

УДК 636.2.032:577.1:57.087.5:51-76

DOI: 0.25687/1996-6733.prodanimbiol.2021.1.75-86

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ БИОСЕНСОРОВ И ТЕХНОЛОГИЙ Big Data: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ ВЫСОКОУДОЙНЫХ КОРОВ

Черепанов Г.Г.

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

В ранее проведенных исследованиях было показано, что продолжительность хозяйственного использования лактирующих коров зависит, в основном, не от темпа старения, а от величины параметра, характеризующего начальный уровень жизнеспособности на первой лактации, т.е. от потенциала здоровья, сформированного до начала лактационной деятельности. Анализ опубликованных теоретических представлений и экспериментальных данных показывает, что этот уровень может в значительной степени детерминироваться эпигенетическими модификациями в развитии эмбриона и плода. Так, международное общество по изучению пренатального программирования здоровья и заболеваний (DOHaD – developmental origins of health and disease) изучает адаптивные изменения в развитии эмбриона и плода к действию факторов внешней среды в период беременности и влияние этих изменений на физиологические процессы в постнатальный период и по достижении возраста репродуктивной зрелости. В связи с этим возникает необходимость организации постоянного автоматизированного мониторинга физиологического статуса лактирующих коров, в том числе по динамике индекса упитанности (BCS – body condition score) в первые месяцы лактации для индикации опасного для эмбрионов влияния метаболического стресса у матерей в периоды отрицательного баланса энергии. Необходимо внедрять системы электронной идентификации животных, системы биосенсоров и приборы медицинской интроскопии для получения и архивирования визуальной и измерительной информации с беспроводной передачей данных и проведением анализа «больших» данных.

Ключевые слова: коровы молочных пород, лактация, физиологический статус, продолжительность продуктивной жизни, прогнозирование, автоматизированный мониторинг

Проблемы биологии продуктивных животных, 2021, 1: 75-86

Введение

Сокращение продолжительности продуктивной жизни высокоудойных коров остаётся одной из важнейших проблем в молочном животноводстве. Вследствие длительного игнорирования научно-теоретических аспектов проблемы выживаемости высокоудойных коров обостряются такие проблемы, как нехватка ремонтных тёлочек, 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, разведения 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. 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 последние десятилетия в странах с развитыми системами молочного скотоводства центр внимания в области селекции и разведения переносится от достижения высокой продуктивности на более сбалансированные цели, и усилия исследователей в большей степени сосредоточиваются на вопросах комфортности условий содержания (welfare), состояния здоровья животных и качества молока; при этом вопросы поддержания здоровья становятся условием финансовой успешности производства. В целом, эта тенденция свидетельствует о настоятельной необходимости смены парадигмы в направлении перехода от борьбы с болезнями к их профилактике и поддержанию здоровья на основе научно обоснованной стратегии прогнозирования и повышения жизнеспособности продуктивных животных.

В мировой и отечественной аграрной науке в подотрасли растениеводства в последние десятилетия сформирована система управления научно-технологическим развитием, получившая название *Precision Agriculture*; в ряде стран в качестве аналогичной целевой установки в животноводстве используется термин *Sustainable Animal Production*. Такие системы управления основаны на применении IT-технологий. Эта область наукоёмких технологий включает в себя в себя три основных составляющих: 1) вычислительное моделирование производственных процессов; 2) когнитивные технологии (системы искусственного интеллекта, машинное обучение, распознавание образов); 3) телекоммуникационные технологии, обеспечивающие функции сбора, передачи и хранения данных.

Селекционируемые признаки, связанные с показателями выживаемости, фертильностью, здоровьем животных и качеством молока в мировой практике в настоящее время интегрируются в составе сложных селекционных индексов. В ближайшие десятилетия системы биосенсоров, устройства регистрации данных, методы прецизионных измерений и другие технические средства обеспечат получение больших объёмов данных для селекции, и трудности будут лежать не в том, как измерить те или иные фенотипические признаки, а в том, какие именно признаки включать в селекционные индексы (Miglior et al., 2017).

Поэтому представляется целесообразным, используя данные производственного учёта и результаты научных исследований, разрабатывать вычислительные инструменты (модели, алгоритмы, количественные тесты) 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 работы – систематизация результатов исследований по прогнозированию выживаемости популяций молочного скота и формулирование концепции по использованию современных систем биосенсоров и технологий Big Data для повышения жизнеспособности высокоудойных коров.

Материал и методы

История развития теоретического аппарата анализа выживаемости восходит к началу 19-го века, ко времени публикации статьи сотрудника компании по страхованию жизни Бенджамина Гомпертца (Gompertz, 1825), в которой автор применил эмпирически найденное соотношение для оценки вероятности смерти в разных возрастных группах населения. Это соотношение, в литературе часто именуемое как «функция Гомпертца» в современной трактовке представляет собой дифференциальное уравнение, описывающее распределение плотности вероятности смерти особей в генетически однородной когорте в период после достижения возраста репродуктивной зрелости:

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

где t – непрерывная переменная времени (возраст); $N(t)$ – текущая численность когорты, генетически однородной группы особей одного и того же года рождения (для коров – одного и того же года первого отёла); B и c – константы (в современных работах по проблемам геронтологии показатель экспоненты иногда бывает представлен функцией от времени). Хотя длительность хозяйственного использования продуктивных животных часто определяется не их физической смертностью, а вынужденным выбытием из стада по сумме причин, общие закономерности, характеризующие признак выживаемости, весьма схожи и для такого стада, и для популяций лабораторных животных, и для человека. С другой стороны, при попытках с помощью этого уравнения исследовать закономерности, характеризующие изменение численности коров по лактациям в конкретном стаде, возникают определённые проблемы. Так, в зоотехнической практике для лактирующих коров широко используется дискретная шкала времени – номера последовательных лактаций, при этом число «отсчётов» небольшое (от 2-3 до 7-10). Кроме того, с большой вероятностью реальные популяции могут быть неоднородными.

Поэтому в данной работе применялся метод приближённых вычислений с адаптацией имеющегося математического аппарата для решения конкретных задач с использованием приложения MS Excell. Метод включает в себя две основные вычислительные операции: 1) определение параметров функции Гомперца для рядов численности дойных коров по последовательным лактациям и 2) численное интегрирование при проведении вычислительных экспериментов (*in silico*) для выявления возможных взаимосвязей между параметрами функции Гомперца и выживаемостью в реальных объектах

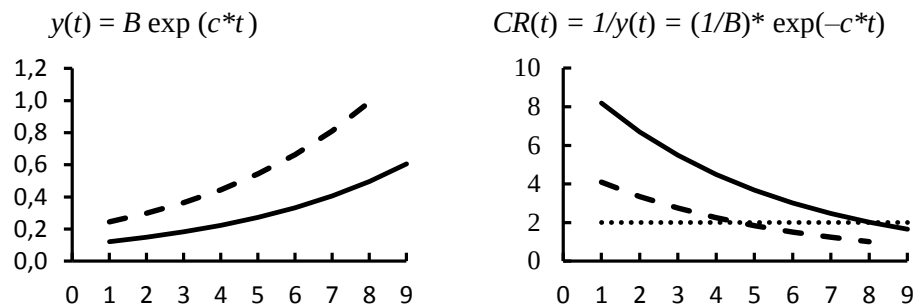
Последовательность значений численности коров в стаде с разными номерами лактации (поперечное исследование) повторяет соответствующие остатки когорт (группы коров одного и того же года первого отёла). Для нивелирования отклонений от стационарности обновления стада при поперечном исследовании используются усреднённые данные по нескольким годам. Определение параметров функции Гомперца осуществляется в приложении Excell по этапам: 1) задаётся построение точечной диаграммы; 2) производится ввод ряда $t = \dots(1, 2, 3, \dots)$ в строке $x = 1$ и ряда $\Delta N/N$ в строке $y = \dots$ ($\Delta N = N_i - N_{i+1}$); 3) выбирается линия регрессии – экспоненциальный тренд; 4) в уравнении регрессии считываются параметры B , c и R^2 . Если в записях учёта численности дойного поголовья значения надоев приведены для первых лактаций по-отдельности, а затем – по двукратным лактациям (например, 4-я+5-я, 6-я+7-я и т.д.), исходный ряд можно восстановить, пользуясь приложением MS Excell методом последовательного приближения по критерию наименьшего разброса отсчётов (Черепанов, 2020б).

Результаты и обсуждение

На основе анализа данных по возрастной динамике надоев за лактацию и выживаемости в реальных популяциях молочных коров была разработана концепция и методы количественной оценки конститутивной резистентности (КР или CR – constitutive resistance) как высоко интегрированного возраст-зависимого показателя, отражающего способность организма поддерживать ключевые функциональные параметры в границах, совместимых с жизнью или с повышенной интенсивностью функционирования составляющих подсистем, в том числе систем молокообразования и общей защиты от факторов риска (Черепанов, 2014; Cherepanov, 2018). При анализе выживаемости уровень общей КР косвенно оценивается величиной, обратной функции Гомперца – $1/y(t)$ (Cherepanov, 2018; Черепанов, 2020а,б). Физиологические проявления КР могут быть разными в зависимости от масштаба времени: в «медленном» времени (на длительных временных интервалах) она отражает темп снижения жизнеспособности, в «быстром» времени – критический (совместимый с жизнью) уровень защитных сил при развитии гомеостатических реакций при воздействии факторов риска.

Показано, что длительность продуктивной жизни коров в значительной степени детерминирована уровнем КР в период, предшествующий достижению репродуктивной зрелости,

т.е. чем выше «начальный» уровень КР на первой лактации (CR1), тем больше шансов у данной группы особей иметь длительную продуктивную жизнь (см. рис.).



По оси абсцисс – время (последовательные номера лактации); по оси ординат *слева*: значения интенсивности выбытия, описанной функцией Гомпертца ($y = \Delta N_i / N_i$, числитель – выбытие за период i -ой лактации, знаменатель – численность коров в начале этого периода), для двух популяций, различающихся значением параметра B («начальное» значение $y(t)$ при $t = 0$). *Справа*: значения индекса жизнеспособности – конститутивной резистентности $CR(t)$. Жирная линия – $B = 0,1$, пунктир – $B = 0,2$. Значение $c = 0,2$ (темп «старения» один и тот же для двух вариантов). На первой лактации $CR1 = B \cdot 2,72^{0,2}$. Линия, обозначенная точками – условный уровень показателя CR , соответствующий истощению защитных сил в момент достижения предельной длительности продуктивной жизни (4,5 и 8 лактаций).

На основе моделирования динамики выживаемости популяций дойных коров и анализа производственных данных предложены количественные тесты для применения в системах разведения и воспроизводства высокопродуктивных коров: 1) для оценки жизнеспособности коров разного возраста – показатель, обратный величине относительного выбытия на данной лактации ($1/y(t)$); 2) для прогнозирования продолжительности хозяйственного использования – функциональная взаимосвязь между средней продолжительностью продуктивной жизни (T) и величиной относительного выбытия на первой лактации ($1/y_1$), т.е. «начального» уровня жизнеспособности. Так, по опубликованным исходным данным для пяти пород США выявлена линейная взаимосвязь между $1/y_1$ и T ($r = 0,94$, $P < 0,05$); при использовании данных по 15 производственным подразделениям Ленинградской области (племзаводы, отдельные хозяйства, районы) было получено аналогичное линейное соотношение ($r = 0,98$, $P < 0,001$; Cherepanov, 2018).

Обоснование постановки проблемы

В целом, полученные данные можно считать обоснованием теоретического положения о том, что продолжительность хозяйственного использования лактирующих коров зависит, в основном, не от темпа снижения уровня защитных сил по мере старения, а от величины параметра, характеризующего начальный уровень общей резистентности на первой лактации, т.е. от потенциала жизнеспособности, сформированного до начала периода лактационной деятельности. В связи с этим возникает два вопроса: 1) какой биологический смысл может иметь этот параметр и 2) в какой мере введенные понятия начального уровня защитных сил (резистентности, состояния здоровья) и потенциала жизнеспособности соответствуют теоретическим представлениям и экспериментальным данным, описанным в мировой литературе исследователями, работающими в области биологии продолжительности жизни.

Потенциал жизнеспособности и концепция эмбриологической программированности «начального здоровья». Трактовка конститутивной резистентности как меры возрастного снижения общей резистентности к действию факторов риска, начиная от некоторого уровня «первичного здоровья» (primal health, см. Odent, 1986) близка к развитой в работах К. Уоддингтона концепции гомеореа как креода – канализованной траектории спуска с некоторого начального уровня защитных сил (Уоддингтон, 1970). 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). Современный уровень знаний допускает возможность повышения уровня «первичного» здоровья (Odent, 1986; Один, 2011; Вайсерман, 2011; Джапаров, 2018).

Данные многочисленных эпидемиологических исследований выявляют обратную взаимосвязь между весом тела при рождении и риском коронарной недостаточности, гипертензии, диабета 2-го типа и других заболеваний у взрослых людей. Согласно «гипотезе Баркера», многие показатели здоровья у взрослых людей программируются в периоды развития эмбриона и плода. В процессе пренатального развития определяются «установочные точки» для физиологических и метаболических процессов у взрослых. Изменения в статусе питания в период беременности могут вызывать адаптационные изменения в процессах развития за счёт гормональных сдвигов в эмбрионе и плоде, которые сдвигают положение установочных точек. Эти адаптивные сдвиги могут создавать кратковременные положительные эффекты для эмбриона и плода, так что новорожденный будет лучше подготовлен для неблагоприятных условий среды (например, недостаточное питание). Однако предпринимаемые в постнатальный период попытки компенсировать задержку роста за счёт усиленного питания могут стать причиной метаболических конфликтов, предрасполагающих к возникновению во взрослой жизни физиологических отклонений, увеличивающих риск заболеваний (Lau, Rogers, 2004; de Boo et al., 2006).

Многочисленные данные свидетельствуют о том, что метаболические нарушения в зрелом возрасте часто возникают в результате эмбриологического программирования ключевых эндокринных систем вследствие отклонений от нормальных условий *in utero*. Недостаточное питание, температура внешней среды, кислородная недостаточность, а также избыточное питание в период беременности существенно влияют на процессы пренатального развития. Это означает, что оптимизация продуктивных качеств, плодовитости, общего состояния здоровья и продолжительности продуктивной жизни молочных коров возможна только с учётом влияния внешних средовых факторов на процессы пренатального развития (Opsoner, 2016).

Концепция эмбрионального программирования была сформулирована в процессе эпидемиологических исследований у людей, страдающих хроническими заболеваниями типа коронарной болезни сердца и гипертензии. В отношении продуктивных животных эта концепция важна с точки зрения обеспечения продуктивности и здоровья. С позиции этого подхода важно, чтобы у матерей поддерживался оптимальный статус питания для обеспечения снабжения нутриентами растущего плода, в том числе для развития иммунной системы. У молочных коров при недостаточном или несбалансированном питании в период беременности рождаются телята с пониженным иммунитетом к возбудителям болезней, таких как респираторные заболевания и маститы (Cooke, 2019).

Работы Баркера (Barker, Osmond, 1986; Barker et al., 1989, 1993) стимулировали интерес к эмбриональным причинным факторам развития заболеваний в зрелом возрасте, и было организовано международное общество по изучению пренатального программирования здоровья и заболеваний (DOHaD – developmental origins of health and disease). Основные направления деятельности этого общества – теоретические проблемы, связанные с оценкой прогностического значения адаптивных изменений в развитии эмбриона и плода к действию факторов внешней среды в период беременности, в том числе к условиям питания и стрессовым воздействиям, и изучение эпигенетических механизмов, обуславливающих влияние этих изменений на физиологические процессы в постнатальный период и по достижении возраста репродуктивной зрелости (Wadhwa et al., 2009).

Со времени публикации работ Баркера о причинах болезней взрослых, обусловленных отклонениями в эмбриональном и раннем постнатальном развитии, большое внимание исследователей было направлено на изучение влияния связи внутриматочной среды с заболеваемостью взрослых. На фоне успехов в технологиях оплодотворения *in vitro* (IVF) мало внимания уделялось выявлению различий в потомстве, получаемом с применением этой технологии. Эти различия

выражаются в более высокой пренатальной смертности, ненормальной массе плода и различных патологиях родов. Теперь становится ясным, что эпигенетические модификации могут возникать ещё до беременности, и они могут быть обусловлены каким-то одним фактором в технологиях IVF, и каждая из влияющих переменных может оказывать влияние на эпигенетические модификации в эмбрионе (Delisle, 2002; Guilloteau et al., 2009; Carpinello et al., 2018).

Открытие феномена раннего пренатального программирования здоровья и заболеваний применительно к проблеме жизнеспособности молочных коров заставляет обратиться к вопросам физиологического мониторинга дойного стада на основе систем современных биосенсоров с беспроводной передачей данных и использованием технологий Big Data.

Применение биосенсоров для контроля физиологического статуса коров. Термином «биосенсоры» обычно обозначают аналитические устройства, в которых чувствительный слой, содержащий биологический материал, реагирует на присутствие определяемого компонента и генерирует электрический сигнал, функционально связанный с наличием и концентрацией этого вещества. Биоматериалом могут служить ткани, бактерии, дрожжи, липосомы, органеллы, рецепторы, ферменты, ДНК, а также клетки, которые иммобилизованы на физических датчиках. В более широком плане к биосенсорам можно относить устройства для съёма и автоматической обработки такой информации, содержание которой ранее было доступно только человеку (например, в результате визуального или тактильного обследования биологического объекта). Такие операции стали доступны для применения в исследованиях биологических объектов благодаря применению новейших методов распознавания образов и машинного обучения с использованием технологии нейросетей.

Системы биосенсоров являются основным источником данных для применения технологии Big Data (BD-технологии) в животноводстве (Hudson et al., 2016). Биосенсоры применяются для измерения электрической проводимости ткани вымени при диагностике маститов у коров, для регистрации изменений физических свойств молока (цвета и др.), концентрации в нём некоторых ферментов, таких как гаптоглобин, L-лактатдегидрогеназа, N-ацетил-β-D-глюкозаминидаза, а также прогестерона и других соединений. Наиболее широко в настоящее время используются сенсоры для регистрации двигательной активности (в частности, для выявления эструса, измерения температуры тела, времени жвачки и др.). Широко используются видеокамеры, устройства для регистрации потребления корма и др. Множественные данные от различных устройств интегрируются, и алгоритмы машинного обучения используются для обнаружения отклонений параметров от нормы (напр., отклонения по частоте или длительности жвачки, температуры тела, двигательной активности, динамике молокоотдачи и др.) с построением списка коров, требующих дополнительного обследования для выявления возможного риска заболеваний.

Высокий уровень распадаемого в рубце протеина (или избыток нераспадаемого по отношению к потребности) может приводить к спаду показателей воспроизводства у лактирующих коров. Для индикации таких состояний в доильных роботах используются биосенсоры для определения уровня мочевины в молоке. Вариации уровня азота мочевины в плазме крови у дойных коров обычно ассоциируется со сдвигами pH в матке, что, в сочетании со снижением концентрации прогестерона в крови в период раздоя, приводит к снижению показателей фертильности. Клеточные культуры эндометрия коров чувствительны к сдвигам в уровнях мочевины и pH, при этом наиболее заметные сдвиги наблюдаются в секрети простогландина F2 альфа (PGF2). Повышенный уровень PGF2 в просвете матки отрицательно сказывается на развитии и выживаемости эмбрионов (Butler, 1998). Отрицательное влияние на созревание ооцитов и развитие эмбрионов оказывает повышение в крови в первые месяцы лактации таких метаболитов, как неэтерифицированные (свободные) жирные кислоты и кетонные тела – продукты форсированной мобилизации жировых депо.

Таким образом, для продления длительности хозяйственного использования и повышения репродуктивной эффективности коров необходимо изыскивать способы повышения уровня «начальной» КР, который ремонтные тёлки приобретают в пре- и постнатальный периоды жизни. Для предотвращения неблагоприятных отклонений в процессах эмбриогенеза целесообразно осуществлять непрерывный мониторинг физиологического статуса матерей, а при выращивании

молодняка – проводить периодические обследования с регистрацией возможных факторов риска. Для этого необходимо внедрять системы электронной идентификации животных, приборы для медицинской интроскопии и наборы микроустройств с беспроводной передачей данных для компьютерного анализа визуальной и измерительной информации.

Идентификация животных является одним из главных элементов информатизации в молочном скотоводстве (Доровских, Жариков, 2020). Группа российских компаний ISBC сертифицировала соответствующие мировым стандартам ISO 11784 и ISO11785 радиочастотные метки в международной организации International Committee for Animal Recording (ICAR). Интеграция с автоматизированными системами на ферме позволяет проводить взвешивание животных, разделять их на группы по разным признакам, индивидуализировать кормление, в том числе с учётом весовых характеристик животных и показателей потребления воды и т.д. Программное обеспечение с RFID-метками позволяет автоматизировать племенной и зоотехнический учет с имеющимися программными комплексами, а также ветеринарный учет с программой «БАРС. Сельское хозяйство – Ветеринария» (Кондратьева и др., 2019).

Перспективным направлением, активно развивающимся в настоящее время во всем мире, является «умное животноводство», повышающие продуктивность животных, качество продукции и рентабельность в целом. В основе умных ферм лежат сенсоры, в том числе биосенсоры, собирающие первичную информацию (Маринченко, Королькова, 2020). Биосенсоры, как инструмент для управления здоровьем животных, – быстро развивающийся рынок, который в ближайшие годы, по прогнозам, вырастет многократно (Neethirajan, 2017).

По прогнозам на ближайшие десятилетия, рентабельность молочных ферм будет иметь решающее значение для устойчивого развития (sustainability). Племенное совершенствование будет основываться на использовании кодирующего генома и некодирующего эпигенома, а также микробиома молочных коров и производственных помещений. Интегрированные системы микросенсоров, роботов и автоматических устройств станут частью рутинной работы по управлению стадом. Инновации в устройстве производственных помещений будут обеспечивать здоровье коров, способствуя приближению к естественным паттернам поведения. Стада будут рассматриваться как суперорганизмы, и их исследование как целостных объектов приведёт к прогрессу в продуктивности и здоровье животных, обеспечению доходности и устойчивости развития производства (Bewley, Schutz, 2008; Britt et al., 2018).

В настоящее время многие молочные фермы используют датчики молока и биосенсоры для регистрации двигательной активности у дойных коров. Предпринимаются попытки использовать массивы множественных данных, получаемые с этих устройств, для прогнозирования таких фенотипически сложных признаков, как пожизненная резистентность (lifetime resilience) или продолжительность продуктивной жизни (productive life span, PLS) (Adriaens et al., 2020). Исходными данными для прогнозирования были 45 показателей, включая параметры лактационной кривой, «выбросы» двигательной активности, свидетельствующие о наступлении эструса, динамика этой активности, связанная с общим состоянием здоровья (напр., снижение среднесуточных показателей активности), параметры вариабельности измеряемых показателей и др. На основании этих данных, полученных на первой лактации, для каждой коровы с помощью последовательного регрессионного анализа вычисляли ранг коровы для трёх уровней прогнозируемой PLS (низкий, средний и высокий уровень) и сопоставляли полученный результат с фактическими данными. При последовательном включении в регрессионную модель исходных показателей вероятность правильного прогноза составляла около 90%, но структура модели различалась для разных ферм.

Автоматизированный мониторинг индекса упитанности коров. Исследования по разработке автоматизированных систем измерения BCS (body condition score) дают основание полагать, что в ближайшем будущем они войдут в производственные системы поддержки и принятия управленческих решений (Roche et al., 2009). Уровень индекса до отёла, его минимальное значение и площадь под кривой BCS-время после отёла ассоциируются с уровнем молочной продуктивности, состоянием репродуктивной функции и метаболическими нарушениями (Dechow

et al., 2002; Bastin et al., 2010). Для показателей продуктивности и здоровья, связь с индексом обычно нелинейная, оптимальным считается диапазон 3,0-3,5 (для 5-балльной шкалы).

При роботизированном доении в устройстве для автоматического надевания и съёма доильных стаканов роль биосенсора выполняет система машинного (технического) зрения, в её состав входит видеокамера и программное обеспечение, которое анализирует визуальную информацию и передаёт команды исполнительным механизмам. В настоящее время выпускаются коммерческие камеры для автоматической оценки BCS (DeLaval Body Condition Scoring, BCS DeLaval International AB, Tumba, Sweden). Исследование показало, что данные автоматической системы высоко коррелируют с результатами обычного ручного обследования в области значений 3,0-3,75, однако отмечены расхождения в области самых низких и самых высоких уровней BCS (Istael et al., 2019). Несомненно, что совершенствование алгоритмов и программ в этой системе обеспечит увеличение точности в большем диапазоне значений индекса (Bewley, Schutz, 2008; Bewley et al., 2008, 2010; Kadivar et al., 2014; Tedin et al., 2014).

Описана автоматизированная система оценки BCS, использующая трёхмерный алгоритм топографической съёмки тела коровы с использованием кинетической камеры (Microsoft Corp., Redmond, WA) (Spoliansky et al., 2016). Все этапы автоматизированы, включая выбор изображения и классификацию. Для каждой коровы используется 40 показателей, которые автоматически выбираются из полученных изображений задней части спины и из базы данных по управлению стадом. Результаты тестовых измерений сопоставлялись с результатами визуальной оценки зоотехниками-экспертами с использованием регрессионного анализа. Тренировочная выборка состояла из измерений по всему интервалу значений BCS для 80 коров и тестовая – из 20 коров. Результаты показали хорошую воспроизводимость оценки BCS с коэффициентом детерминации 0,75 при общем стандартном отклонении 0,19. Для применения на разных фермах требуется проведение измерений на тренировочной выборке из 10 коров с получением 10 видеосъёмок по 4 сек каждая.

Решалась задача пространственного моделирования формы тела коровы для разработки усовершенствованного алгоритма машинной оценки индекса (Azzaro et al., 2019). Видеокамера помещалась над входом в каиеру для роботизированного доения, получаемые изображения использовались для построения базы данных по набору контрольных точек. Набор контрольных точек строился по 286 видеоизображениям в области поясничного и заднего тазового отдела, и формировался набор базовых изображений, который сопоставлялся с набором данных по исследованному животным с использованием метода главных компонент. Результаты анализа показали преимущество разработанного метода по точности оценки индекса в широкой области его значений.

Разработана система автоматической оценки BCS, улучшенная за счёт учёта множественных измерительных параметров при анализе изображений в трёх позициях на 8 участках тела (Song et al., 2019). Камеры расположены на высоте 3 м над землёй для получения изображений коровы спереди, с правой стороны и сзади. Каждая камера автоматически адаптировалась для идентификации анатомических контрольных точек на поверхности тела. Вокруг этих точек классифицировались выступы и углубления поверхности для получения значений 8 переменных, связанных с признаками упитанности. Разработанная база данных по контрольным точкам на поверхности тела выложена в Интернете и доступна для разработчиков дальнейших вариантов системы автоматической оценки BCS.

Использование технологий Big Data – существенное условие для системы физиологического мониторинга. Для определения содержания термина Big Data (перевод на русский – «большие данные» не совсем адекватен); в англо-язычной литературе обычно используют “four Vs”: *Volume* (объём информации), *Velocity* (скорость её обработки), *Veracity* (достоверность, точность, качество исходных данных) и *Variety* (разнообразие, множественность, полнота). Качество собираемой для анализа информации приобретает критическое значение для «осмысления» по мере увеличения её объёмов (в наиболее критическом варианте получается ситуация «мусор на входе – мусор на выходе»), особенно в тех случаях, когда предполагается интеграция данных, полученных от разных специалистов. Как и в других сферах применения «прорывных» технологий, для успешного

применения BD-технологий большое значение имеет наличие развитой «аналитики» (статистического анализа, методов фильтрации исходных данных, интеграции выходных данных, их визуализации и т.д.), в противном случае будет большой вероятностью возникновения ситуации, когда «данных много, а информации мало». Поэтому на первых этапах освоения технологии критическим фактором обычно бывает дефицит подготовленных профильных специалистов («айтишников», системных аналитиков, программистов и др.).

По мнению специалистов из университета Джона Хопкинса, применение BD-технологий может стать основой второй революции в медицине, причём этот переворот будет «не менее драматичным и всеобъемлющим», чем первая революция, которую принято связывать с изобретением микроскопа и первыми попытками врачей фиксировать наблюдения о состоянии больных, анализировать и собирать информацию, основываясь на науке (Царская, 2016). В качестве иллюстрации возможностей новой технологии можно привести результаты работы команды исследователей из некоммерческого института Christiana Care Health System, которую они вели совместно с Университетом Делавера (UD). Использовались данные о пациентах, накопленные медицинскими учреждениями округа, чтобы исследовать результативность лечения для больных, страдающих хронической почечной недостаточностью. Целью исследования было понять, как и когда даже незначительные изменения в жизненных показателях таких пациентов приводят к осложнениям и госпитализации. В итоге исследователи пришли к выводу, что госпитализацию можно предсказать с необыкновенно высокой степенью вероятности, если систематически следить за артериальным давлением, частотой возникновения эпизодов кожных и респираторных инфекций, проявлениями гиперволемии (увеличение объема циркулирующей крови и плазмы) и гипонатриемии (снижения концентрации ионов натрия в плазме крови)

Как и большинство других прорывных технологий, широкое применение BD-технологий создаёт не только значительные выгоды, но и определённые потенциальные риски, оценить которые можно только в процессе работы в конкретных условиях производства. Наибольший эффект в настоящее время оно даёт в молочном скотоводстве для улучшения показателей воспроизводства (в основном, при регистрации двигательной активности и уровня прогестерона в молоке). По мере освоения этой технологии, дополнительный долговременный эффект она может дать в плане достижения оптимального сочетания уровня продуктивности, состояния здоровья животных и рентабельности производства.

Заключение

Полученные нами ранее результаты свидетельствуют о том, что различия по продолжительности продуктивной жизни высокоудойных коров в значительной степени обусловлены уровнем жизнеспособности на первой лактации, т.е. потенциалом здоровья, сформированным в ходе пре- и постнатального развития. Этот вывод согласуется с современными воззрениями и результатами биомедицинских исследований. Так, международное общество по изучению пренатального программирования здоровья и заболеваний интенсивно изучает адаптивные изменения в развитии эмбриона и плода к действию факторов внешней среды в период беременности и влияние этих изменений на физиологические процессы после достижения возраста репродуктивной зрелости. В связи с этим необходимо разрабатывать и внедрять в производство системы мониторинга физиологического статуса животных, особенно у коров в период метаболического стресса в первые месяцы лактации, с применением систем биосенсоров и высокопроизводительных вычислительных комплексов. В племенных центрах системы физиологического мониторинга целесообразно создавать на базе экспериментального стада с использованием устройств электронной идентификации животных, систем биосенсоров и BD-технологий. Это будет способствовать выявлению «критических точек» в формировании новых генотипов животных с оптимальным соотношением уровня жизнеспособности и продуктивности, которое необходимо для повышения рентабельности производства молока.

Список литературы

1. Вайсерман А.М., Войтенко В.П., Мехова Л.В. Эпигенетическая эпидемиология возраст-зависимых заболеваний. // Онтогенез. 2011. Т. 42. № 1. С. 30-50.
2. Джапаров Д.Э. Эпигенетика старения: прорывное направление геронтологии? // Успехи геронтологии. 2018. Т. 31. № 5. С. 628-631.
3. Доровских В.И., Жариков В.С. Опыт использования доильных роботов. // Техника и технологии в животноводстве. 2020. Т. 38. № 2. С. 19-22.
4. Кондратьева О.В., Федоров А.Д., Слинко О.В., Войтюк В.А. К вопросу о повышении эффективности в отрасли животноводства // Эффективное животноводство. 2019. № 5. С. 56-57.
5. Маринченко Т.Е., Королькова А.П. Роботизация молочного скотоводства. // Мат. VI межд. научно-практ. онлайн-конф.: «Наука, образование и инновации для АПК: состояние, проблемы и перспективы». Майкоп, 2020. С. 264-266.
6. Один В.И. Кризис геронтологии: к вопросу о первичном здоровье в XX веке. // Успехи геронтологии. 2011. Т. 24. № 1. С. 11-23.
7. Прошина О., Лоскутов Н. Воспроизводство стада: потерянная страница. // Животноводство России. 2011. № 9. С. 40-41.
8. 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.
9. Уоддингтон К.Х. Основные биологические концепции. // В сб.: На пути к теоретической биологии. I. Прологомены. М.: Мир, 1970. 181 с. (Пер. с англ. изд.: Towards to theoretical biology. I. Prolegomena. UBS Symposium. Birmingham: Aldine Publ., 1968).
10. 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.
11. Черепанов Г.Г. Исследование динамики выживаемости в неоднородных популяциях коров: вопросы методологии, анализ производственных данных. // Проблемы биологии продуктивных животных. 2020а. № 1. С. 52-63. DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.1.52-63
12. Черепанов Г.Г. Новые подходы в изучении жизнеспособности высокоудойных коров: концепции, модели, анализ данных. // Проблемы биологии продуктивных животных. 2020б. № 2. С. 5-42. DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.2.5-42
13. Adriaens I., Friggens N.C., Ouweltjes W., Scott H., Aernouts B., Statham J. Productive life span and resilience rank can be predicted from on-farm first-parity sensor time series but not using a common equation across farms. // J. Dairy Sci. 2020. Vol. 103. nr 8. P. 7155-7171. DOI: 10.3168/jds.2019-17826
14. Azzaro G.M., Caccamo J.D., Ferguson G., Puglisi R., Petriglieri G., Licitra Objective estimation of body condition score by modeling cow body shape from digital images. // J. Dairy Sci. 2019. Vol. 102. nr 5. P. 4294-4308. DOI: 10.3168/jds.2018-15238
15. Barker D. J., Osmond C. Infant mortality, childhood nutrition, and ischaemic heart disease in England and Wales. // Lancet. 1986. Vol. 1. nr 8489. P. 1077-1081.
16. Barker D.J., Winter P.D., Osmond C., Margetts B., Simmonds S.J. Weight in infancy and death from ischaemic heart disease. // Lancet. 1989. Vol. 2. nr 8663. P. 577-580.
17. Barker D.J., Gluckman P.D., Godfrey K.M., Harding J.E., Owens J.A., Robinson J.S. Fetal nutrition and cardiovascular disease in adult life. // Lancet. 1993. Vol. 341. nr 8850. P. 938-945.
18. Bastin C., Loker S., Gengler N., Sewalem A., Miglior F. Genetic relationships between body condition score and reproduction traits in Canadian Holstein and Ayrshire first-parity cows. // J. Dairy Sci. 2010. Vol. 93. P. 2215-2228.
19. Bewley J.M., Peacock A.M., Lewis O., Boyce R.E., Roberts D.J., Coffey M.P., Kenyon S.J., Schutz M.M. Potential for estimation of body condition scores in dairy cattle from digital images. // J. Dairy Sci. 2008. Vol. 91. P. 3439-3453. DOI: 10.3168/jds.2007-0836
20. Bewley J.M., Schutz M.M. An interdisciplinary review of body condition scoring for dairy cattle. // Prof. Anim. Sci. 2008. Vol. 24. P. 507-529. DOI: 10.15232/S1080-7446(15)30901-3
21. Bewley J.M., Boehlje M.D., Gray A.W., Hogeveen H., Eicher S.D., Schutz M.M. Assessing the potential value for an automated dairy cattle body condition scoring system through stochastic simulation. // Agric. Financ. Rev. 2010. Vol. 70. P. 126-150. DOI: 10.1108/00021461011042675
22. Britt J.H., Cushman R.A., Dechow C.D., Dobson H., Humblot P., Hutjens M., 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. nr 5. P. 3722-3741. DOI: 10.3168/jds.2017-14025

23. Butler W.R. Review: effect of protein nutrition on ovarian and uterine physiology in dairy cattle. // J. Dairy Sci. 1998. Vol. 81. nr 9. P. 2533-9533. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(98)70146-8
24. Cherepanov G.G. Prediction of viability of cows: a new look at the old problem. // Agricultural Research and Technology. Open Journal (ARTOAJ). 2018. Vol. 141. nr 5. DOI: 10.19080/ARTOAJ.2018.14.555931
25. de Boo H.A., Harding J.E., Aust N.Z. The developmental origins of adult disease (Barker) hypothesis. // J. Obstet. Gynecol. 2006. Vol. 46. nr 1. P. 4-14. DOI: 10.1111/j.1479-828X.2006.00506.x
26. Dechow C.D., Rogers G.W., Clay J.S. Heritability and correlations among body condition score loss, body condition score, production and reproductive performance. // J. Dairy Sci. 2002. Vol. 85. P. 3062-3070.
27. Delisle H. [Foetal programming of nutrition-related chronic diseases]. // French Review. Sante. 2002. Vol. 12. nr 1. P. 56-63. PMID: 11943639
28. 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. nr 2. P. 613-623.
29. Faust M. Capitalizing on dairy cow herd life. US National Dairy Database. <<http://www.inform.umd.edu/EdRes/Topic/AgrEnv/ndd/>>
30. Guilloteau P., Zabielski R., Hammon H.M., Metges C.C. Adverse effects of nutritional programming during prenatal and early postnatal life, some aspects of regulation and potential prevention and treatments. // J. Physiol. Pharmacol. 2009. Vol. 60. Suppl 3. P. 17-35.
31. Helfand S.L., Inouye S.K. Rejuvenating views of the aging process. // Nat. Rev. Genet. 2002. Vol. 3: 149-153.
32. Hudson Ch., Kaler J., Down P. Using big data in cattle practice. // Clinical Practice. 2016. Vol. 40. nr 9. . P. 368-423. <<http://doi.org/10.1136/inp.k4328>>
33. Lau Ch., Rogers J.M. Embryonic and fetal programming of physiological disorders in adulthood. // Res. C. Embryo Today. 2004. Vol. 72. nr 4. P. 300-312. DOI: 10.1002/bdrc.20029
34. Kadivar A., Ahmadi M.R., Vatankah M. Associations of prepartum body condition score with occurrence of clinical endometritis and resumption of postpartum ovarian activity in dairy cattle. // Trop. Anim. Health Prod. 2014. Vol. 46. P. 121-126. DOI: 10.1007/s11250-013-0461-9
35. Miglior F., Fleming A.F., Malchiodi F.M., Brito L.F., Martin P., Baes Ch.F. A 100-Year Review: Identification and genetic selection of economically important traits in dairy cattle. // J. Dairy Sci. 2017. Vol. 100. nr 12. P. 10251-10271. DOI: 10.3168/jds.2017-12968
36. Mullins I.L., Truman C.M., Campler M.R., Bewley J.M., Costa J.H.C. Validation of a commercial automated body condition scoring system on a commercial dairy farm. // Animals (Basel). 2019. Vol. 9. nr 6. P. 287-329. DOI: 10.3390/ani9060287
37. Neethirajan S. Recent advances in wearable sensors for animal health management. // Sensing and Bio-Sensing Research. 2017. Vol. 12: 15-29. <<https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2016.11.004>>
38. Odent M. Primal Health. London: Century Hutchinson, 1986.
39. Opsomer G, Van Eetvelde M, Kamal M, Van Soom A. Epidemiological evidence for metabolic programming in dairy cattle. // Reprod. Fertil. Dev. 2016. Vol. 29. nr 1. P. 52-57. DOI: 10.1071/RD16410
40. Roche J.R., Friggens N.C., Kay J.K., Fisher M.W., Stafford K.J., Berry D.P.. Invited review: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. // J. Dairy Sci. 2009. Vol. 92. nr 12. P. 5769-5801. DOI: 10.3168/jds.2009-2431
41. Song X., Bokkers E.A.M., van Mourik S., Koerkamp P.W.G., van der Tol P.P.J. Automated body condition scoring of dairy cows using 3-dimensional feature extraction from multiple body regions. // J. Dairy Sci. 2019. Vol. 102. nr 5. P. 4294-4308. DOI: 10.3168/jds.2018-15238
42. Spoliansky R., Yael E.Y., Israel P.Y., Halachmi I. Development of automatic body condition scoring using a low-cost 3-dimensional kinect camera. // J. Dairy Sci. 2016. Vol. 99. nr 9. P. 7714-7725. DOI: 10.3168/jds.2015-10607
43. Tedín R., Becerra J., Duro R. Building the “Automatic Body Condition Assessment System” (ABiCA), an automatic body condition scoring system using active shape models and machine learning. // In: Recent Advances in Knowledge-Based Paradigms and Applications. Cham, Switzerland: Springer, 2014. P. 145-168.
44. Wadhwa P.D., Buss C., Entringer S., Swanson J.M. Developmental origins of health and disease: brief history of the approach and current focus on epigenetic mechanisms. // Semin. Reprod. Med. 2009. Vol. 27. nr 5. P. 358-368. DOI: 10.1055/s-0029-1237424

References (for publications in Russian)

1. Cherepanov G.G. [Substantiation of the concept of the key role of constitutive resistance for the viability and duration of the use of highly productive animals]. *Problemy biologii productivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*. 2014. 4: 5-34.
2. Cherepanov G.G. [Study of the dynamics of survival in heterogeneous populations of cows: questions of methodology, analysis of production data]. *Problemy biologii productivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*. 2020. 1: 52-63. DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.1.52-63

3. Cherepanov G.G. [New approaches in studying the viability of high-yielding cows: concepts, models, data analysis]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*. 2020. 2: 5-42. DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.2.5-42
4. Dorovskikh V.I., Zharikov V.S. [Experience with milking robots]. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve - Equipment and technologies in animal husbandry*. 2020. 38(2): 19-22.
5. Dzhaparov D. [Epigenetics of aging: a breakthrough direction in gerontology?]. *Uspekhi gerontologii - Advances in gerontology*. 2018. 31(5): 628-631.
6. Kondrat'eva O.V., Fedorov A.D., Slin'ko O.V., Voityuk V.A. [On improving efficiency in the livestock industry]. *Effektivnoe zhivotnovodstvo - Effective Animal Husbandry*. 2019. 5: 56-57.
7. Marinchenko T.E., Korol'kova A.P. [Dairy farming robotization]. *Mat. VI Mezhd. nauchno-prakt. onlain-konf.: «Nauka, obrazovanie i innovatsii dlya APK: sostoyanie, problemy i perspektivy»* (Mat. VI Int. scientific and practical online conference: Science, education and innovation for the agro-industrial complex: state, problems and prospects). Maikop, 2020. P. 264-266.
8. Odin V.I. [The crisis of gerontology: towards primary health in the 20th century]. *Uspekhi gerontologii - Advances in Gerontology*. 2011. 24(1): 11-23.
9. Proshina O., Loskutov N. [Herd reproduction: the lost page]. *Zhivotnovodstvo Rossii - Animal Husbandry in Russia*. 2011, 9: 40-41.
10. Sel'tsov V.I., Molchanova N.V., Kalievskaya G.F., Tokhov M.Kh. [Productive longevity is a complex indicator in cattle breeding]. In: *Produktivnoe dolgoletie krupnogo rogatogo skota molochnykh porod (informatsionnyi obzor)* (Productive longevity of dairy cattle: information review). Podol'sk-Dubrovitsy: VIZH, 2012. P. 9-27.
11. Vaiserman A.M., Voitenko V.P., Mekhova L.V. [Epigenetic epidemiology of age-related diseases]. *Ontogenez - Developmental Biology*. 2011. 42(1): 30-50.
12. Waddington K.Kh. [Basic biological concepts // In: *Na puti k teoreticheskoi biologii. I. Prolegomeny*. Moscow: Mir Publ., 1970. 181 p. (Translated from: Towards to theoretical biology. I. Prolegomena. UIBS Symposium. Birmingham: Aldine Publ., 1968).

DOI: 0.25687/1996-6733.prodanimbiol.2021.1.75-86

Physiological monitoring based on biosensors systems and big data technologies: opportunities and prospects to increase the viability of high-yielding dairy cows

Cherepanov G.G.

Institute of Animal Physiology, Biochemistry and Nutrition-Branch of Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Borovsk, Kaluga oblast, Russian Federation

ABSTRACT. Previous studies have shown that the duration of the economic use of lactating cows depends mainly not on the rate of aging, but on the value of the parameter characterizing the initial level of viability in the first lactation, i.e. from health potential, formed before the start of lactation activity. Analysis of published theoretical concepts and experimental data shows that this level can be largely determined by epigenetic modifications in the development of the embryo and fetus. Thus, the international society for the study of developmental origins of health and disease (DOHaD) studies adaptive changes in the development of the embryo and fetus to the action of environmental factors during pregnancy and the effect of these changes on physiological processes in the postnatal period and upon reaching the age of reproductive maturity. In this regard, it becomes necessary to organize continuous automated monitoring of the physiological status of lactating cows, including the dynamics of the body condition score (BCS) in the first months of lactation to indicate the dangerous influence of metabolic stress in mothers for embryos during periods of negative energy balance. It is necessary to introduce electronic identification systems for animals, biosensors systems and medical introscopy devices for obtaining and archiving visual and measuring information with wireless data transmission and analysis of "big" data.

Keywords: dairy cows, lactation, physiological status, productive life span, forecasting, automated monitoring

Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology, 2021, 1: 75-86

Поступило в редакцию: 18.01.2021

Получено после доработки: 01.03.2021

Черепанов Геннадий Георгиевич, д.б.н., с.н.с., тел. моб. +7(905)642-03-99; 89611243110@mail.ru