующие положения о потенциале продуктивности и резерве жизнеспособности коров молочного направления продуктивности сформулированы, в основном, на основе анализа одной из жизненных функций (лактационной), в данной работе ставилась задача по проведению анализа выживаемости (выбытию из хозяйственного оборота по сумме причин) по архивным записям в системе учёта племенных коров.

Рассмотрение с использованием непрерывной шкалы времени даёт возможность отождествить кривую выбытия с кривой выживаемости, рассматриваемой в демографии, и использовать некоторые теоретические результаты, полученные для этого случая (Кременцова, Горбунова, 2010). В частности, поскольку функция Гомпертца и текущая численность когорты  $N_i$  связаны между собой в форме дифференциального уравнения (1), то зависимость численности когорты от времени (возраста) определяется решением этого уравнения, как функции от времени (возраста):

$$N_i = \exp[-(B/c) * (e^{ct} - 1)] \quad (2)$$

При этом средняя продолжительность жизни  $T$  определяется аналитической формулой

$$T = \frac{1}{c} \exp\left(\frac{B}{c}\right) * Ei\left(\frac{B}{c}\right) \quad (3)$$

где  $Ei(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^y}{y} dy$  – специальная функция (интегральная экспонента), вычисление которой

включено в современные системы статистического анализа MATLAB и R.

Применимость модели Гомпертца при аналитическом моделировании динамики выбытия коров из стада проверялась на массиве данных по выживаемости для пяти популяций коров молочных пород США (Hare et al., 2006). Кривые выживаемости аппроксимировались по формуле (1), при этом за оценки параметров  $B$  и  $c$  принимались значения, при которых достигалась минимальная величина среднеквадратичной ошибки ( $Ско$ ) приближения, вычисляемой по формуле:

$$Ско(B, c) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \left( \frac{n_i}{n_1} - \exp \left[ -\frac{B}{c} (e^{c(i-1)} - 1) \right] \right)^2, \quad (4)$$

где  $n_i$  – число коров, доживших до  $i$ -й лактации. Величина среднеквадратичной ошибки приближения составила  $4 \times 10^{-3}$ . Таким образом, фактические данные по популяциям коров пяти пород США описывались функцией Гомпертца с высокой статистической надёжностью (Cherapanov et al., 2017).

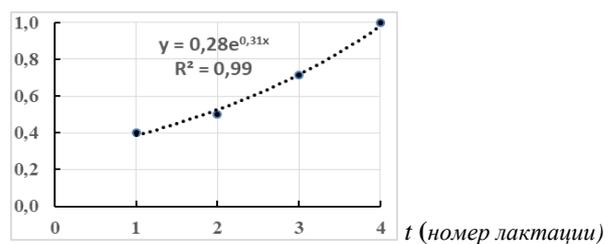
Вероятность выбытия коров неодинакова на протяжении лактации (она наиболее высокая в начальной фазе лактации), поэтому не совсем рационально и слишком затратно точно отмечать момент выбраковки для каждой коровы, и на практике фиксируют общую величину выбытия за лактацию (по сумме причин или по определённым заболеваниям). У племенных коров молочных пород при ежегодно проводимой бонитировке регистрируется возрастной состав стада (численность коров по последовательным лактациям), и при анализе выживаемости возраст обычно выражают числом лактаций. С вычислительной точки зрения, это означает замену непрерывной шкалы времени на дискретную с дополнительным исследованием погрешностей в оценках параметров. У высокопродуктивных коров количество лактаций (т.е. количество «точек» на эмпирической кривой выживаемости) небольшое, что предъявляет повышенные требования к статистической надёжности оцениваемых параметров выживаемости и тем самым – к объёму выборки.

Для выявления различий в возрастной динамике выбытия коров можно использовать несколько вариантов анализа: 1) непосредственно по бонитировочной возрастной структуре стада (по относительной доле коров на последовательных лактациях – «поперечный» анализ); 2) по данным численности коров по последовательным лактациям в когортах животных, родившихся в одни и те же сроки (лонгитудинальный, когортный анализ); 3) по данным выбраковки (выбытия по сумме причин или по отдельным болезням) на последовательных лактациях.

Простая схема, иллюстрирующая эквивалентность «поперечного» и «продольного» (когортного) анализа выбытия коров показана ниже (рис. 1). Видно, что численность коров первой когорты первотелок по последовательным годам (продольное исследование) повторяет возрастную структуру дойного стада (поперечное исследование). Доля коров в первой когорте с длительностью продуктивного использования в 1 лактацию =  $28/70 = 0,4$ , в 2 лактации =  $21/70 = 0,3$  и т.д.

Определение параметров функции Гомпертца осуществляется в приложении MS Excell по этапам: 1) задаётся построение точечной диаграммы; 2) производится ввод ряда  $t$  в строке  $x = \dots$  и ряда  $\Delta N/N$  в строке  $y = \dots$  3) выбирается линия регрессии – экспоненциальный тренд; 4) в уравнении регрессии считываются параметры  $B$ ,  $c$  и  $R^2$ . Для данного примера  $B = 0,28$ ,  $c = 0,31$ .

$t$	$N$	$\Delta N$	$\Delta N/N$
1	70	28	0.4
2	42	21	0.5
3	21	15	0.7
4	6	6	1
5	0		



Следует отметить, что из двух вариантов методики подбора функции Гомпертца («поперечного» и когортного анализа) второй вариант требует значительно меньшего объема выборки, хотя он более трудоёмок. С другой стороны, если выполняются условия стационарности (например, отсутствие в прошлые годы значительных «аварийных» выбраковок или закупок со стороны) и имеется возможность работы с базами данных, то можно использовать данные по возрастной структуре стада, усреднённые за несколько лет.

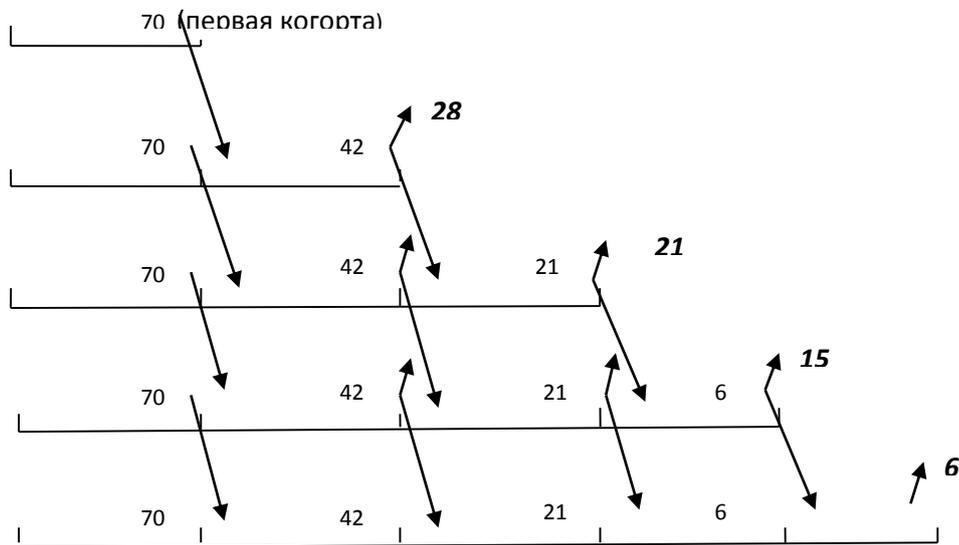


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая эквивалентность «поперечного» и «продольного» (когортного) анализа выбытия коров из дойного стада. При численности стада 139 голов ежегодно регистрируется 70 коров первого отела; это первая численность когорты, последующие численности представлены крайними справа цифрами обычного шрифта ( $N = 70-42-21-6-0$ ); цифры, отмеченные курсивом, обозначают количество коров этой когорты, выбывших за текущую лактацию ( $\Delta N$ ). Длительность межотельного интервала принята равной одному году. Нижней горизонтальной линией с цифрами возле вертикальных отметок представлена возрастная структура стада на пятом году; последовательность чисел в ней идентична таковой для рассмотренной когорты. Интенсивность выбраковки (вероятность выбытия за текущую лактацию) по последовательным лактациям:  $\Delta N/N = 0,4 - 0,5 - 0,7 - 1,0$ .

Некоторые трудности здесь возникают в связи с тем, что распространенной практикой было в карточках племенного учёта приводить бонитировочные данные по численности коров для первых лактаций по-отдельности, а с 4-й – по сдвоенным лактациям (4-я + 5-я, 6-я + 7-я и т.д.). С другой стороны, имеет смысл проследивать динамику вероятности выбытия по всем законченным лактациям. Поэтому в таких ситуациях можно применять итерационную методику восстановления полных рядов по критерию минимизации отклонений от общей линии регрессии с использованием электронных таблиц Excel (см. ниже раздел 3.1).

## 2.2. Численное моделирование выбытия в однородных популяциях с использованием дискретной шкалы времени

Как отмечалось выше, при попытках использования аппарата дифференциальных уравнений для исследования динамики популяций лактирующих коров, возникают трудности, связанные с необходимостью «привязки» этого аналитического инструмента с учётом особенностей реальных объектов (популяций и составляющих субпопуляций коров разных пород при разных системах разведения и содержания). В связи с этим, с учётом слабой изученности данной конкретной области и отсутствия достаточно проработанных методических подходов, на первых этапах в качестве

«разведочного» исследования целесообразно применять более простые схемы вычислений, в частности, использующие методы численного интегрирования дифференциальных уравнений. Для проведения серии вычислительных экспериментов была разработана методика численного интегрирования распределения Гомпертца, при этом полученные результаты в ряде случаев сопоставлялись с данными аналитического моделирования.

При использовании численного интегрирования распределения Гомпертца (1) дифференциалы  $dN$  и  $dt$  заменяются конечными разностями  $\Delta N$  и  $\Delta t$  и при условии  $\Delta t = 1$  (шаг по оси независимой переменной времени = 1, одна лактация), вначале определяется первый член функции  $y(t)$ , т.е:

$$y_1 = (N_1 - N_2)/N_1; \quad \text{т.е.} \quad y_1 * N_1 = N_1 - N_2,$$

следовательно,

$$N_2 = (1 - y_1) * N_1.$$

Эта операция повторяется для последующих временных интервалов ( $N_3 = (1 - y_2) * N_2$ ) и т.д. в формате таблиц MS Excell (табл. 1) Начальное значение численности когорты  $N_1$  принимается произвольным (с расчётом, чтобы общая численность по всем лактациям была в пределах 1000-1500, или с численностью 1000 на первой лактации).

**Таблица 1. Пример численного интегрирования функции (распределения плотности вероятности) Гомпертца (при значениях параметров  $B=0,1$ ,  $c=0,16$ )**

$t$	$y$	$1-y$	$N$	$\Delta N$	$n$	$n*t$
1	0,117	0,883	300	35	0,117	0,117
2	0,138	0,862	265	36	0,122	0,243
3	0,162	0,838	228	37	0,123	0,369
4	0,190	0,810	191	36	0,121	0,484
5	0,223	0,777	155	35	0,115	0,576
6	0,261	0,739	121	32	0,105	0,630
7	0,307	0,693	89	27	0,091	0,637
8	0,360	0,640	62	22	0,074	0,593
9	0,422	0,577	40	17	0,056	0,501
10	0,496	0,504	23	11	0,038	0,377
11	0,582	0,418	12			
12	0,683	0,317	5			T=4,5

Примечание:  $n$  – относительное выбытие, т.е. по отношению к начальной численности, в данном случае  $\Delta N_i/300$ ; при этом сумма произведений  $n*t$  по всем строкам равна средней продолжительности продуктивной жизни (среднее число лактаций)

В ходе расчётов при появлении малых численностей последние значения отбрасываются, т.е. «хвост распределения» обрезается и в расчёт принимается 95-98% значений  $N$ , поскольку неучёт малого количества особей старших возрастов не имеет большого экономического значения. Суммирование значений  $n*t$  в последней колонке даёт значение средней продолжительности продуктивной жизни коров в данной когорте ( $T$ ).

Для дальнейшей работы с использованием этого методического приёма необходимо убедиться в том, что он позволяет получать объективные несмещённые оценки параметров изучаемых объектов. С этой целью была проведена серия вычислительных экспериментов (исследования *in silico*) с использованием дискретной шкалы времени (возраста, выражаемого числом завершённых 305-дн. лактаций) и численных расчётов, при этом полученные оценки параметров и выявленные закономерности сопоставлялись с результатами математического анализа динамики популяций (с применением аналитических формул).

*Исходные данные* – значения  $B$  и  $c$  функции Гомпертца  $y(t) = B \exp(ct)$  и начальная численность когорты  $N_1$ . Для каждого значения  $B$  в диапазоне 0,04-0,3 использовали 7 значений  $c$  в диапазоне 0,2-0,8. Исследованный диапазон значений  $B$  соответствует эмпирическим данным по интенсивности выбытия коров из стада в период первой лактации, верхняя область диапазона значений  $c$  выбрана «с запасом» в связи с отсутствием достаточно многочисленных фактических данных по короткоживущим субпопуляциям.

Использовались дискретные значения номеров лактации  $i = 1, 2, 3 \dots i_{max}$  с соответствующими значениями возраста  $t_i$  и интенсивности выбытия из стада  $y_i$  ( $y_1 = (N_1 - N_2)/N_1$ ;  $y_2 = (N_2 - N_3)/N_2$  и т.д.);  $t_i$  – номер лактации;  $N_i$  – численность коров с номером лактации  $t_i$ ;  $\Delta N_i$  – количество выбывших на  $i$ -ой лактации;  $n_i = \Delta N_i / N_i$ ; сумма значений произведения  $n_i * t_i$  равна средней продолжительности продуктивной жизни  $T$ ;  $t_{max}$  – последний номер лактации.

Расчёт останавливали при достижении предельного значения  $t_{max}$ , т.е. при появлении первого отрицательного значения величины  $(1 - y_i)$  в случае короткоживущих субпопуляций или при достижении практически незначимой численности «долгожителей». Под выбытием из стада понимается выбраковка «по сумме причин» (по причинам болезней, спада удоев молока или репродуктивной способности).

Выходные данные (значения  $t_{max}$ ,  $T$ ,  $y_1$ ,  $1/y_1$  для данного сочетания параметров  $B$  и  $c$ ) использовали для выявления взаимосвязей между параметрами выживаемости (табл. 2, 3).

Таблица 2. Расчёт средней и максимальной продолжительности продуктивной жизни в когорте с параметрами  $B=0,14$ ,  $c=0,3$

$t$	$y$	$1-y$	$N$	$\Delta N$	$n$	$t*n$
1	0,188	0,811	100	19	0,1889	0,1889
2	0,255	0,744	81	21	0,2068	0,4137
3	0,344	0,655	60	20	0,2080	0,6240
4	0,464	0,535	40	19	0,1841	0,7364
5	0,627	0,372	21	13	0,1330	0,6650
6	0,846	0,153	8	7	0,0668	0,4013
7	1,143	-0,143	1			

$t_{max}=6$   $T=3,13$

Таблица 3. Фрагмент исходных данных для выявления взаимосвязей между параметрами выживаемости\*

$c$	$B$	$t_{max}$	$T$	$c*T$	$B/c$	$y_1$	$1/y_1$
0,2	0,2	7	2,93	0,586	1,00	0,244	4,09
0,3	0,2	6	2,52	0,756	0,67	0,270	3,70
0,4	0,2	5	2,22	0,888	0,50	0,298	3,35
0,5	0,2	4	2,01	1,005	0,40	0,330	3,03
0,6	0,2	4	1,85	1,11	0,33	0,364	2,74
0,7	0,2	4	1,71	1,197	0,29	0,403	2,48
0,8	0,2	3	1,56	1,248	0,25	0,445	2,25

Примечание: \* один из 14 циклов вычислений с варьированием параметров  $c$  и  $B$ .

### Результаты и обсуждение

При анализе результатов проведенных модельных расчётов была выявлена линейная положительная взаимосвязь максимального возраста коров  $t_{max}$  в когорте от средней продолжительности продуктивной жизни, при этом величина  $t_{max}$  приблизительно в два раза больше величины  $T$ . (рис. 2).

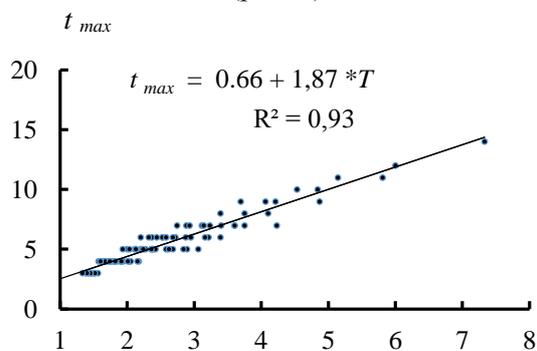


Рис. 2. Зависимость максимального возраста коров  $t_{max}$  (номер последней лактации) в когорте от средней продолжительности продуктивной жизни  $T$ . Точки обозначают результаты 98 серий расчётов с варьированием численных значений параметров функции Гомпертца в интервале  $B = 0,04-0,3$  и  $c = 0,2-0,8$ .  $R^2$  – коэффициент детерминации.

Для оценки точности алгоритма приближённого расчёта были сопоставлены две функции, вычисленные по результатам численного эксперимента и по аналитическим формулам. Вычислялось произведение параметра  $c \cdot T$  в зависимости от отношения  $B/c$ , а также значение  $T$  в зависимости от величины  $1/y_1$ .

$$T = \frac{1}{c} \exp\left(\frac{B}{c}\right) * \left[ Ei\left(\frac{B}{c}\right) - Ei\left(\frac{B}{c} \exp(ct_{\max})\right) \right], \quad (5)$$

де  $t_{\max}$  – максимальная длительность продуктивной жизни при использовании «усечённого» распределения Гомпертца (Черепанов и др., 2017).-

Сопоставление диаграмм, построенных по результатам численного эксперимента (аппроксимация) и вычислениям, проведенным с использованием аналитических формул свидетельствует о том, что для практических расчётов можно пользоваться выведенной аппроксимацией (рис. 3, 4).

Аппроксимация:  $c \cdot T = 0.61(B/c)^{0.51}$

Аналитическое решение:  $c \cdot T = \exp(B/c) * Ei(B/c)$

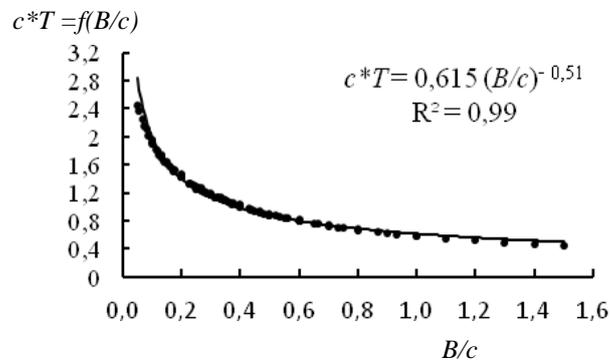


Рис. 3. Зависимость произведения  $c \cdot T$  от величины отношения  $B/c$ . Точки – результаты численного эксперимента, линия – прогноз по формуле (3). В численном эксперименте использована шкала последовательных номеров лактаций и «усечённое» распределение численности когорты (без учёта небольшого количества особей в области «хвоста» распределения).

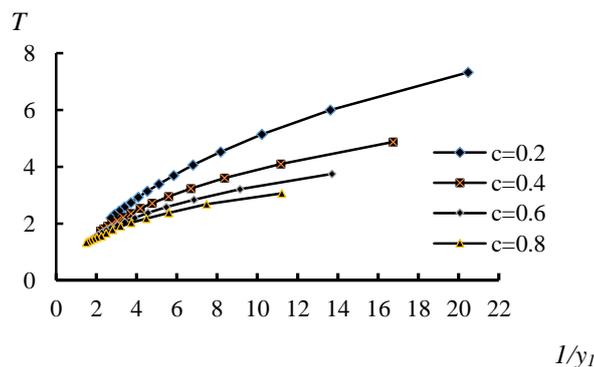


Рис. 4. Зависимость средней продолжительности продуктивной жизни  $T$  от величины  $1/y_1$  ( $y_1$  – интенсивность выбытия на первой лактации) по результатам численного эксперимента)

Проведенные расчёты показали, что аналитические кривые зависимости средней длительности продуктивной жизни  $T$  от  $1/y_1$  при различных значениях параметра  $c$  представляют

собой монотонно возрастающие функции. Таким образом, анализ выживаемости с использованием функции Гомпертца даёт теоретическое обоснование существованию положительной корреляции между средней длительностью хозяйственного использования коров и начальным уровнем жизнеспособности, оцененным по величине, обратной величине относительного выбытия в период первой лактации. То есть, величину  $1/y_1$  можно интерпретировать как среднегрупповой показатель жизнеспособности в ранней фазе репродуктивного периода (на первой лактации), или как потенциал долголетия данной группы коров (Черепанов, 2014; Черепанов, Михальский, 2016). Такая трактовка соответствует исторически первоначальной интерпретации этого показателя как «сопротивляемости смертности» (Gompertz, 1825)

### 2.3. Вычислительные эксперименты

С целью изучения закономерностей по динамике выживаемости в популяциях коров, гетерогенных по параметрам жизнеспособности, была исследована численная модель, в которой были приняты следующие условия: 1) популяция состоит из некоторого числа субпопуляций; 2) в каждой субпопуляции выполняется условие стохастичности выбытия, но они различаются по величине параметров  $B$  и  $c$ . Цель анализа: проверить, существует ли зависимость срока продуктивной жизни от начального уровня резистентности ( $1/y_1$ ) по всему набору субпопуляций. Начальная численность когорты коров (число первотёлок) для всех субпопуляций условно принята равной 100; значения параметра  $c$  и  $B$  варьировали в пределах 0,1-0,3 и 0,05-0,3 соответственно. Всего было проведено 17 серий расчётов.

Последовательность вычислений для одной субпопуляции приведена в табл. 4, значения итоговых показателей приведены в табл. 5. Прогноз динамики обновления стада для 9 модельных субпопуляций приведен на рис. 5. Анализируя кривые, приведенные на рис. 5, становится понятно, почему мало информативно использование одного параметра выживаемости, а именно - средней продолжительности продуктивной жизни коров; ведь при разных сочетаниях численных значений двух параметров функции Гомпертца  $B$  и  $c$  имеют место совершенно разные формы кривых, отражающих различные аспекты возрастной динамики выживаемости, в частности, долю коров с данным количеством законченных лактаций ( $n$ ), причём эти кривые могут сильно отличаться от кривых нормального (Гауссовского) распределения.

На основе использования методики когортного анализа и итоговых расчётных данных была выявлена взаимосвязь между показателем жизнеспособности, оцененном по первой лактации ( $1/y_1$ ), и средней длительностью продуктивного использования коров ( $Tc$ ) по всему набору проанализированных субпопуляций. Значения итоговых показателей для 13 субпопуляций сведены в табл. 5; построенные по этим данным кривые для шести модельных популяций приведены на рис. 5.

Таблица 4. Расчёт параметров выбытия коров и средней длительности продуктивной жизни для субпопуляци с параметрами  $B=0,13$ ;  $c=0,3$

$t$	$y$	$1-y$	$N$	$\Delta N$	$n$	$t*n$
1	0,175	0,825	100	18	0,175	0,175
2	0,237	0,763	82	20	0,195	0,391
3	0,320	0,680	63	20	0,201	0,604
4	0,432	0,568	43	18	0,185	0,739
5	0,583	0,417	24	14	0,142	0,709
6	0,786	0,214	10	10	0,102	0,609
		$1/y_1= 5,7$	$\sum N=323$			$Tc= 3,2$

Обозначения:  $t$  – номер лактации,  $y$  – интенсивность выбытия (*hazard function*, исходные данные);  $1-y$  – вероятность иметь следующую лактацию;  $N$  – возрастная структура когорты общей численностью 323 головы;  $\Delta N$  – количество коров, выбывающих на данном номере лактации;  $n$  = доля коров (по отношению к начальной численности когорты) с данным сроком продуктивной жизни,  $n_i = \Delta N_i / N t_i$ ;  $t*n$  – среднее количество отёлов на данном номере лактации (сумма значений по всем номерам лактации равна средней по стаду длительности продуктивной жизни).

Таблица 5. Значения итоговых показателей для 13 субпопуляций (когорт)

	$B$	$T$	$l/y_l$	$y_l$
$c=0,3$	0,13	3,2	5,7	0,175
	0,15	3	4,9	0,202
	0,2	2,5	3,7	0,270
	0,3	1,94	2,5	0,405
	0,4	1,6	1,85	0,54
$c=0,2$	0,15	3,45	5,46	0,183
	0,2	2,89	4,1	0,244
	0,3	2,15	2,7	0,366
	0,5	1,7	1,64	0,611
$c=0,1$	0,15	3,96	6,03	0,166
	0,2	3,35	4,52	0,221
	0,3	2,36	3,02	0,332
	0,4	1,94	2,26	0,442

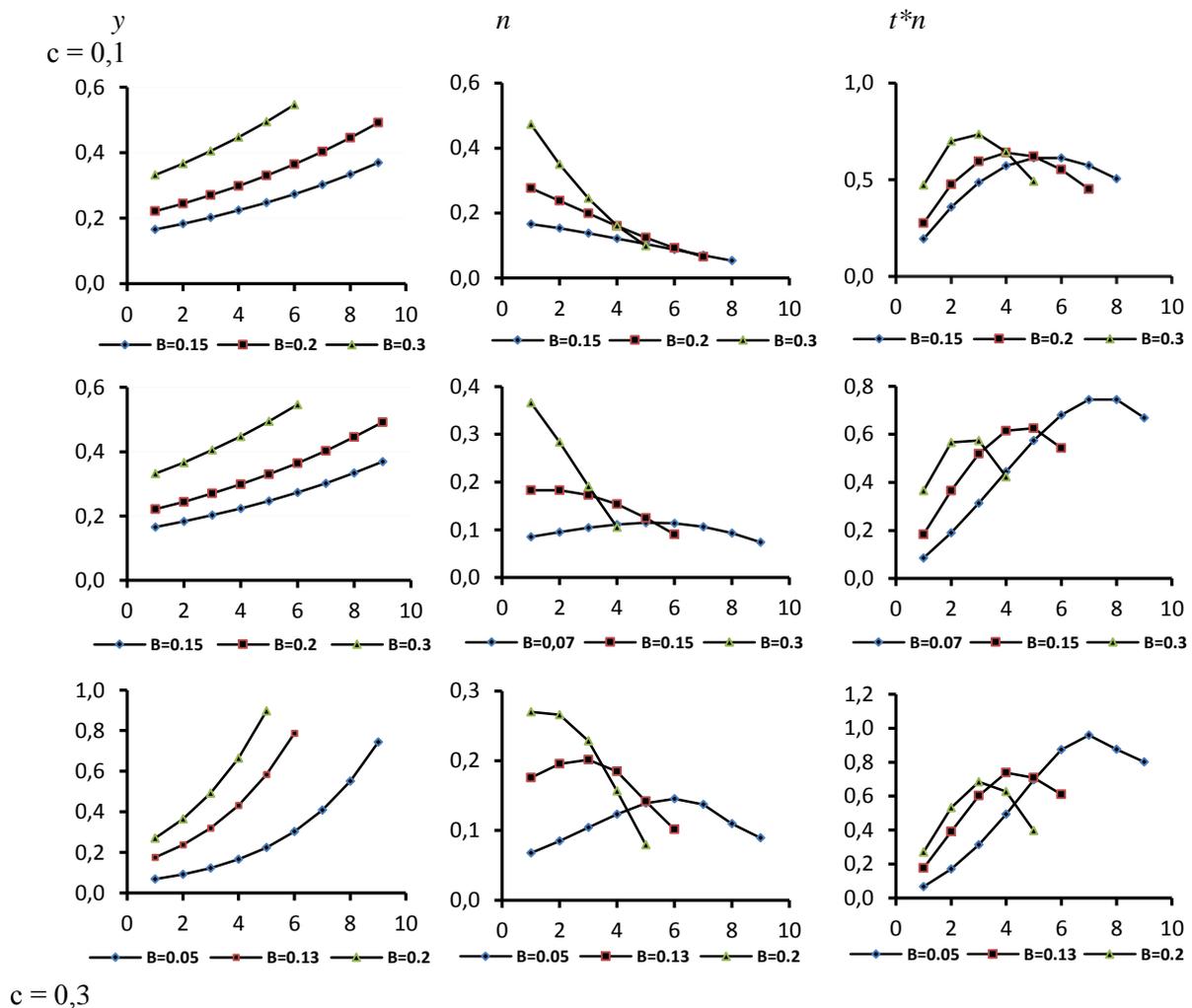


Рис. 5. Возрастная динамика трёх показателей обновления стада для 9 модельных когорт;  $y$  – интенсивность выбытия; по оси абсцисс –  $t$ , номер лактации;  $n$  – доля коров в когорте с данным сроком продуктивной жизни;  $t*n$  – среднее количество отёлов с данным сроком продуктивной жизни (сумма значений по всем номерам лактации равна средней длительности продуктивной жизни:  $\sum t*n = T$ ). Строки сверху вниз соответствуют трём значениям  $c$ : 0,1; 0,2; 0,3.

Заключение по результатам вычислительного эксперимента: 1) при фиксированном параметре  $B$  и варьировании параметра  $c$  проявляется чёткая линейная зависимость  $T$  от величины

$1/y_1$  (рис. 6 слева); 2) при фиксированном параметре  $c$  и варьировании  $B$  выявляется аналогичная линейная зависимость (рис. 6, справа); при этом в диапазоне практически наблюдаемых значений параметра  $c$  (0,1-0,3) положение общей линии регрессии (зависимость средней длительности продуктивной жизни от величины  $1/y_1$ ) определяется в основном параметром  $B$ .

Таким образом, в численном эксперименте, имитирующем динамику выбытия коров разных генотипов (с разными значениями параметров  $B$  и  $c$ ), показано, что в объединённой выборке, состоящей из субпопуляций, различающихся по динамике выбытия, чётко проявляется зависимость среднего срока продуктивной жизни от начального уровня жизнеспособности ( $1/y_1$ ). Это позволяет снять кажущееся противоречие между известным положением о стохастичности смертности (и выбытия коров) и выявленной в наших исследованиях взаимосвязью между средней длительностью продуктивной жизни коров и уровнем их конститутивной резистентности (жизнеспособности) в период первой лактации

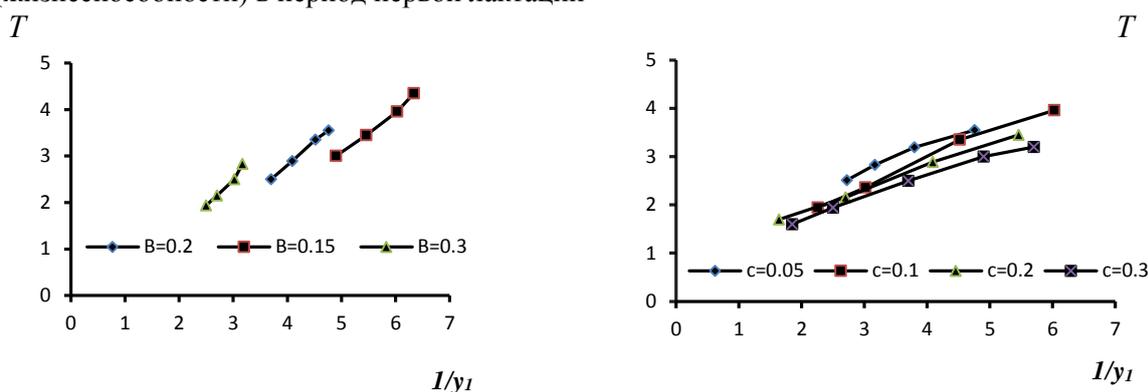


Рис. 6. Зависимость длительности продуктивного использования коров от уровня жизнеспособности, оцененного по первой лактации в модельных субпопуляциях с разными значениями параметров  $B$  и  $c$ . По оси абсцисс –  $1/y_1$  как показатель жизнеспособности (если интенсивность выбытия для первой лактации,  $y_1=0,2$ ; то показатель жизнеспособности = 5); по оси ординат – средняя длительность продуктивной жизни (количество лактаций). Слева: при фиксированном параметре  $B$  варьировался параметр  $c$ ; справа: при фиксированном параметре  $c$  варьировался параметр  $B$ .

Сравнивая два приведенных рисунка, обращает на себя внимание относительно «кучное» расположение кривых при варьировании параметра  $c$ , и более выраженные различия в расположении кривых при варьировании параметра  $B$ . Как будет показано в нижеследующих разделах, эта закономерность имеет немаловажное практическое значение при прогнозировании и поиске средств повышения жизнеспособности высокоудойных коров.

### 3. Определение параметров выживаемости в реальных популяциях

#### 3.1. Субпопуляции коров чёрно-пёстрой породы Ленинградского типа

В качестве материала исследования использовали данные производственного учёта возрастного состава стада коров по производственным подразделениям Ленинградской области в период 1985-1990 гг., усреднённые за несколько лет с целью компенсации отклонений от стационарных условий обновления стада. Такие отклонения возникают неизбежно в производственных условиях в силу разных факторов, включая состояние кормовой базы, ветеринарное благополучие стада, форс-мажорные выбраковки и приобретение животных и др.

Производственные данные, взятые из записей системы СЕЛЭКС, включали общую численность стада и бонитировочные данные распределения численности коров по последовательным лактациям – по 1-й, 2-й и 3-й по отдельности, затем по двум лактациям – 4-5, 6-7, 8-9, 10 и старше. Наличие данных по сдвоенным лактациям создаёт определённые трудности для количественного анализа динамики выживаемости, поэтому применялась итеративная методика восстановления ряда численности коров для всех последовательных номеров лактации по неполным

исходным данным, которая иллюстрируется на примере анализа данных по Всеволожскому району (табл. 6).

**Таблица 6. Восстановление ряда численности коров для последовательных номеров лактации по неполным исходным данным**

Номер лактации, $t$	Исходный неполный ряд	Корректирующий коэффициент	Восстановленный ряд	$y_c(t)$
1	3165		3165	0,199
2	2534		2534	0,236
3	1936		1936	0,315
4+5	2253	1,7	1325	0,300
5			928	0,358
6+7	983	1,65	596	0,350
7			387	0,499
8+9	302	1,56	194	0,444
9			108	0,629
10 и более	54	1,35	40	0,650
11			14	

Для восстановления первого и второго значения численности для «сдвоенных лактаций» применялась следующая итерационная процедура: 1) на первой итерации используются ориентировочные корректирующие коэффициенты для получения полного ряда значений  $y$ ; 2) в формате электронной таблицы Excel строится точечная диаграмма  $y(x)$  с обозначением линий маркеров первого варианта ряда, для которого обычно характерен большой разброс точек в интервале 4-й и последующих лактаций; 3) в корректирующие коэффициенты последовательно вносятся поправки, при этом автоматически генерируется новый ряд  $y$ , который отображается на точечной диаграмме; 4) при достижении минимального разброса точек убираются линии маркеров, вводится линия экспоненциального тренда с обозначением в легенде формулы регрессии и коэффициента детерминации  $R^2$ .

Динамика выбытия коров из дойного стада обычно хорошо аппроксимировалась функцией Гомпертца (рис. 7, табл. 7). Значения параметра  $c$  в разных субпопуляциях варьировали в диапазоне 0,08 - 0,15, при среднем значении для всего стада по Ленинградской области 0,1 (табл. 7). При анализе совокупности данных по 17 производственным подразделениям Ленинградской области выявлена существенная корреляция между значением средней продолжительности продуктивной жизни  $T$  и величиной  $y_1 = B * 2,72^c$  (рис. 8).

**Таблица 7. Параметры выживаемости коров дойного стада для производственных подразделений Ленинградской области**

Название	$B$	$c$	$y_1 = B * 2,72^c$	$1/y_1$	$T$
Племсовхозы	0,198	0,104	0,22	4,56	2,39
Р-н Волосовский	0,166	0,134	0,19	5,27	2,57
Р-н Гатчинский	0,22	0,096	0,18	5,47	2,61
Племзаводы	0,245	0,082	0,27	3,76	2,15
Р-н Лужский	0,209	0,084	0,23	4,40	2,34
Р-н Госненский	0,187	0,12	0,21	4,74	2,44
Р-н Тихвинский	0,183	0,10	0,20	4,94	2,5
Р-н Сланцевский	0,169	0,10	0,19	5,35	2,61
Р-н Приозерский	0,203	0,108	0,23	4,42	2,35
Р-н Ломоносовский	0,166	0,128	0,19	5,3	2,57
Р-н Кинжеский	0,219	0,089	0,24	4,18	2,27
Р-н Киришский	0,177	0,093	0,19	5,15	2,55
Р-н Кировский	0,12	0,135	0,14	7,28	3,08
Р-н Бокситогорский	0,106	0,15	0,12	8,12	3,27
Р-н Волховский	0,152	0,107	0,17	5,91	2,75
Р-н Всеволожский	0,186	0,125	0,21	4,74	2,31
Ленингр. область	0,184	0,103	0,20	4,9	2,48

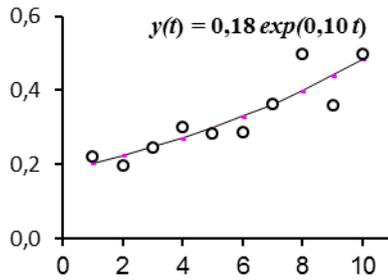
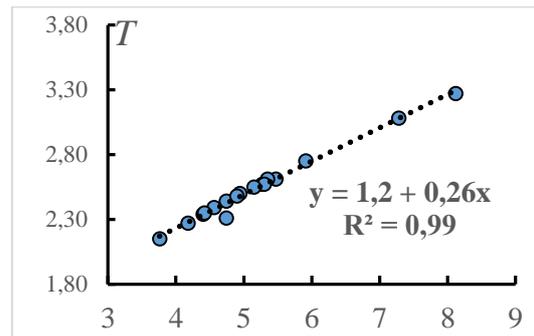


Рис. 7. Динамика интенсивности выбытия коров, оцененная по общему поголовью в производственных подразделениях Ленинградской области. По оси абсцисс – номер лактации.



$1/y_1$

Рис. 8. Взаимосвязь между начальным уровнем жизнеспособности ( $1/y_1$ ), оцененным в 17 производственных подразделениях Ленинградской области и средним количеством законченных лактаций ( $T$ ) ( $y_1 = B \cdot 2,72^c$ ) в этих подразделениях.

### 3.2. Популяции коров пяти пород США

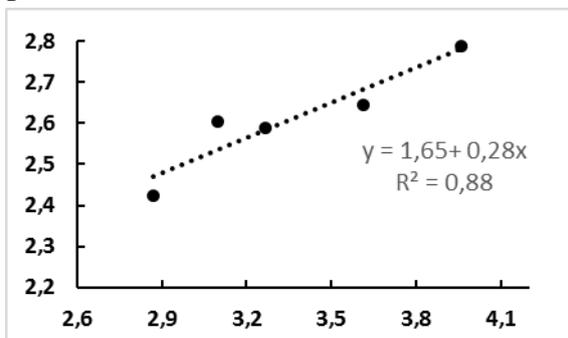
В предыдущих разделах было показано, что для интенсивности выбытия коров из стада характерна экспоненциальная динамика, как и в случае смертности в популяциях лабораторных животных и человека. Представленные в табл. 8 данные, полученные при анализе динамики интенсивности выбытия коров по общему поголовью пяти пород США – айрширская, гернзейская, голштинская, джерсейская, брауншвицкая (Hare et al., 2006), показывают большую изменчивость кривых по положению начальной точки (параметр  $B$ ) и по наклону общей линии логарифмической регрессии к оси абсцисс (параметр  $c$ ).

Таблица 8. Оценки параметров интенсивности выбытия и средней длительности продуктивной жизни для общего поголовья коров пяти пород США, полученных по данным возрастной структуры стада (Hare et al., 2006)

Параметры	Породы США				
	Голштинская	Гернзейская	Джерсейская	Айрширская	Брауншвицкая
$B$	0,262±0,01	0,316±0,006	0,220±0,006	0,273±0,007	0,276±0,01
$c$	0,118±0,01	0,084±0,004	0,115±0,006	0,077±0,006	0,067±0,006
$1/y_1$	3,612	2,868	3,960	3,267	3,10
$T$	2,644	2,423	2,789	2,589	2,604

Примечание:  $1/y_1$  – показатель жизнеспособности, оцененный по первой лактации;  $T$  – среднее по популяции значение длительности продуктивной жизни, рассчитанное за период 6 лактаций ( $r = 0.94$ ,  $P < 0.01$ )

$T$



$1/y_1$

Рис. 9. Взаимосвязь между средней длительностью продуктивной жизни ( $T$ , среднее число лактаций) и начальным уровнем жизнеспособности, оцененным по величине  $1/y_1$  для пяти пород США (рассчитано по исходным данным для шести лактаций по: Hare et al., 2006).  $T = 1,65 + 0,284 (1/y_1)$ ;  $r = 0.94$ ,  $P < 0,05$

Аналогично данным по Ленинградской области, для пяти пород США также выявлена взаимосвязь между начальным уровнем жизнеспособности, оцененным по величине  $1/y_1$  и средней длительностью продуктивной жизни ( $T$ ) (рис. 9).

### 3.3. Определение параметров выживаемости по данным регистрации выбытия по разным причинам

Исследования проводили на стаде коров чёрно-пёстрой породы с долей кровности 78-92% по голштинской породе (быки-производители из разных стран происхождения) (Федотова и др., 2019). В процессе исследований проводили расчёты с использованием информации в системе СЕЛЭКС из карточек 2-МОЛ, которые ведутся на каждую корову, при этом учитывали количество коров, выбывших за период 2015-2017 гг. по отдельным причинам и по сумме причин.

Алгоритм расчёта по восстановлению функции Гомпертца приведен в табл. 9. По столбцу «выбыло» с использованием общего начального количества 790 голов строится столбец «осталось», затем последовательно вычисляются значения  $y(t)$ , строится точечная диаграмма, определяется линия экспоненциального тренда и соответствующие значения параметров  $B$  и  $c$ . Столбец «отн. выбытие» – значения «выбыло», делённые на 790. Затем значения столбца «отн. выбытие» последовательно умножаются на соответствующие значения  $t$ , получается столбец, сумма значений которого равна средней продолжительности продуктивной жизни коров.

Таблица 9. Иллюстрация методики восстановления функции Гомпертца по эмпирическим данным выбытия коров (количество выбывших по последней завершённой лактации)

$t$ , номер лактации	Осталось в стаде, $N_i$	Выбыло, $\Delta N_i = N_i - N_{i+1}$	$y(t) = \Delta N_i / N_i$	Относ. выбытие, $n = \Delta N_i / N_1$	$n \cdot t$
1	790	138	0,175	0,175	0,175
2	652	129	0,198	0,163	0,326
3	523	237	0,453	0,300	0,900
4	286	170	0,594	0,215	0,861
5	116	62	0,534	0,078	0,392
6	54	36	0,667	0,046	0,273
7	18	18	1	0,023	0,159
8	0				$T = \sum n \cdot t = 3,1$

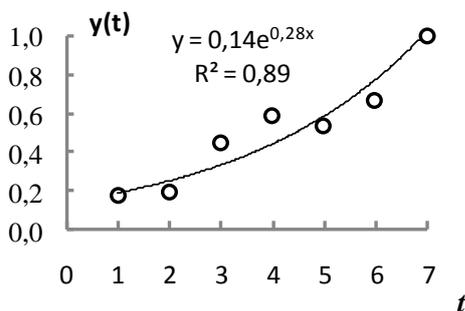


Рис. 10. Динамика интенсивности выбытия коров по сумме причин (параметры функции Гомпертца:  $B = 0,14$ ,  $c = 0,28$ ). По оси абсцисс – номера последней законченной лактации (по данным табл. 10)

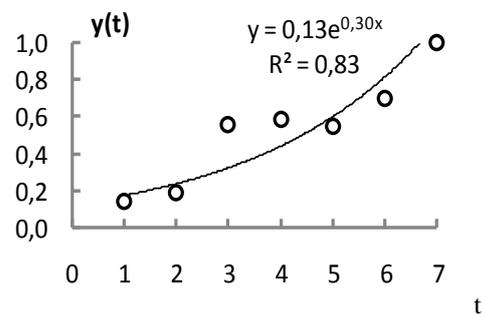


Рис. 11. Динамика интенсивности выбытия коров по сумме трёх причин – нарушений обмена, заболеваний органов воспроизводства и болезней пищеварительного тракта. Параметры функции Гомпертца:  $B = 0,13$ ,  $c = 0,30$ ).

Обращает на себя внимание практически идентичная форма кривых, описывающих динамику интенсивности выбытия коров по общей сумме причин и по сумме трёх причин – нарушений обмена веществ, заболеваний органов воспроизводства и болезней пищеварительного

тракта (рис. 10, 11). Эту закономерность можно интерпретировать как косвенное указание на существование причинно-следственных взаимосвязей в этиологии этих групп заболеваний, которые, в частности, могут быть обусловлены рассогласованием между гипертрофированной лактационной деятельностью и относительной морфо-функциональной недостаточностью в развитии внутренних органов у высокопродуктивных животных (Черепанов, 2014, 2019).

Данные о параметрах выживаемости, оцененным по данным регистрации выбытия по отдельным причинам и по сумме причин, могут быть использованы в процессе направленного отбора и подбора быков-производителей чёрно-пёстрой и голштинской пород. Изучение количественных взаимосвязей между гомеостазом (адаптивной способностью), здоровьем и параметрами выживаемости позволит выявить потенциальные резервы в организме животных и наметить пути их реализации

#### *3.4. Анализ выживаемости в популяциях, неоднородных по параметрам жизнеспособности*

*Постановка задачи.* Вопрос, возникающий в ряде практически важных приложений анализа продолжительности жизни, заключается в следующем. Если изучаемая популяция, в которой возрастная динамика интенсивности выбытия из популяции описывается функцией Гомпертца  $y(t) = B \exp(ct)$ , неоднородна по выживаемости, то можно ли оценить численные значения параметров  $B$  и  $c$  для составляющих субпопуляций, а также их долю в общей популяции на основе общепопуляционных данных и с привлечением дополнительной информации по другим источникам? Хотя аналитического решения этой задачи в такой общей постановке, по-видимому, не существует, но для получения оценок с приемлемой для практики точностью можно использовать методики расчётов, использующие итерационные процедуры последовательного приближения и оптимизации, а также методы вычислительного эксперимента.

##### *Варианты приближённого решения задачи*

###### *а) Аналитический метод (метод наименьших квадратов)*

*Исходные данные.* В расчётах использовались эмпирические данные выбытия из стада коров холмогорской породы (Черепанов et al., 2017). В качестве исходной гипотезы предполагалось, что стадо состоит из пяти составляющих – остатков когорт с различными значениями параметра  $B$  при равенстве значений параметра  $c$  (обоснование этого условия приведено ниже). Задача – оценка начальных численностей групп и значений параметров  $B$  для составляющих стада, различающихся по средней продолжительности продуктивной жизни (ППЖ). Для решения задачи использовался нелинейный метод наименьших квадратов (МНК), алгоритм оптимизации Ньютона-Рафсона.

*Методика анализа.* Обозначим пропорции, с которыми пять субпопуляций представлены в популяции в начальный момент, и кумулятивный риск выбытия в каждой из субпопуляций через  $p_j(0)$  и  $H_j(t) = B_j/c * (\exp(ct) - 1)$  соответственно, где  $t$  – время, выраженное числом лактаций,  $j$  – последовательные номера лактаций. Суммарная функция дожития (текущая численность когорты) запишется в виде:

$$S(t) = \sum_{j=1}^5 p_j(0) \exp(-H_j(t)), \quad (5)$$

а интенсивность выбытия из общей популяции описывается выражением (6)

$$y(t) = \sum_{j=1}^5 p_j(t) B_j \exp(ct), \quad (6),$$

где  $p_j(t)$  обозначает долю в общей популяции субпопуляции  $j$ ; дожившей до момента времени  $t$ . Эта доля вычисляется по формуле

$$p_j(t) = \frac{p_j(0)\exp(-H_j(t))}{\sum_{i=1}^5 p_i(0)\exp(-H_i(t))}. \quad (7)$$

Задача состоит в том, чтобы по эмпирическим данным и заданному значению параметра  $c$  найти оценки пропорций, с которыми пять субпопуляций представлены в общей популяции в начальный момент. Для этого сначала необходимо оценить значения параметров  $B_j$ ,  $j=1, \dots, 5$ , используя соотношение (6) при  $t$ , принимающем значения  $j$  от 1 до 5 лактаций.

В качестве основы для такой оценки принимается теоретическое выражение (3) для средней продолжительности жизни  $T$  при заданных параметрах  $c$  и  $B$  в модели дожития Гомпертца (Кременцова, Горбунова, 2010). Задавшись значением параметра  $c$ , для каждого  $T_j$  определяется соответствующее значение параметра  $B_j$ .

При найденных значениях  $B_j$  пропорции  $p_j(0)$  находятся по эмпирическим данным нелинейным методом наименьших квадратов; при этом минимизируется сумма квадратов разностей между эмпирическими значениями интенсивности выбытия для последовательных лактаций и значениями интенсивности выбытия, вычисленными в те же моменты времени. Далее, при найденных значениях  $p_j(0)$  вычисляется коэффициент детерминации  $R^2$ , который остаётся только функцией параметра  $c$ .

Максимизация коэффициента детерминации по  $c$  (с необходимым повторением описанной выше процедуры) даёт возможность получить соответствующее оптимальное значение параметров  $p_j(0)$ .

Заключение, которое можно сделать по результатам расчётов (с учётом сделанных предположений и в пределах разрешающей способности метода для данного набора данных), состоит в том, что в данном стаде отсутствуют представители короткоживущих групп со средней ППЖ 1 и 2 лактации, а также группа со средней ППЖ 4 лактации. Представители когорты со средней ППЖ 3 и 5 лактаций представлены практически в равных пропорциях;  $p(0) = 51$  и 49% соответственно. Коэффициент детерминации  $R^2$  для зависимости, полученной для всего стада, равен 0.835. Величина  $R^2$  показывает, какая часть (доля) дисперсии зависимой переменной объясняется рассматриваемой моделью. В случае линейной зависимости достаточно качественной считается модель с коэффициентом детерминации выше 0,8. Хотя для нелинейных моделей  $R^2$  не является вполне адекватной характеристикой качества приближения рассматриваемой функции, в данном случае отклонение от линейной зависимости небольшое, поскольку эти отклонения проявляются более чётко по мере приближения к максимальной видовой продолжительности жизни, которая для коров в естественных условиях оценивается не менее чем 20 лактациями.

#### *Условия применимости и ограничения метода наименьших квадратов*

При оценке параметров выживаемости методом наименьших квадратов для неоднородной популяции по данным возрастной структуры стада коров необходимо учитывать влияние «мешающих» факторов.

1) Небольшое количество «точек» (пар значений интенсивности выбытия и номера лактации) – как правило, не более 10; это накладывает определённые ограничения на количество оцениваемых параметров, так как при его увеличении свыше определённого уровня, специфического для каждого набора эмпирических данных, надёжность оценок снижается. В данном случае значения параметров  $B_j$  вычисляются с использованием условия, что все группы имеют одинаковые значения  $c$ . По эмпирическим данным оценивается 5 параметров (начальные доли групп в популяции). Оптимальное значение параметра  $c$  определяется из условия достижения максимума величины  $R^2$ . Ввиду небольшого количества «точек», результаты проведенного расчёта следует рассматривать в качестве примера «работающего метода», а в дальнейшем необходимо проводить детальную его апробацию и исследовать возможности других методов. При этом будут иметь преимущество те методы, которые дополнительно дают значения стандартной ошибки оцененных параметров. Увеличить количество точек можно, но для этого необходим переход к более информативной системе регистрации и электронной архивации производственных данных.

2) В описанной процедуре минимизируется сумма квадратов разностей между прогнозируемыми и фактическими величинами по всему интервалу значений аргумента, при этом суммирование отклонений производится с равными весами для всех точек. Но в данном случае, ввиду того, что численность когорты с возрастом быстро снижается, а интенсивность выбытия вычисляется как относительная разность двух смежных значений, статистическая надёжность этой величины выше всего на первых лактациях, а на последующих она снижается, увеличивается разброс точек, нарушается требование равенства дисперсий отклонений. В связи с этим увеличивается риск получения «выскакивающих значений».

3) Определённая проблема при использовании метода МНК для оценки параметров выживаемости коров возникает в случае существования «короткоживущих» субпопуляций, численность которых с возрастом быстро снижается, и если расчётная (при заданных значений  $B$  и  $c$ ) интенсивность выбытия становится больше 1, то прогнозируемая численность группы «короткожителей», будет сначала небольшой отрицательной величиной (т.е. артефактной), с увеличением на последующих шагах с попеременным изменением знака. Следовательно, в применяемых алгоритмах необходимо предусматривать «обрыв» вычислений для короткоживущих когорты во избежание смещений в оценках параметров для общей популяции. Такие ситуации в демографических работах не встречаются, так как в них рассматриваются возрастные интервалы в несколько десятков лет, но они возможны в популяциях продуктивных животных, если проводится «поперечный» анализ по данным возрастной структуры стада.

По результатам проведенной предварительной апробации, применение метода наименьших квадратов с итерационной процедурой для получения оптимальных оценок параметров выживаемости в неоднородной популяции продуктивных животных можно считать в целом обоснованным и перспективным, но требуется проведение дополнительных исследований, в том числе с выработкой предложений по совершенствованию системы регистрации, электронной архивации и анализа производственных данных. Такие предложения актуальны в настоящее время в связи с разработкой микроэлектронной системы идентификации животных.

*б) Пилотный алгоритм оценки гетерогенности популяции методом последовательного приближения*

При этом подходе задача состояла в том, чтобы на материале, полученном на некотором множестве субпопуляций одного породного типа найти такие значения  $B$  и начальной численности для нескольких однородных групп, входящих в состав каждой субпопуляции, чтобы точки, представляющие значения  $B$  *sum* и  $c$  *sum*, определяемые по динамике суммарной численности остатков этих групп (когорты), максимально приближались к линии эмпирического тренда  $c = f(B)$  по исследованным субпопуляциям (производственным подразделениям).

Работоспособность такого способа решения первоначально была показана на численном примере (Черепанов, 2018). Следующий этап отработки метода включал в себя исследование, проведенное на конкретном эмпирическом материале (Черепанов, 2020).

*Материал, методы, задачи исследования.* В качестве материала для исследования были использованы данные по возрастному составу дойного стада в 16 производственных подразделениях Ленинградской области.

При анализе данных по возрастной динамике выбытия коров нами было выявлено наличие отрицательной корреляции между параметрами  $B$  и  $c$  для исследованных субпопуляций (Черепанов, 2020, рис. 14) Такую закономерность (корреляция Гомпертца-Мейкема) в демографических работах объясняют тем, что в динамику смертности вносит вклад компонента, связанная с воздействием внешних факторов, с равной вероятностью убивающих особей разного возраста. Поэтому был разработан алгоритм численного интегрирования распределения Гомпертца для проверки применимости этой модели к имеющемуся массиву данных.

*Проверка модели Гомпертца-Мейкема*

Для объяснения выявленной нами аналогичной корреляции была предложена альтернативная гипотеза, работоспособность которой ранее была апробирована на иллюстративном численном примере (Черепанов, 2018б), согласно которой причиной наблюдаемой корреляции

может быть неоднородность субпопуляции по параметрам жизнеспособности, т.е. каждое стадо может состоять, из нескольких однородных групп, имеющих одно и то же значение  $\hat{c}$ , но разные значения параметра  $B$  и начальной численности когорты. При описании выживаемости всего стада функцией Гомпертца, наличие «короткоживущей» группы вызывает смещение вверх начального участка кривой  $y(t)$ , поэтому оцененное по всему стаду значение  $c\ sum$  оказывается меньше  $\hat{c}$  (т.е. чем больше  $B\ sum$ , тем меньше  $c\ sum$ ).

Полученный паттерн распределения точек, представляющих значения эмпирических параметров  $B$  и  $c$  на корреляционном эллипсе, и общая линия регрессии использовались в качестве эталона сравнения для последующих модельных расчётов, проведенных для проверки гипотезы о существовании механизма Гомпертца-Мейкема и для идентификации составляющих компонент субпопуляций (по предположению неоднородных) при проверке альтернативной гипотезы.

При проверке гипотезы о корреляционной взаимосвязи значений  $B$  и  $c$  по типу модели Гомпертца-Мейкема вышеизложенный алгоритм восстановления рядов численности когорты был модифицирован за счёт добавления компоненты, пропорциональной текущей численности когорты  $N_i$  с использованием коэффициентом пропорциональности 0,03; 0,06 и 0,12:  $N_{(i+1)} = (1 - y_i) * N_i - (0,03 * N_i)$ , и т.д.

#### *Верификация гипотезы о неоднородности субпопуляций*

При проведении расчётов по проверке альтернативной гипотезы предполагалось, что каждая субпопуляция состоит из трёх групп, различающихся по параметрам выживаемости, для каждой когорты задавали значения параметров  $B$ ,  $c$  и начальной численности  $N_1$  и производили восстановление значений  $N_i$  посредством численного интегрирования распределения Гомпертца. Для получения значений  $B\ sum$  и  $c\ sum$  для субпопуляции, ряды  $N_i$  трёх когорт суммировались, вычислялись последовательные значения для столбцов  $\Delta N_i$  и  $\Delta N_i / N_i$ . Затем в приложении MS Excell производилось построение точечной диаграммы с использованием ряда значений  $t$  в качестве  $x = \dots$  и ряда  $\Delta N_i / N_i$  в качестве  $y = \dots$ , задавалось построение линии «экспоненциальный тренд», формулы регрессии и значения коэффициента детерминации.

Задача состояла в том, чтобы найти такие значения  $B$  и начальной численности для трёх однородных групп, входящих в состав каждой субпопуляции, чтобы точки, представляющие значения  $B\ sum$  и  $c\ sum$ , определяемые по динамике суммарной численности остатков этих групп (когорт), максимально приближались к линии эмпирического тренда  $c = f(B)$  по исследованным производственным подразделениям.

Было проведено несколько серий расчётов, в каждой из которых во всех однородных группах использовалось одно значение  $\hat{c}$  (по предположению, оно может быть специфическим для данного породного типа). Совпадение расчётного тренда с фактической линией регрессии было получено при значении  $\hat{c} = 0,16$ .

Расчёты были проведены для пяти неоднородных субпопуляций, каждая из которых состоит из трёх групп с одинаковыми значениями  $c$ , но с разными значениями  $B$  и начальной численности когорт. В первом варианте субпопуляция численностью 1000 голов, состояла из трёх групп с начальной численностью когорт 300, 300 и 400. Во втором варианте численность групп была одинаковой (330). Задачей было определить значения параметров  $B\ sum$  и  $c\ sum$  для пяти точек, представляющих 15 однородных групп, по критерию максимально возможного приближения к эмпирически наблюдаемой линии регрессии.

Для корректного решения поставленной задачи необходимо при выборе отсчётов параметра  $B$  для групп, различающихся по жизнеспособности, особенно для короткоживущих групп, принимать во внимание наличие нелинейной взаимосвязи между параметром  $B$  и показателем  $CR1$  ( $CR1 = 1/y1 = 1/(B * 2.72^c)$  конститутивной резистентности) (табл. 11), как предиктором продолжительности продуктивной жизни коров (рис. 12).

Поэтому отсчёты величины  $B$  для составляющих групп (с последующим построением кривой  $y(t)$  для всего стада) производились по шкале жизнеспособности  $CR1$ , а после получения решения уравнений и последующего перехода к исходной координатной сетке, при совпадении прогнозных и эмпирических значений, задачу можно считать решённой.

Таким образом, в расчётах по вариантам I - V значения параметра  $B$  для отдельных групп, составляющих субпопуляцию, подбирались так, чтобы соответствующие им значения  $CR1$  в группах  $B1(CR1.1)$ ;  $B2(CR1.2)$ ;  $B3(CR1.3)$  различались приблизительно на одно и то же количество единиц  $CR1$  (для разных вариантов расчёта они различались примерно на 2 или 3 ед.  $CR1$ ).

Таблица 10. *Нелинейная зависимость  $CR1$  (конститутивной резистентности) на первой лактации от величины параметра  $B$*

$B$	$CR1 = 1/(B*2,72)$
0,06	14,20
0,08	10,65
0,1	8,52
0,12	7,10
0,14	6,09
0,16	5,33
0,18	4,73
0,2	4,26
0,22	3,87
0,24	3,55
0,26	3,28
0,28	3,04
0,3	2,84
0,32	2,66

Примечание: 0,16 – значение параметра  $c$

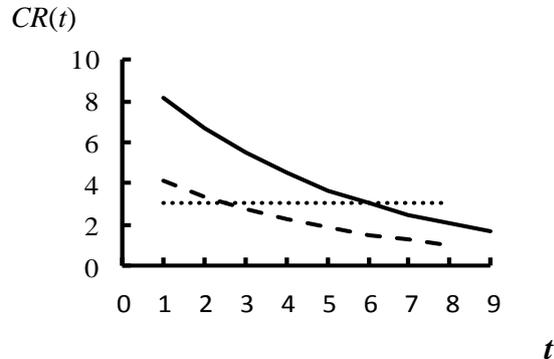


Рис. 12. Два варианта динамики жизнеспособности в когортах, имеющих разные значения параметра  $B$  (0,1 и 0,2) и одно значение  $c$  (0,2) в функции Гомпертца  $y_c(t)$ . По оси абсцисс – номер лактации, по оси ординат – показатель конститутивная резистентность – величина, обратная интенсивности выбытия  $1/y(t)$ . ..... условная нижняя граница жизнеспособности, определяющая сроки исчерпания когорт.

### Результаты и обсуждение

В логарифмическом масштабе полученные графики интенсивности выбытия имели вид, характерный для модели Гомпертца-Мейкема – линии тренда сходятся к одной точке при экстраполяции в область больших значений времени (номеров лактации), при этом наблюдается отрицательная корреляция между значениями  $B$  и  $c$ . Совершенно по-другому располагаются логарифмические графики интенсивности выбытия в изученной популяции коров – схождение линий тренда при экстраполяции в область больших значений времени (номеров лактации) отсутствует (Черепанов, 2020). Следовательно, причиной отрицательной корреляции, наблюдаемой по массиву эмпирических данных, служит какой-то другой механизм, отличный от модели Гомпертца-Мейкема.

Согласно вышеописанной методике, были определены значения параметров  $B_{sum}$  и  $c_{sum}$  для кривых, представляющих функции  $y(t)$  для пяти модельных субпопуляций, каждая из которых состоит из трёх однородных групп. На рис. 13 представлены возрастные тренды интенсивности выбытия по варианту IV трёх однородных групп с разными значениями параметра  $B$  (0,12; 0,16; 0,30) и одним значением  $c$  (0,16). Для суммарной субпопуляции параметр  $c = 0,09$ .

По значениям параметров  $B_{sum}$  и  $c_{sum}$ , оцененным по динамике численности объединённых однородных групп, были получены отрицательные линейные тренды по обоим вариантам расчёта: по варианту  $a$  (начальная численность когорт – 300-300-400):  $c = 0,20 - 0,49*B$ ;  $R^2 = 0,996$  по варианту  $b$  (330-330-330):  $c = 0,22 - 0,6*B$ ,  $R^2 = 0,82$ .

При этом линия тренда, построенная по варианту  $a$ , практически совпала с эмпирической линией регрессии  $c = 0,19 - 0,45*B$  (рис. 14).

Поскольку для прогноза выживаемости для всех модельных групп использовалось одно и то же значение показателя  $\hat{c}$  (0,16), выявленное совпадение прогноза и эмпирических данных можно трактовать в том смысле, что продолжительность хозяйственного использования лактирующих коров зависит, в основном, не от темпа старения, а от величины параметра  $CR1 = 1/y_1 = 1/(B*2,72^c)$ ,

характеризующего конститутивную резистентность на первой лактации, т.е. от потенциала жизнеспособности, сформированного до начала лактационной деятельности.

Действительно, по данным проведенных расчётов прогнозируется зависимость средней продолжительности продуктивной жизни  $T$  неоднородной субпопуляции от величины конститутивной резистентности на первой лактации ( $T = 2 - 0.24 \cdot CR1$ ;  $R^2 = 0.965$ ). Аналогичная зависимость получена по сводным данным для 15 однородных групп – составляющих пяти субпопуляций одной породы. Теоретически, при расширении диапазона значений  $CR1$ , как показано ранее, следует ожидать отклонения от линейного тренда (Черепанов и др., 2017), однако в исследованной области значений этого параметра такое отклонение можно считать малозначимым (рис. 15).

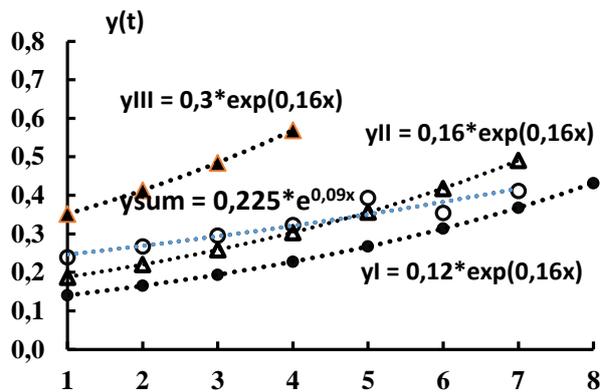


Рис. 13. Интенсивность выбытия  $y_{sum}$  по варианту IV (табл. 1) для субпопуляции, полученной при объединении трёх однородных групп – I, II, III с разными значениями параметра  $B$  (0,12; 0,16; 0,30) и одним значением  $c$  (0,16). По оси абсцисс – номер лактации. Светлыми кружками маркирована суммарная популяция с параметром  $c = 0,09$ .

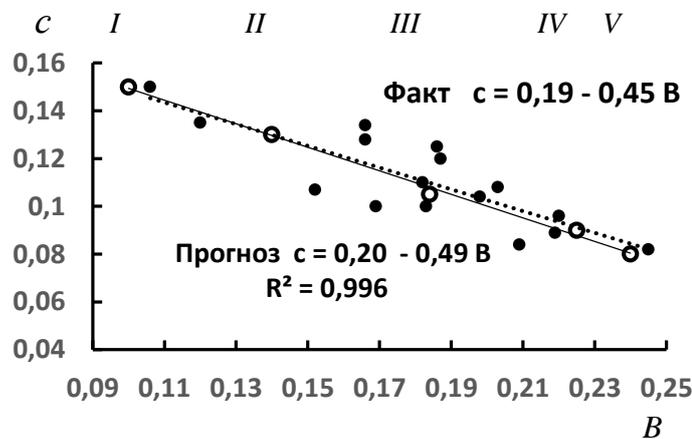


Рис. 14. Корреляция между значениями параметров  $B$  и  $c$  при анализе выбытия коров в 17 производственных подразделениях Ленинградской области. ● – эмпирические данные; ○ – модельный прогноз для пяти неоднородных субпопуляций, каждая из которых состоит из трёх групп с одинаковыми значениями  $c = 0,16$ , но с разными значениями  $B$  и начальной численности когорт (табл. 1).

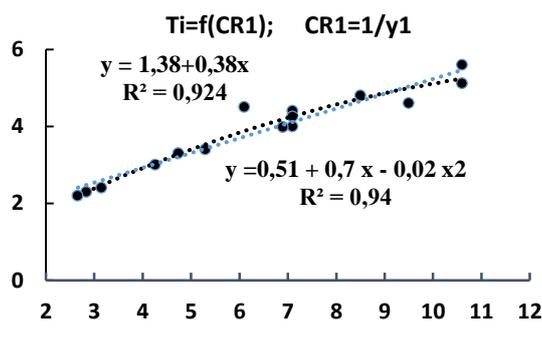


Рис. 15. Прогнозируемая зависимость средней продолжительности продуктивной жизни  $T$  для 15 однородных групп, составляющих 5 субпопуляций одной породы (при  $\hat{c} = 0,16$ ), от величины  $CR1 = 1/y_1 = 1/(B \cdot 2.72^c)$ .

В целом, полученные данные можно считать развитием предложенной концепции о ключевой роли конститутивной резистентности для оценки потенциала жизнеспособности молочных коров. Согласно этой концепции, продолжительность продуктивной жизни существенно зависит от потенциала жизнеспособности, сформированного до начала периода лактационной деятельности.

#### 4. Анализ динамики надоев молока по последовательным лактациям

При анализе возрастной динамики молочной продуктивности используются данные производственного учёта надоев молока за 305 дней в группах коров с разными номерами лактации. Для оценки количественных параметров, определяющих динамику удоя за учётный период по последовательным лактациям ( $y_m$ , кг;  $t$  – номер лактации) применяется трёхкомпонентная функция, ранее использованная в докторской диссертации Ю.Т. Токарева по селекции молочных коров (Токарев, 2005):

$$y_m(t) = A \cdot \exp(-\exp(-bt)) \cdot D^t, \quad (8)$$

где  $A$  – потенциал молочной продуктивности – биологический максимум для данной субпопуляции при гипотетически отсутствии возрастного снижения функциональных резервов молокообразования.

Вторая компонента,  $\exp(-\exp(-bt))$  описывает возраст-зависимое увеличение (с эффектом насыщения) потенциальной способности к молокообразованию, обусловленное увеличением размеров тела и морфологическим развитием вымени;  $b$  – параметр, определяющий скорость роста этой способности у молодых особей, который для современных пород, по нашим оценкам, варьирует в относительно небольших пределах (0,4–0,5);

Функция  $D^t$  описывает возрастное снижение (поскольку  $D < 1$ ) функциональной мощности систем, обеспечивающих лактационную деятельность; при этом параметр  $D$  представляет собой «начальное» значение этого параметра в период первой лактации ( $D^1 = D$ ).

По нашим данным, значение  $D$  может варьировать в пределах 0,85 у коров с коротким сроком продуктивной жизни до 0,99 у коров-«долгожительниц», что даёт основание интерпретировать этот параметр как потенциал жизнеспособности, сформированный к началу репродуктивного периода. Синонимом жизнеспособности в данном контексте можно считать конститутивную резистентность как общую фоновую возраст-зависимую устойчивость к действию повреждающих факторов.

Следует иметь в виду, что функция  $D^t$  описывает отрицательный экспоненциальный тренд, поскольку её можно представить в виде экспоненты, т.е.  $D^t = \exp(-c \cdot t)$ , где  $c = \ln D$ , хотя здесь мы не будем использовать это преобразование. Известно, что после достижения возраста репродуктивной зрелости ряд важнейших физиологических свойств организма характеризуются

экспоненциальным снижением в связи с перехода многих клеточных систем в постмитотическое состояние. Хотя молочные железы, в отличие, например, от скелетно-мышечной ткани, не относятся к таким системам, и пролиферативные процессы в них активируются в соответствии с половой цикликой, функциональная мощность общих систем организма, обеспечивающих лактационную деятельность (конститутивная резистентность), как показано в предыдущих разделах, снижается с возрастом, причём с наибольшей скоростью в ранние сроки общего лактационного периода, т.е. на первых лактациях (см. рис. 12).

Для численной идентификации значений  $A$ ,  $b$  и  $D$  для групп коров с разными номерами последней лактации применялась процедура нелинейного оценивания (метод Маргкарта-Левенберга, пакет СТАТИСТИКА) с использованием в качестве исходных данных последовательных значений номеров лактации  $t_i$  и 305-дн. надоев  $y_{mi}$ .

**Исследование 1.** Стадо коров холмогорской породы ОАО «колхоз им. В.И. Ленина» Жуковского района Калужской обл. (Черепанов и др., 2013; Cherepanov et al., 2013). Общая численность обследованной выборки коров 1650.

Исходные данные – надои молока по последовательным завершённым лактациям (табл. 11). После усреднения сгруппированных данных была проведена аппроксимация возрастной динамики надоев трёхкомпонентной функций  $y_m(t)$  (рис. 16).

**Таблица 11. Динамика надоев молока за учётный период (305 дней) по последовательным лактациям для коров холмогорской породы, сгруппированных по продолжительности продуктивной жизни**

$t$	M	$\sigma$	m	$t$	M	$\sigma$	m	$t$	M	$\sigma$	m
1	4793	905	65	1	4703	918	66	1	4746	945	68
	N=1, n=210			2	5389	983	70	2	5405	1053	75
1	4703	918	66	3	5691	1202	86	3	5668	1010	72
2	5389	983	70				n=196	4	5566	1146	82
	n=196										n=196
$t$	M	$\sigma$	m	M	$\sigma$	m	M	$\sigma$	m		
1	4381	877	58	4207	899	60	4217	914	65		
2	5090	978	65	4948	930	62	5068	1039	74		
3	5394	1049	70	5294	926	62	5372	1144	82		
4	5510	1113	74	5409	1110	74	5546	1109	79		
5	5344	1150	77	5515	1122	75	5619	1106	79		
6			n=212	5296	1154	77	5397	1095	78		
7						n=212	5129	1122	80		
									n=196		
$t$	M	$\sigma$	m	M	$\sigma$	m	$\sigma$	m			
1	3964	72	867	4214	951	136	3815	801	160		
2	4760	85	1025	4936	1145	164	4520	1119	224		
3	5066	80	957	5433	1298	185	5135	1074	215		
4	5339	95	1146	5363	1012	145	5585	1005	201		
5	5415	96	1157	5302	966	138	5306	902	180		
6	5465	88	1051	5255	841	120	5576	1045	209		
7	5282	94	1128	5293	1016	145	5655	871	174		
8	4926	93	1119	5212	955	136	5405	984	197		
9			n=142	4547	963	138	5105	836	167		
10						n=64	4867	916	183		
									n=26		

Примечание:  $t$  – число лактаций,  $n$  – количество коров в группе. Данные из архива системы СЕЛЭКС по ОАО «колхоз им. В.И. Ленина» Жуковского района Калужской обл. (Черепанов и др., 2013);

По результатам проведенного анализа выявлены корреляционные взаимосвязи между продолжительностью продуктивной жизни (число законченных лактаций) и параметрами  $D$  (потенциал конститутивной резистентности,  $A$  (потенциал продуктивности) и надоями за первую лактацию в группах с разным числом лактаций (рис. 16).

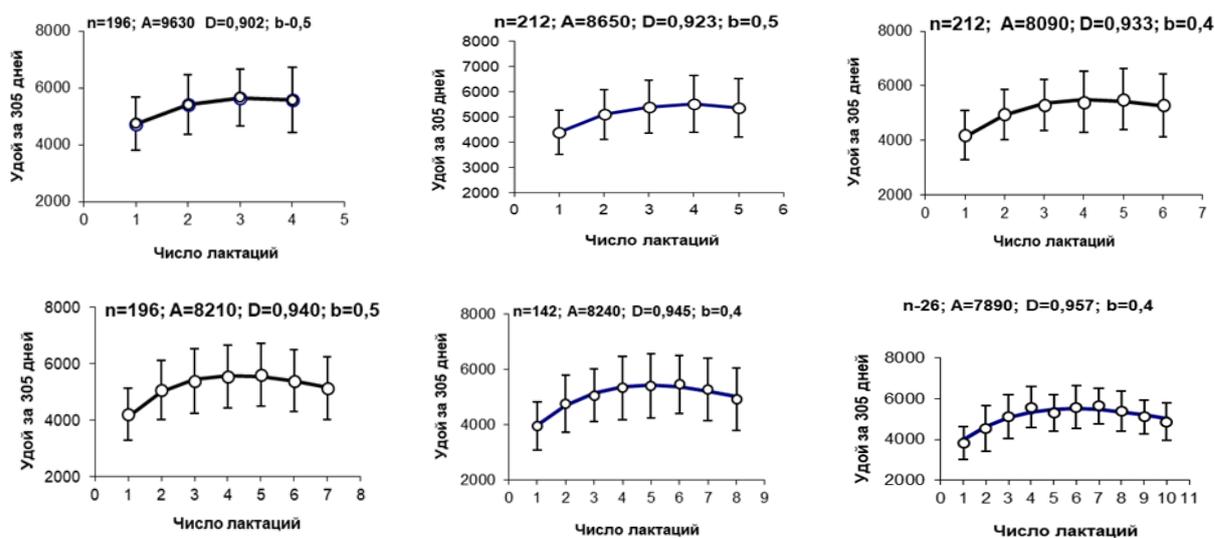


Рис. 16. Возрастная динамика удоя молока за 305 дней лактации ( $M \pm \sigma$ ) в группах коров холмогорской породы с разной длительностью продуктивной жизни («к-з им. В.И. Ленина» Жуковского района Калужской обл. ( $M \pm \sigma$ )). Кружки – фактические данные; линии – аппроксимация функцией  $y = A * \exp(-\exp(-bt)) * D^t$ , где  $t$  – порядковый номер лактации,  $D < 1$ .

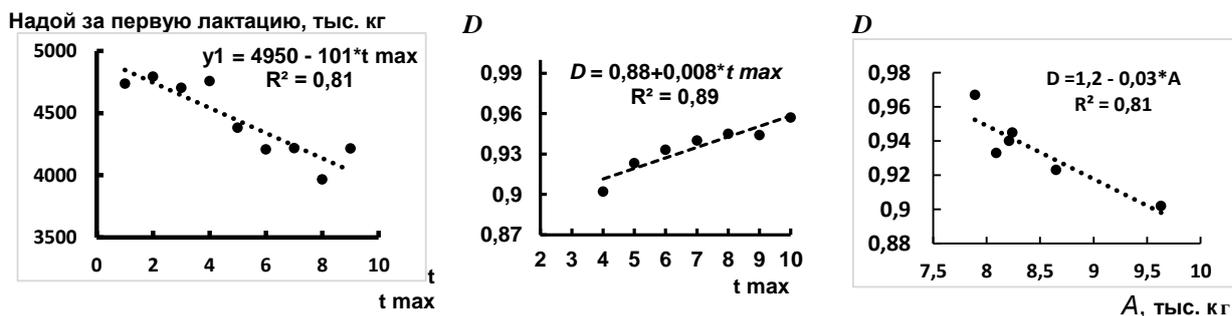


Рис. 17. Надой за первую лактацию и оцененные значения параметров  $D$  (потенциал конститутивной резистентности) и  $A$  (потенциал продуктивности) в группах коров с разной продолжительностью продуктивной жизни.

Примечание: к-з им. В.И. Ленина Жуковского р-на, холмогорская порода (Черепанов и др., 2013).

Исследования 2 и 3 проведены на значительно меньшем поголовье коров, однако в них были выявлены аналогичные закономерности по возрастной динамике 305-дн. надоев

**Исследование 2.** Стадо коров чёрно-пестрой породы племхоза «Ворсино» Калужской области (Черепанов, Решетов, 2010; Черепанов, Богданова, 2012).

По данным, приведенном на рис. 19, в каждой группе наблюдается снижение надоев в конце всего общего лактационного периода, причём вариации в сроках появления этого снижения зависят от «начального» значения величины функции  $D'$  при  $t = 1$ , т.е. от величины  $D$  для данной группы коров, так что при малых значениях  $D$  пик надоев за лактацию наступает раньше и коровы быстрее выбывают из стада (рис. 18). При этом также выявляется корреляционная взаимосвязь между показателем конститутивной резистентности  $D$  и средней продолжительности жизни  $T$  (рис. 19).

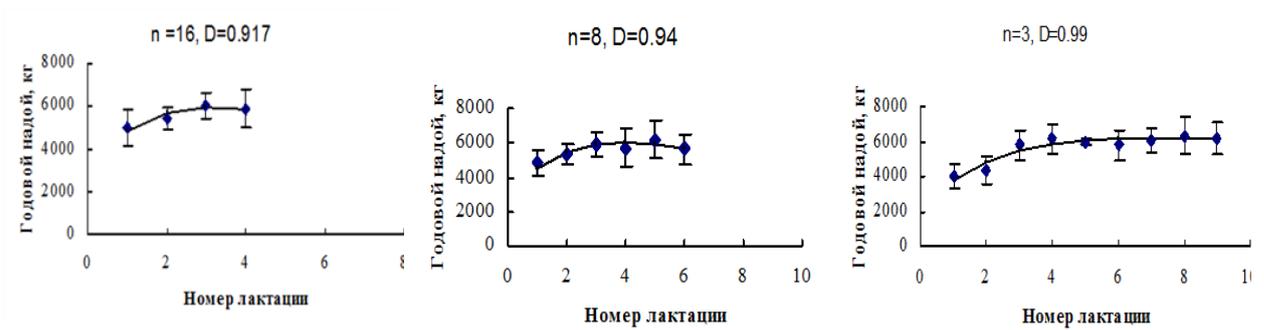


Рис. 18. Возрастная динамика удоя молока за 305 дней лактации ( $M \pm \sigma$ ) в группах коров чёрно-пестрой породы племхоза «Ворсино» Калужской области (Черепанов, Решетов, 2010; Черепанов, Богданова 2012).

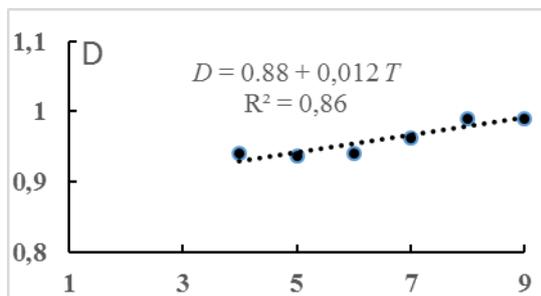


Рис. 19. Взаимосвязь показателя конститутивной резистентности и средней продолжительности жизни коров чёрно-пестрой породы племхоза «Ворсино» Калужской области.

**Исследование 3.** Использованы данные племенного учета по стаду коров черно-пестрой породы ОАО «Воробьево» Калужской области, выбывших в период 1998-2007 г.г. (Черепанов, Решетов, 2010; Черепанов, Богданова, 2012). По сгруппированным данным была проведена аппроксимация трёхкомпонентной функции возрастной динамики надоев за 305 дней лактации (рис. 20).

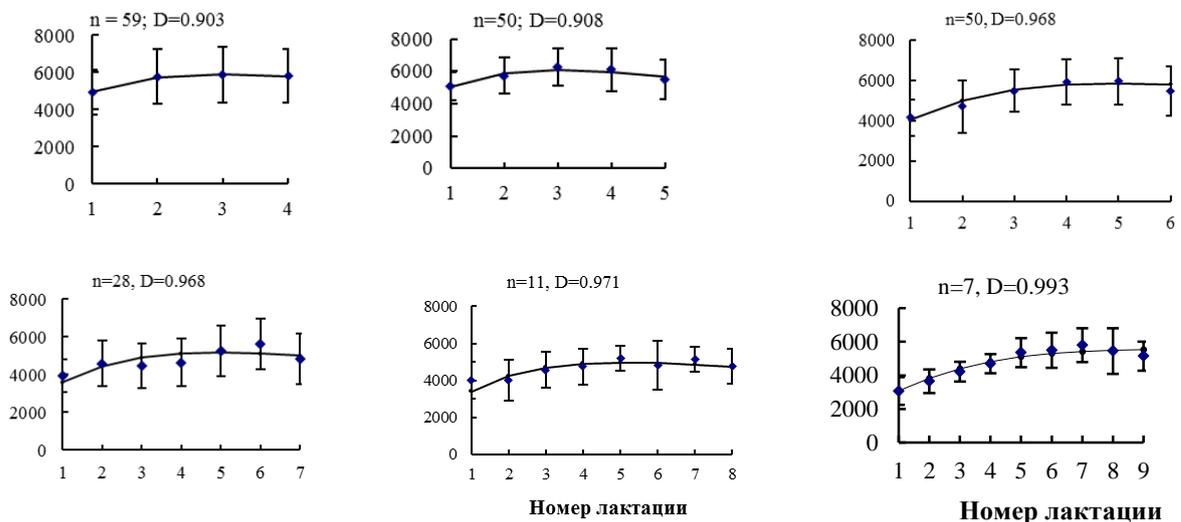


Рис. 20. Возрастная динамика удоя молока за 305 дней лактации ( $M \pm \sigma$ ) в группах коров черно-пестрой породы ОАО «Воробьево» Калужской области.

В целом, по результатам трёх исследований с регистрацией динамики 305-дн. надоев по последовательным лактациям можно для отдельных групп коров с данным номером последней лактации показана возможность определить два количественных параметра, определяющих потенциал продуктивности  $A$  и потенциал конститутивной резистентности (жизнеспособности)  $D$ .

Здесь возникает вопрос о том, как наследуются потенциалы продуктивности и резистентности, но на это можно ответить только в ходе дальнейших исследований.

В отличие от простого визуального рассмотрения динамики надоев по последовательным лактациям, количественный анализ даёт возможность оценить потенциал продуктивности и резерв резистентности. При значениях параметров  $A=9630$ ,  $D=0,902$ ,  $b=0,5$  надой за первую лактацию  $y_{m1} = 4740$ , т.е. в 2 раза меньше потенциала продуктивности; для второй лактации  $y_{m2}=5420$  и т.д. При этом нельзя считать, что наивысшая по стаду лактация отражает момент «полной реализации» потенциала продуктивности. Стадо может быть гетерогенным и по потенциалу продуктивности, и по резерву жизнеспособности; в самом неблагоприятном случае эти показатели могут оказаться антагонистами.

Наличие статистически значимой положительной взаимосвязи между длительностью периода хозяйственного использования коров и «начальным» уровнем конститутивной резистентности, т.е. значением параметра  $D$  (Черепанов, 2014) даёт основание предположить существование количественной взаимосвязи между резистентностью, оцененной по удоям, и продуктивной жизнеспособностью, оцененной по выбытию коров из стада: чем выше «начальный уровень» резистентности (жизнеспособности), тем больше шансов у данной особи иметь длительную продуктивную жизнь. Полученные данные дают основание предполагать, что возрастную динамику надоев и пожизненную продуктивность можно спрогнозировать с помощью двух параметров – потенциала молочной продуктивности и потенциала жизнеспособности. На этом основании можно, по-видимому, рассчитывать на разработку тестов для оценки племенной ценности быков-производителей по показателям потенциала продуктивности и жизнеспособности их дочерей

Второе следствие выявленной закономерности состоит в том, что поголовье первотёлок в стаде неоднородно по потенциалу жизнеспособности  $D$ , т.е. по продолжительности предстоящей продуктивной жизни, которая, судя по этим и обсуждаемым ниже данным, детерминирована резервом «жизненных сил» сформированным в периоды, предшествующие достижению возраста репродуктивной зрелости.

Выявленные закономерности дают основание предположить, что потенциал продуктивности и потенциал резистентности – это два количественных признака, которые у разных особей или групп животных могут сочетаться по-разному, в частности, в зависимости от уровня продуктивности. Например, в группу с более высоким потенциалом продуктивности могут попадать преимущественно коровы с низким уровнем резистентности, тогда как в области менее высоких значений потенциала продуктивности вероятность такого неблагоприятного сочетания будет незначительной. Определенную роль при этом, вероятно, могут играть и наследственно обусловленные, и паратипические факторы, например, обусловленные неадекватностью применяемых систем разведения, питания и мониторинга здоровья высокопродуктивных коров.

Вклад некоторых паратипических факторов в продуктивное долголетие коров можно в определенной степени оценить по имеющимся данным зоотехнического учета. Так, если степень гипертрофии молочных желез не соответствует генетическим детерминированным возможностям висцеральных функций обеспечивать высокий темп синтеза компонентов молока в транзитный период, то т.е. на пике метаболического стресса, то это может сказаться на персистенции лактации (будет наблюдаться более крутой спад лактационной кривой после пика лактации), на индексе осеменяемости, на величине сервис-периода и в целом (с учётом эффектов последействия) – на жизнеспособности в последующие сроки продуктивной жизни. Ввиду высокой вариабельности лактационных кривых, для проверки этого прогноза необходимо накопление достаточно большого объёма данных, полученных в разных хозяйствах. На данный момент мы можем отметить, что анализ, проведенный нами ранее по одному племенному хозяйству, не выявил существенных различий по форме лактационных кривых в группах коров с разной длительностью продуктивной жизни (Черепанов, Решетов, 2010).

*Основные положения концепции о конститутивной резистентности  
как основного фактора выживаемости коров дойного стада*

В 70-х гг. в научной литературе обсуждался вопрос о различной природе и проявлениях конститутивных и индуцибельных процессов во время развития, роста и старения организма (Озернюк и др., 1971; Зотин, 1974); позднее такой подход получил распространение в молекулярно-биологических работах, в том числе в отношении процессов транскрипции и синтеза белков. В контексте обсуждаемой проблемы можно полагать, что конститутивная резистентность (КР) является высоко интегрированным возраст-зависимым физиологическим показателем, отражающим способность организма поддерживать ключевые функциональные параметры в границах, совместимых с жизнью или с повышенной интенсивностью функционирования составляющих подсистем (в том числе, с уровнем молочной продуктивности). Проявления КР могут быть разными в зависимости от масштаба времени; в «медленном» времени её величина отражает скорость старения, в «быстром» времени – критический (совместимый с жизнью) уровень защитных сил при развитии гомеостатических реакций при воздействии факторов риска. Первичные количественные оценки КР сделаны на коровах на основе анализа записей удоев за 305 дней по последовательным лактациям.

Длительность продуктивной жизни коров в определённой степени детерминирована уровнем КР в период первой лактации: чем выше «начальный» уровень КР, тем больше шансов у данной группы особей иметь длительную продуктивную жизнь.

Имеется определённая количественная связь между показателем КР, оцененным по возрастной динамике удоев, и параметрами жизнеспособности, оцененными по выбраковке коров с использованием функции интенсивности выбытия).

Для продления длительности хозяйственного использования и повышения репродуктивной эффективности рекомендуется изыскивать способы повышения уровня «начальной» КР, который ремонтные тёлки приобретают в пре- и постнатальный периоды жизни. Показано, что на основе концепции можно разработать алгоритмы прогнозирования экономической эффективности производства молока с учётом показателей жизнеспособности и продуктивности коров.

#### **4. Прогнозирование биоэкономической эффективности производства молока с учётом показателей выживаемости и продуктивности коров**

Ранее при анализе эмпирических данных по коровам холмогорской и чёрно-пёстрой пород была выявлена положительная взаимосвязь между длительностью продуктивной жизни (ДПЖ), выраженной номером последней лактации  $t_{imax}$ , и значением величины  $D_i$  в группах. В исследованном стаде чёрно-пёстрых коров она описывалась эмпирической формулой:

$$D = 0.88 + 0.01 t_{imax}; \text{ т.е. } t_{imax} = 100 D - 88 \quad (9)$$

Значения параметров в этих соотношениях могут варьировать в определённом диапазоне, который можно оценить в ходе дальнейших исследований. Однако выявленная общая закономерность указывает на то, что величина  $D$ , которая выше трактовалась как конститутивная резистентность, может иметь смысл потенциала жизнеспособности (ПЖ), оцениваемого по возрастной динамике 305-дн. надоев в группах.

Значение параметра  $b$  во второй компоненте формулы (1) изменяется в небольших пределах (0,4-0,5) и для всех субпопуляций для дальнейших расчётов оно было принято равным 0,45. В этих предположениях из формул (1) и (2) следует, что потенциал продуктивности (ПП) в среднем приблизительно в два раза выше надоя за первую лактацию  $y_{m1}$ :

$$A = 2,17 y_{m1} \quad (10)$$

Наличие положительной взаимосвязи между длительностью продуктивной жизни (ДПЖ) и «начальным» значением КР при анализе возрастной динамики надоев молока в качественном

отношении согласуется с выявленной взаимосвязью между ДПЖ и индексом жизнеспособности, оцененным по динамике выбытия коров по сумме причин.

Величину средней ДПЖ ( $T$ , среднее число лактаций) можно оценить по эмпирическим данным при численном интегрировании распределения Гомпертца. Как показало численное моделирование, в диапазоне величин  $B = 0,04-0,3$ ,  $c = 0,2-0,8$  величина максимальной ДПЖ приблизительно в 2 раза больше средней ДПЖ, т.е.  $t_{max} \approx 2 T$  или  $T = t_{max}/2$ .

Таким образом, на основании выявленных взаимосвязей, зная численные значения параметров  $A$  и  $D$ , можно спрогнозировать динамику надоев по последовательным завершённым лактациям для групп коров с разной длительностью продуктивной жизни (рис. 21).

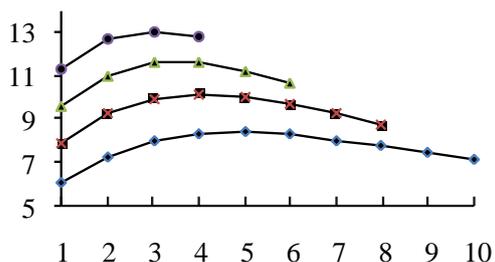


Рис. 21. Возрастная динамика 305-дн. надоев молока в четырёх модельных группах. По оси абсцисс - номера лактаций. Значения параметров: ◆ -  $D=0.95, A=12$ ; ■ -  $D=0.93, A=16$ ; ▲ -  $D=0.91, A=20$ ; ● -  $D=0.89, A=24$ ;  $b = 0.45$  во всех группах.

Как показано в предыдущих разделах, при анализе производственных данных по возрастной структуре дойного стада, в частности, по пяти породам США и по 17 производственных подразделений Ленинградской области было выявлено существование положительной линейной зависимости  $T$  от величины  $1/y_1$ . Поэтому величина  $1/y_1$  имеет смысл потенциала (предиктора) жизнеспособности, оцениваемого по динамике выбытия коров из популяции, стада или когорты.

Функция, обратная интенсивности выбытия, характеризует снижение с возрастом жизнеспособности («сопротивляемости смертности» по Гопертцу). Таким образом, при  $t = 1$  определяется «начальная» интенсивность выбытия  $y_1 = B e^c$ , а обратная величина  $-1/y_1 = B^{-1} e^{-c}$  имеет смысл начального уровня жизнеспособности.

#### Исходные данные для прогноза эффективности производства молока

В рассматриваемых модельных ситуациях четыре группы с последовательными значениями  $A = 24, 20, 16, 12$  тыс. кг (средний за жизнь надой молока – 12,4; 11,0 9,35, 7,64 тыс. кг.);  $T = 2, 3, 4, 5$  ( $t_{max} = 4, 6, 8, 10$  лактаций) и  $D = 0.95; 0.91; 0.89, 0.88$ . В дополнительный перечень исходных данных может входить большое число показателей. В данном случае в этот перечень включён межотельный интервал (13 мес.) и основные стоимостные показатели, включая затраты на корм, цену реализованного молочного сырья и выбракованных коров (сдача на мясокомбинат, утилизация туш больных коров и т.п.).

*Промежуточные расчёты и целевой прогноз.* По исходным данным для каждой группы рассчитывали средний за жизнь 305 дн. надой на одну корову и накопленный надой за 10 завершённых лактаций ( $y_m$ ); количество замен выбывшей коровы на новотельную из расчёта на общее число 10 лактаций (replacement number,  $Nr=10/T$ ); средняя цена выращенной или закупленной нетели, тыс. руб. (heifer cost,  $Hc$ ); затраты на выращивание или приобретение нетелей, тыс. руб. (reproduction,  $repr.= Hc \times Nr$ ); выручка на одну корову от реализации молока за 10 лактаций ( $inc.m.$ , тыс. руб.); календарный срок, соответствующий 10 лактациям (year); выручка от реализации выбракованной коровы, тыс. руб.; общая прибыль по молоку и реализации выбракованной нетели ( $inc.$ ): затраты на поддержание основного обмена + технологические затраты на одно скотоместо за весь период (technological expenses,  $t.exp.=12 \times year$ ); затраты на корм для получения молока в расчёте на 10 лактаций, тыс. руб. ( $feed/year = inc.m. \times 0.6$ ); сумма затрат (sum expenses) за один год, тыс. руб. ( $s.exp./year$ ). За целевой прогноз принималась общая прибыль по молоку и реализации выбывших коров в год ( $inc./year$ ) и рентабельность – прибыль/общие затраты, % (rentability) в группах.

Принятая схема прогнозирования предполагает принятие определённого способа объединения в одном алгоритме двух разнородных данных – по возрастной динамике

продуктивности и по продолжительности жизни коров. В литературных источниках нет описания такого алгоритма, а также отсутствуют систематизированные эмпирические данные, необходимые для детального анализа. Использованный в данной работе упрощённый способ расчёта на десять 305-дн. лактаций при разных значениях межотельного интервала состоит в следующем. Поскольку в группах используются средние за жизнь величины надоев, для получения прогноза календарного срока для 10 лактаций на одно скотоместо можно использовать вышеприведенное соотношение  $T = t_{max}/2$ . Например, при  $T = 5$  необходимо иметь два периода, т.е. 2 коровы с 5 лактациями и 4 периодами сухостоя (100 мес. лактаций, 24 мес. сухостоя). При этом в случае выбраковки на это место переводится новотельная корова, один период сухостоя вычитается, и общий календарный срок, по которому рассчитываются затраты на одно скотоместо в год, для этой группы равен 10,3 года. Для последующих трёх групп эти значения составляют 10; 9,9; 9,5.

#### Результаты и обсуждение

Результаты расчёта прибыли и рентабельности производства молока для 4-х модельных групп (субпопуляций) с разными значениями потенциала продуктивности, средней длительности продуктивной жизни, стоимости выращивания или импорта ремонтного молодняка и основных технологических затрат при длительности межотельного интервала 13 мес. приведены в табл. 12.

Таблица 12. Исходные данные и результаты прогноза биоэкономической эффективности производства молока в группах, различающихся по потенциалу продуктивности (A) и показателю жизнеспособности (D).

D	T	A	ум	Nr	Hс	years	repr.	t.exp.	inc.m	s.exp./	inc./	rent.
										year	year	
0,95	2	24	124	5	80	10,3	400	124	969,2	268	98,9	37
0,91	3	20	110	3,3	65	10	214	120	980,7	231	101,4	44
0,89	4	16	93,5	2,5	50	9,9	125	119	878,2	195	91,2	47
0,88	5	12	76,4	2	35	9,5	70	114	732,8	164	79,2	48

Примечания: T – средняя длительность продуктивной жизни в группе (число лактаций); A – потенциальный максимальный 305-дн. надой на одну корову в группе (тыс. кг); ум – накопленный надой на одну корову в группе за 10 лактаций (тыс. кг); Nr – количество замен выбывшей коровы на новотельную из расчёта на общее число 10 лактаций (replacement number,  $Nr=10/T$ ); Hс – средняя цена выращенной или закупленной нетели, тыс. руб.; years – календарный срок, соответствующий 10 лактациям, год; герг. – затраты на выращивание или приобретение нетелей, тыс. руб.; t.exp – затраты на поддержание основного обмена + технологические затраты на одно скотоместо, тыс. руб ( $t.exp = 12 * years$ ); inc.m – прибыль в группе на одну корову за 10 лактаций от реализации молока по цене 30 руб/кг (тыс. руб); s.exp./year – сумма затрат за один год, тыс руб.; inc./year – общая прибыль по молоку и реализации выбывшей коровы в год, тыс. руб.; rent. – рентабельность, %.

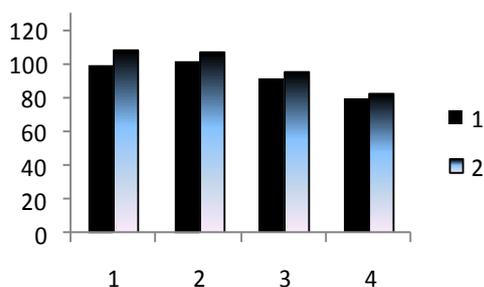


Рис. 22. Выручка по молоку и реализации выбракованных коров) на одну корову в год в четырёх группах коров (табл. 1). В группах 1, 2, 3, 4, средний за жизнь надой 305-дн. молока – 12,4; 11,0; 9,35; 7,64 тыс. кг, цена молочного сырья – 30 руб./л; межотельный интервал – 13 мес., длительность периода 10 лактаций. Средняя цена выбракованной коровы в варианте 1 – 10, в варианте 2 – 30 тыс. руб.

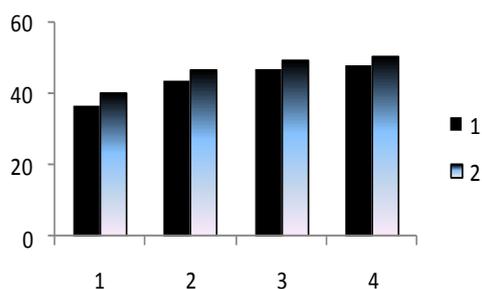


Рис. 23. Рентабельность производства молочного сырья (выручка по молоку и реал-лизации выбракованных коров /сумма за-рат) в четырёх группах неоднородной популяции в двух вариантах (1 и 2) при значениях параметров, приведенных в табл. 1 и на рис. 1. Средняя цена реализованной выбракованной коровы в варианте 1 – 10, в варианте 2 – 30 тыс. руб.

Результаты расчётов показали, что в рассмотренной модельной ситуации по мере увеличения продуктивности коров общая прибыль (выручка по молоку и реализации выбракованных коров) на одну корову в год увеличивается, но рентабельность производства снижается (рис. 22, 23).

#### Выводы

1. С точки зрения развития молочного скотоводства, важно иметь инструменты для прогнозирования влияния наиболее критических факторов в программах по воспроизводству и эксплуатации молочных коров. В качестве таких факторов для целей прогнозирования и оптимизации предложено использовать потенциал продуктивности и уровень жизнеспособности коров. Исходные значения этих величин для планирования управленческих решений в конкретных ситуациях можно определять по данным регистрации возрастной динамики 305-дн. надоев молока и по выбытию коров из хозяйственного оборота на первой лактации (прогноз среднего срока продуктивной жизни).

2. Результаты проведенного пилотного исследования показали, что по мере увеличения средних 305-дн. надоев от 8 до 12 тыс. кг. общая выручка на одну корову в год увеличивается, но рентабельность производства может снижаться, в зависимости от конкретного соотношения значений производственных параметров. Это означает, что вложение финансовых средств в селекционно-племенную работу с ориентацией на достижение максимально высоких уровней молочной продуктивности может быть рациональным только в определённых рамках, задаваемых планируемым уровнем рентабельности производства.

3. Для прогнозирования био-экономических эффектов в реальных условиях необходимо принимать в расчёт общее количество и диапазон возможных значений параметров. В данной работе приняты в расчёт семь факторов, принятых за постоянные, четыре градации двух факторов (уровень продуктивности и показатель жизнеспособности) и две градации цены выбракованных коров. На последующих этапах работы необходимо расширять список учитываемых факторов, в том числе затраты на биологически активные добавки, ветеринарное обслуживание и воспроизводство дойного стада, возрастающие при высоких уровнях молочной продуктивности.

4. После расширения объёма эмпирических данных, совершенствования алгоритмов расчёта и их апробации предложенный методический подход предлагается использовать для решения задач анализа, оптимизации ведения стада молочных коров и прогноза научно-технологического развития в молочном скотоводстве

#### 5. Общее обсуждение и рекомендации

На основе моделирования динамики выживаемости популяций дойных коров и анализа производственных данных в данной работе предложены количественные тесты для применения в системах разведения и воспроизводства высокопродуктивных коров: 1) для оценки потенциала жизнеспособности – параметр, обратный относительно выбытию на первой лактации; 2) для прогнозирования продолжительности хозяйственного использования – функциональная взаимосвязь продолжительности продуктивной жизни и потенциала жизнеспособности.

Биологический смысл выявленных соотношений может заключаться в том, что различия по продолжительности продуктивной жизни в разных стадах и субпопуляциях обусловлены, в

основном, величиной потенциала жизнеспособности, сформированного в периоды онтогенеза, предшествующие началу лактационной деятельности.

В настоящее время общая установка в селекции и разведении сводится к повышению продуктивности до мирового уровня и борьбе с ростом заболеваемости, как неизбежного следствия этого повышения. Традиционно в работе по селекции молочного скота фиксируются, в основном, данные по надоям и составу молока, формам вымени и экстерьерным показателям; при этом предполагается, что существует биологически обусловленное соответствие между совершенством форм тела и возможностями висцеральных функций в обеспечении планируемого уровня продуктивности. Однако фиксируемое на больших массивах данных сокращение длительности продуктивной жизни коров по мере роста их продуктивности (Прошина, Лоскутов, 2011; Сельцов и др., 2012; Miglior et al., 2017, Britt et al., 2019; Федотова и др., 2019) свидетельствует о том, что этот постулат перестаёт работать, а основная часть заболеваний высокоудойных коров вызвана нарушением баланса между высоким уровнем синтеза компонентов молока и возможностями внутренних органов поддерживать метаболический гомеостаз. Можно отметить в этой связи, что схожая ситуация возникла также на бройлерах высокопродуктивных штаммов в связи с появлением синдрома внезапной смерти: очень высокий темп синтеза мышечных белков оказывается несомненным

Поэтому возможный выход в этой ситуации видится в том, что необходимо идентифицировать «узкие звенья» на пути обеспечения необходимого баланса между уровнем гипертрофии молочных желез и возможностями висцеральных систем поддерживать метаболическое и репродуктивное здоровье. Такую ориентацию исследований можно считать попыткой постановки и осознания общей проблемы, имеющей существенное теоретическое и практическое значение. Учитывая новизну такой постановки вопроса и сложность проблем разведения и воспроизводства высокопродуктивного скота, следующим этапом после осознания и постановки проблемы следует считать разработку концепции её решения, общих методологических подходов и конкретного методического инструментария.

В мировой и отечественной аграрной науке в последние десятилетия сформирована система управления научно-технологическим развитием, которая в значительной степени основана на широком применении IT-технологий. В ряде стран в животноводстве используется обобщённый термин «Устойчивое животноводство» (Sustainable Animal Production). В отечественном животноводстве аналогичного интегрированного целевого индикатора нет, поэтому авторами в последние годы в ходе проведения комплексных исследований, имеющих отношение к проблемам продуктивности и жизнеспособности молочных коров, были сформулированы некоторые положения, которые можно рассматривать в качестве составляющих элементов для общего целевого показателя при планировании научно-технологического развития в области животноводства.

В качестве общего ориентира для движения в этом направлении можно принять методологию, принятую в теории управления развитием крупномасштабных систем, в которой учитывается наличие множественных факторов и комплексных взаимодействий. Для большей части биологов-исследователей, привыкших проводить опыты на малых выборках на ограниченных временных интервалах, эта теория пока ещё *terra incognita*. При попытках найти решения проблем на уровне стада и популяции исследователи сталкиваются с трудностями, связанными с необходимостью рассмотрения в комплексе трёх основных технологических аспектов ведения животноводства: 1) разведение (селекционно-племенная работа), 2) кормление/содержание и 3) воспроизводство стада. Но с позиций общей теории управления, эти технологические блоки представляют собой один объект – систему производственных процессов, поэтому, помимо информации, снимаемой с отдельных животных или при обследовании малой выборки, нужны ясные количественные критерии для определения принадлежности животных к различным внутрипородным субпопуляциям и для выработки программ селекции, разведения и технологического мониторинга с учётом взаимосвязей между составляющими производственного процесса. При этом очень важно найти набор ключевых количественных параметров для целей прогнозирования и оптимизации всего комплекса производственных процессов.

Таких параметров может быть очень много. В качестве одного из них представляется целесообразным использовать показатель конститутивной резистентности, как меры возрастного снижения общей резистентности к действию факторов риска, начиная от некоторого уровня

«начальной жизнеспособности» (primal health). Такой подход близок к развитой в работах К. Уоддингтона концепции гомеореза как *креода* – канализованной траектории спуска с некоторого начального уровня защитных сил (Уоддингтон, 1980). Эта концепция и полученные в нашей работе количественные закономерности согласуются с результатами исследований, в которых показано, что частота возникновения возрастных заболеваний зависит от воздействия внешних и внутренних факторов, имевших место в периоды онтогенеза, предшествующие достижению возраста репродуктивной зрелости и начала лактационной деятельности. В основе феноменов этого типа лежат изменения в механизмах эпигенетического контроля – средовые факторы могут влиять на экспрессию генов, не затрагивая кодирующие последовательности ДНК, однако вызванные при этом изменения в паттернах экспрессии могут провоцировать нежелательные отклонения в состоянии здоровья на протяжении всей жизни, а в некоторых случаях и передаваться потомству (Helfand, Inouye, 2002).

Проблема здесь состоит в том, что такие сдвиги очень медленные, механизмы их развития кроются во внутриклеточных структурах и процессах, которые трудно выявить по доступным в настоящее время тестам, в том числе по данным морфологического и химического анализа крови. Обычные показатели неспецифической резистентности, такие как БАСК, комплемент, бета-лизины, МДА, антиоксидантные ферменты и др., очень вариабельны, сильно зависят от физиологического состояния и условий кормления; они хорошо выявляют динамику состояния организма в ходе болезни и её лечения, но мало информативны для характеристики медленной фоновой, базисной (конститутивной) компоненты резистентности, которая, вероятно, в основном определяет возрастное снижение устойчивости к действию внешних и внутренних повреждающих факторов.

Вместе с тем, современный уровень знаний допускает возможность повышения уровня «первичного» здоровья (Odent, 1986; Один, 2011; Вайсерман, 2011; Джапаров, 2018), поэтому для использования этого ресурса необходим переход к новой парадигме, и в программах селекции и воспроизводства молочного скота необходимо ставить целью получение популяций животных с оптимальным соотношением потенциала продуктивности, плодовитости и резерва защитных сил.

По умолчанию, такая цель подразумевается как самоочевидная; но пока отсутствует общая концепция и нет понимания о возможных подходах для её достижения, поскольку основные секторы животноводческой науки развиваются в русле традиционно сложившейся практики, не имея системных интегрирующих индикаторов. Но опыт разработки крупных научно-технических проектов и практика бизнес-аналитики показывают, что при отсутствии «системных агрегаторов» в современных условиях локальные тактические успехи в принципе не могут гарантировать от стратегического поражения. В качестве модельного прогноза можно твёрдо рассчитывать на то, что на базе современной методологии селекции, в течение 10-20 лет можно поднять молочную продуктивность «до мирового уровня», но потом в течение 40-50 лет, по-видимому, придётся разбираться в том, что же такое жизнеспособность, и что делать с нехваткой тёлочек, с проблемами качества и пищевой безопасности молока. Поэтому новизна излагаемого здесь подхода состоит в обосновании необходимости расширения «горизонта внимания», т.е. предлагается расширить область биолого-зоотехнических исследований, включив в неё, помимо борьбы с «болезнями продуктивности», проблемы, связанные с пониманием природы формирования и поддержания ресурсов здоровья, в определённой степени подобных тем, которые существуют у «диких» животных, но были утрачены в процессе односторонней селекции.

Методы обеспечения жизни без болезней разрабатываются в русле нового направления медицины – валеологии (Брехман, 1986). Поскольку постоянно действующие агрессивные внешние воздействия и нежелательные эндогенные факторы вызывают постепенные сдвиги во внутренней среде организма, снижающие общую жизнеспособность и увеличивающие риск широкой гаммы заболеваний, разработку средств диагностики и нейтрализации этих нежелательных донологических сдвигов следует сделать приоритетным направлением исследований в области биологии продуктивных животных. При этом речь вовсе не идёт о какой-то недостаточности современной ветеринарной практики и существующих методов «укрепления здоровья». В отличие от обычных процедур профилактики, основанных на использовании механизмов физиологической адаптации к воздействию факторов внешней среды, в новой парадигме предлагается использовать

источники и ресурсы желательных внутренних эпигенетических модификаций, осуществляющихся в течение очень длительного времени, практически на всех этапах пре- и постнатального развития.

Имеются экспериментальные данные о том, что предпосылки возникновения метаболических нарушений на более поздних этапах жизни могут создаваться *in utero* в результате отклонений от субоптимальных условий для созревания ооцитов, формирования эмбриональных структур и развития плода, вызванных метаболическими и нейро-гуморальными отклонениями в организме матери в период беременности. Процесс, при котором пренатальные дефекты могут приводить к отклонениям в структуре и функции тканей, сниженной массе новорожденного и различным отклонениям при достижении репродуктивного возраста, называют эмбриональным импринтингом, т.е. плацентарная недостаточность неизбежно сказывается на развитии эмбриона и состоянии здоровья на последующих этапах развития (Opsomer et al., 2016).

Конечно, контролировать отклонения от оптимальных условий в развитии плода у коров технически сложно, но можно фиксировать неблагоприятные сдвиги в организме матери, которые у высокопродуктивных коров наблюдаются в первой трети лактации, т.е. в транзитный период, когда развивается состояние энергетического дефицита, мобилизации жировых депо, гипогликемии, повышенного уровня в крови кетоновых тел (ацетона, ацетотацетата,  $\beta$ -оксимасляной кислоты) и других токсических продуктов метаболизма. Это состояние выявляется у коров по визуально определяемому индексу упитанности BCS (body condition score), однако для постоянного наблюдения на большом поголовье такое обследование слишком затратно. Использование систем видеонаблюдения с беспроводной связью и применение современных когнитивных технологий при обработке получаемой информации открывают большие возможности для решения этой проблемы и других задач технологического контроля (выявление эструса с применением датчиков движения конечностей, контроль температуры тела, неинвазивный анализ биохимического состава крови и др.),

Новизна этого подхода состоит в ориентации на повышение уровня жизнеспособности и тем самым – снижения выбытия высокопродуктивных животных по сумме причин путём ослабления или устранения факторов риска на всех этапах онтогенеза, создания адаптивных систем кормления, внедрения новых методов медицинской интроскопии, дистанционной диагностики и физиологического мониторинга, а также поддержания комфортных условий (welfare) эксплуатации высокопродуктивных животных (Miglior et al., 2017, Britt et al., 2019; Черепанов, 2019)

В целом, результаты, полученные с использованием разных способов и объектов анализа (по возрастной динамике молочной продуктивности и по данным выживаемости в популяциях) свидетельствуют о существовании закономерных взаимосвязей между «начальным» уровнем жизнеспособности и продолжительностью хозяйственного использования высокопродуктивных коров. С учётом существующего чёткого тренда к снижению продуктивного долголетия коров при односторонней селекции по продуктивным признакам, выявленные закономерности могут иметь практическое значение, в том числе для многовариантного прогнозирования эффективности производства молока с учётом показателей выживаемости и продуктивности коров.

Для получения достаточного поголовья молочного скота оптимального типа целесообразно в племенных центрах на базе экспериментального стада создавать системы непрерывного мониторинга внешних воздействий и физиологического статуса животных на всех этапах онтогенеза с использованием устройств электронной идентификации животных, получения визуальной и измерительной информации и применения технологий анализа «больших данных» для поиска прогностических тестов и эффективных биолого-технологических решений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брехман И.И. Валеология – наука о здоровье. М: Физкультура и спорт, 1986.
2. Вайсерман А.М., Войтенко В.П., Мехова Л.В. Эпигенетическая эпидемиология возраст-зависимых заболеваний // Онтогенез. – 2011. – Т. 42. – № 1. – С. 30-50.
3. Гаврилов Л.А., Гаврилова Н.С. Биология продолжительности жизни. – М.: Наука, 1991.
4. Голубев А. Проблемы обсуждения вопроса о возможности подходов к построению общей теории старения. III. Теория и практика старения // Успехи геронтологии. – 2009. – Т. 22. – № 3. – С. 387-400.

5. Джапаров Д.Э. Эпигенетика старения: прорывное направление геронтологии? // Успехи геронтологии. 2018. – Т. 31. – № 5. – С. 628-631.
6. Зотин А.И. Термодинамический подход к проблемам развития, роста и старения. – М.: Мир, 1974.
7. Кременцова А.В., Горбунова Н.В. Роль окружающей среды в динамике распределения продолжительности жизни // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 8. – С. 121-133.
8. Михайленко И.М. Управление жизненным циклом лактирующих коров на основе вероятностно-статистических и динамических моделей // Сельскохозяйственная биология. – 2015. – Т. 50. – № 4. – С. 467-475. DOI: 10.15389/agrobiology.2015.4.467rus
9. Новосельцев В.Н., Аркинг Р., Новосельцева Ж.А., Яшин А.И. Междисциплинарное моделирование системных механизмов репродукции и старения // Проблемы управления. – 2004. – № 4. – С. 27-40.
10. Один В.И. Кризис геронтологии: к вопросу о первичном здоровье в XX веке // Успехи геронтологии. – 2011. – Т. 24. – № 1. – С. 11-23.
11. Озернюк Н.Д., Зотин А.И., Юровитцкий Ю.Г. Оогенез как модель уклонения живой системы от стационарного состояния // Онтогенез. – 1971. – Т. 2. – № 6. – С. 565-571.
12. Прошина О., Лоскутов Н. Воспроизводство стада: потерянная страница // Животноводство России. – 2011. – № 9. – С. 40-41.
13. Сельцов В.И., Молчанова Н.В., Калиевская Г.Ф., Тохов М.Х. Продуктивное долголетие – комплексный показатель в селекции крупного рогатого скота // В сб.: Продуктивное долголетие крупного рогатого скота молочных пород (информационный обзор). – Подольск-Дубровицы: ВИЖ, 2012. – С. 9-27.
14. Токарев Т.Ю., Токарев Ю.Т. Теоретическое обоснование и основные элементы методики анализа изменений удоев молока у коров от лактации к лактации // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2005. – № 5. – С. 45-48.
15. Федотова Е.Г., Некрасов А.А., Попов Н.А., Черепанов Г.Г. Влияние технологий содержания на молочную продуктивность и производственное долголетие коров с высокой долей кровности по голштинской породе // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2019. – № 1. – С. 66-75.
16. Черепанов Г.Г., Решетов В.Б. Исследование возрастной динамики молочной продуктивности и интенсивности выбраковки коров в связи с длительностью их хозяйственного использования // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2010. – № 1. – С. 5-17.
17. Черепанов Г.Г., Решетов В.Б. Анализ возрастной динамики молочной продуктивности коров в связи с длительностью их хозяйственного использования // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2011. – № 3. – С. 26-37.
18. Черепанов Г.Г., Богданова Н.А. К анализу возрастной динамики молочной продуктивности и выбраковки коров: разработка метода и его апробация // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2012. – № 1. – С. 110-119.
19. Черепанов Г.Г., Богданова Н.А., Макаре З.Н. Особенности возрастной динамики молочной продуктивности коров в связи с их жизнеспособностью // Доклады РАСХН. – 2013. – № 5. – С. 48-50.
20. Черепанов Г.Г. Обоснование концепции о ключевой роли конститутивной резистентности для жизнеспособности и длительности использования высокопродуктивных животных // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2014. – № 4. – С. 5-34.
21. Черепанов Г.Г. Марзанов Н.С. Пилотные модели продукционных процессов для использования в крупномасштабных системах управления в животноводстве // В сб.: Материалы девятой международной конференции: «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016)». – М.: ИПУ РАН, 2016. – Т. 2. – С. 411-413.
22. Черепанов Г.Г. Михальский А.И. Проблема поиска возможных подходов для оценки потенциала жизнеспособности и продления сроков использования высокопродуктивных животных // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2016. – № 1. – С. 5-25.
23. Черепанов Г.Г., Михальский А.И., Новосельцева Ж.А. Оценка параметров выживаемости для составляющих неоднородной популяции продуктивных животных: анализ проблемы, варианты приближённого решения // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2017. – № 4. – С. 83-97.
24. Черепанов Г.Г. Исследование динамики выживаемости коров дойного стада: анализ производственных данных и вычислительное моделирование // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2018. – № 2. – С. 101-111.
25. Черепанов Г.Г. Проблемы прогнозирования и повышения жизнеспособности продуктивных животных: интегративный подход с позиций биологии развития // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2019. – № 4. – С. 5-22.
26. Яшин А.И., Украинцева С.В. Новые идеи, методы и проблемы в моделировании демографических и эпидемиологических проявлений старения // Проблемы управления. – 2004. – № 4. – С. 18-26.

27. Britt J.H., Cushman R.A., Dechow C.D., Dobson H., Humblot P., Hutjens M.F., Jones G.A., Ruegg P.S., Sheldon I.M., Stevenson J.S. Invited review: Learning from the future-A vision for dairy farms and cows in 2067 // *J. Dairy Sci.* – 2018. – Vol. 101. – No. 5. – P. 3722-3741. DOI:10.3168/jds.2017-140.
28. Cherepanov G.G., Bogdanova N.A., Makar Z.N. Special traits of the age dynamics of milk productivity in dairy cows in relation to their viability // *Russian Agricultural Sciences.* – 2013. – Vol. 39. – No. 8-6. – P. 442-445.
29. Cherepanov G.G., Mikhalskii A.I., Novoseltseva J.A. Estimation of Survival Parameters in Heterogeneous Population (Heterogeneity parameters estimation) // In: 11<sup>th</sup> IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). 20-22 Sep 2017, Moscow, Russia. – P. 433-436.
30. Cherepanov G.G. An Empirical and *In Silico* Study of the Survival of Dairy Cows in Heterogeneous Population // *Agricultural Research and Technology Open Journal (ARTOAJ).* – December 2018. – Vol. 19. – Issue 2. DOI: 10.19080/ARTOAJ.2019.18.556088
31. DeVries A. Productive life of dairy cows in Florida. – Gainesville: Department of Animal Sciences University of Florida, 2003.
32. De Vries A., Olson J.D., Pinedo P.J. Reproductive risk factors for culling and productive life in large dairy herds in the eastern US between 2001 and 2006. – *J. Dairy Sci.* – 2010. – Vol. 93. – No. 2. – P. 613-623.
33. Ducrocq V., Quaas R.L., Pollak E.J., Casella G. Length of productive life of dairy cows. I - Justification of a Weibull model; 2-Variance component estimation and sire evaluation // *J. Dairy Sci.* – 1988. – Vol. 71. – P. 3061-3079.
34. Ducrocq V., Casella G. A Bayesian analysis of mixed survival models // *Genet. Sel. Evol.* – 1996. – Vol. 28. – P. 505-529.
35. Faust M. Capitalizing on dairy cow herd life. US National Dairy Database. Available at: <http://www.inform.umd.edu/EdRes/Tipic/AgrEnv/ndd/>
36. Gompertz B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new mode of determining life contingencies // *Philos. Trans. Roy. Soc. London. A.* – 1825. – Vol. 115. – P. 513-585.
37. Hare E., Norman H.D., Wright J.R. Survival rates and productive herd life of dairy cattle in the United States // *J. Dairy Sci.* – 2006. – Vol. 89. – P. 3713-3720.
38. Helfand S.L., Inouye S.K. Rejuvenating views of the aging process // *Nat. Rev. Genet.* – 2002. – Vol. 3. – P. 149-153.
39. Miglior F., Fleming A., Malchiodi F., Brito L.F., Martin P., Baes C.F. A 100-Year Review: Identification and genetic selection of economically important traits in dairy cattle // *J. Dairy Sci.* – 2017. – Vol. 100. – No. 12. – P. 10251-10271. DOI: 10.3168/jds.2017-12968.
40. Odent M. Primal Health. – London: Century Hutchinson, 1986.
41. Opsomer G., Van Eetvelde M., Kamal M., Van Soom A. Epidemiological evidence for metabolic programming in dairy cattle // *Reprod. Fertil.* – 2016. – Vol. 29. – No. 1. – P. 52-57. DOI: 10.1071/RD164101.
42. Roxström A., Ducrocq V., Strandberg E. Survival analysis of longevity in dairy cattle on a lactation basis // *Genet. Sel. Evol.* – 2003. – Vol. 35. – P. 305-318.
43. Weibull W.A. A statistical distribution function of wide applicability // *J. Appl. Mech.* – 1951. – Vol. 18. – P. 293-297.

#### REFERENCES

1. Brekhman I.I. Valeologiya – nauka o zdorov'е (Valeology – the science of health). Moscow: Fizkul'tura i sport Publ., 1986.
2. Britt J.H., Cushman R.A., Dechow C.D., Dobson H., Humblot P., Hutjens M.F., Jones G.A., Ruegg P.S., Sheldon I.M., Stevenson J.S. Invited review: Learning from the future-A vision for dairy farms and cows in 2067. *J. Dairy Sci.* 2018, 101(5): 3722-3741. DOI:10.3168/jds.2017-140.
3. Cherepanov G.G., Reshetov V.B. [Study of age-related dynamics of milk productivity and culling intensity in connection with the duration of their economic use]. *Problemy biologii productivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*, 2010, 1: 5-17.
4. Cherepanov G.G., Reshetov V.B. [Analysis of age-related dynamics of milk production of cows in connection with the duration of their economic use]. *Problemy biologii productivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*, 2011, 3: 26-37.
5. Cherepanov G.G., Bogdanova N.A. [On the analysis of age-related dynamics of milk productivity and culling: development of the method and its testing]. *Problemy biologii productivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*, 2012, 1: 110-119.
6. Cherepanov G.G., Bogdanova N.A., Makar Z.N. [Features of the age-related dynamics of milk productivity by corvo in connection with their viability]. *Doklady Rossiiskoi Akademii Sel'skokhozyaistvennykh Nauk - Reports of Russian Agricultural Sciences.* 2013. 5: 48-50

7. Cherepanov G.G. [Justification of the concept of the key role of constitutive resistance for the viability and duration of use of highly productive animals]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*. 2014, 4: 5-34.
8. Cherepanov G.G. Marzanov N.S. [Pilot models of production processes for use in large-scale livestock management systems]. In: *Materialy devyatoi mezhdunarodnoi konferentsii: «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2016) (Materials of the ninth international conference: "Management of the development of large-scale systems" (MLSD'2016). Moscow: IPU RAN Publ., 2016, 2, P. 411-413.*
9. Cherepanov G.G. Mikhal'skii A.I. [The problem of finding possible approaches to assess the potential for viability and extend the life of highly productive animals]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*. 2016, 1: 5-25.
10. Cherepanov G.G., Mikhal'skii A.I., Novosel'tseva Zh.A. [Estimation of survival parameters for the components of a heterogeneous population of productive animals: analysis of the problem, options for an approximate solution]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*. 2017, 4: 83-97.
11. Cherepanov G.G. [The study of the dynamics of survival of dairy herd cows: analysis of production data and computational modeling]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*. 2018, 2: 101-111.
12. Cherepanov G.G. [Problems of forecasting and increasing the viability of productive animals: an integrative approach from the standpoint of developmental biology]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*. 2019, 4: 5-22.
13. Cherepanov G.G., Bogdanova N.A., Makar Z.N. Special traits of the age dynamics of milk productivity in dairy cows in relation to their viability. *Russian Agricultural Sciences*, 2013, 39(6-8): 442-445.
14. Cherepanov G.G., Mikhalskii A.I., Novoseltseva J.A. Estimation of Survival Parameters in Heterogeneous Population (Heterogeneity parameters estimation). In: *11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. 20-22 Sep 2017, Moscow, Russia, P. 433-436
15. Cherepanov G.G. An empirical and *in silico* study of the survival of dairy cows in heterogeneous population. *Agricultural Research and Technology Open Journal (ARTOAJ)*. December 2018, 19, Issue 2. DOI: 10.19080/ARTOAJ.2019.18.556088
16. DeVries A. *Productive life of dairy cows in Florida*. Gainesville: Department of Animal Sciences University of Florida, 2003.
17. De Vries A., Olson J.D., Pinedo P.J. Reproductive risk factors for culling and productive life in large dairy herds in the eastern US between 2001 and 2006. *J. Dairy Sci.*, 2010, 93(2): 613-623.
18. Ducrocq V., Quaas R.L., Pollak E.J., Casella G. Length of productive life of dairy cows. I - Justification of a Weibull model; 2-variance component estimation and sire evaluation. *J. Dairy Sci.*, 1988, 71: 3061-3079.
19. Ducrocq V., Casella G. A Bayesian analysis of mixed survival models. *Genet. Sel. Evol.* 1996, 28: 505-529.
20. Dzhaparov D.E. [Epigenetics of Aging: A Breakthrough in Gerontology?]. *Uspekhi gerontologii - Advances in gerontology*. 2018, 31(5): 628-631.
21. Faust M. Capitalizing on dairy cow herd life. *US National Dairy Database*. Available at: <http://www.inform.umd.edu/EdRes/Tipic/AgrEnv/ndd/>
22. Fedotova E.G., Nekrasov A.A., Popov N.A., Cherepanov G.G. [Influence of keeping technologies on milk productivity and production longevity of cows with a high blood percentage in Holstein breed]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*. 2019, 1: 66-75.
23. Gavrilov L.A., Gavrilova N.S. *Biologiya prodolzhitel'nosti zhizni (Life expectancy biology)*. Moscow: Nauka Publ., 1991.
24. Golubev A. [Problems of discussing the possibility of approaches to the construction of a General theory of aging. III. Theory and practice of aging]. *Uspekhi gerontologii - Advances in gerontology*. 2009, 22(3): 387-400.
25. Gompertz B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new mode of determining life contingencies. *Philos. Trans. Roy. Soc. London. A*. 1825, 115: 513-585.
26. Hare E., Norman H.D., Wright J.R. Survival rates and productive herd life of dairy cattle in the United States. *J. Dairy Sci.* 2006, 89: 3713-3720.
27. Helfand S.L., Inouye S.K. Rejuvenating views of the aging process. *Nat. Rev. Genet.* 2002, 3: 149-153.
28. Kremntsova A.V., Gorbunova N.V. [The role of the environment in the dynamics of the distribution of life expectancy]. *Avtomatika i telemekhanika - Automation and Remote Control*. 2010, 8: 121-133.
29. Miglior F., Fleming A., Malchiodi F., Brito L.F., Martin P., Baes C.F. A 100-Year Review: Identification and genetic selection of economically important traits in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 2017, 100(12): 10251-10271. DOI: 10.3168/jds.2017-12968.
30. Mikhailenko I.M. [Life cycle management of lactating cows based on probabilistic-statistical and dynamic models]. *Sel'skokhosyaistvennaya biologiya - Agricultural Biology*. 2015, 50(4): 467-475. DOI: 10.15389/agrobiologia.2015.4.467rus

31. Novosel'tsev V.N., Arking R., Novosel'tseva Zh.A., Yashin A.I. [Interdisciplinary modeling of systemic mechanisms of reproduction and aging]. *Problemy upravleniya - Control Sciences*. 2004, 4: 27-40.
32. Odent M. *Primal Health*. London: Century Hutchinson, 1986.
33. Odin V.I. [The crisis of gerontology: on the issue of primary health in the 20th century]. *Uspekhi gerontologii - Advances in gerontology*. 2011, 24(1): 11-23.
34. Opsomer G., Van Eetvelde M., Kamal M., Van Soom A. Epidemiological evidence for metabolic programming in dairy cattle. *Reprod. Fertil.* 2016, 29(1): 52-57. DOI: 10.1071/RD164101.
35. Ozernyuk N.D., Zotin A.I., Yurovitskii Yu.G. [Oogenesis as a model of evasion of a living system from a stationary state]. *Ontogenez - Developmental Biology*. 1971, 2(6): 565-571.
36. Proshina O., Loskutov N. [Herd Reproduction: Lost Page]. *Zhivotnovodstvo Rossii - Animal Husbandry in Russia*. 2011, 9: 40-41.
37. Roxström A., Ducrocq V., Strandberg E. Survival analysis of longevity in dairy cattle on a lactation basis. *Genet. Sel. Evol.* 2003, 35: 305-318.
38. Sel'tsov V.I., Molchanova N.V., Kalievskaya G.F., Tokhov M.Kh. [Productive longevity is a comprehensive indicator in cattle breeding]. In: *Produktivnoe dolgoletie krupnogo rogatogo skota molochnykh porod (informatsionnyi obzor)* (Productive longevity of dairy cattle: information review). Dubrovitsy: VIZh Publ., 2012, P. 9-27.
39. Tokarev T.Yu., Tokarev Yu.T. [Theoretical basis and the main elements of the methodology for the analysis of changes in milk yield in cows from lactation to lactation]. *Mezhdunarodnyi sel'skokhosaistvennyi zhurnal - Intern. Agric. J.* 2005, 5: 45-48.
40. Vaiserman A.M., Voitenko V.P., Mekhova L.V. [Epigenetic epidemiology of age-related diseases]. *Ontogenez - Developmental Biology*. 2011, 42(1): 30-50.
41. Weibull W.A. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.*, 1951, 18: 293-297.
42. Yashin A.I., Ukraintseva S.V. [New ideas, methods and problems in modeling demographic and epidemiological manifestations of aging]. *Problemy upravleniya - Control Sciences*. 2004, 4: 18-26.
43. Zotin A I. *Termodinamicheskii podkhod k problemam razvitiya, rosta i stareniya* (Thermodynamic approach to the problems of development, growth and aging). Moscow: Mir Publ., 1974.

**New approaches in research on the viability of high-yielding cows:  
concepts, models, and data analysis**

Cherepanov G. G.

*Institute of Animal Physiology, Biochemistry and Nutrition, Branch of Ernst Federal  
Science Center for Animal Husbandry; Borovsk, Kaluga oblast, Russian Federation*

**ABSTRACT.** Reducing the productive life of highly dairy cows for several years remains one of the most important problems in dairy farming. The aim of this work is to systematize methodological approaches and the results of their use at the interface between search fundamental and applied research in the field of assessment, forecasting and improving the viability of highly productive dairy cattle. Main sections: theoretical bases of research on the dynamics of cow culling from the dairy herd; determination of survival parameters in real populations (including populations that are heterogeneous in terms of viability parameters); analysis of the dynamics of milk yield by successive lactation; forecasting the bioeconomic efficiency of milk production, taking into account the indicators of cow survival and productivity. When analyzing the dynamics of survival, an original algorithm for numerical integration of the Gompertz distribution using a discrete time scale was used, which is convenient for performing serial calculations taking into account the features of real objects, including heterogeneous populations. Based on the results of the study, quantitative tests are proposed for use in breeding and reproduction of highly productive cows: 1) to assess the viability potential – the parameter that is the reverse of the relative culling at the first lactation; 2) to predict the duration of economic use – the functional relationship between length of productive life (LPL) and the viability potential. Based on the analysis of empirical material and literature data, it is concluded that the LPL of cows is largely determined by the viability potential formed during the period preceding the beginning of lactation activity, i.e. during pre - and postnatal ontogenesis and in the process of rearing repair young. Therefore, to extend LPL, it is necessary to increase the "initial" value of viability by monitoring the physiological status of mothers to eliminate adverse deviations during prenatal development, as well as to conduct screening examinations in the periods preceding the onset of reproductive maturity. The novelty of this approach is to shift the emphasis from the fight against "productivity diseases" to their prevention based on the exclusion of risk factors at all stages of ontogenesis, the creation of adaptive feeding systems, the introduction of new methods of medical introscopy, remote diagnostics and physiological monitoring, as well as the maintenance of comfortable conditions (welfare) for the operation of highly productive animals. Ultimately, the goal of reproduction of dairy cattle should be to obtain populations of dairy cows with a balanced development of mammary glands and visceral systems that provide an optimal level of synthesis of milk components, eliminating risks of the occurrence of metabolic dysfunctions and reducing the quality of dairy products.

*Keywords: dairy cows, viability, dynamism of productive life, modeling, forecasting*

**Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology. 2020, 2: 5-42**

Поступило в редакцию: 21.04.2020

Получено после доработки: 08.06.2020

**Черепанов Геннадий Георгиевич, д.б.н., с.н.с., тел. +7(905) 654-03-99;**