Пассивный акустический мониторинг птиц: методы, ограничения и анализ данных

Методический обзор научных публикаций и практических рекомендаций. Ноябрь 2026 г. Приведены авторские обобщения и примеры; тексты источников полностью не переводились.

Варианты организации PAM

Проекты PAM различаются несколькими независимыми методическими решениями. В таблице перечислены основные варианты и указаны разделы, где обсуждаются их последствия.

Элемент процесса	Распространённые варианты	Основное следствие
Режим записи	Непрерывно; в выбранные часы суток; по расписанию «запись — пауза»	Полнота регистрации кратких и редких сигналов, расход энергии и памяти (разд. 07, 17)
Хранение звука	Полный звук; только фрагменты с детекциями; фрагменты и случайная выборка полного звука	Возможность оценить пропуски и повторно обработать данные (разд. 20, 31)
Место распознавания	На устройстве в реальном времени; позже на компьютере	Энергопотребление, сохранность звука, воспроизводимость (разд. 17, 21)
Схема ручной проверки	Случайная или стратифицированная по score; поиск подтверждения присутствия; полное прослушивание отрезков	Какие показатели качества можно оценить: precision, recall или только присутствие (разд. 28, 29)
Единица подтверждения присутствия	Отдельная детекция; вид × точка × день, ночь или обследование	Интерпретация агрегированных данных и риск ложного присутствия (разд. 33)

Термины и показатели качества распознавания

PAM / пассивный акустический мониторинг — Регистрация звуков окружающей среды с последующим определением птиц и анализом данных.

ARU / autonomous recording unit — Автономный звукозаписывающий прибор: рекордер с микрофоном, питанием и памятью.

Deployment / размещение, цикл установки — Один непрерывный период работы конкретного устройства в конкретной точке. Перенос или перезапуск после остановки может создавать новое размещение.

Detection / срабатывание, обнаружение — Событие, когда алгоритм предложил вид на определённом фрагменте. Пока это не подтверждённая встреча.

Classifier / классификатор — Программа, выбирающая наиболее подходящие классы, например виды птиц.

Score / оценка модели — Число, отражающее уверенность алгоритма по его внутренней шкале. Score 0,95 не означает автоматически 95-процентную вероятность верного определения.

Threshold / порог — Минимальный score, выше которого срабатывания оставляют для просмотра или анализа.

Calibration / калибровка score — Оценка по размеченной выборке зависимости между score и вероятностью верного определения для конкретного вида, территории и версии модели.

TP — True Positive / истинно положительное — Алгоритм назвал вид, и специалист подтвердил, что его голос действительно есть на записи.

FP — False Positive / ложноположительное — Алгоритм назвал вид, которого в проверенном фрагменте нет. Например, шум принят за крик совы.

FN — False Negative / ложноотрицательное — Настоящий голос вида есть в записи, но программа его не обнаружила как этот вид.

TN — True Negative / истинно отрицательное — В проверенном участке звука нужного вида нет, и алгоритм его не отметил. Интервалы для TN должны быть определены заранее.

Precision / точность положительных определений — Какая доля срабатываний, названных видом, оказалась правильной: TP/(TP+FP). Это ответ на вопрос «можно ли доверять положительным определениям?»

Recall или sensitivity / полнота обнаружения — Какая доля действительно присутствовавших в эталонных записях событий была найдена: TP/(TP+FN). Это ответ на вопрос «сколько настоящих голосов программа нашла?»

F1-score / F1-мера — Обобщённая характеристика баланса precision и recall: 2×precision×recall/(precision+recall). Высокая F1 не гарантирует пригодности для любой задачи.

Validation / валидация, проверка — Сопоставление ответов программы с экспертной разметкой звука. Проверять нужно как удачные, так и ошибочные определения.

Ground truth / эталонная разметка — Независимо и надёжно установленное содержание аудиозаписи, с которым сравнивают алгоритм.

Overlap / перекрытие окон — Насколько соседние отрезки анализируемого аудио перекрывают друг друга. Одну песню при перекрытии можно зарегистрировать несколько раз.

Sampling effort / усилие наблюдения — Сколько реально обследовано: работающих устройств, часов, суток, интервалов. Запланированные, но не записанные часы сюда не относятся.

Positive interval / положительный интервал — Заранее выбранный отрезок времени (например, 10 минут), в котором вид был зарегистрирован хотя бы один раз.

Occupancy / занятость участка — Вероятность того, что вид использует обследуемый участок в определённом экологическом смысле. При PAM этот смысл требуется специально определить.

Detection probability / вероятность обнаружения — Шанс зарегистрировать вид при условии, что он действительно находится и вокализирует в доступной для метода области.

Covariate / объясняющая переменная — Характеристика, которую учитывают в анализе: дата, биотоп, ветер, оборудование и т. п.

Bias / систематическое смещение — Ошибка, которая постоянно завышает или занижает сравнение, например из-за разного оборудования в лесу и у жилья.

Bootstrap / бутстрэп — Способ оценить неопределённость, многократно формируя выборки из данных. Важно повторно выбирать участки, а не считать каждую секунду независимой.

Acoustic index / акустический индекс — Числовая характеристика структуры звука, не равнозначная автоматически числу птиц или видов.

Spectrogram / спектрограмма — Изображение того, как звуковые частоты меняются во времени; помогает различать крики, песни и шум.

NFC / nocturnal flight call — Ночной полётный крик — позывка птицы в полёте, часто используемая для изучения ночной миграции.

01. Объект измерения: вокализация, обнаружение и подтверждённая регистрация

Акустическая регистрация — результат последовательности событий: птица подала голос, звук дошёл до микрофона, файл сохранился, вид верно определён алгоритмом или экспертом. Птица может присутствовать и молчать, вокализировать за пределами зоны слышимости или остаться нераспознанной. Поэтому результаты PAM различают на трёх уровнях: исходный звуковой сигнал, автоматическое предсказание вида и подтверждённая регистрация.

Вероятность обнаружения зависит от вида и типа сигнала, удалённости птицы, акустических свойств местообитания, погоды, характеристик оборудования и параметров классификатора. Следовательно, различия между сезонами или участками могут иметь как биологическую, так и наблюдательную составляющую. Например, снижение числа регистраций вальдшнепа в июне может отражать изменение интенсивности тяги, перемещение рекордеров или сокращение ночной записи, а не уменьшение численности. Корректная формулировка в таком случае — «уменьшилась доля интервалов с зарегистрированной вокализацией».

Отсутствие автоматического определения при исправной записи означает недетекцию целевого сигнала, но не доказывает отсутствия вида на участке. Число предсказаний не интерпретируется как число особей [39], [14].

Литература: [14], [39].

02. Исследовательский вопрос и измеряемый показатель

Применение BirdNET — способ обработки, а не научная задача. Вопрос формулируется через объект наблюдения и сравниваемый показатель: например, когда в течение ночи чаще регистрируется голос коростеля или различается ли доля суток с голосом певчего дрозда между типами леса. Для каждого вопроса заранее определяют показатель и необходимое время записи [66], [41].

Присутствие вида, доля суток с его голосом, число звуковых эпизодов и доля положительных интервалов — разные показатели, и без пояснения их нельзя заменять один другим. Один поющий самец, остающийся на месте неделю, даёт семь суток обнаружений, но это одна птица. Заранее определяют и смысл нуля в таблице: «нет сигналов вида при работавшем устройстве» не равнозначно «устройство в это время не работало».

По данным одного некалиброванного микрофона плотность птиц непосредственно не оценивается: для этого нужны дополнительные допущения о дальности регистрации и связи вокализации с численностью (разд. 38).

Литература: [41], [66].

03. Пилотные установки

Первая серия установок служит для проверки всей последовательности работ: включения устройств, правильности даты и времени, качества звука, переноса файлов, работы распознавателя, ручной проверки и получения итоговой таблицы [41]. Устройства размещают в контрастных условиях — в закрытом лесу, на открытой местности, у источника фонового шума — и оценивают не только качество записи, но и время, необходимое на проверку определений.

Короткий период непрерывной записи позволяет затем искусственно проредить материал (например, оставить по минуте из каждых десяти) и оценить, какие виды и сигналы теряются. Одновременно измеряют расход батарей и памяти и дрейф часов. Результат пилота — небольшая, но полная таблица с датой, координатами, прибором, числом фактически записанных часов и проверенными определениями по нескольким видам.

Литература: [41].

04. Пространственный дизайн и выбор точек

Схема размещения определяет совокупность, к которой относятся выводы. Если большинство устройств стоит у доступных дорог, данные описывают придорожные местообитания, а не все леса региона; это не обесценивает исследование, но требует точно назвать обследованную совокупность. Систематическая сетка, случайный выбор и целенаправленный подбор контрастных биотопов решают разные задачи [41].

Сетка 10 × 10 км фиксирует расположение крупных единиц, но не способ выбора точки внутри ячейки. Протокол заранее задаёт выбор ячеек, правило выбора микроточки, допустимые отклонения и причины отказа (недоступность, заболоченность, опасность). При выборе удобного подъезда или наиболее богатого голосами места получается выборка доступных или целевых микробиотопов, а не ландшафта.

Пространственный охват не равен репрезентативности. Для регионального обобщения сравнивают доли лесов, болот, открытых территорий и удалённости от жилья в выборке и на всей территории; при

непропорциональном обследовании возможна постстратификация, если в каждой категории достаточно фактических размещений.

Соседние устройства могут регистрировать одних и тех же птиц или находиться в сходных условиях, поэтому стандартная ошибка, рассчитанная по отдельным срабатываниям, занижается. Неопределённость оценивают с группированием по участку или ячейке, пространственными случайными эффектами или блочным бутстрэпом.

Литература: [41].

05. Ротационные схемы размещения

Ротационный дизайн, при котором рекордеры последовательно переносят между точками, научно допустим, но в нём место и дата меняются одновременно [52]. Если в апреле обследованы преимущественно лиственные леса, а в мае — пойменные луга, различие между месяцами нельзя однозначно отнести к сезонности. Месяц или сезон не должны быть полностью вложены в определённый набор биотопов.

Перекрытие обеспечивают стратифицированной последовательностью размещений по коротким календарным блокам, частичным повтором одних и тех же ячеек в разные периоды и одновременной работой нескольких рекордеров в контрастных условиях. Даже при неполном балансе приводят таблицу распределения усилия по месяцам, категориям покрова и участкам. Моделирование для сочетаний «сезон × биотоп», отсутствующих в данных, является экстраполяцией, а не эмпирическим сравнением.

Каждое размещение получает собственный идентификатор, начало, конец и фактическое усилие; имя прибора или потока данных не обозначает постоянный участок. Иерархия «физический рекордер — поток — участок — размещение» необходима для контроля повторных наблюдений; сходный принцип реализован в европейской сети TABMON [12].

Литература: [12], [52].

06. Единица наблюдения и независимость данных

Независимая единица определяется экологическим вопросом, а не длительностью окна классификатора. Поющий самец, попавший в 80 последовательных трёхсекундных окон, — не 80 особей и не 80 независимых свидетельств; десять положительных интервалов могут принадлежать одной территориальной птице; совпадение голосов на двух близких приборах не означает двух особей [54].

Данные организуют по вложенным уровням: участок, размещение, сутки, интервал, звуковой эпизод, срабатывание. Для описания суточного профиля удобны интервалы, для сравнения участков решающим является число независимых участков и размещений. Корреляцию внутри размещения, суток и участка учитывают в модели или при оценке неопределённости; иначе уверенность в выводе искусственно завышается.

Идентификаторы уровней (срабатывание, звуковой эпизод, интервал, поток, участок, размещение) хранят раздельно. При смене единицы агрегации все показатели качества пересчитывают: precision для трёхсекундных окон не равна precision для видо-дней.

Литература: [54].

07. Продолжительность записи и временное прореживание

Универсальной продолжительности записи нет: она зависит от редкости вида, сезонного этапа и задачи [52]. Непрерывная запись позволяет регистрировать краткие редкие сигналы, но требует больше энергии и памяти; запись по расписанию экономнее, однако пропускает время, когда микрофон выключен. Для интенсивно поющего вида такие потери могут быть приемлемы, для редких ночных позывок — решающими.

Запись одной минуты из десяти охватывает 10 % времени, и число обнаружений нельзя просто умножить на десять. При выборе расписания сначала оценивают ресурс батарей и памяти, затем на пилотных данных проверяют, какие виды и часы теряются при прореживании [41]; расписание фиксируют до начала сезона и сохраняют одинаковым для сравниваемых точек.

Число суток выбирают по цели: сравнивают, как меняются число подтверждённых видов и вероятность обнаружить целевой вид при двух, четырёх и семи сутках. Семидневное размещение не равно семи полным обследованным суткам: установка и снятие занимают часть первого и последнего дня, а неожиданные остановки уменьшают фактическое время.

Литература: [41], [52].

08. Временные шкалы: сутки и ночь

Суточная активность птиц связана с положением Солнца, а не с гражданским временем: в 04:00 освещённость в апреле и июне различна. Для ночных видов используют минуты после заката (сохраняют абсолютную задержку от заката) или нормированную долю ночи (учитывает сезонное изменение её длительности); эти шкалы отвечают на разные вопросы [47].

Восход и закат рассчитывают по координатам и датам конкретных размещений. Дату ночи определяют по закату, а не по полуночи. Явно указывают, какие сумерки исключены и пересчитывается ли шкала относительно оставшейся части ночи: смена определения ночного окна между анализами может создать кажущееся смещение пика.

Сезонные сравнения внутри ночи повторяют на нескольких обоснованных шкалах с одинаковым правилом исключения сумерек. Доля положительных интервалов нормируется на число фактически обследованных интервалов в каждом временном классе, а не на длительность ночи или общее число регистраций вида.

Литература: [47].

09. Описание местообитаний

Категория «лес» для птиц слишком широка, а чрезмерно дробная классификация при небольшом числе установок оставляет по одному рекордеру в категории. Практичный компромисс — основной тип местообитания (хвойный, лиственный или смешанный лес, кустарники, открытая местность, болото, застройка) и несколько воспроизводимых дополнительных признаков, с фотографиями точки [69].

Классификация земного покрова по спутниковым данным характеризует окружение рекордера, но не обязательно местообитание вокализирующей птицы. Сохраняют полевое описание, преобладающий класс дистанционного зондирования и доли классов в заранее выбранных буферах (например, 100 и 250 м); радиус буфера не является измеренной дальностью слышимости.

Для продуктов вроде ESA WorldCover фиксируют версию, год, разрешение, определения классов и долю валидных пикселей. Класс «tree cover» не заменяет различения хвойного, смешанного и лиственного леса; изменения местообитания после даты съёмки проверяют отдельно.

Литература: [69].

10. Антропогенные градиенты: расстояние до застройки

Близость к жилью одновременно влияет на птиц (подкормка, сады, освещение) и на условия регистрации (шум, доступность точек); кроме того, ошибки классификатора у жилья и в лесу могут различаться [28]. Расстояние до ближайшего здания, до жилой застройки и до границы населённого пункта — разные переменные, и их связь с регистрациями нельзя объяснять одним механизмом.

Максимум регистраций на промежуточной дистанции требует проверки числа независимых размещений и усилия по обе стороны от него: при редких дальних точках сглаженная кривая может показывать кажущийся оптимум, созданный одним размещением. Показывают распределение размещений вдоль оси расстояния и повторяют оценку без наиболее влиятельных размещений; без доказанного механизма используют формулировку «связь регистраций с расстоянием».

Литература: [28].

11. Дальность акустического обнаружения

Единой площади обследования для всех видов нет: громкий голос выпи и тихая позывка королька регистрируются на разных расстояниях, а дальность зависит также от листвы, ветра, влажности, рельефа, высоты источника и чувствительности микрофона. Различают три дальности: на которой сигнал физически доходит до микрофона, на которой его может распознать человек при прослушивании или на спектрограмме, и на которой классификатор правильно определяет вид. Для тихих и далёких голосов они существенно расходятся.

В эксперименте с воспроизведением голосов 31 вида лесных птиц в польских лесах [50] дальность оценивали по слышимости сигнала на записи и по его видимости на спектрограмме; автоматическое распознавание не оценивалось. Большинство видов было слышно до 200 м, но на спектрограммах редко различимо дальше примерно 150 м; голоса мелких птиц — примерно до 100 м, крупных — до 300–400 м. Влажность увеличивала дальность, ветер уменьшал; в сосновом лесу она была больше, чем в буковом, и снижалась по мере распускания листвы. Для планирования сети авторы предлагают разносить рекордеры примерно на три радиуса обнаружения вида, если его территория меньше этого радиуса, и на четыре, если больше. Для лесов России эти значения — ориентир; дальность распознавания классификатором может быть ещё меньше.

Выбор порога score также определяет площадь обследования. Если score зависит от расстояния до птицы, повышение порога не только меняет соотношение ложных срабатываний и пропусков, но и сужает площадь, с которой собраны данные [23]. При сравнении биотопов с разной слышимостью один и тот же порог соответствует разной обследованной площади.

Для оценки плотности необходима отдельная модель обнаружения в зависимости от расстояния (разд. 38). В описательных работах корректно указывать, что анализировались акустические регистрации вокруг рекордера без оценки фиксированной площади.

Литература: [23], [50].

12. Выбор оборудования

Измерительная цепочка включает микрофон, его защиту, звуковую карту, усиление, питание и программные настройки; замена одного компонента может изменить число регистраций слабых сигналов при неизменной орнитофауне [13], [45]. Перед сезоном комплекты сравнивают при совместной записи одних и тех же событий — тихой песни, громкого крика, голоса на фоне ветра — и по прослушиванию, и по результату распознавания. Модели оборудования не распределяют строго по разным местообитаниям, иначе техническая разница станет неотделима от экологической.

Используются три класса приборов: недорогие рекордеры с записью на карту памяти (например, AudioMoth), сохраняющие звук для последующего анализа; профессиональные рекордеры с расписанием и ёмкими батареями (Song Meter, BAR и аналоги); станции с распознаванием на месте (например, BirdNET-Pi на Raspberry Pi). Станции последнего типа удобны для списков видов и суточных профилей, но в стандартной конфигурации сохраняют только фрагменты с детекциями (разд. 20). Для фенологии и ночных сигналов предпочтителен полный звук.

Литература: [13], [45].

13. Установка и крепление рекордера

Положение микрофона влияет на результат не меньше настроек программы. Ветки, ремни, капли и плотная плёнка создают шумы, которые классификатор может принять за голоса птиц [14]. Высоту, направление микрофона и способ крепления стандартизируют и записывают; отклонения от запланированной точки отмечают в журнале. После установки делают и прослушивают короткую пробную запись, проверяют дату и время, фотографируют прибор и местообитание.

Микрофон AudioMoth не всенаправлен: позади корпуса чувствительность в среднем ниже примерно на 5 дБ, а на высоких частотах потери значительно больше; при креплении на стволе толщиной около 30 см разница между передней и задней стороной на высоких частотах достигала примерно 25 дБ [24]. Поэтому микрофон направляют в сторону ожидаемых источников и по возможности крепят на опору диаметром 3–7 см. Пластиковый пакет почти не влияет на сигнал ниже 10 кГц, но ослабляет его выше 10 кГц на 5–10 дБ; другие кожухи проверяют до сезона [24].

Литература: [14], [24].

14. Разрешения, приватность и сохранность оборудования

Рекордеры записывают и человеческую речь, а автоматические системы не отличают её от голосов птиц, поэтому разговоры попадают в записи без согласия говорящих. Одно из технических решений — распознавание речи на устройстве с немедленным удалением таких фрагментов [56]. Проблема особенно значима у жилья, дорог и троп.

До начала сезона решают четыре вопроса: необходимо ли разрешение на работу на территории (особо охраняемые природные территории, частные земли); как обращаться с записями речи (не публиковать сырой звук из населённых мест, прослушивать только фрагменты с птицами, удалять случайные разговоры); как действовать, если запись фиксирует нарушение закона — некоторые журналы указывают на обязанности исследователя в таких случаях [72]; какие требования к записи звука и персональным данным действуют в организации и законодательстве. Последний вопрос в обзоре не рассматривается и требует консультации юриста или этического комитета.

Рекордеры закрепляют и маскируют, точные координаты хранят в закрытой копии; при публикации координаты гнёзд и местообитаний редких видов обобщают. Тесты с воспроизведением голосов проводят вне гнездовых участков.

Литература: [56], [72].

15. Параметры цифровой записи

Частота дискретизации определяет число отсчётов в секунду; наибольшая записываемая частота равна её половине (частота Найквиста). Для большинства птиц используют 44,1 или 48 кГц; BirdNET v2.4 работает с 48 кГц и окнами по 3 с, предварительная BirdNET+ V3.0 — с 32 кГц и окном переменной длины [63]. Частоты 32 кГц (верхняя граница 16 кГц) достаточно для большинства певчих птиц, при этом экономится память.

WAV и FLAC хранят звук без потерь; сжатие с потерями и автоматическое шумоподавление могут изменить тихие элементы сигнала. Усиление выбирают максимальным из не вызывающих перегрузки и проверяют на реальных голосах разной громкости в каждом типе местообитания: перегруженные пики обрезаются безвозвратно, а при недостаточном усилении тихие сигналы теряются в собственном шуме тракта [70], [24]. Все параметры вносят в протокол.

Литература: [24], [63], [70].

16. Деградация микрофонов и контроль качества записи

Повреждённый микрофон часто не замолкает, а постепенно теряет чувствительность или добавляет шум, например из-за влаги; в данных это выглядит как снижение активности птиц, а проверка наличия файлов такой проблемы не выявляет [45]. Контроль включает выборочное прослушивание, сравнение фонового спектра между устройствами и во времени, поиск перегрузки и тестовое воспроизведение контрольного сигнала; при долгом сезоне полезны периодические совместные записи нескольких приборов.

Границы неисправного периода уточняют; часы с непригодным звуком исключают и не учитывают как нулевые наблюдения. В отчёте указывают исключённые данные, причину и неопределённость даты начала неисправности.

Литература: [45].

17. Энергообеспечение, память и фактическое время работы

Автономность проверяют в рабочем режиме: распознавание на устройстве, радиосвязь и перезапуски увеличивают расход. Несжатый моно WAV 48 кГц, 16 бит занимает около 8,3 ГБ в сутки. На холоде ресурс батарей снижается: в тестах AudioMoth при 32 кГц щелочные элементы работали около 189 ч при комнатной температуре и около 103 ч при −16 °C, литиевые — 234–241 ч при всех проверенных температурах; оценки программы настройки могут расходиться с измеренными [24]. Для зимних работ используют литиевые элементы.

Энергопотребление станции на Raspberry Pi Zero 2 W (сборка с USB-звуковой картой и микрофоном, Wi-Fi и HDMI отключены, внешний USB-измеритель) составило около 1,15 Вт в режиме только записи, около 1,30 Вт при распознавании BirdNET v2.4 и 2,1–2,3 Вт при работе предварительной BirdNET+ V3; при повышенной частоте процессора — до 3,7 Вт с нагревом до 82,7 °C [65]. Это кратковременные замеры одной конфигурации, но они показывают, что распознавание на месте может почти удваивать расход, а схема «записать сейчас, проанализировать позже» продлевает автономную работу.

Для количественного анализа усилие — это продолжительность пригодного акустического наблюдения, а не плановое время нахождения прибора в поле [66]. Если за неделю записано 151 ч вместо 168, недостающие 17 ч не являются нулями по всем видам. Предпочтительный источник — журналы записи файлов и состояния системы; при непрерывном архиве суммируют длительность файлов за вычетом разрывов и непригодных фрагментов. Если устройство сохраняет только положительные фрагменты, отсутствие файлов может означать остановку программы, отказ микрофона, ошибку памяти или отсутствие сигналов, и без отдельного журнала работы отрицательные интервалы проверить нельзя.

Для исторических массивов без журнала возможна приближённая реконструкция размещений по временным меткам детекций: пустой день завершает последовательность, возобновление регистраций открывает новую; начало и конец уточняются по первой и последней метке. Это допущение, а не доказательство непрерывной работы: полные дни между регистрациями могут содержать остановки, а отсутствие регистраций может отражать молчание птиц. Реконструированное усилие маркируют отдельно от подтверждённого.

Особую опасность представляет эндогенность знаменателя: если наличие детекций одновременно используется для подтверждения работы устройства и для измерения активности, тихие периоды исключаются из усилия чаще, чем богатые голосами, и активность завышается. Рекомендуются анализ чувствительности к альтернативным правилам реконструкции, оценка доли данных с независимым журналом, сравнение с контрольными устройствами и явное ограничение интерпретации отрицательных наблюдений.

Литература: [24], [65], [66].

18. Координаты, время и идентификаторы размещений

Неверный часовой пояс сдвигает суточные пики, неверные координаты искажают карту и расчёт заката; систематические ошибки, одинаковые во всех файлах, могут выглядеть как особенность поведения птиц. Время хранят в UTC или с явным указанием часового пояса, сохраняют исходное время события, точность и источник координат. Часы прибора сверяют с эталоном при установке и снятии, чтобы оценить дрейф; у AudioMoth при каждой замене батарей часы сбрасываются, и после замены питания проверяют дату первого нового файла [70], [67].

Идентификаторы физического устройства, потока данных, участка и размещения разделяют. Размещение в новом пункте получает новые идентификаторы участка и размещения, даже если прибор и его имя не изменились; повторный запуск после подтверждённого перерыва образует новый технический цикл. Первая и последняя детекции характеризуют границы наблюдавшихся срабатываний, а не обязательно время включения и выключения.

Выгрузки проверяют на пропущенные сутки, дубли, неожиданные смены координат и даты за пределами установки. Автоматический порог расстояния при проверке координат — правило контроля качества, но не доказательство того, какая из координат верна. Исходные значения сохраняют вместе с журналом исправлений.

Литература: [67], [70].

19. Погодные условия и фоновый шум

Дождь, ветер и антропогенный шум маскируют сигналы, а погода одновременно меняет поведение птиц [50], [28]. Различают две ситуации: запись технически непригодна и запись пригодна, но условия

обнаружения хуже; во втором случае погоду учитывают как ковариату. Удаление всех дождливых интервалов превращает исследование в изучение активности в сухую погоду; такой выбор допустим, если он определён заранее и указан в методике.

Для каждого условия приводят не только число регистраций, но и число пригодных часов. В шумных местообитаниях (например, у жилья и дорог) доля исключённого материала может быть заметно выше, и без учёта этого различия между местами искажаются.

Литература: [28], [50].

20. Хранение исходного звука

Исходный звук позволяет переслушать сомнительные находки, повторно обработать данные новой версией классификатора и искать пропущенные сигналы [19]. Архив, состоящий только из фрагментов, отобранных моделью, пригоден для подтверждения находок, но не для оценки полноты распознавания. При ограниченной памяти сохраняют все кандидаты, случайную выборку звука независимо от срабатываний и периоды непрерывной записи. В описании исследования указывают, какое звуковое сырьё существует: «анализировали непрерывные записи» и «анализировали сохранённые системой фрагменты» означают разные возможности проверки.

Станции BirdNET-Pi в стандартной конфигурации сохраняют только фрагменты вокруг детекций; данные такой сети в Центральной России агрегировали в 10-минутные интервалы [1]. Подобные данные пригодны для списков видов и суточных профилей при известном времени работы, но не для оценки полноты распознавания. Модифицированная версия BirdNET-Pi допускает режим, в котором устройство записывает полный звук без потерь, а анализ выполняется позже на устройстве или компьютере; для каждого файла сохраняются время, размер, модель, число детекций и ошибки, а неизвестный результат не приравнивается к нулю [65]. Такой журнал служит прямым учётом усилия. Если файлы без детекций после анализа удаляются, случайную их долю (например, 1–5 %) целесообразно сохранять как контрольную выборку для оценки пропусков.

Литература: [1], [19], [65].

21. Документирование параметров BirdNET

BirdNET — инструмент, а не неизменный метод: модель, длина окна, перекрытие, чувствительность и фильтры видов различаются между версиями и запусками, поэтому из одного звука могут получаться разные таблицы [19]. Для каждого запуска архивируют версию программы и модели (с контрольной суммой), версию географического фильтра, минимальный порог (min_conf), sensitivity, overlap, координаты и неделю года, порог фильтра видов (sf_thresh), частотные границы (fmin, fmax), пользовательский список видов, правило объединения окон и полную командную строку; названия параметров приведены по документации BirdNET-Analyzer [64] и могут различаться между версиями. Каждая детекция связывается с идентификатором запуска.

Изменение перекрытия меняет число строк, относящихся к одному сигналу; поэтому число строк разных запусков сравнивают только после согласованного объединения соседних срабатываний. При сравнении версий используют идентичные исходные файлы. При смене модели в середине сезона либо повторно обрабатывают весь сопоставляемый материал, либо оценивают эффект версии на контрольном наборе; простое объединение результатов двух версий в одном временном ряду нарушает сопоставимость. Улучшение распознавания одного типа сигнала может сопровождаться ухудшением для другого (самки, молодые птицы, полётные позывки), поэтому контрольный набор включает разные типы вокализаций.

Если в базу записываются только детекции выше заданного порога (например, 0,60), впоследствии невозможно подобрать порог ниже него, оценить плотность сигналов без порога (разд. 34) и построить полную кривую precision–recall. Целесообразно сохранять несколько наиболее вероятных предсказаний для каждого окна начиная примерно с score 0,1, а рабочий порог применять на этапе анализа.

Литература: [19], [64].

22. Интерпретация и калибровка score

Score — внутренняя оценка модели, а не вероятность верного определения [51]. Если среди 100 проверенных ответов с высоким score для одного вида подтверждены 98, а для другого — 65, порог одинаков, но надёжность различна. Поэтому в методике указывают «порог score 0,95», а не «достоверность 95 %». Для неожиданных находок редких видов высокий score сам по себе не служит доказательством.

Связь score с вероятностью верного определения оценивают по выборке проверенных срабатываний, охватывающей весь диапазон score, отдельно для каждого вида. Распространённый приём — логистическая регрессия с исходом «верно/неверно» и score (обычно в логит-преобразовании) в качестве предиктора; по кривой находят score, при котором оценённая вероятность достигает требуемого уровня [51]. Форма зависимости не обязательно линейна на логит-шкале, поэтому её адекватность проверяют, а при достаточном объёме данных используют гибкие модели (сплайны, изотоническую регрессию). Качество калибровки оценивают на независимой выборке, не использованной для подбора. Калибровка действительна для конкретного вида, территории, сезона и версии модели. В крупном исследовании на четырёх наборах данных после локальной калибровки точность выше 90 % была получена для 109 из 136 видов [38].

Примеры видовых различий в средней полосе России (BirdNET v2.4, Ярославская обл., 2026 г. [75]) получены на неслучайной выборке проверенных записей и характеризуют только эту выборку, а не precision для всего потока детекций. Среди проверенных записей зяблика доля подтверждённых определений достигала 95 % уже при score 0,60, у желтоголового королька — около 0,68, у вальдшнепа — около 0,81. У погоныша ложные срабатывания отмечались вплоть до score 0,99, а для серой неясыти подходящий порог не был найден (45 подтверждённых и 327 ложных срабатываний среди проверенных; ложные часто приходились на лай собак и другие посторонние звуки).

Литература: [38], [51], [75].

23. Влияние настроек анализа

Снижение порога увеличивает число кандидатов и выявляет слабые сигналы ценой большей нагрузки на проверку; повышение порога сокращает ложные срабатывания, но теряет часть верных. Оптимум зависит от задачи: подтверждение необычной встречи требует высокой надёжности отдельного сигнала, а оценка видового состава — знания пропусков. Настройки сравнивают на одном и том же размеченном аудио, рассчитывая качество отдельно для окон, суток и видов.

По глобальной проверке на 4224 минутных записях из 67 точек [34] увеличение overlap с 0 до 2 с последовательно улучшало результат. Для поиска возможно большего числа вокализаций лучше подходили низкие пороги (0,1–0,3), для описания состава сообществ — около 0,5; оптимальная sensitivity составила 0,5 для сообществ и 1,5 для отдельных вокализаций и зависела от региона. Эти значения — отправная точка, а не замена локальной проверки. Увеличение overlap умножает число строк об одном сигнале, поэтому строки объединяют до подсчёта (разд. 33).

Литература: [34].

24. Версии BirdNET и альтернативные модели

По состоянию на ноябрь 2026 г. стабильной рабочей версией BirdNET-Analyzer остаётся модель BirdNET v2.4 (BirdNET_GLOBAL_6K_V2.4). Линия BirdNET+ V3.0 распространяется как предварительная версия для разработчиков (первая публикация на Zenodo — 10 ноября 2025 г.): вход 32 кГц вместо 48 кГц, окно переменной длины вместо фиксированных 3 с, расширенный набор классов, включающий насекомых и амфибий [63]. Perch 2.0 (Google DeepMind, август 2025 г.) обучен более чем на 14,5 тыс. видов, в основном птиц, и используется прежде всего как источник эмбеддингов для быстрого обучения собственных классификаторов [60].

Для воспроизводимости модель фиксируют на весь сезон; при её смене весь сопоставляемый материал обрабатывают повторно, а показатели качества пересчитывают. Параметры, подобранные для трёхсекундных окон (например, перекрытие), не переносятся механически на модели с другим окном. Практичный способ выбора модели — обработать одну и ту же контрольную разметку двумя моделями и сравнить precision и recall для своих видов.

Пример: две одинаковые станции на Raspberry Pi Zero 2 W с одинаковыми микрофонами работали рядом с 27 сентября по 2 октября 2026 г., одна с BirdNET v2.4, другая с BirdNET+ V3 [65]. V3 дала в 3,4 раза больше сырых детекций (9547 против 2825) и 57 видов с хотя бы одной подтверждённой детекцией против 44. Изменения доли ложных среди проверенных различались по видам: у белобровика она снизилась с 22,6 до 2,2 %, у ворона выросла с 0 до 19,9 %. При пороге 0,80 V3 сохранила 585 десятиминутных интервалов с подтверждёнными видами против 272 при близкой доле ложных. Поскольку score двух моделей не откалиброваны относительно друг друга, проверка не была случайной, а станции записывали разные экземпляры звука, это не сравнение точности; строгое сравнение требует обработки обеими моделями одних и тех же файлов.

Литература: [60], [63], [65].

25. Классификаторы на основе эмбеддингов

Готовые классификаторы не охватывают многие позывки, типы песни и возрастные голоса, а для части видов работают неудовлетворительно. Альтернатива обучению сети с нуля — использование эмбеддингов, то есть векторных представлений звуковых окон, получаемых из крупных предобученных моделей (BirdNET, Perch). По эмбеддингам выполняют поиск сходных сигналов и обучают простые, обычно линейные, классификаторы на десятках размеченных примеров.

Итеративная схема (agile modeling) включает подбор одного или нескольких примеров целевого сигнала, поиск сходных окон в архиве, разметку найденного, обучение классификатора и проверку следующей порции его наиболее вероятных и пограничных результатов с последующим дообучением. По данным разработчиков, классификатор нового звука удовлетворительного качества может быть получен менее чем за час работы эксперта [59]; векторный поиск Perch интегрирован в BirdNET-Analyzer.

Эмбеддинги позволяют находить звуки, отсутствующие среди классов модели, начиная с одного примера [4], и различать типы сигналов внутри вида — например, голоса взрослых и молодых бородатых неясытей [27]. В нерецензированной работе по вальдшнепу эмбеддинги BirdNET в сочетании со вторым классификатором (SVM, Random Forest, XGBoost) улучшили отделение его сигналов от посторонних звуков [58].

Собственный классификатор требует той же проверки, что и любой другой: на независимой разметке, отдельно для территорий и сезонов. Вместе с результатами архивируют версию модели эмбеддингов, обучающую выборку и сам классификатор.

Литература: [4], [27], [58], [59].

26. Ограничение списка видов

Региональный или сезонный список видов отсекает заведомо невозможные определения, но сам способен сформировать фенологическую картину: если весенний вид запрещён до определённой даты, ранний прилёт не будет обнаружен [32]. В исследованиях сроков прилёта и отлёта ограничения, исключающие изучаемое явление, не применяют; основные виды анализируют по фиксированному списку, необычные кандидаты проверяют отдельно.

Список имеет дату и версию, учитываются изменения таксономии. В таблице различают «вид не искали» и «вид не обнаружен»: если вид не входил в список, отсутствие срабатываний не является недетекцией.

Литература: [32].

27. Общие и видоспецифические пороги

Общий порог прост и воспроизводим, но надёжность распознавания зависит от вида и типа сигнала. Видоспецифические пороги получают тремя основными способами: логистической регрессией score по размеченной выборке для каждого вида — так рассчитаны пороги для 72 видов альпийских птиц [37]; смешанными моделями, учитывающими различия между участками [43]; с использованием временного контекста — числа и плотности детекций вида в соседних интервалах, что в одной работе дало precision не ниже 0,9 для 70 % видов против 31 % при порогах только по score [40]. Опубликованные пороги — отправная точка для локальной проверки, а не готовые значения для другой версии модели или территории. Для редкого вида с немногими кандидатами надёжнее проверить все срабатывания.

Порог выбирают под заранее определённую цель: при поиске редких единичных сигналов приоритетен recall, при составлении списка достоверно присутствующих видов — precision. При подборе по кумулятивной кривой precision выбирают значение, начиная с которого требуемый уровень сохраняется при всех более высоких score: кривая немонотонна, и в данных по Ярославской области у 37 из 139 видов она после найденного порога вновь опускалась ниже 95 % [75]. Подбор порога и оценка его качества на одних и тех же данных дают оптимистически смещённый результат, поэтому для итоговой оценки нужна независимая выборка.

Пороги перепроверяют во времени. В тех же данных пороги, подобранные по проверкам до 1 июня, применили к проверенным записям июня–августа: объединённая доля подтверждённых определений составила 94,5 %, но у 8 из 47 видов, имевших не менее 20 поздних проверок, она была ниже 90 %, а у 4 — ниже 80 % [75]. Поскольку проверки не были случайными, эти величины характеризуют проверенную выборку; тем не менее они показывают, что смена сезона, типа сигнала и фона может нарушить работу порога. Правила выбора порогов фиксируют до основного анализа; изменение порога ради «удобного» сезонного графика недопустимо.

Литература: [37], [40], [43], [75].

28. Валидация: precision, recall и единица оценки

Precision — доля верных среди срабатываний, отнесённых к виду; recall — доля обнаруженных среди всех присутствующих сигналов вида. Например, при 24 верных срабатываниях (TP), 10 ложных (FP) и 6 пропущенных сигналах (FN) precision = 24/34 ≈ 0,71, recall = 24/30 = 0,80, F1 ≈ 0,75. Число истинно отрицательных случаев в эти показатели не входит и в PAM зависит от выбранной единицы, поэтому основными служат precision и recall. Высокая precision при низком recall (десять верных из пятидесяти присутствовавших редких сигналов) приемлема для подтверждения находок, но не для оценки интенсивности, например, миграции.

Показатели зависят от единицы оценки — трёхсекундного окна, отдельного сигнала, 10-минутного интервала, суток или участка, — поэтому единицу всегда указывают, а значения из публикаций с разными единицами не сравнивают напрямую [21]. Для recall необходимо независимо разметить фрагменты, отобранные без учёта ответа классификатора: архив положительных срабатываний даёт информацию только о precision.

Для оценки precision по всему массиву формируют стратифицированную случайную выборку кандидатов с учётом вида, месяца, местообитания, диапазона score, типа сигнала и технических условий [22]. Прицельная проверка редких видов, крайних дат и необычных последовательностей полезна, но не объединяется со случайной выборкой при расчёте precision без поправок. Для каждой проверки сохраняют исходное определение программы, решение эксперта (TP, FP или «неопределённо»), дату, проверяющего, способ отбора и примечание; исходный ответ программы не перезаписывается.

Глобальное сравнение BirdNET на 4224 минутных записях из 67 точек показало precision на уровне вокализаций 0,57–0,71 и recall 0,24–0,52 в зависимости от континента; площадь под кривой precision–recall была наибольшей в Северной Америке, Океании и Европе (0,16–0,23) и наименьшей в Африке и Азии (0,03–0,04), что авторы связывают с различиями в охвате видов и местных условиях [18]. Эти значения описывают эталонную выборку, а не ожидаемое качество в конкретном проекте; для азиатской части России локальная проверка особенно важна. Для независимого сравнения моделей и настроек полезны открытые размеченные наборы, например WABAD — более 90 тыс. вокализаций более чем 1100 видов [73].

Литература: [18], [21], [22], [73].

29. Подтверждение присутствия и оценка качества как разные задачи

Ручная проверка преследует две разные цели. Первая — подтвердить присутствие вида в заданной единице (вид × точка × сутки, ночь или обследование); для этого достаточно одной достоверной записи, и проверку логично начинать с наиболее перспективных фрагментов. Вторая — оценить качество распознавания для всего потока детекций; для этого нужна заранее спланированная случайная или стратифицированная по score выборка. Результаты первой процедуры не являются оценкой второй [51].

Если проверку в пределах видо-дня прекращают на первом подтверждении, то при присутствии вида проверяется мало записей, а при его отсутствии — много, обычно с высокими score. Ложные срабатывания оказываются перепредставлены, и рассчитанная по таким меткам доля верных определений смещена, как правило в сторону занижения. Поэтому для каждой проверенной детекции фиксируют способ её отбора (случайный, по убыванию score, по спектрограмме, целевой запрос) и рассчитывают precision только по случайной части.

Результаты проверки хранят на уровне отдельной детекции, а карточки наблюдений («вид отмечен в точке в данный день») формируют автоматически по индивидуально подтверждённым записям, а не вносят вручную после прослушивания. Тогда одни и те же метки используются для карточек, подбора порогов и оценки качества. Подтверждение присутствия вида в единице не делает верной каждую детекцию внутри неё.

Один из вариантов последовательного отбора: (A) все детекции; (B) видо-дни, в которых присутствие подтверждено хотя бы одной проверенной записью; (C) непроверенные детекции этих видо-дней не ниже видового порога, без известных ложных; (D) все индивидуально подтверждённые записи, включая записи ниже порога. Для каждой строки сохраняется основание включения. Сходные процедуры подтверждения на уровне вида и площадки применяются при составлении видовых списков [5], [17].

В данных по Ярославской области (2026 г., восемь переносных станций BirdNET-Pi, 831 тыс. детекций, около 17 тыс. ручных проверок [75]) фильтр подтверждённого присутствия при неизменных порогах исключил 17,7 % видо-дней, прошедших порог, однако 97 % исключённых детекций пришлись на видо-дни, в которых данный вид вообще не проверялся. Следовательно, такой фильтр отражает прежде всего охват проверки, а не число устранённых ошибок. Для карточек атласа и видовых списков это приемлемо; при анализе сезонной и суточной активности результат начинает воспроизводить распределение проверок по видам и датам, поэтому приводят охват проверки по видам и месяцам и сравнивают результаты с фильтром и без него.

Литература: [5], [17], [51], [75].

30. Объём экспертной проверки

Универсального объёма проверки нет: при малой доле ошибок для уверенного вывода требуется больше наблюдений, а для редких видов часто возможно проверить все кандидаты. Проверка охватывает сезоны, местообитания, типы сигналов и диапазоны score. Результат приводят с числом проверенных случаев («из 30 случайно выбранных кандидатов подтверждены 28») и интервалом неопределённости — по методу Уилсона, при малых выборках — Клоппера–Пирсона. Для 28 из 30 доля составляет 93 % с 95-процентным интервалом примерно 79–98 % [22], [28].

В работе Petry et al. [31] на 31 европейском виде оценивали, сколько размеченных срабатываний нужно, чтобы временные оценки активности перестали зависеть от размера выборки; компромиссом между трудозатратами и надёжностью названы около 90 образцов на вид при эталоне в 100 размеченных срабатываний (в препринте приводилось: в среднем 57, в наиболее требовательном случае 90). Это эмпирический результат одного дизайна, а не стандарт.

Для собственной сети приводят доверительный интервал precision, долю неразрешённых записей и распределение проверок по ключевым стратам. Если большинство проверенных кандидатов относится к одному месяцу, высокая общая precision не доказывает такой же надёжности, например, зимних регистраций. Для сравнения двух местообитаний проверку проводят в обоих.

Литература: [22], [28], [31].

31. Оценка пропущенных сигналов

Ложноотрицательные результаты выявляют только прослушиванием фрагментов, отобранных независимо от классификатора: случайных отрезков или периодов непрерывной записи. Эксперт размечает все сигналы, а разметку сравнивают с выходом модели по заранее определённому правилу

сопоставления событий и объединения окон [21]. Особое внимание уделяют тихим сигналам, перекрывающимся голосам и видам, которые модель систематически путает.

В крупных программах ручное прослушивание ведут по единому протоколу: прослушивают случайно выбранные записи, стратифицированные по сезону и времени суток, и отмечают виды (иногда и число особей) по минутам; так организована работа одного из крупнейших акустических архивов — более 20 тыс. точек в Альберте (Канада) [62]. Для стратифицированного отбора записей существуют готовые инструменты, например R-пакет ARUtools [61]. Объём данных таких программ достигает десятков терабайт за полевой сезон.

Высокая доля пропусков не обязательно обесценивает данные: для карт подтверждённых находок она допустима, но для сравнения абсолютной интенсивности вокализации требует оговорок или поправок.

Литература: [21], [61], [62].

32. Экспертная идентификация сложных сигналов

Эксперт прослушивает не только выделенное окно, но и несколько секунд до и после него: это позволяет увидеть повторность, последовательность сигналов, соседние голоса и шум [21]. Спектрограмма помогает различить форму сигнала, повторения и перекрывающиеся голоса, но сама по себе не определяет вид: шум и артефакты записи могут давать сходный рисунок. Решение основывается на сочетании слухового впечатления, формы и длительности сигнала, контекста и известных вариантов вокализации.

Для редких находок сохраняют более длинный звуковой контекст и получают второе независимое мнение. Неуверенные случаи помечают отдельно, не превращая их в TP или FP. При участии нескольких экспертов согласие между ними оценивают на общей выборке (например, коэффициентом к Коэна), а спорные случаи разбирают совместно.

Литература: [21].

33. Агрегация регистраций и риск ложного присутствия

Один сигнал может занимать несколько соседних окон, особенно при перекрытии, поэтому строки классификатора не считают отдельными сигналами. Агрегацию выполняют последовательно: от предсказаний к звуковым эпизодам (по заранее указанному правилу объединения окон и допустимому разрыву), затем к фиксированным интервалам, суткам и размещениям [43]. Число положительных 10-минутных интервалов — это число интервалов, в которых найден хотя бы один подтверждённый сигнал вида, а не число сигналов, особей или независимых встреч. Размер интервала выбирают заранее и проверяют устойчивость результата к альтернативным значениям.

Агрегация усиливает влияние ложных срабатываний: если вероятность ошибки в окне мала, но окон тысячи, вероятность хотя бы одного ложного указания вида за сутки или сезон становится заметной, и единственное ошибочное срабатывание делает «положительным» весь период. Поэтому качество присутствия оценивают отдельно на единице «вид × участок × дата», а срабатывания, создающие новые видо-дни, крайние даты и необычные сочетания места и времени, проверяют вручную до агрегации. Фильтр серий снижает долю ошибок, но может исключить настоящие одиночные миграционные позывки; анализ повторяют при нескольких правилах допуска.

Автоматически построенный региональный список видов без оценки ошибок распознавания не является доказанным фаунистическим списком; в публикации указывают, как подтверждались неожиданные находки.

Литература: [43].

34. Оценка плотности сигналов без порога

При пороговом подходе доли ложных срабатываний и пропусков могут различаться между участками, сезонами и уровнями шума, и изменение числа детекций может отражать изменение ошибок классификатора, а не активности птиц. Альтернатива — прямая оценка плотности сигналов (call density), то есть доли звуковых окон, содержащих сигнал вида, независимо от score [29]. Все окна распределяют по интервалам score (обычно логарифмическим), в каждом интервале проверяют небольшую случайную выборку и по долям подтверждений пересчитывают общую долю окон с сигналом.

Метод требует сохранения всех окон с их score, включая низкие (разд. 21), и проверки во всех интервалах score. Его ограничения: оценки чувствительны к числу проверок в малочисленных интервалах, особенно при низкой доле окон с сигналом; при сравнении участков с разными условиями распределение score для верных и ложных срабатываний может различаться и требует проверки в каждой группе либо моделирования; плотность сигналов характеризует вокальную активность, а не численность. Подход наиболее полезен для сравнений активности, когда пороговые показатели дают смещённую картину.

Литература: [29].

35. Усилие и интерпретация нулей

Для сравнения мест и периодов необходимы сведения о времени, когда прибор работал и мог зарегистрировать вид [66], [52]. Знаменатель (часы записи, полные сутки или пригодные интервалы) соответствует выбранному показателю; доля положительных интервалов рассчитывается только относительно фактически обследованных интервалов. 300 регистраций в мае и 100 в апреле несопоставимы, если в мае работало втрое больше устройств.

Нули имеют установленное происхождение. «Вид не обнаружен при доказанно работавшей записи» отличается от «нет строк в базе детекций» и от «интервал не обследован»; последний случай — отсутствующее наблюдение, а не экологический ноль. Если закончилось питание, неисправен микрофон или вид не входил в список поиска, это пропуск данных. В таблице анализа целесообразно поле статуса усилия с категориями «подтверждённое», «реконструированное» и «неизвестное»; отрицательные наблюдения используют только там, где отсутствие обнаружения действительно наблюдалось.

Рекомендуемая проверка чувствительности: повторить расчёт на полном массиве с реконструированным усилием, на подмножестве с независимо подтверждённой работой и при альтернативных правилах реконструкции. Заменять неизвестную продолжительность средним значением по устройствам нельзя.

Литература: [52], [66].

36. Модели занятости (occupancy)

Модели занятости разделяют вероятность присутствия и вероятность обнаружения при присутствии; они требуют повторных обследований и допущения о неизменности состояния участка в рассматриваемый период [26]. В РАМ смысл «занятости» требует определения: голос может принадлежать птице, пролетающей над точкой или находящейся за пределами участка. Предварительно формулируют экологическое состояние — «использует участок», «вокализирует в зоне слышимости», «пролетает над точкой» — и не отождествляют его с гнездованием [53].

Стандартная модель занятости предполагает отсутствие ложных определений, поэтому к сырому выходу классификатора не применяется. Возможны три подхода. Первый — использовать только проверенные детекции: на примере примата показано, что проверка наиболее вероятных срабатываний (classifier-guided listening) вместе со стандартной моделью даёт точную оценку при небольшом объёме проверки [20]. Второй — модели, учитывающие ложноположительные ошибки; они сложнее и чувствительны к выбору порога [20], [9], [10]. Третий — включение в модель долей TP и FP, оценённых по размеченной выборке: для 13 видов оценки занятости по BirdNET со 100 проверенными трёхсекундными срабатываниями на вид были близки к оценкам по ручной разметке [11].

Литература: [9], [10], [11], [20], [26], [53].

37. Сравнение видового богатства

Обнаруженное видовое богатство зависит от продолжительности записи, числа точек, оборудования, условий слышимости и качества распознавания отдельных видов; более длительная запись почти всегда увеличивает число зарегистрированных редких видов [52]. Участки сравнивают при одинаковом или явно учтённом усилии, используя кривые накопления видов и проверку определений по группам видов [43].

Виды с тихими или редкими сигналами систематически недоучитываются. Результат «записано 50 видов» описывает акустически выявленный список при данном усилии и не означает отсутствия остальных видов.

Литература: [43], [52].

38. От акустической активности к численности

Поющие самцы различаются по громкости и частоте пения: одна птица может дать сотни срабатываний, несколько молчащих — ни одного. Поэтому частота регистраций характеризует вокальную активность и без дополнительных данных не пересчитывается в численность или плотность [35]. В описательных работах корректно указывать, что изучалась частота акустических регистраций при известном усилии. Для оценки численности используют специальные подходы, каждый из которых требует собственного полевого дизайна.

Парные учёты. На части точек наблюдатель проводит точечный учёт одновременно с записью рекордера; по таким парам оценивают поправку — отношение эффективных радиусов обнаружения рекордера и наблюдателя — и применяют её к точкам, где работал только рекордер. В бореальных лесах Канады такая поправка устранила систематическое расхождение учётов для 35 видов [48]; опубликованы и поправки, согласующие разные модели рекордеров между собой и с наблюдателем [55]. Совмещение методов особенно выгодно для редких видов: в модельной работе по виргинской куропатке оно было наиболее экономичной стратегией при плотности ниже 1,7 особи/га [25].

Подсчёт сигналов (cue counting). Плотность оценивают как плотность сигналов на единицу площади и времени, делённую на среднюю частоту сигналов одной особи. Частоту пения измеряют в тех же условиях: у жаворонка Дюпона частота, оценённая по записям открытой фонотеки, оказалась намного выше полевой, и численность была занижена на 41 % [33].

Массивы микрофонов и пространственный отлов–повторный отлов (SECR). По распределению одновременных обнаружений сигнала несколькими синхронизированными микрофонами, а при возможности и по уровню сигнала или времени его прихода, оценивают плотность вокализирующих

особей; при пространственных повторах достаточны небольшие массивы из двух–четырёх микрофонов [16]. Метод требует точной синхронизации времени и продуманной геометрии размещения.

Литература: [16], [25], [33], [35], [48], [55].

39. Индивидуальная идентификация по голосу

У многих видов вокализации индивидуальны и устойчивы во времени, что позволяет распознавать отдельных птиц по записям и строить истории повторных регистраций без отлова и мечения. Это перспективное направление открывает возможность оценки численности методами отлова–повторного отлова и оценки выживаемости. В препринте 2025 г. для 405 особей золотоголового пеночкового певуна по песне построены четырёхлетние истории повторных регистраций и оценены численность и годовая выживаемость [57]. Для полосатой неясыти показана возможность различать особей по детекциям BirdNET на записях автономных рекордеров [44]. В условиях России вероятные модельные объекты — совы, коростель, выпь.

Ограничения: требуются высокое отношение сигнал/шум и достаточная длительность сигналов; модель, обученная в одной популяции или в один год, может не переноситься на другие; необходимы методы распознавания ранее не встречавшихся особей и оценка согласия экспертов при ручной разметке особей.

Литература: [44], [57].

40. Сезонность и фенология

Сезонная кривая регистраций отражает как появление и исчезновение птиц, так и изменение их вокальной активности; кроме того, классификатор может по-разному распознавать сезонно различающиеся типы сигналов [8]. Поэтому первая регистрация голоса не равна дате прилёта, а последняя — дате отлёта: вид мог присутствовать молча, прибор мог ещё не работать на подходящем участке, тихий сигнал мог быть пропущен. Сезонные изменения состава видов анализируют отдельно от изменений типа вокализации: например, весеннее «бухание» выпи и её осенние полётные позывки имеют разную структуру и обнаруживаемость [52], [47].

Для сравнения месяцев используют нормирование на фактическое усилие в сравниваемых временных классах, единую астрономическую шкалу, сравнение распределения усилия по типам покрова и проверку зависимости результата от длительности размещений. Необычно ранние и поздние одиночные регистрации проверяют отдельно. При недостаточном пространственно-временном перекрытии выводы ограничивают обследованными точками; изменения акустической активности не отождествляют с числом прилетевших или отлетевших птиц.

Литература: [8], [47], [52].

41. Ночная миграция и полётные позывки

Ночные полётные позывки (NFC) позволяют регистрировать мигрантов, недоступных дневным учётам, но птица, подавшая голос над микрофоном, может не останавливаться на участке. Для анализа определяют интервал ночи, типы сигналов, относимые к пролётным, и надёжность их распознавания: некоторые позывки сходны у разных видов и отличаются от песен, на которых в основном обучены модели. Неожиданные определения проверяют прослушиванием [47], [30].

Число позывок не является счётчиком пролетающих особей: птицы кричат с разной частотой, часть летит молча, высота полёта влияет на слышимость. Результат формулируют как интенсивность акустических

регистраций ночного пролёта. Большинство славковых Старого Света, по-видимому, мигрируют ночью молча, тогда как дрозды, овсянки, трясогузки и кулики кричат часто; поэтому в Европе доля регистрируемых воробьиных мигрантов меньше, чем в Северной Америке, и состав регистраций смещён к «разговорчивым» группам [74].

Интенсивность пролёта по метеорадарам и по акустическим регистрациям согласуется лишь частично: в Финляндии связь была лучше весной для всех видов вместе, а осенью — для воробьиных, причём хорошо согласовывались данные по часто кричащим видам, певчему дрозду и белобровику [49]. Акустические данные полезны как источник видового состава для радарных оценок. Классификатор Nighthawk разработан для Америки [46]; для Европы опубликован открытый набор записей ночных мигрантов [3]. Результаты проверки одной территории не переносят на другую без собственной разметки.

Литература: [3], [30], [46], [47], [49], [74].

42. Акустические индексы

Акустические индексы сводят свойства звукового фона к одному или нескольким числам, например характеризуют распределение энергии по частотам или скорость её изменения, что позволяет быстро сравнивать большие архивы [6], [7]. Однако значение индекса может расти от птичьего хора, насекомых, дождя или механического шума, поэтому индекс сам по себе не является мерой видового богатства, численности или качества местообитания.

Перед интерпретацией проверяют, какие звуки определяют индекс в изучаемых местообитаниях и сезонах, и сопоставляют его с размеченными данными. В публикации указывают математический смысл индекса и не приписывают ему биологической интерпретации, не подтверждённой данными.

Литература: [6], [7].

43. Визуализация и статистические модели

Сложная модель не исправляет несопоставимую полевую выборку. Перед моделированием строят простые графики: сколько устройств работало в каждом месяце, какие местообитания представлены, сколько независимых участков приходится на каждую группу [54]. В моделях учитывают вложенность данных (интервалы в сутках, сутки в размещениях, размещения на участках) и ковариаты — дату, время ночи, местообитание, погоду и комплект оборудования; добавление многих переменных при малом числе размещений не повышает надёжность [28].

Сглаженные кривые и тепловые карты показывают область эмпирической поддержки: максимум на дистанции 5 км не интерпретируют, если в соседних классах одно-два независимых размещения. На тепловых картах активности согласуют нормировку цветовой шкалы и единицы усилия и различают пустые ячейки (нет обследования) и нулевые (обследование было, сигналов нет).

При стандартизации по местообитаниям указывают целевое распределение весов: фактическое для региона, равное или иное заранее заданное. Предсказания для сочетаний категорий, отсутствующих в данных, являются экстраполяцией и графически отделяются от наблюдаемых сравнений.

Литература: [28], [54].

44. Анализ чувствительности

Устойчивый вывод сохраняет основной смысл при разумном изменении рабочих решений: другого порога score, исключения сомнительных регистраций, иной длительности интервала, исключения

отдельных влиятельных размещений [43]. Альтернативные варианты определяют заранее и ограничивают научно обоснованными; перебор многих вариантов ради наиболее выразительного или статистически значимого результата недопустим.

Приводят диапазон результатов и указывают, какие решения на них влияют. Если вывод исчезает после исключения одного прибора, это не обязательно ошибка, но существенное ограничение, которое обсуждается в работе.

Литература: [43].

45. Архивирование, структура данных и воспроизводимость

Через несколько лет должно быть возможно восстановить происхождение каждой опубликованной цифры. Для этого архивируют исходные выгрузки детекций, метаданные размещений, сведения о фактическом времени работы, результаты экспертной проверки на уровне отдельных детекций (с проверяющим и способом отбора), параметры обработки, правила фильтрации и код, воспроизводящий итоговые таблицы и графики. При обновлении модели или изменении правил создают новую версию результата, а не перезаписывают прежнюю.

Каждый исходный файл имеет постоянный идентификатор, дату, часовой пояс, параметры дискретизации и по возможности контрольную сумму. Таблица размещений содержит идентификаторы устройства, потока, участка и размещения, координаты, тип установки, время начала и окончания, основание определения усилия и статус качества; таблица классификации — версию модели и географического фильтра, порог, overlap, score и точные временные метки; таблица проверки — идентификатор кандидата, статус (TP, FP, «неопределённо»), проверяющего, способ отбора и тип сигнала. У итоговых выборок сохраняют основание включения каждой строки (разд. 29).

Вместо собственной схемы таблиц целесообразно использовать разрабатываемый стандарт данных PAM на основе Camtrap DP (таблицы размещений, медиафайлов и наблюдений) [71]; для публикации в GBIF используют Darwin Core и соответствующее руководство [68], различая подтверждённую встречу и техническое срабатывание классификатора и документируя усилие и отрицательные наблюдения. Структуру данных полезно сверить с существующими инфраструктурами — ARBIMON [2], Australian Acoustic Observatory [36], ecoSound-web [15], TABMON [12] и WildTrax [62]; практические рекомендации для природоохранных проектов собраны в обзоре [42]. Если полный аудиоархив не публикуется, указывают условия его доступности.

Литература: [2], [12], [15], [36], [42], [62], [68], [71].

Литература

Источники разделены на три группы; нумерация сквозная. Рабочие материалы и препринты не прошли рецензирование, и приведённые по ним сведения следует рассматривать как предварительные.

Рецензируемые публикации

[1] Уколов ИИ, Салов АА, Насонова СО, Русол ВА, Нецветаев ВА, Невский МА, Садыкова МВ, Баженова И (2026). Опыт применения пассивного акустического мониторинга для оценки суточных и сезонных закономерностей вокальной активности лесных птиц Центральной России. Русский орнитологический журнал 35(2592):608–614.

[2] Aide TM, Corrada-Bravo C, Campos-Cerqueira M, Milan C, Vega G, Alvarez R (2013). Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification. PeerJ 1:e103. https://doi.org/10.7717/peerj.103

[3] Airale et al. (2026). An open dataset for acoustic monitoring of nocturnal migratory birds in Europe. Scientific Data. https://doi.org/10.1038/s41597-026-07176-5

[4] Allen-Ankins S, Hoefer S, Bartholomew J, Brodie S, Schwarzkopf L (2025). The use of BirdNET embeddings as a fast solution to find novel sound classes in audio recordings. Frontiers in Ecology and Evolution 12:1409407. https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1409407

[5] Balantic C, Donovan TM (2019). Dynamic wildlife occupancy models using automated acoustic monitoring data. Ecological Applications 29(3):e01854. https://doi.org/10.1002/eap.1854

[6] Bradfer-Lawrence T et al. (2019). Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research. Methods in Ecology and Evolution. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13254

[7] Bradfer-Lawrence T et al. (2023). Using acoustic indices in ecology: guidance. Methods in Ecology and Evolution. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14194

[8] Chiatante G, Canestrelli D (2026). Temporal dynamics of animal vocal behavior affect semi-automatic identifications. Ecological Processes 15:4. https://doi.org/10.1186/s13717-025-00664-3

[9] Clare JDJ, Townsend PA, Zuckerberg B (2021). Generalized model-based solutions to false-positive error in species detection/nondetection data. Ecology 102:e03241. https://doi.org/10.1002/ecy.3241

[10] Clement M, Royle JA, Mixan R (2022). Estimating occupancy from autonomous recording unit data in the presence of misclassifications and detection heterogeneity. Methods in Ecology and Evolution 13(8). https://doi.org/10.1111/2041-210X.13895

[11] Cole JS, Michel NL, Emerson SA, Siegel RB (2022). Automated bird sound classifications of long-duration recordings produce occupancy model outputs similar to manually annotated data. Ornithological Applications 124(2):duac003. https://doi.org/10.1093/ornithapp/duac003

[12] Cretois B, Rosten CM, Wiel J et al. (2026). TABMON: design and deployment of a transnational passive acoustic monitoring network for European birds. Methods in Ecology and Evolution 17(6):1867–1879. https://doi.org/10.1111/2041-210X.70308

[13] Darras K et al. (2018). Comparing the sampling performance of sound recorders versus point counts in bird surveys: a meta-analysis. Journal of Applied Ecology. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13229

[14] Darras K et al. (2019). Autonomous sound recording outperforms human observation for sampling birds: a systematic map and user guide. Ecological Applications. https://doi.org/10.1002/eap.1954

[15] Darras KFA et al. (2024). ecoSound-web: an open-source, online platform for ecoacoustics [version 3]. F1000Research 9:1224. https://doi.org/10.12688/f1000research.26369.3

[16] Dawson DK, Efford MG (2009). Bird population density estimated from acoustic signals. Journal of Applied Ecology 46:1201–1209.

[17] Fairbairn AJ, Burmeister J-S, Weisser WW, Meyer ST (2025). BirdNET can be as good as experts for acoustic bird monitoring in a European city. PLOS ONE 20(9):e0330836. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0330836

[18] Funosas D, Sebastián-González E, Morant J et al. (2026). A global assessment of BirdNET performance: differences among continents, biomes, and species. Ecological Indicators 182:114550. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114550

[19] Kahl S, Wood CM, Eibl M, Klinck H (2021). BirdNET: a deep learning solution for avian diversity monitoring. Ecological Informatics 61:101236. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101236

[20] Katsis LKD, Rhinehart TA, Dorgay E, Sanchez EE, Snaddon JL, Doncaster CP, Kitzes J (2025). A comparison of statistical methods for deriving occupancy estimates from machine learning outputs. Scientific Reports 15:14700. https://doi.org/10.1038/s41598-025-95207-3

[21] Knight EC et al. (2017). Recommendations for acoustic recognizer performance assessment with application to five common automated signal recognition programs. Avian Conservation and Ecology 12(2):14. https://ace-eco.org/vol12/iss2/art14/

[22] Knight EC et al. (2020). Validation prediction: a flexible protocol to increase efficiency of automated acoustic processing for wildlife research. Ecological Applications. https://doi.org/10.1002/eap.2140

[23] Knight EC, Bayne EM (2019). Classification threshold and training data affect the quality and utility of focal species data processed with automated audio-recognition software. Bioacoustics 28(6):539–554. https://doi.org/10.1080/09524622.2018.1503971

[24] Lapp S, Stahlman N, Kitzes J (2023). A quantitative evaluation of the performance of the low-cost AudioMoth acoustic recording unit. Sensors 23:5254. https://par.nsf.gov/servlets/purl/10478417

[25] Lewis WB, Johnson C, Martin JA (2025). Assessing the efficacy and cost-effectiveness of integrating autonomous recording units and point-count surveys for population monitoring of northern bobwhite. Ecological Solutions and Evidence 6(2). https://doi.org/10.1002/2688-8319.70056

[26] MacKenzie DI et al. (2002). Estimating site occupancy rates when detection probabilities are less than one. Ecology 83:2248–2255. https://www.usgs.gov/publications/estimating-site-occupancy-rates-when-detection-probabilities-are-less-one

[27] McGinn K, Kahl S, Peery MZ, Klinck H, Wood CM (2023). Feature embeddings from the BirdNET algorithm provide insights into avian ecology. Ecological Informatics 74:101995. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.101995

[28] Metcalf OC et al. (2022). Detecting and reducing heterogeneity of error in acoustic classification. Methods in Ecology and Evolution. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13967

[29] Navine AK, Denton T, Weldy MJ, Hart PJ (2024). All thresholds barred: direct estimation of call density in bioacoustic data. Frontiers in Bird Science 3:1380636. https://doi.org/10.3389/fbirs.2024.1380636

[30] Osterhaus et al. (2025). A call in the dark: nocturnal flight calls. Ornithology. https://doi.org/10.1093/ornithology/ukaf002

[31] Petry P, Carruthers-Jones J, Desjonquères C, Nesenhöner ML, Raymond CM (2026). Framework for consistent BirdNET detection labelling to prevent biases in downstream community predictions. Ecological Indicators 185:114794. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2026.114794

[32] Pérez-Granados C (2023). BirdNET: applications, performance, pitfalls and future opportunities. Ibis 165:1068–1075. https://doi.org/10.1111/ibi.13193

[33] Pérez-Granados C, Barrero A, Traba J, Bustillo-de la Rosa D, Reverter M, Gómez-Catasús J (2021). Assessment of cue counting for estimating bird density using passive acoustic monitoring: recommendations for estimating a reliable cue rate. Avian Conservation and Ecology 16(1):11. https://doaj.org/article/9c1a3fe569fe4941ac2f0288c489e439

[34] Pérez-Granados C, Funosas D, Morant J et al. (2026). Optimization of passive acoustic bird surveys: a global assessment of BirdNET settings. Ibis 168(2):785–798. https://doi.org/10.1111/ibi.70013

[35] Pérez-Granados C, Traba J (2021). Estimating bird density using passive acoustic monitoring. Ibis. https://doi.org/10.1111/ibi.12944

[36] Roe P et al. (2021). The Australian Acoustic Observatory. Methods in Ecology and Evolution 12(10):1802–1808. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13660

[37] Scanferla J, Brambilla M, Brambilla G, Hilpold A, Marchetti AE, Puff F, Tappeiner U, Anderle M (2025). Determining species-specific thresholds to improve precision in passive acoustic monitoring. Ecological Informatics 91:103423. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103423

[38] Sethi SS et al. (2024). Large-scale avian vocalization detection delivers reliable global biodiversity insights. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 121:e2315933121. https://doi.org/10.1073/pnas.2315933121

[39] Shonfield J, Bayne EM (2017). Autonomous recording units in avian ecological research: current use and future applications. Avian Conservation and Ecology 12(1):14. https://doi.org/10.5751/ACE-00974-120114

[40] Singer D, Hagge J et al. (2024). Aggregated time-series features boost species-specific differentiation of true and false positives in passive acoustic monitoring of bird assemblages. Remote Sensing in Ecology and Conservation. https://doi.org/10.1002/rse2.385

[41] Sugai LSM, Desjonquères C, Silva TSF, Llusia D (2020). A roadmap for survey designs in terrestrial acoustic monitoring. Remote Sensing in Ecology and Conservation 6(3):220–235. https://doi.org/10.1002/rse2.131

[42] Teixeira D, Roe P, van Rensburg BJ, Linke S, McDonald PG, Tucker D, Fuller S (2024). Effective ecological monitoring using passive acoustic sensors: recommendations for conservation practitioners. Conservation Science and Practice 6(6):e13132. https://doi.org/10.1111/csp2.13132

[43] Thompson MC, Ducey MJ, Gunn JS, Rowe RJ (2025). A post-processing framework for assessing BirdNET identification accuracy and community composition. Ibis 167(2):530–542. https://doi.org/10.1111/ibi.13357

[44] Tseng S, Hodder DP, Otter KA (2024). Using autonomous recording units for vocal individuality: insights from Barred Owl identification. Avian Conservation and Ecology 19(1):23. https://doi.org/10.5751/ACE-02680-190123

[45] Turgeon PJ, Van Wilgenburg SL, Drake KL (2017). Microphone variability and degradation: implications for monitoring programs employing autonomous recording units. Avian Conservation and Ecology 12(1):9. https://ace-eco.org/vol12/iss1/art9/

[46] Van Doren BM et al. (2024). Nighthawk: acoustic monitoring of nocturnal bird migration in the Americas. Methods in Ecology and Evolution. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14272

[47] Van Doren BM, Lostanlen V, Cramer A, Salamon J, Dokter A, Kelling S, Bello JP, Farnsworth A (2023). Automated acoustic monitoring captures timing and intensity of bird migration. Journal of Applied Ecology. https://doi.org/10.1111/1365-2664.14342

[48] Van Wilgenburg SL, Sólymos P, Kardynal KJ, Frey MD (2017). Paired sampling standardizes point count data from humans and acoustic recorders. Avian Conservation and Ecology 12(1). https://doaj.org/article/ea2d1bac131e42bb8d002cb4e0e98b21

[49] Weisshaupt N, Saari J, Koistinen J (2024). Evaluating the potential of bioacoustics in avian migration research by citizen science and weather radar observations. PLOS ONE 19(3):e0299463. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299463

[50] Winiarska D et al. (2024). Detection ranges of forest bird vocalisations: guidelines for passive acoustic monitoring. Scientific Reports. https://doi.org/10.1038/s41598-024-51297-z

[51] Wood CM, Kahl S (2024). Guidelines for appropriate use of BirdNET scores and other detector outputs. Journal of Ornithology 165(3):777–782. https://doi.org/10.1007/s10336-024-02144-5

[52] Wood CM, Kahl S, Chaon P, Peery MZ, Klinck H (2021). Survey coverage, recording duration and community composition affect observed species richness in passive acoustic surveys. Methods in Ecology and Evolution 12(5):885–896. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13571

[53] Wood CM, Peery MZ (2022). What does 'occupancy' mean in passive acoustic surveys? Ibis 164:1295–1300. https://doi.org/10.1111/ibi.13092

[54] Wood CM, Popescu VD, Klinck H, Keane JJ, Gutiérrez RJ, Sawyer SC, Peery MZ (2019). Detecting small changes in populations at landscape scales: a bioacoustic site-occupancy framework. Ecological Indicators 98:492–507. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.018

[55] Yip DA, Leston L, Bayne EM, Sólymos P, Grover A (2017). Experimentally derived detection distances from audio recordings and human observers enable integrated analysis of point count data. Avian Conservation and Ecology 12(1):11. https://doi.org/10.5751/ACE-00997-120111

Препринты

[56] acoupi: an open-source Python framework for deploying bioacoustic AI models on edge devices (2025). arXiv:2501.17841. https://arxiv.org/abs/2501.17841

[57] Automated identification of individual birds by song enables multi-year recapture from passive acoustic monitoring data (2025). bioRxiv. https://doi.org/10.1101/2025.06.26.661638

[58] Dogan H. Improved detection of bird vocalisations using BirdNET embeddings and machine learning. engrXiv. https://doi.org/10.31224/4466

[59] Dumoulin V, Stretcu O, Hamer J et al. (2025). The Search for Squawk: agile modeling in bioacoustics. arXiv:2505.03071. https://arxiv.org/abs/2505.03071

[60] van Merriënboer B, Dumoulin V, Hamer J, Harrell L, Burns A, Denton T (2025). Perch 2.0: the bittern lesson for bioacoustics. arXiv:2508.04665. https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.04665

Руководства, техническая документация и рабочие материалы

[61] ARUtools: management and processing of autonomous recording unit (ARU) data. Пакет R. https://arutools.r-universe.dev/ARUtools/doc/manual.html

[62] Bioacoustic Unit (University of Alberta, ABMI) и платформа WildTrax. https://abmi.ca/abmi-home/working-together/projects-collaborations/bioacoustic-unit

[63] BirdNET Team (2025). BirdNET+ V3.0 model developer preview. Zenodo. https://zenodo.org/record/17571190

[64] BirdNET Team. BirdNET-Analyzer: документация к интерфейсу командной строки и графическому интерфейсу. https://birdnet-team.github.io/BirdNET-Analyzer/stable/usage/cli.html

[65] BirdNET-Pi V3 (2026). Модифицированная версия BirdNET-Pi: BirdNET+ V3, режимы записи, ручная проверка; документация, замеры энергопотребления и полевое сравнение v2.4 и V3. Репозиторий GitHub. https://github.com/iiukolov-max/BirdNET-Pi_v3

[66] Browning E, Gibb R, Glover-Kapfer P, Jones KE (2017). Passive acoustic monitoring in ecology and conservation. WWF Conservation Technology Series 1(2). WWF-UK. https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2019-04/Acousticmonitoring-WWF-guidelines.pdf

[67] Cornell Lab of Ornithology (2025). AudioMoth standard operating procedure. https://www.birds.cornell.edu/landtrust/wp-content/uploads/2025/12/Audiomoth_SOP_12.25.pdf

[68] Ingenloff K et al. (2025). Guide for publishing biological survey and monitoring data to GBIF. GBIF Secretariat. https://docs.gbif.org/guide-publishing-survey-data/en/

[69] Metcalf O et al. (2023). Good practice guidelines for long-term ecoacoustic monitoring in the UK. UK Acoustics Network. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/534646/

[70] Open Acoustic Devices. AudioMoth configuration app guide. https://www.openacousticdevices.info/config-app-guide

[71] PAM-flow. Input data standards (pamDP — адаптация Camtrap DP для данных PAM). https://pamflow.readthedocs.io/en/latest/data_standardization/data_exchange_format.html

[72] PeerJ. Policies and procedures: camera traps, drones and passive acoustic monitoring. https://peerj.com/about/policies-and-procedures/cs

[73] Pérez-Granados C. Optimizing BirdNET: lessons from a global initiative (описание набора WABAD). British Ornithologists' Union, блог. https://bou.org.uk/blog-perez-granados-optimizing-birdnet-lessons-from-a-global-initiative/

[74] Robb M, van den Berg AB, Constantine M (2017). Acoustic monitoring of nocturnal migration in Europe. International Bird Observatory Conference II, Cape May (доклад). https://birdobservatories.com/international-conferences/iboc-ii-cape-may-2017/conference-programme/acoustic-monitoring

[75] RU-BIRDS. PAM (BirdNET-Pi): описание доработок и инструкция по работе с данными; данные ручной проверки 2026 г. (рукопись в подготовке). https://ru-birds.ru/pam/