



World Organisation
for Animal Health
Founded as OIE

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕМА II

**Цифровизация Ветеринарных служб
(управление данными, системы ветеринарной
информации, большие данные, метаязык,
искусственный интеллект)**

Д-р Беатрис Мартинес Лопес

18/09/2024

Техническая тема II
Цифровизация Ветеринарных служб (управление данными, системы ветеринарной информации, большие данные, метаязык, искусственный интеллект)

Проф. Беатрис Мартинес Лопес

Директор Центра моделирования и надзора болезней животных
(Center for Animal Disease Modeling and Surveillance)

Резюме

Колоссальное количество ежедневных появляющихся данных о здоровье животных и аналитика больших данных могут кардинально изменить подходы к борьбе с болезнями и эпизоотологии. Достижения в области геномики, сенсоров и информационных технологий позволяют более подробно и точно характеризовать здоровье животных. В докладе рассматривается польза, которую цифровизация может принести Ветеринарным службам, и продвигается концепт «прицельной эпизоотологии», которая строится на использовании многоуровневых данных о здоровье животных для лучшего понимания динамики болезней в данной популяции и разработки экономически эффективных систем эпиднадзора, раннего выявления и контроля болезней животных. В докладе анализируются источники информации, способы её использования и некоторые трудности практического применения этого концепта.

Цифровизация может не только в значительной мере способствовать повышению эффективности и устойчивости животноводства при меньшем воздействии на окружающую среду, но и позволит добиться успехов (как в вертикальном, так и горизонтальном масштабе) в деле предотвращения и борьбы с болезнями животных на местном и глобальном уровнях. Для широкого внедрения этого концепта необходимо провести кардинальные изменения в способах сбора, стандартизации, интеграции, обмена и использования данных. Также для этого потребуется формирование междисциплинарных групп специалистов по информатике, инженеров и/или специалистов в области обработки данных, которые работают вместе с ветеринарными врачами и другими ветеринарными специалистами, занимающимися различными аспектами здоровья животных. Несмотря на сложность задачи внедрение цифровизации является серьёзным подспорьем для Ветеринарных служб в деле улучшения здоровья животных.

Введение

Сбор, обработка и анализ данных имеют главнейшее значение для быстрого и обоснованного принятия мер и планирования программ эпизоотнадзора и контроля с минимальным бюджетом. Обычно сбор эпизоотических данных ограничивался сбором и мониторингом ряда конкретных показателей, которые было принято считать информативными для оценки тех или иных проблем. Однако в последние годы масштабы генерации, сбора и оцифровки, хранения и анализа данных значительно выросли, открыв новые возможности. Ныне непрерывная регистрация и сбор больших объёмов разномасштабных данных ведётся как самими производителями (торговые и производственные отчёты; показания датчиков, установленных на животных и др.), так и ветеринарами и диагностическими лабораториями (данные о здоровье животных), которые дополняются данными, поступающими через системы управления и мониторинга окружающей среды (температура, относительная влажность, ветер и т.д.); весь этот корпус сведений может с пользой применяться для целей оптимизации управления здоровьем животных. Такие колоссальные объёмы данных образуют так называемые «Большие данные» (Big Data) – огромную группу больших, сложных и разнообразных данных, которые не могут быть обработаны привычными средствами^{1,2}.

Очевидно, что использование больших данных позволит кардинально изменить сложившийся подход к управлению здоровьем животных аналогично тому, как ранее регистрация показателей репродуктивности и смертности фермерских животных помогла повысить продуктивность и эффективность в животноводстве. Теперь, когда мы получили возможность более чётко понимать проблемы со здоровьем животных, можно переходить к более активным и индивидуальным подходам. Тем не менее, управление (большими) данными и применение аналитики больших данных не простой процесс, уже определился ряд трудностей, которые принято называть «Три V: 1) объём – растущий объём этих наборов данных; 2) скорость – быстрая и часто обновляющаяся в режиме реального времени скорость обновления данных; и 3) многообразие – различные типы данных из разных источников и в разных пространственно-временных масштабах³. Кроме того, следует добавить ещё два важных V, а именно – достоверность и ценность, что подчёркивает потребность в целостности/надёжности данных для получения оптимальных результатов анализа^{4,5}. Более того, для более подробного описания характеристик и свойств больших данных предлагаются дополнительные V (числом семь⁶, десять⁷ и даже 42⁸). Ныне преодоление перечисленных трудностей становится более реальным благодаря появлению вычислительных ресурсов, облегчающих сбор, хранение и обработку больших объёмов данных, а также благодаря облачным вычислениям, достижениям в автоматизации и машинном обучении, созданию аналитических инструментов и интегрированных платформ. Не удивительно, что в целях оптимизации управления здоровьем животных интерес к аналитике больших данных непрерывно растёт. При этом Ветеринарные службы многих стран пока не располагают возможностями для сбора данных в цифровом и стандартизированном виде, а также испытывают нехватку потребной компьютерной инфраструктуры и специалистов для надлежащей обработки таких данных. Представляется, однако, что такое значительное препятствие можно относительно легко преодолеть. Ведь создание инфраструктуры для сбора и обработки данных (смартфонов, планшетов, ноутбуков, серверов и т. д.) и привлечение некоторого числа инженеров, программистов, специалистов по компьютерам и по обработке данных для поддержки Ветеринарных служб не потребует слишком крупных затрат, принимая во внимание экономическую эффективность, которую окупят вложенные инвестиции. Нехватка ветеринарных врачей ощущается повсеместно, и благодаря перечисленным выше специалистам службы могли бы рациональнее использовать «ветеринарное время», поскольку они могут облегчить и ускорить сбор, доступ и визуализацию соответствующих данных, что, в свою очередь, высвободит ветеринарных врачей, позволив им в полной мере сосредоточиться на оценке информации, а значит и принимать более рациональные решения для обеспечения здоровья животных.

В докладе будет сделан обзор следующих вопросов:

- 1) Эволюция и **современное состояние цифровизации в ветеринарии**;
- 2) Соображения **относительно данных**: типы данных, источники данных, стандарты данных, качество данных и т. д., необходимых для обеспечения профилактики и контроля болезней животных, производящих пищевые продукты;
- 3) Пять основных **«Задач цифровизации в ветеринарии»** для ускорения цифровой революции в области здоровья животных.

1. Современное состояние цифровизации в ветеринарии

Применение и проблемы цифровизации в области охраны здоровья животных и связанной с этим аналитики больших данных недавно были освещены в ряде обзоров и исследований. Авторы обсуждают возможности и проблемы Интернета для здоровья животных (IoANT)⁹, ценность применения секвенирования нового поколения (NGS), которое позволяет секвенировать ДНК/РНК и обнаруживать мутации за короткий период времени, и связанные с этим большие данные для ветеринарии лошадей и других видов животных¹⁰, их ценность для благополучия животных^{11,12}, или для оптимизации процесса принятия решений в сфере здоровья животных^{13,5}. Тем не менее, на практике большие данные в ветеринарии и эпизоотологии пока используются недостаточно активно¹⁴. Данные по-прежнему представляются и используются отдельно, зачастую в слабой взаимосвязанности между различными сегментами или полным отсутствием такой взаимосвязанности; более того: на всех этапах цепочки – от сбора данных до анализа данных и получения результатов – возникают серьёзные проблемы. Преодоление перечисленных трудностей было бы чрезвычайно полезно в деле профилактики и контроля болезней.

Число “прицельных” дисциплин значительно возросло благодаря возможностям цифровизации и аналитики больших данных. В данном случае заслуживает упоминания так называемое Прицельное содержание стада (Precision livestock farming (PLF)), которое подразумевает применение комплекса различных технологий для мониторинга целевых или ключевых параметров стада в режиме реального времени, что служит фермерам для выявления и регистрации событий, которые затем учитываются ими для оптимизации различных аспектов выращивания своих животных, при этом отмечается относительная успешность PLF^{10,15}.

Наряду с этим в области здоровья животных и борьбы с болезнями заслуживают внимания и такие инструменты, как машинное обучение (ML) и другие методы искусственного интеллекта (ИИ). Этот подход может способствовать раннему выявлению болезней и улучшению управления здоровьем животных за счёт лучшего понимания динамики какой-либо болезни и своевременного выявления закономерностей и факторов, связанных с болезнью, благодаря сочетанному применению традиционных методов и аналитики больших данных. Это может стать хорошим подспорьем Ветеринарным службам в ходе планирования и реализации программ профилактики и контроля. Концепция прицельной эпидемиологии или прицельного здравоохранения уже была исследована в медицине человека¹⁶, определяя его как «*обеспечение нужного вмешательства в нужной популяции в нужное время*»¹⁷. В области здоровья животных внедрения концепта прицельной эпизоотологии можно добиться путём интеграции весьма разнообразных многоуровневых данных, уже полученных в животноводстве (ветеринарная диагностика, управление животными, биобезопасность, производственные показатели, торговля, экономика и т.д.). Используя такие подробные данные, можно более точно понять данную эпизоотическую проблему, а значит и оперативно провести выбор вмешательств в конкретных группах животных, на конкретных фермах или в системах производства. При этом прицельная эпизоотология отнюдь не призвана подменить собой «классическую» эпизоотологию, а предоставляет возможность воспользоваться цифровыми технологиями и новыми аналитическими инструментами для проактивной, своевременной и индивидуальной оценки здоровья животных, риска заболеваний и возникновения угроз на фермах. Представляется очевидным, что описанный выше подход принесёт немалую пользу животноводам, частным ветеринарным врачам и Ветеринарным службам, позволив получать более точную и своевременную информацию для принятия оптимальных решений (Рисунок 1).

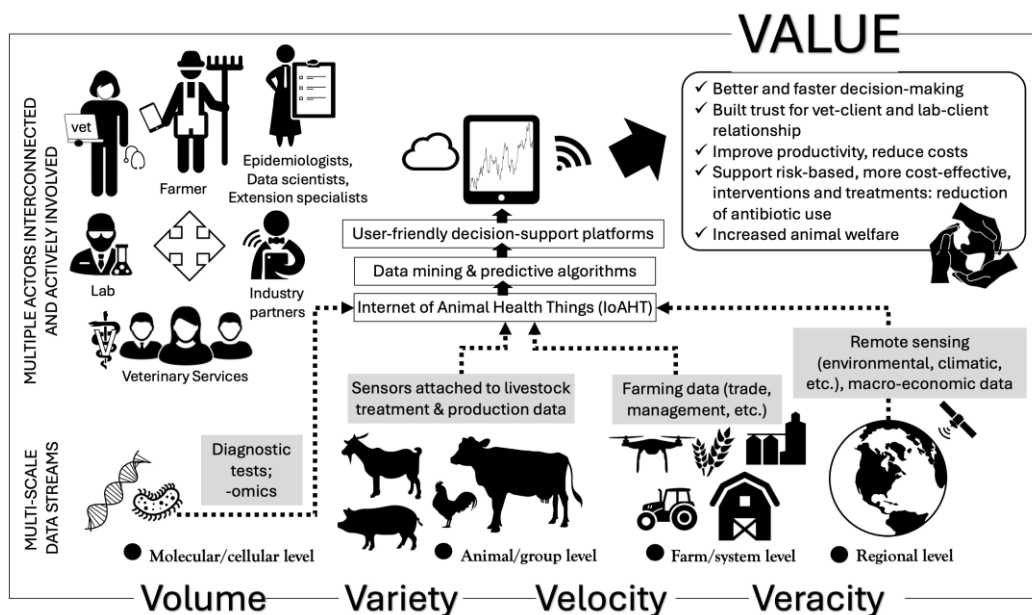


Рисунок 1. Цифровизация как способ интеграции нескольких потоков данных и коммуникации между заинтересованными сторонами для целей обеспечения здоровья животных.

2. Рекомендации по работе с данными

Обширность спектра данных, связанных со здоровьем животных, является одной из самых сильных сторон (но также и главной проблемой) цифровизации в ветеринарии. Долгие годы сбор информации о животных и фермах (т.е. цифровизация сельского хозяйства) был в значительной мере конкретизирован и диверсифицирован, особенно в крупных промышленных системах выращивания животных в странах со средним и высоким уровнем дохода. Сегодня достаточно легко получить информацию о состоянии отдельного стада, отдельных животных – как на молекулярном уровне, так и в более широких масштабах – за пределами стад и коллективов, благодаря огромному разнообразию ресурсов, которые собирают, хранят и обмениваются данными: это и автоматические датчики (на животных и вживлённые в них); и сенсорные датчики на фермах; и отчёты о проводимых в стаде программах мониторинга; лаборатории и организации; различные компании в животноводческой подотрасли; обязательная отчётность и программы и т.д. Всё это обеспечивает высокую степень готовности характеризовать и понимать систему (её риски, слабые и сильные стороны и др.) и, таким образом, достигать высокой степени персонализации вмешательства. С другой стороны, такая обширность данных, источников данных и типов данных является основной проблемой, когда встаёт вопрос практического внедрения прицельной эпизоотологии. Интегрировать, картографировать, визуализировать и обеспечить своевременный доступ заинтересованных сторон ко всем этим данным – весьма сложная задача, поскольку эти данные находятся в собственности, собираются, хранятся и обрабатываются разными организациями (производственным менеджментом, диагностическими лабораториями, ветеринарными клиниками, фармацевтическими компаниями и др.) без следования общей структуре данных, понятия случая и иных стандартов данных. Помимо этого, в странах с низким и средним уровнем дохода, или в регионах, где практикуется мелкотоварное животноводство – большая часть таких данных попросту не собирается, а если и собирается, то на бумажных носителях (эпизоотические обследования и другие анкеты и пр.), что затрудняет интеграцию, обработку и использование данных, а значит и задерживает доступ к ним, замедляя работу приложений в режиме реального времени. Использование планшетов или смартфонов для сбора информации Ветеринарными службами на местах может свести к минимуму ошибки при вводе данных и ускорить использование этих данных для целей оперативного реагирования. Однако этого будет недостаточно. Ощущается потребность нацелить научные исследования и политики на более справедливую и инклюзивную цифровизацию, сделав так, чтобы доступ к цифровым технологиям был доступен и мелким фермерам, и сотрудникам Ветеринарных служб, ресурсы которых весьма. Ниже рассматриваются основные источники данных и типы данных о здоровье животных, собираемых на молекулярном уровне, уровне отдельного животного, уровне фермы и региональном уровне.

2.1. Информация на молекулярном/клеточном уровне

Молекулярная информация – одна из основ диагностики, мониторинга и контроля инфекционных заболеваний. ПЦР-диагностика и ПЦР секвенирование рутинно проводятся в различных подотраслях животноводства для выявления и идентификации известных и новых штаммов, циркулирующих на ферме, или для отслеживания новых инфекций. Использование молекулярной информации хорошо зарекомендовало себя в эпизоотических исследованиях для понимания источника вспышки и распространения инфекции в популяции, например, с использованием филогеографии¹⁸.

Новые молекулярные технологии, такие как секвенирование нового поколения (NGS) и анализ экспрессии генов (т.е. процесс, с помощью которого наследственная информация, закодированная в гене, преобразуется в конечный продукт, белок или функцию в результате транскрипции и трансляции) получают всё большее распространение благодаря снижению затрат и упрощению доступности, а также облегчению производства и доступности массивов геномной информации для целей эпидемиологии. Они вызвали появление ряда дисциплин, определяемых термином «омикс» (например, протеоеномика, метаболомика, метагеномика, транскриптомика и т.д.), высокопроизводительных методик, которые могут симультанно измерять молекулы, позволяя составить таким образом целостное представление о молекулярном процессе. Применение этих технологий в эпизоотологии поистине революционно в точки зрения возможностей характеристики патогенных возбудителей и их хозяев. Например, стало возможным идентифицировать специфические черты, связанные с устойчивостью патогенов¹⁹⁻²¹, ключевыми клеточными рецепторами у отдельного человека или животного^{22,23} и молекулярными путями инфекции²⁴⁻²⁶; изучить персистенцию инфекций, вирулентность, взаимодействие хозяина и патогена, а также патогенность, колонизацию и механизмы выживания^{27,28}; понять генетическое разнообразие патогенов и взаимодействие с сообществами микробной флоры; оценить устойчивость к антибиотикам и связанные с ней гены устойчивости²⁹⁻³⁰. Омиксы также помогают идентифицировать биомаркеры инфекций и болезней^{31,32}, которые могут быть использованы для мониторинга коллективов и раннего выявления болезни, когда она ещё остается незамеченной³³.

Давая более точную картину отношений между хозяином и патогеном, новые молекулярные технологии подталкивают к смене парадигмы изучения биологических проблем. В медицине мы видим, как эти инструменты активно внедряются для создания индивидуальных методов лечения человека с учётом специфических характеристик хозяев и патогенов¹⁶. Тот же принцип может быть экстраполирован на эпизоотологию для адаптации программ контроля и ликвидации болезней, равно как и для исследования происхождения и распространения какой-либо вспышки. Динамика вспышек, вызванных каким-либо патогеном или штаммом, может отличаться в разных стадах, поэтому эффективность мер борьбы во-многом обусловлена учётом конкретного взаимодействия хозяина, патогена и окружающей средой на данной ферме. Таким образом, информация, которую можно получить благодаря NGS, обладает немаловажным потенциалом для эпизоотнадзора, выявления вспышек и контроля инфекций. Всё же основными препятствиями для его внедрения Ветеринарными службами остаются высокая затратность и сложное управление информацией. На повестке дня по-прежнему стоит необходимость добиться большей доступности NGS и разработка систем для более эффективного управления и анализа огромных объёмов данных, которые она производит.

2.2. Информация на уровне животных и ферм

В настоящее время широко используются сенсорные датчики для сбора данных из среды, в которой содержатся животные, или от животных, или же из возможных выделений животного (молока, слюны и пр.). В последние годы распространение сенсорных технологий значительно увеличилось, благодаря чему появилась возможность измерять практически все параметры животных или групп животных на фермах, которые могут оказаться необходимы для эпизоотических исследований, проводимых, например, по причине повышенной температуры тела, или перемещения животных, или в том, что касается потребления корма и воды^{10,34,14,35}.

Такие технологии постепенно внедряются в сферу охраны здоровья животных, что происходит быстрее или медленнее в зависимости от конкретной подотрасли животноводства. Молочное скотоводство явилось первой отраслью, где были внедрены генерация, сбор и использование больших данных с помощью устройств и киберфизических систем (роботы, автоматические системы дойки) для выявления и решения проблем репродукции, идентификации мастита, контроля качества молока, мониторинга хромомы³⁶, а также обнаружения субстанций, вырабатываемых животными (прогестерона или летучих органических соединений, в числе которых кетоновые тела, этанол, метанол и др.)^{14,41}. В птицеводстве и свиноводстве также отмечаются определённые успехи во внедрении сенсорных технологий, хотя их применение не приобрело широкого распространения, главным образом из-за

высокой стоимости^{11,42}. Сегодня мы можем контролировать среду содержания животных (температуру, влажность, углекислый газ и качество воздуха)⁴³ и косвенные показатели болезней в режиме реального времени. Приведём несколько примеров: инфракрасное тепловизионное изображение может быть использовано для мониторинга теплового стресса⁴⁴, акселерометры – для измерения активности⁴⁵, а ушные бирки для контроля самочувствия⁴⁶. Для раннего выявления птичьего гриппа у бройлеров использовались показания средней температуры тела и подвижности⁴⁷. Микрофоны, среди прочего, используются для мониторинга кашля и выявления респираторных проблем у свиней⁴⁸; фотоэлектрические датчики для обнаружения хромоты⁴⁹; видеокамеры – для оценки массы тела и изменений в поведении и активности^{50,51}.

Хотя применение сенсорных датчиков в PLF^{42,52,53} постепенно растёт, использование регистрируемых ими данных для задач охраны здоровья животных пока не достаточно. Причина кроется в том, что большинство сенсорных технологий до сих пор далеко не везде внедрено в животноводстве, и пока они используются лишь для демонстрации практической осуществимости каких-либо технологий или действуют как автономные, изолированные приложения. В эпизоотологии интеграция и синергетическое использование данных сенсорных датчиков в совокупности с другими данными (записями журналов здоровья, данными о производственных показателях, биобезопасности, вакцинации, лечении, торговле и другими практиками управления на ферме) повысит их ценность, а значит будет способствовать совершенствованию управления здоровьем животных.

2.3. Информация на региональном уровне

На этом уровне информация достаточно гетерогенна благодаря данным из самых разных источников. Во-первых, аккумулируются данные переписи популяции путём обычного сбора выше описанных данных по каждому животному/ферме для последующего обобщения и характеристики всей популяции (т.е. производственной системы, группы ферм, региона и т.д.). Данные переписи помогают выявлять тенденции, оценивать риск контакта с патогенами, а затем принимать меры биобезопасности и планировать ответ на чрезвычайные ситуации на региональном уровне. Кроме того, имеются и другие источники сведений, которые могут служить для характеристики коллективов. Например, рутинное использование диагностических средств лабораториями и ветеринарными клиниками позволяет аккумулировать значительный и непрерывно увеличивающийся объём результатов диагностических исследований и данных о болезнях, которые могут применяться для оценки тенденций в популяциях. При этом данные о животных и поголовье на фермах остаются частной собственностью и не далеко не всегда могут быть доступны для сторонних агентов. Обмен данными ограничен и сложен по причине конфиденциальности и из-за отсутствия систем, адаптированных для сбора, интеграции и обработки информации в понятной форме. Тем не менее, обмен сгруппированными или обезличенными данными о здоровье животных показал свою ценность для целей информирования производителей об общих трендах и может быть полезен для повышения осведомленности об изменениях в моделях и эпизоотологии отдельных болезней, особенно эндемических⁵⁴. Записи о вспышках болезней, подлежащих обязательной декларации, находятся в открытом доступе в национальных и международных базах данных (в т.ч. в WAHIS, <https://wahis.woah.org>).

К числу других видов ценной информации относятся регистрационные базы по торговле животными или передвижению грузовиков, статистика убоя, экологические и климатические факторы и т. д. Эти данные могут применяться по-разному. Сетевой анализ перемещений животных может использоваться для оценки риска при торговле животными^{55,56}; пространственная и временная кластеризация случаев полезна для выявления ареалов и периодов времени с наибольшим риском появления болезней^{57,58}; модели передачи возбудителей могут помочь рассчитать потенциально возможное распространение болезни и спланировать максимально экономически эффективные меры борьбы с ней⁵⁹. Экологические, географические и климатические данные (температуры, осадки, вегетационные показатели, показатели окружающей среды и др.) повсеместно признаются модуляторами риска заболеваний и широко применяются для исследования, моделирования и картирования болезней. В настоящее время климатические данные поступают с метеорологических станций, при том, что в некоторых ареалах наземные наблюдательных станций может не быть. Кроме того, пространственно-временное разрешение видимых и инфракрасных спутниковых снимков повысилось, а их использование становится всё более доступным. Благодаря спутниковым снимкам можно снимать различные показатели, например, отражение излучения, которые могут быть преобразованы и использованы в качестве косвенных показателей окружающей среды и климата для моделирования рисков чрезвычайных эпизоотических ситуаций⁶⁰. Высокое разрешение снимков, поступающих практически в реальном времени, позволяет использовать их для мониторинга, оперативной оценки угроз территорий и прогнозирования распространения заболеваний.

Наряду с этим новые коммуникационные технологии также предлагают новые средства сбора информации. Интернет-сети могут использоваться для оповещения о вспышке заболевания до того, как о ней узнают санитарные органы^{61,62}. В медицине человека неоднократно предпринимались попытки использовать взаимодействие людей в интернете для выявления эпидемий (приложение Google Flu Trends, вероятно, стало одним из самых первых таких приложений⁶³). В последние годы мониторинг социальных сетей начал рассматриваться в качестве одного из средств надзора, выявления событий, фармаконадзора, прогнозирования, отслеживания и географической идентификации заболеваний^{64,65}. Отмечалось применение различных стратегий, например, мониторинг твитов для обнаружения вспышки болезней ещё до того, как будет готово официальное сообщение о ней.

Хотя возможности, которые предоставляют данные этого уровня, поистине огромны из-за их разнообразия, всё же доступ к ним и интеграция с данными из других источников – зачастую проблематичны. Информация о фермах обычно ограничивается интегрированными производственными системами, или направляется фермерским ассоциациям, или учитывается в общих планах повышения качества (например, контроль молока у дойных животных); она предназначена для узких конкретных целей, с разными масштабами в зависимости от систем производства, её сбор лишь изредка осуществляется в режиме реального времени, а обмен ею ведётся далеко не всегда. Интеграция данных о популяции животных на фермах затруднительна, отмечается недостаточность их стандартизации. Некоторые источники могут генерировать большой объём данных со строгой периодичностью, другие же источники могут оказаться довольно неполными и скудными. Эта неоднородность усложняет своевременное картографирование, обработку и моделирование данных для дальнейшего использования.

3. Проблемы цифровизации здоровья животных

Чтобы добиться успеха в деле внедрения и использования цифровизации Ветеринарными службами требуется найти решение пяти проблем, а именно:

3.1. Упрощение доступа к многоуровневым данным и их интеграция

Возникновение, распространение и проявление болезни модулируются множеством факторов разной природы. Для лучшего понимания и предсказуемости болезней требуется целостный подход, интегрирующий всю информацию, потенциально связанную с эпизоотологией болезней, и объединяющий всех вовлеченных субъектов, чтобы позволить лучше понять причинно-следственную цепочку возникновения болезней и взаимодействие партнёров. Однако на практике сбор и комбинирование многоуровневых источников данных осуществляется не часто. Даже на одном уровне данные рассредоточены, сбор их ведётся обычно силами разных организаций или служб, они представлены в форматах, которые трудно интегрировать. Наряду с этим компании могут зафиксировать право собственности на собираемые ими сведения и не всегда готовы поделиться данными из своих баз. Недостаточная функциональная совместимость является одной из наиболее часто упоминаемых проблем в управлении большими данными о животных⁶⁶, что не только препятствует использованию информации, но и затрудняет разработку новых приложений. До конечного пользователя необходимо донести, что потенциальный эффект, которого можно добиться, взаимно связав данные из разных источников, является не столько неким дополнением, но имеет самостоятельную большую ценность. Исходя из этой потребности могут быть созданы новые сервисы и системы, функционирующие как хабы, направляющие потоки информации. В сельском хозяйстве предпринимался ряд инициатив по стандартизации и совместимости формата данных, которые можно рассматривать в качестве образца (OASIS, 2016; OGC, 2016; GODAN, 2013), однако число аналогичных проектов, адресованных животноводческой подотрасли, пока не велико⁶⁶. Даже при сведении схожих данных (например, диагностической информации) трудность кроется в отсутствии общих определений случая и разное в протоколах сбора данных. Несмотря на попытки гармонизации, которые предпринимались на разных уровнях (клинические признаки⁶⁷, диагностические данные⁶⁸), стандарты ветеринарной медицины значительно отстают от стандартов медицины человека. Существует насущная потребность в создании стандартов сбора данных о здоровье животных и, как минимум – в установлении чётких определений случаев, метаданных и словарей данных, чтобы наконец получить возможность эффективно комбинировать, интегрировать и сравнивать данные из многочисленных источников, извлекать из них, таким образом, максимум пользы.

Помимо этого, интеграция сведений, регистрируемых на фермах, вызывает вопросы конфиденциальности и безопасности. Фермеры не должны опасаться, что использование сведений об их хозяйствах может нанести им потенциальный урон, иначе они откажутся делиться своей информацией, что, разумеется, значительно ограничит всю систему. В меньшей мере это возможно в

условиях эндемических заболеваний, когда все фермеры готовы принимать меры борьбы и ликвидации какой-либо болезни. Действительно, бенчмаркинг и формирование «белых списков» ферм (т.е. свободных от болезней) может стать стимулом для присоединения к программе. Однако, когда накладываются штрафы или торговые ограничения, вопрос конфиденциальности для фермера может приобретать особую остроту, что, как следствие, способно затормозить выявление новых вспышек и эмергентных болезней. Существуют различные методы машинного обучения, которые могут помочь преодолеть эту проблему. Papst и колл.⁶⁹ предоставили обзор аналитики данных с сохранением конфиденциальности. Так, федеративное обучение (federate learning) – это тип машинного обучения, который весьма интересен, поскольку оно обеспечивает обмен данными и обучение между устройствами без необходимости передачи необработанных данных. Вместо того, чтобы делиться данными фермы в коллективной системе, федеративное обучение способно собирать и обрабатывать данные локально по общей модели, гарантируя безопасность данных. Несмотря на то, что эта технология уже проникла в различные области так называемого «умного сельского хозяйства», её применение в ветеринарии всё ещё находится в зачаточном состоянии.

Проблема интеграции особенно остра, когда речь идёт о внедрении омиксных данных. Известно, что интерконнекция между различными омиксными дисциплинами и данными, поступающими с других уровней (например, данные о кормах), очень важна для понимания динамики и рисков по болезням. Управление и интеграция омиксов затруднительны не только из-за большого объёма и размерности данных, но также и по причине их неоднородности (даже внутри самого омикса) вследствие разномасштабности и разброса типов данных (количественных, качественных и т. д.). Для мультиомиксного анализа предлагаются различные подходы: статистический анализ, сетевой анализ, контролируемый анализ и др.⁷⁰⁻⁷². Все перечисленные подходы обычно страдают из-за небольшого размера выборки (что объясняется затратностью процедур омикса), поскольку такие интеграционные подходы в большинстве своём функционируют на большом объёме данных. Выдвигались идеи по хранению и стандартизации метагеномных данных животных⁷³, наряду с этим действует несколько общедоступных репозиторий, содержащих референсные пути, которые могут облегчить реконструкцию и прогнозирование метаболических путей⁷⁴. Очевидно, что на повестке дня – дальнейшие шаги для продвижения к максимально функциональной интеграции. Поэтому нам нужны **многоуровневые решения, основанные на данных, и структуры принятия решений**, которые способны решить некоторые из описанных выше проблем разномасштабности и конфиденциальности.

3.2. Преодоление разрыва между доступностью данных и их эффективным использованием

При том, что ведётся активная аккумуляция данных и появились возможности для более масштабного их сбора, их использование, однако, выражается в примитивной описательной статистике или ограничивается частными аспектами животноводства и диагностики патогенов^{75,76}. Другими словами: большая часть собранной информации не используется, и по сути мы не извлекаем всей потенциальной пользы из данных, в сбор которых был вложено столько усилий. Например, акселерометры были созданы и главным образом применяются для выявления эструса у молочного скота, но наряду с этим они могут помочь раннему выявлению больных животных, поскольку такие особи неохотно двигаются. Поэтому следует особо подчеркнуть важность **многоцелевого сбора данных**. Холистический подход к процессу сбора данных и широкий набор показателей позволят создать более точные модели и повысить возможности для понимания и предупреждения болезней.

Механический сбор максимально большого объёма данных слишком малая задача. Ведь известно, что количество не значит качество, и аккумуляция большого количества данных совсем не обязательно является указанием, что эти данные репрезентативны и надёжны. Таким образом, возникает потребность в наладке инструментов фильтрации, чтобы определить, какие данные являются более ценными, информативными, репрезентативными и т.д., а также решить, какие из них легче других подвергаются сбору и экономически целесообразны для заданной цели. Первый вопрос касается качества самого процесса сбора. В процесс сбора данных может воздействовать множество факторов, и, если персонал или инфраструктура не готовы управлять данными надлежащим образом, возникает угроза утраты или искажения информации. Даже когда собрана правильная информация, данные могут иметь пробелы в зависимости от того, каким образом осуществлялся их сбор. Когда недостаток информации вызван известным фактором (например, праздники, день недели, недостаточное разрешение и др.), такой недостаток можно смягчить тем или иным образом (с помощью прогнозирования, условного расчёта и косвенных расчётов^{72,77}). Однако в случае, когда информация упущена из-за неслучайной закономерности или систематических пропусков, результат не адекватен, а значит положение исправить или компенсировать недостаток труднее. Машинное обучение особенно чувствительно к этой проблеме, поскольку оно полагается на обучение или опирается на ранее собранные данные как на достоверную информацию, в результате система будет полностью искажена,

оценка окажется не адекватной, что в конечном итоге затруднит способность моделей ИИ извлекать информацию.

Чтобы преобразовать данные в информативный продукт, требуются специальные знания, технологии и аналитика. Междисциплинарные подходы с привлечением специалистов с соответствующими навыками и знаниями в каждой области на каждом этапе цепи – таков наилучший способ действия, что также подразумевает установление надёжных каналов связи, обмена информацией и обратной связи. Проект «Данные по свиньям» явился примером того, как внедрить большие данные в животноводство с помощью трансдисциплинарного подхода⁷⁸. В числе таких инициатив «Хабы цифровых инноваций» (например, действующие при вузах), которые могут быть открыты для оказания поддержки организациям-разработчикам цифровых приложений, в них можно организовать междисциплинарные группы для работы по тематике прицельного животноводства⁷⁹. Сходный подход может быть применен для развития цифровизации в области здоровья животных и содействия интеграции прицельной эпизоотологии в деятельность Ветеринарных служб.

3.3. Разработка новых алгоритмов, адаптированных к здоровью животных

Как правило, чем выше количество и качество данных, вводимых в модель, тем лучше будут результаты, полученные благодаря её использованию (более высокая точность и пр.). При том, что стратегии раннего предупреждения облегчаются за счёт включения многоуровневых данных, с другой стороны, многоуровневые структуры, в свою очередь, порождают аналитические проблемы из-за сложности и размерности структур. Алгоритмы машинного обучения – суть мощные инструменты, которые представляют собой оптимальный подход к использованию входных данных⁸⁰, поскольку они позволяют управлять большими наборами сложными данными и получать результат в полуавтоматическом режиме. Применительно к непрерывному потоку данных, регистрируемых на ферме, эти алгоритмы пригодны для мониторинга функционирования системы и обнаружения аномалий, которые могут указывать на чрезвычайную ситуацию по болезни ещё до того, как её смогут обнаружить сами фермеры. В последние годы распространение алгоритмов машинного обучения растёт в геометрической масштабах в различных областях, в том числе в здравоохранении, при том что их применение в области ветеринарного здоровья остается ограниченным⁸¹. Guitian и колл.⁸² обобщили различные алгоритмы машинного обучения, применяемые для ветеринарных задач. Такие алгоритмы нацелены главным образом на четыре основные цели: диагностику, оценку риска смертности и заболеваемости, профилактику и эпиднадзор болезней, а также политику и планирование в области здравоохранения. Речь идёт об очень широких алгоритмах и приложениях, в числе которых: нейронные сети для распознавания изображений, анализ текста для извлечения значений из регистров, классификационные древа для оценки в процессе принятия решений, приоритизации проб, раннего выявления заболеваний, выявления потенциальных резервуаров болезней и т.д. Зачастую оптимальный алгоритм машинного обучения в значительной мере зависит от цели и состава набора данных. В идеале подход к прицельной эпизоотологии должен включать в себя различные алгоритмы и множественные анализы для лучшей поддержки решений в области здоровья животных. Проблема кроется в том, что существующие методики были изначально созданы для одноуровневых данных, поэтому ныне алгоритмы машинного обучения требуют адаптации к многоуровневой реальности в животноводстве. Во многих случаях это действительно представляет собой реальную проблему, поскольку многоуровневые данные не допускают независимости среди данных разных уровней. Например, в мультиомиксах наборы данных обладают высокой размерностью (большое количество признаков при относительно небольшом числе выборок), что в значительной мере затрудняет формулировку заключений и прогнозирование в условиях отсутствия большого объёма данных (по причине ограниченности затрат на анализ). Ещё более усложняет задачу потребность адаптации этих алгоритмов для управления широкими потоками данных и получения результатов в режиме реального времени.

С другой стороны, весьма важно проверить прогностическое качество методов машинного обучения, сравнив их со статистическими подходами (когда это возможно)⁸³. Машинное обучение особенно ориентировано на повышение возможностей прогнозирования и имеет тенденцию к переобучению, но вдруг оказывается бесполезным, когда характеристики, используемые для обучения, внезапно меняются в реальном мире. На стыке этих двух областей рождаются новые области исследований, такие как вероятностное машинное обучение (Probabilistic Machine Learning)⁸⁴, которые потребуют нашего внимания в скором будущем.

3.4. Разработка операционных систем для сбора, интеграции, анализа, визуализации и обмена данными в режиме реального времени для поддержки принятия решений

Исходя из того, что конечной целью является предоставление решений и помощь Ветеринарным службам в принятии решений, анализ должен быть интегрирован и прост в исполнении. Не следует ожидать, что конечный пользователь (ветеринары, фермеры, диагносты и др.) найдёт время и желание разбираться в методологиях, по причине чего мы должны обеспечить его готовыми инструментами для мониторинга, визуализации, оценки и генерации «интерпретируемых» оповещений об угрозах в режиме реального времени в изменяющихся сценариях, а также и инструментами для облегчения коммуникации с другими заинтересованными сторонами. Будучи адаптированы к потребностям и возможностям заинтересованных сторон, эти инструменты призваны упростить интерпретацию результатов, заблаговременно предупредить пользователей о выявленных аномалиях, предложить набор мер по смягчению последствий и мер контроля с учётом потенциальных ветеринарно-санитарных и экономических последствий. И всего этого желательно достигнуть, избежав обязательного и длительного обучения конечных пользователей применению этих инструментов.

В ряде проектов предпринимаются попытки интегрировать источники данных и отдельные методы исследования в оперативные инструменты. Европейский проект DECIDE (<https://decideproject.eu>) имеет своей целью разработку инструментов (основанных на данных) для поддержки принятия решений в случае с респираторными и желудочно-кишечными синдромами и их внедрения в системы управления фермой⁸⁵. В рамках проекта предполагается разработать инструменты поддержки принятия решений, которые будут интегрированы в существующие системы управления фермерским хозяйством. Такие платформы, как Disease Bioportal (<https://bioportal.ucdavis.edu>) в университете Калифорния-Дэвис уже предоставляют средства для интеграции сложных структур данных, давая возможность визуализировать и анализировать данные в режиме реального времени, помогая тем самым принимать решения. Животноводческие производители, использующие Disease Bioportal, располагают возможностью визуализировать и анализировать различные потоки данных (например, тестовую диагностику, геномную информацию, перемещения животных, производственные журналы, устойчивость к противомикробным препаратам и т. д.) и, таким образом, связывать результаты молекулярной диагностики с информацией на уровне отдельного животного и популяции, содержащейся на платформе. Затем информация может быть преобразована в описательные графики или получить географическую визуализацию и филогенетические деревья в режиме реального времени, что упрощает оценку рисков и ускоряет коммуникацию о рисках между лабораториями, ветеринарами и производителями. В настоящее время программа Disease Bioportal обогащается машинным обучением для автоматизации некоторых анализов и облегчения процесса создания информационных панелей, улучшения доступа и опыта конечных пользователей, а также внедрения новых алгоритмов, которые облегчат интерпретацию данных, особо выделяя такие события, как повышенная заболеваемость, новые вирусные штаммы, снижение производственных показателей и пр.

Несмотря на то, что проблематичность всё ещё остаётся значительной, следует отметить, что инновации и доступность методов становятся всё проще в использовании. Появились новые платформы с открытым кодом, такие как GitHub, которые позволяют коллективно продвигаться в реализации методов. В открытом доступе имеется прикладное программное обеспечение, позволяющее экспериментировать в создании интерфейсов и информационных панелей, удобных для конечных пользователей, таких как Shiny; они предлагают возможность интерактивного применения научно-обоснованной методологии, которая может подвергаться рецензированию в пользовательских глобальных сетях. Например, уже доступны информационные панели Shiny для интерпретации рентгенограмм, омиксной визуализации, вывода генов, сетевого анализа и других задач⁸⁶⁻⁹⁰. Важно подчеркнуть, что большинство этих информационных панелей Shiny созданы с использованием программного обеспечения с открытым исходным кодом, что способствует открытости процесса цифровизации, хотя ещё предстоит проделать большую работу для ускорения цифрового перехода мелких фермерских хозяйств и Ветеринарных служб в условиях ограниченности ресурсов⁹¹.

3.5. Обучение нового поколения специалистов по обработке и анализу данных, и «ветеринарных сотрудников/ветеринаров-специалистов по обработке и анализу данных»

Следующее поколение ветеринарных работников нуждается не только в знаниях в области ветеринарии, но и в других дисциплинах, связанных с обработкой и анализом данных, объём и сложность которых не позволяет применения к ним обычных инструментов. Будущие эпизоотологи также должны быть знакомы с машинным обучением, параллельной обработкой, системами информационных технологий и обладать некоторыми техническими навыками, такими как компьютерное программирование, которые не являются традиционной частью их профессионального

образования. В этой ситуации работа ведётся по двум направлениям: во-первых, адаптация существующих учебных программ путём включения в них новых компетенций, соответствующих требованиям времени, а во-вторых, создание междисциплинарных команд с различными навыками и опытом. **Обновляя учебную программу**, можно взять уже существующую учебную программу по машинному обучению/науке о данных и адаптировать её к ветеринарной специфике. Для этого формируют группу из людей, разбирающихся в ветеринарных потребностях, и специалистов по информатике, которые могут предоставить надёжные, практичные и доступные инструкции по методам машинного обучения, наборам инструментов и знаниям. Таким образом удаётся преодолеть разрыв между этими двумя сферами знаний. Благодаря привлечению специалистов по различным областям знаний, учащиеся получают более всестороннюю подготовку⁹². В связи с этим в последние годы появляются различные инициативы по созданию трансдисциплинарной науки о данных, например, с использованием схем совместного обучения (<https://datascience.duke.edu/>). Другой подход под названием Discipline-based Educational Researcher program был реализован в Корнелльском университете, где назначили отдельного разработчика учебного процесса, в функции которого входит определение того, какие методы активного обучения наиболее подходят для того или иного факультета (<https://cder.as.cornell.edu>). Сотрудничество учащихся из разных областей знаний и дисциплин для решения актуальных практических задач также может способствовать развитию навыков для будущей практики. Такой подход развивает навыки критического мышления, способность к обзору литературы и поощряет непрерывное обучение, часто в условиях группы учащихся. Подобные программы действуют в специализированных программах магистратуры, но они могут быть реализованы и в учебном плане ветеринарного вуза.

Создание междисциплинарной команды, которая работает совместно, имеет важное значение для успеха цифровизации Ветеринарных служб, и сотрудники в её составе должны обладать специальной подготовкой для работы в этой среде. Для слаженного функционирования такой команды уже определены рекомендуемые принципы и передовая практика, в том числе: хорошие коммуникации, регулярные встречи, набор навыков и знаний в предметной области, чёткое видение и чёткое определение целей, сильное лидерство и управление, развитая командная культура, возможности для последующего обучения и развития, гибкость и пр.⁹³

Помимо технических навыков, коммуникация также важна для специалистов по прицельной эпизоотологии. Отчасти успех зависит от того, как конечные пользователи используют продукт, поэтому, несмотря на сложность сбора, введения, картографирования и анализа данных, результаты должны быть легко доступными, понятными и используемыми. Эксперты по взаимодействию человека и компьютера выполняют основную роль в этом процессе, создавая программное обеспечение, удобное в применении конечными пользователями. С операционной точки зрения, совместное проектирование и вовлечение конечных пользователей имеет решающее значение для успеха компьютерного приложения, а также для информирования о пользе его применения. Также очень важны действия для получения обратной связи от пользователей и для оценки и информирования о преимуществах с практической, экономической и санитарной точки зрения, убеждая пользователей в достижимости конкретных целей и задач.

Заключение

Цифровизация Ветеринарных служб может внести существенный вклад в обеспечение здоровья животных, продовольственной безопасности и безопасности пищевых продуктов, при условии, что процесс цифровизации будет равномерным, доступным и этичным для всех типов и размеров заинтересованных сторон. Наряду с этим она будет способствовать значительному повышению устойчивости, благополучия животных и прибыльности животноводческой отрасли. Цифровизация невозможна без интеграции разнообразных и разномасштабных источников данных в режиме реального времени, удобного и безопасного доступа к информации и её визуализации конечными пользователями (например, с помощью информационных панелей) для своевременного и обоснованного принятия решений. Убеждены, что решение пяти задач цифровизации в области охраны здоровья животных приведёт к значительному повышению уровня здоровья животных, благополучия животных, производительности фермерских хозяйств и доходов животноводческой отрасли. Хотя в настоящем докладе основное внимание уделено вопросам здоровья скота и безопасности пищевых продуктов (поскольку эти области традиционно остаются приоритетными для Ветеринарными служб), мы считаем, что цифровая трансформация и использование прицельной эпизоотологии – это по сути целостный подход «Единое здоровье», который эффективно применяется для более эффективного решения проблем на уровне популяции людей и популяции животных в любых условиях общественного здравоохранения и здоровья животных (например, на основе изучения воздействия окружающей среды, инфекционных болезней, хронических заболеваний человека для оценки эпидемиологических проблем, сказывающихся на животных-компаньонах или диких животных).

Органы власти должны уделять приоритетное внимание разработке политики, предоставлению рекомендаций и инвестированию в цифровизацию (включая стандартизацию данных и взаимосвязанность), поскольку это не только поможет Ветеринарным службам лучше, быстрее и эффективнее выполнять доверенные им задачи, но и принесёт значительные общественные и экономические выгоды.

Ссылки

1. Diebold, F. X. (2012). "On the Origin(s) and Development of the Term "Big Data.""
2. Favaretto, M., de Clercq, E., Schneble, C. O., & Elger, B. S. (2020). What is your definition of Big Data? Researchers' understanding of the phenomenon of the decade. *PLoS ONE*, 15(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228987>
3. Laney, D. (2001). 3-D data management: controlling data volume, velocity and variety. In *META Group Research Note, February 6*.
4. McCue, M. E., & McCoy, A. M. (2017). The scope of Big Data in one medicine: Unprecedented opportunities and challenges. *Frontiers in Veterinary Science*, 4(NOV), 1–23. <https://doi.org/10.3389/fvets.2017.00194>
5. VanderWaal, K., Morrison, R. B., Neuhauser, C., Vilalta, C., & Perez, A. M. (2017). Translating big data into smart data for veterinary epidemiology. *Frontiers in Veterinary Science*, 4(JUL), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fvets.2017.00110>
6. Andreu-Perez, J., Poon, C. C. Y., Merrifield, R. D., Wong, S. T. C., & Yang, G. Z. (2015). Big Data for Health. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 19(4), 1193–1208. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2015.2450362>
7. Nigania, J. (2018). *The 10 V's of Big Data*. <http://houseofbots.com/news-detail/2819-1-the-10-v%27s-of-big-data>
8. Shafer, T. (2017). *The 42 V's of Big Data and Data Science*. <https://www.elderresearch.com/blog/42-v-of-big-data>
9. Smith, D., Lyle, S., Berry, A., & Manning, N. (2015). *Internet of Animal Health Things (IoAHT) Opportunities and Challenges*.
10. McCue, M. E., & McCoy, A. M. (2019). Harnessing big data for equine health. *Equine Veterinary Journal*, 51(4), 429–432. <https://doi.org/10.1111/evj.13080>
11. Benjamin, M., & Yik, S. (2019). Precision livestock farming in swine welfare: A review for swine practitioners. *Animals*, 9(4), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ani9040133>
12. Sassi, N. Ben, Averós, X., & Estevez, I. (2016). Technology and poultry welfare. *Animals*, 6(10), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ani6100062>
13. Piñeiro, C., Morales, J., Rodríguez, M., Aparicio, M., Manzanilla, E. G., & Koketsu, Y. (2019). Big (pig) data and the internet of the swine things: A new paradigm in the industry. *Animal Frontiers*, 9(2), 6–15. <https://doi.org/10.1093/af/vfz002>
14. Knight, C. H. (2020). Review: Sensor techniques in ruminants: More than fitness trackers. *Animal*, 14(S1), S187–S195. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003276>
15. Kleen, J. L., & Guatteo, R. (2023). Precision Livestock Farming: What Does It Contain and What Are the Perspectives? In *Animals* (Vol. 13, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ani13050779>
16. Ladner, J. T., Grubaugh, N. D., Pybus, O. G., & Andersen, K. G. (2019). Precision epidemiology for infectious disease control. *Nature Medicine*, 25(2), 206–211. <https://doi.org/10.1038/s41591-019-0345-2>
17. Khoury, M. J., Iademarco, M. F., Riley, W. T., Sciences, P., Service, P. H., Corps, C., Precision, T., & Initiative, M. (2016). Precision Public Health for the Era of Precision Medicine - ClinicalKey. *Am J Prev Med*, 50(3), 398–401. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2015.08.031.Precision>
18. Van Borm, S., Belák, S., Freimanis, G., Fusaro, A., Granberg, F., Höper, D., King, D. P., Monne, I., Orton, R., & Rosseel, T. (2014). Next-generation sequencing in veterinary medicine: How can the massive amount of information arising from high-throughput technologies improve diagnosis, control, and management of infectious diseases? *Methods in Molecular Biology*, 1247, 415–436. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2004-4_30

19. Bishop, S. C., & Woolliams, J. A. (2014). Genomics and disease resistance studies in livestock. *Livestock Science*, 166(1), 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.04.034>
20. Islam, M. A., Rony, S. A., Rahman, M. B., Cinar, M. U., Villena, J., Uddin, M. J., & Kitazawa, H. (2020). Improvement of disease resistance in livestock: Application of immunogenomics and CRISPR/Cas9 technology. In *Animals* (Vol. 10, Issue 12, pp. 1–20). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ani10122236>
21. Nietfeld, F., Höltig, D., Willems, H., Valentin-Weigand, P., Wurmser, C., Waldmann, K. H., Fries, R., & Reiner, G. (2020). Candidate genes and gene markers for the resistance to porcine pleuropneumonia. *Mammalian Genome*, 31(1–2), 54–67. <https://doi.org/10.1007/s00335-019-09825-0>
22. Lagumdzic, E., Pernold, C., Viano, M., Olgiati, S., Schmitt, M. W., Mair, K. H., & Saalmüller, A. (2022). Transcriptome Profiling of Porcine Naïve, Intermediate and Terminally Differentiated CD8+ T Cells. *Frontiers in Immunology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.849922>
23. Pluta, A., Taxis, T. M., van der Meer, F., Shrestha, S., Qualley, D., Coussens, P., Rola-Łuszczak, M., Ryło, A., Sakhawat, A., Mamanova, S., & Kuźmak, J. (2023). An immunoinformatics study reveals a new BoLA-DR-restricted CD4+ T cell epitopes on the Gag protein of bovine leukemia virus. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48899-4>
24. Bagnicka, E., Kawecka-Grochocka, E., Pawlina-Tyszko, K., Zalewska, M., Kapusta, A., Kościuczuk, E., Marczak, S., & Ząbek, T. (2021). MicroRNA expression profile in bovine mammary gland parenchyma infected by coagulase-positive or coagulase-negative staphylococci. *Veterinary Research*, 52(1). <https://doi.org/10.1186/s13567-021-00912-2>
25. Islam, M. A., Große-Brinkhaus, C., Pröll, M. J., Uddin, M. J., Rony, S. A., Tesfaye, D., Tholen, E., Hölker, M., Schellander, K., & Neuhoﬀ, C. (2016). Deciphering transcriptome profiles of peripheral blood mononuclear cells in response to PRRSV vaccination in pigs. *BMC Genomics*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2849-1>
26. Kreitmaier, P., Katsoula, G., & Zeggini, E. (2023). Insights from multi-omics integration in complex disease primary tissues. In *Trends in Genetics* (Vol. 39, Issue 1, pp. 46–58). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tig.2022.08.005>
27. Belák, S., Karlsson, O. E., Leijon, M., & Granberg, F. (2013). December 2013 in issue 32-3 of the Scientific and Technical Review. (1) Department of Virology. In *Rev. sci. tech. Off. int. Epiz* (Vol. 32, Issue 3).
28. Hernández-Triana, L. M., Garza-Hernández, J. A., Ortega Morales, A. I., Prosser, S. W. J., Hebert, P. D. N., Nikolova, N. I., Barrero, E., de Luna-Santillana, E. de J., González-Alvarez, V. H., Mendez-López, R., Chan-Chable, R. J., Fooks, A. R., & Rodríguez-Pérez, M. A. (2021). An Integrated Molecular Approach to Untangling Host–Vector–Pathogen Interactions in Mosquitoes (Diptera: Culicidae) From Sylvan Communities in Mexico. *Frontiers in Veterinary Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.564791>
29. Hickman, R. A., Leangapichart, T., Lunha, K., Jiwakanon, J., Angkitittrakul, S., Magnusson, U., Sunde, M., & Järhult, J. D. (2021). Exploring the Antibiotic Resistance Burden in Livestock, Livestock Handlers and Their Non-Livestock Handling Contacts: A One Health Perspective. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.651461>
30. Oniciuc, E. A., Likotrafiti, E., Alvarez-Molina, A., Prieto, M., Santos, J. A., & Alvarez-Ordóñez, A. (2018). The present and future of whole genome sequencing (WGS) and whole metagenome sequencing (WMS) for surveillance of antimicrobial resistant microorganisms and antimicrobial resistance genes across the food chain. In *Genes* (Vol. 9, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/genes9050268>
31. Gaudette, S., Smart, L., Woodward, A. P., Sharp, C. R., Hughes, D., Bailey, S. R., Dandrieux, J. R. S., Santos, L., & Boller, M. (2023). Biomarkers of endothelial activation and inflammation in dogs with organ dysfunction secondary to sepsis. *Frontiers in Veterinary Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1127099>
32. Perera, T. R. W., Skerrett-Byrne, D. A., Gibb, Z., Nixon, B., & Swegen, A. (2022). The Future of Biomarkers in Veterinary Medicine: Emerging Approaches and Associated Challenges. In *Animals* (Vol. 12, Issue 17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ani12172194>

33. Koene, M. G. J., Mulder, H. A., Stockhofe-Zurwieden, N., Kruijt, L., & Smits, M. A. (2012). Serum protein profiles as potential biomarkers for infectious disease status in pigs. *BMC Veterinary Research*, 8. <https://doi.org/10.1186/1746-6148-8-32>
34. Caja, G., Castro-Costa, A., & Knight, C. H. (2016). Engineering to support wellbeing of dairy animals. *Journal of Dairy Research*, 83(2), 136–147. <https://doi.org/10.1017/S0022029916000261>
35. Michie, C., Andonovic, I., Davison, C., Hamilton, A., Tachtatzis, C., Jonsson, N., Duthie, C. A., Bowen, J., & Gilroy, M. (2020). The Internet of Things enhancing animal welfare and farm operational efficiency. *Journal of Dairy Research*, 87(S1), 20–27. <https://doi.org/10.1017/S0022029920000680>
36. Blewey, J. (2010). Precision dairy farming: advanced analysis solutions for future profitability. *Proceedings of the First North American Conference on Precision Dairy Management*.
37. Connolly, A. (2019). The new Digital World of Dairy Farming - Bridging the data gap. *Proceedings of the II International Precision Dairy Farming Conference*, 1–8.
38. Crowe, M. A., Hostens, M., & Opsomer, G. (2018). Reproductive management in dairy cows - The future. *Irish Veterinary Journal*, 71(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s13620-017-0112-y>
39. Hudson, C., Kaler, J., & Down, P. (2018). Use of big data in cattle practice. *In Practice*, 983.
40. Thorup, V. M., Nielsen, B. L., Robert, P. E., Giger-Reverdin, S., Konka, J., Michie, C., & Friggens, N. C. (2016). Lameness affects cow feeding but not rumination behavior as characterized from sensor data. *Frontiers in Veterinary Science*, 3(MAY), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fvets.2016.00037>
41. Džermeikaitė, K., Bačėninaitė, D., & Antanaitis, R. (2023). Innovations in Cattle Farming: Application of Innovative Technologies and Sensors in the Diagnosis of Diseases. In *Animals* (Vol. 13, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ani13050780>
42. Berckmans, D. (2017). General introduction to precision livestock farming. *Animal Frontiers*, 7(1), 6–11. <https://doi.org/10.2527/af.2017.0102>
43. Bustamante, E., Guijarro, E., García-Diego, F. J., Balasch, S., Hospitaler, A., & Torres, A. G. (2012). Multisensor system for isotemporal measurements to assess indoor climatic conditions in poultry farms. *Sensors*, 12(5), 5752–5774. <https://doi.org/10.3390/s120505752>
44. da Fonseca, F. N., Abe, J. M., de Alencar Nääs, I., da Silva Cordeiro, A. F., do Amaral, F. V., & Ungaro, H. C. (2020). Automatic prediction of stress in piglets (*Sus Scrofa*) using infrared skin temperature. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105148>
45. Cornou, C., Lundbye-Christensen, S., & Kristensen, A. R. (2011). Modelling and monitoring sows' activity types in farrowing house using acceleration data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.02.010>
46. Pandey, S., Kalwa, U., Kong, T., Guo, B., Gauger, P. C., Peters, D. J., & Yoon, K. J. (2021). Behavioral monitoring tool for pig farmers: Ear tag sensors, machine intelligence, and technology adoption roadmap. *Animals*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/ani11092665>
47. Okada, H., Itoh, T., Suzuki, K., & Tsukamoto, K. (2009). Wireless sensor system for detection of avian influenza outbreak farms at an early stage. *Proceedings of the 2009 IEEE Sensors Conference*.
48. da Silva, J. P., de Alencar Nääs, I., Abe, J. M., & da Silva Cordeiro, A. F. (2019). Classification of piglet (*Sus Scrofa*) stress conditions using vocalization pattern and applying paraconsistent logic Et. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105020>
49. Besteiro, R., Arango, T., Rodríguez, M. R., Fernández, M. D., & Velo, R. (2018). Estimation of patterns in weaned piglets' activity using spectral analysis. *Biosystems Engineering*, 173, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.014>

50. Nasirahmadi, A., Richter, U., Hensel, O., Edwards, S., & Sturm, B. (2015). Using machine vision for investigation of changes in pig group lying patterns. *Computers and Electronics in Agriculture*, 119, 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.10.023>
51. White, R. P., Schofield, C. P., Green, D. M., Parsons, D. J., & Whittemore, C. T. (2004). The effectiveness of a visual image analysis (VIA) system for monitoring the performance of growing/finishing pigs. *Animal Science*, 78(3), 409–418. <https://doi.org/DOI: 10.1017/S1357729800058811>
52. Guarino, M., Norton, T., Berckmans, D., Vranken, E., & Berckmans, D. (2017). A blueprint for developing and applying precision livestock farming tools: A key output of the EU-PLF project. *Animal Frontiers*, 7(1), 12–17. <https://doi.org/10.2527/af.2017.0103>
53. Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. In *Agricultural Systems* (Vol. 153, pp. 69–80). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
54. Trevisan G, Linhares LCM, Crim B, Dubey P, Schwartz KJ, Burrough ER, Main RG, Sundberg P, Thurn M, Lages PTF, Corzo CA, Torrison J, Henningson J, Herrman E, Hanzlicek GA, Raghavan R, Marthaler D, Greseth J, Clement T, Christopher-Hennings J, Linhares DCL. (2019). Macroepidemiological aspects of porcine reproductive and respiratory syndrome virus detection by major United States veterinary diagnostic laboratories over time, age group, and specimen. *PLoS One*. 14(10):e0223544. doi: 10.1371/journal.pone.0223544.
55. Martínez-López, B., Perez, A. M., & Sánchez-Vizcaíno, J. M. (2009). Social network analysis. Review of general concepts and use in preventive veterinary medicine. *Transboundary and Emerging Diseases*, 56(4), 109–120. <https://doi.org/10.1111/j.1865-1682.2009.01073.x>
56. O'Hara KC, Beltrán-Alcrudo D, Hovari M, Tabakovski B, Martínez-López B. (2022). Network analysis of live pig movements in North Macedonia: Pathways for disease spread. *Front Vet Sci.*; 9:922412. doi: 10.3389/fvets.2022.922412.
57. Gao, W., Jiang, X., Hu, Z., Wang, Q., Shi, Y., Tian, X., Qiao, M., Zhang, J., Li, Y., & Li, X. (2023). Epidemiological investigation, determination of related factors, and spatial-temporal cluster analysis of wild type pseudorabies virus seroprevalence in China during 2022. *Frontiers in Veterinary Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1298434>
58. O'Hara, K. C., Pires, A. F. A., & Martínez-López, B. (2021). Evaluating the association between climatic factors and sheep condemnations in the United States using cluster analysis and spatio-temporal modeling. *Preventive Veterinary Medicine*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2021.105342>
59. Baron, J. N., Aznar, M. N., Monterubbianesi, M., & Martínez-López, B. (2020). Application of network analysis and cluster analysis for better prevention and control of swine diseases in Argentina. *PLoS ONE*, 15(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234489>
60. Mazzucato M, Marchetti G, Barbujani M, Mulatti P, Fornasiero D, Casarotto C, Scolamacchia F, Manca G, Ferrè N. (2023). An integrated system for the management of environmental data to support veterinary epidemiology. *Front Vet Sci*. 10:1069979. doi: 10.3389/fvets.2023.1069979.
61. Arsevska, E., Roche, M., Hendrikx, P., Chavernac, D., Falala, S., Lancelot, R., & Dufour, B. (2016). Identification of terms for detecting early signals of emerging infectious disease outbreaks on the web. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.010>
62. Tizzani, M., Muñoz-Gómez, V., de Nardi, M., Paolotti, D., Muñoz, O., Ceschi, P., Viltrop, A., & Capua, I. (2021). Integrating digital and field surveillance as complementary efforts to manage epidemic diseases of livestock: African swine fever as a case study. *PLoS ONE*, 16(12 December). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252972>
63. Kandula, S., & Shaman, J. (2019). Reappraising the utility of Google Flu Trends. *PLoS Computational Biology*, 15(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007258>
64. Prieto, V. M., Matos, S., Álvarez, M., Cacheda, F., & Oliveira, J. L. (2014). Twitter: A good place to detect health conditions. *PLoS ONE*, 9(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086191>

65. Yousefinaghani, S., Dara, R., Poljak, Z., Bernardo, T. M., & Sharif, S. (2019). The Assessment of Twitter's Potential for Outbreak Detection: Avian Influenza Case Study. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54388-4>
66. Bahlo, C., Dahlhaus, P., Thompson, H., & Trotter, M. (2019). The role of interoperable data standards in precision livestock farming in extensive livestock systems: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156(August 2018), 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.007>
67. Willette, M., Ponder, J. B., McRuer, D. L., & Clark, E. E. (2013). Wildlife health monitoring systems in North America: from sentinel species to public policy. In A. Aguirre, R. S. Ostfel, & P. Daszak (Eds.), *Conservation Medicine: Applied Cases of Ecological Health* (pp. 552–562). Oxford University Press.
68. Main, R. (2016). Supporting VDL messaging and data analysis through data standardization. *Allen D. Leman Swine Conference*.
69. Papst, F., Saukh, O., Romer, K., Grandl, F., Jakovljevic, I., Steininger, F., Mayerhofer, M., Duda, J., & Egger-Danner, C. (2019, October 22). Embracing Opportunities of livestock big data integration with privacy constraints. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3365871.3365900>
70. Chetty, A., & Blekhman, R. (2024). Multi-omic approaches for host-microbiome data integration. In *Gut Microbes* (Vol. 16, Issue 1). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/19490976.2023.2297860>
71. Fiocchi, C. (2023). Omics and Multi-Omics in IBD: No Integration, No Breakthroughs. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 24, Issue 19). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ijms241914912>
72. Picard, M., Scott-Boyer, M. P., Bodein, A., Périn, O., & Droit, A. (2021). Integration strategies of multi-omics data for machine learning analysis. In *Computational and Structural Biotechnology Journal* (Vol. 19, pp. 3735–3746). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2021.06.030>
73. Hu, R., Yao, R., Li, L., Xu, Y., Lei, B., Tang, G., Liang, H., Lei, Y., Li, C., Li, X., Liu, K., Wang, L., Zhang, Y., Wang, Y., Cui, Y., Dai, J., Ni, W., Zhou, P., Yu, B., & Hu, S. (2022). A database of animal metagenomes. *Scientific Data*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01444-w>
74. Shah, H. A., Liu, J., Yang, Z., & Feng, J. (2021). Review of Machine Learning Methods for the Prediction and Reconstruction of Metabolic Pathways. In *Frontiers in Molecular Biosciences* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2021.634141>
75. Grzesiak W and Zaborski D (2012). Examples of the Use of Data Mining Methods in Animal Breeding. Data Mining Applications in Engineering and Medicine. InTech. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/50893>.
76. Williams ML, Mac Parthaláin N, Brewer P, James WPJ, Rose MT. (2016). A novel behavioral model of the pasture-based dairy cow from GPS data using data mining and machine learning techniques. *J Dairy Sci*. 99(3):2063-2075. doi: 10.3168/jds.2015-10254.
77. Vahabi, N., & Michailidis, G. (2022). Unsupervised Multi-Omics Data Integration Methods: A Comprehensive Review. In *Frontiers in Genetics* (Vol. 13). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.854752>
78. Faverjon, C., Bernstein, A., Grütter, R., Nathues, C., Nathues, H., Sarasua, C., Sterchi, M., Vargas, M. E., & Berezowski, J. (2019). A transdisciplinary approach supporting the implementation of a big data project in livestock production: An example from the swiss pig production industry. *Frontiers in Veterinary Science*, 6(JUL), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00215>
79. van der Weerd, C. A., Vonder, M. R., & Berkers, F. (2019). Accelerating adoption of precision dairy farming through digital innovation hubs. *Proceedings of the Second International Precision Dairy Farming Conference*, 8–11.
80. Herland, M., Khoshgoftaar, T. M., & Wald, R. (2014). A review of data mining using big data in health informatics. *Journal of Big Data*, 1, 2. <https://doi.org/10.1021/ci0255782>

81. Ezanno, P., Picault, S., Beaunée, G., Bailly, X., Muñoz, F., Duboz, R., Monod, H., & Guégan, J. F. (2021). Research perspectives on animal health in the era of artificial intelligence. In *Veterinary Research* (Vol. 52, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s13567-021-00902-4>
82. Guitian, J., Arnold, M., Chang, Y., & Snary, E. L. (2023). Applications of machine learning in animal and veterinary public health surveillance. *OIE Revue Scientifique et Technique*, 42, 230–241. <https://doi.org/10.20506/RST.42.3366>
83. Hepworth, P. J., Nefedov, A. V., Muchnik, I. B., & Morgan, K. L. (2012). Broiler chickens can benefit from machine learning: Support vector machine analysis of observational epidemiological data. *Journal of the Royal Society Interface*, 9(73), 1934–1942. <https://doi.org/10.1098/rsif.2011.0852>
84. Ghahramani, Z. (2019). *Probabilistic modelling, machine learning, and the information revolution*. Citeseer.
85. van Schaik, G., Hostens, M., Faverjon, C., Jensen, D. B., Kristensen, A. R., Ezanno, P., Frössling, J., Dórea, F., Jensen, B.-B., Carmo, L. P., Steeneveld, W., Rushton, J., Gilbert, W., Bearth, A., Siegrist, M., Kaler, J., Ripperger, J., Siehler, J., de Wit, S., ... Nielen, M. (2023). The DECIDE project: from surveillance data to decision-support for farmers and veterinarians. *Open Research Europe*, 3, 82. <https://doi.org/10.12688/open-reseurope.15988.1>
86. Badgeley, M. A., Liu, M., Glicksberg, B. S., Shervey, M., Zech, J., Shameer, K., Lehar, J., Oermann, E. K., McConnell, M. V., Snyder, T. M., & Dudley, J. T. (2019). CANDI: An R package and Shiny app for annotating radiographs and evaluating computer-aided diagnosis. *Bioinformatics*, 35(9), 1610–1612. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty855>
87. Class, C. A., Ha, M. J., Baladandayuthapani, V., & Do, K. A. (2018). IDINGO-integrative differential network analysis in genomics with Shiny application. *Bioinformatics*, 34(7), 1243–1245. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btx750>
88. Fawcett, L. (2018). Using Interactive Shiny Applications to Facilitate Research-Informed Learning and Teaching. *Journal of Statistics Education*, 26(1), 2–16. <https://doi.org/10.1080/10691898.2018.1436999>
89. Schultheis, H., Kuenne, C., Preussner, J., Wiegandt, R., Fust, A., Bentsen, M., & Looso, M. (2019). WILSON: Web-based Interactive Omics VisualizatiON. *Bioinformatics*, 35(6), 1055–1057. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty711>
90. Vinogradova, S., Saksena, S. D., Ward, H. N., Vigneau, S., & Gimelbrant, A. A. (2019). MaGIC: A machine learning tool set and web application for monoallelic gene inference from chromatin. *BMC Bioinformatics*, 20(1), 1–5. <https://doi.org/10.1186/s12859-019-2679-7>
91. Lioutas E.D., Charatsari C., De Rosa, M., (2021). Digitalization of agriculture: A way to solve the food problem or a trolley dilemma?. *Technology in Society*, 67, 101744. <https://doi.org/10.1016/j.tech-soc.2021.101744>
92. National Academies of Sciences Engineering. (2017). Data Science Education in the Future. In *Envisioning the data science discipline: the undergraduate perspective: interim report ahead* (pp. 19–25). The National Academic Press.
93. Nancarrow, S. A., Booth, A., Ariss, S., Smith, T., Enderby, P., & Roots, A. (2013). Ten principles of good interdisciplinary teamwork. *Human Resources for Health*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.1186/1478-4491-11-19>