



Лаборатория изучения
экологических функций
почв

Институт проблем экологии и
эволюции им. А.Н. Северцова
РАН



Недооцененные переносчики: мета-анализ роли почвенных беспозвоночных в циркуляции патогенов

Касаткина Анастасия Николаевна, аспирант, м.н.с.

1

Местообитание



Город



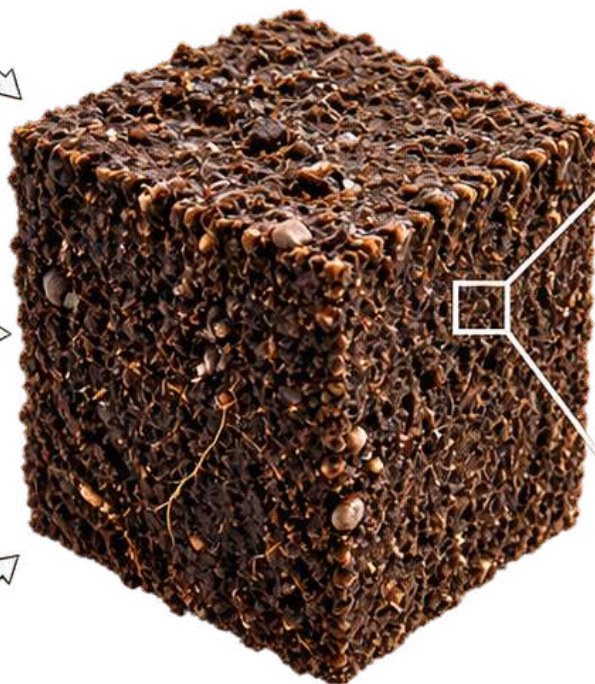
Сельхоз



Естественное

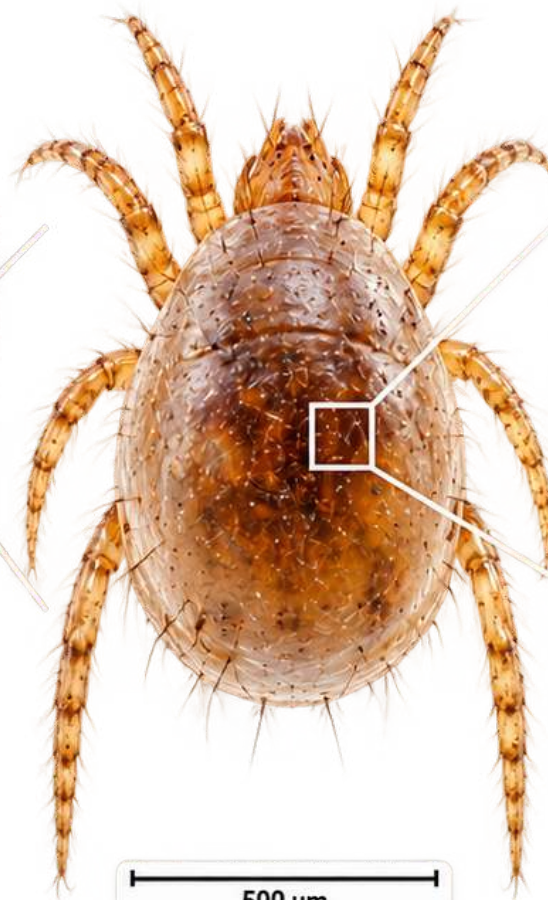
2

Почвенный образец



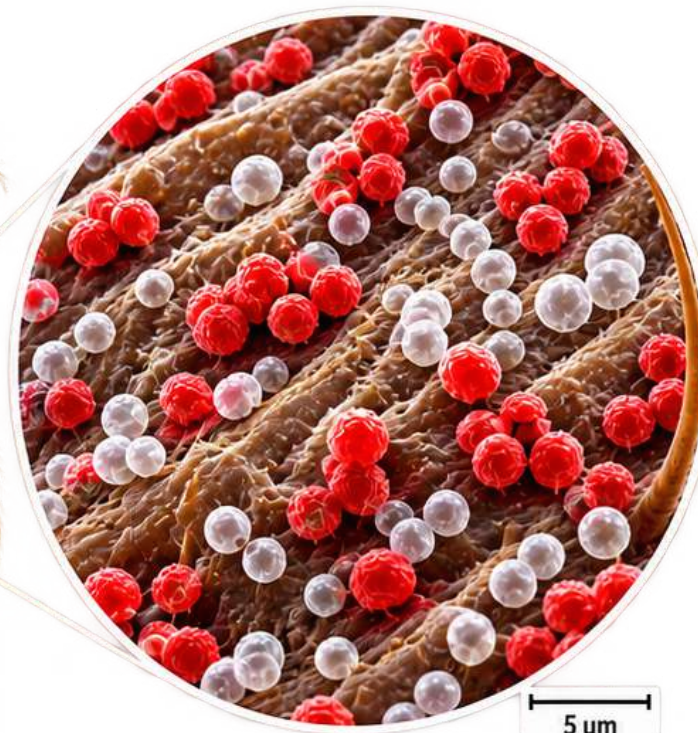
3

Почвенное животное

500 μm

4

Микробиом

5 μm 

Патогенные микроорганизмы

Комменсалы/транзитные
микроорганизмы

Перспективы изучения функций почв и почвенной multifunctionality

Концептуальные проблемы	Что такое «критические блоки»?	Связь трейты → процессы → функции	Масштабирование уровней организации	
Методологические проблемы	Стандартизация трейтов почвенной фауны	Измерение функций почвы	Связывание данных разных типов	
Данные и наблюдения	Недостаток данных по почвенной фауне	Cryptic (black) diversity	Контроль условий	Лабораторные эксперименты
Пространственно-временная динамика	Пространственная неоднородность	Временная изменчивость	Глобальные изменения	
Моделирование	Трофические взаимодействия	Нетрофические взаимодействия	Выбор типа моделей	Нелинейность и критические точки
Синтез	Универсальность vs контекст	Предсказательная сила	Управление экосистемами	

Почвенная фауна — недооценённый резервуар патогенов

Каждый четвёртый описанный вид животных на планете — это **почвенное беспозвоночное** (FAO, 2021).

Почвенные беспозвоночные играют **ключевую роль в функционировании экосистем**:

- разложение органического вещества;
- круговорот питательных элементов;
- формирование структуры почвы.

НО: они также могут быть вовлечены в **экосистемные дисфункции**, связанные с распространением почвенных патогенов (Montanarella et al., 2015; EASAC, 2018).

- Почвенные животные находятся на стыке: резервуары патогенов в почве ↔ человек.
- Потенциальное влияние на здоровье и агро-экосистемы — **слепое пятно**.

Цель и задачи

Цель: оценить распространённость потенциальных патогенов в микробиоме почвенных беспозвоночных и выявить факторы, влияющие на неё.

Задачи:

1. Систематизировать литературу о микроорганизмах, ассоциированных с почвенными беспозвоночными (PRISMA-систематический обзор).
2. Провести мета-анализ для количественной оценки распространённости доли потенциальных патогенов в микробиоме почвенных беспозвоночных.
3. Разработать консенсусную классификацию патогенности на основе трёх источников (авторские оценки, экспертные списки, PHI-base), для объективной оценки распространённости патогенов в микробиоме почвенных животных.
4. Оценить влияние экологических (степень антропогенеза, климат, группа хозяина) и методологических (метод детекции, локализация) факторов на распространённость подтверждённых патогенов.

Методы



Поиск и отбор литературных данных

Структура поискового запроса (базовая):

("name_invertebrate") AND ("microbiome" OR "gut microbiota" OR "surface microbiota") AND ("vector" OR "pathogenic") AND («soil»)

Базы данных: PubMed (n = 2090) + ScienceDirect & citation chaining (n = 210)

Фильтры: все исследовательские статьи за период 1980-2025 гг.

Критерии включения:

1. **Объект:** Не-гематофаги, контакт с почвой, беспозвоночные
2. **Среда:** Образцы из почвы (не лабораторные культуры).
3. **Методы:** Культуральные или молекулярные (есть таксономия).
4. **Тип публикации:** исследовательские статьи

Промежуточная методологическая цель:

На основе сведений из экспериментальных баз данных, собранных литературных данных и экспертных мнений составить «расширенный» список потенциальных почвенных патогенов и ранжировать их по степени консенсуса между источниками для последующего выявления таксонов, требующих приоритетной верификации.

Проверка факторов, влияющих на оценку доли патогенов

Зависимая переменная: доля патогенов (prevalence) по результатам мета-анализа

Независимые переменные (4 группы):

Группа	Факторы
Методологические	Метод детекции (культуральный / молекулярный), локализация (кишечник / поверхность / целый гомогенат)
Хозяин	Группа (macrofauna / mesofauna / microfauna)
Экологические	Степень урбанизации (естественная / сельхоз / город), климатическая зона
Контроль	Чувствительный анализ: только молекулярные, без синантропов, high-quality, байес

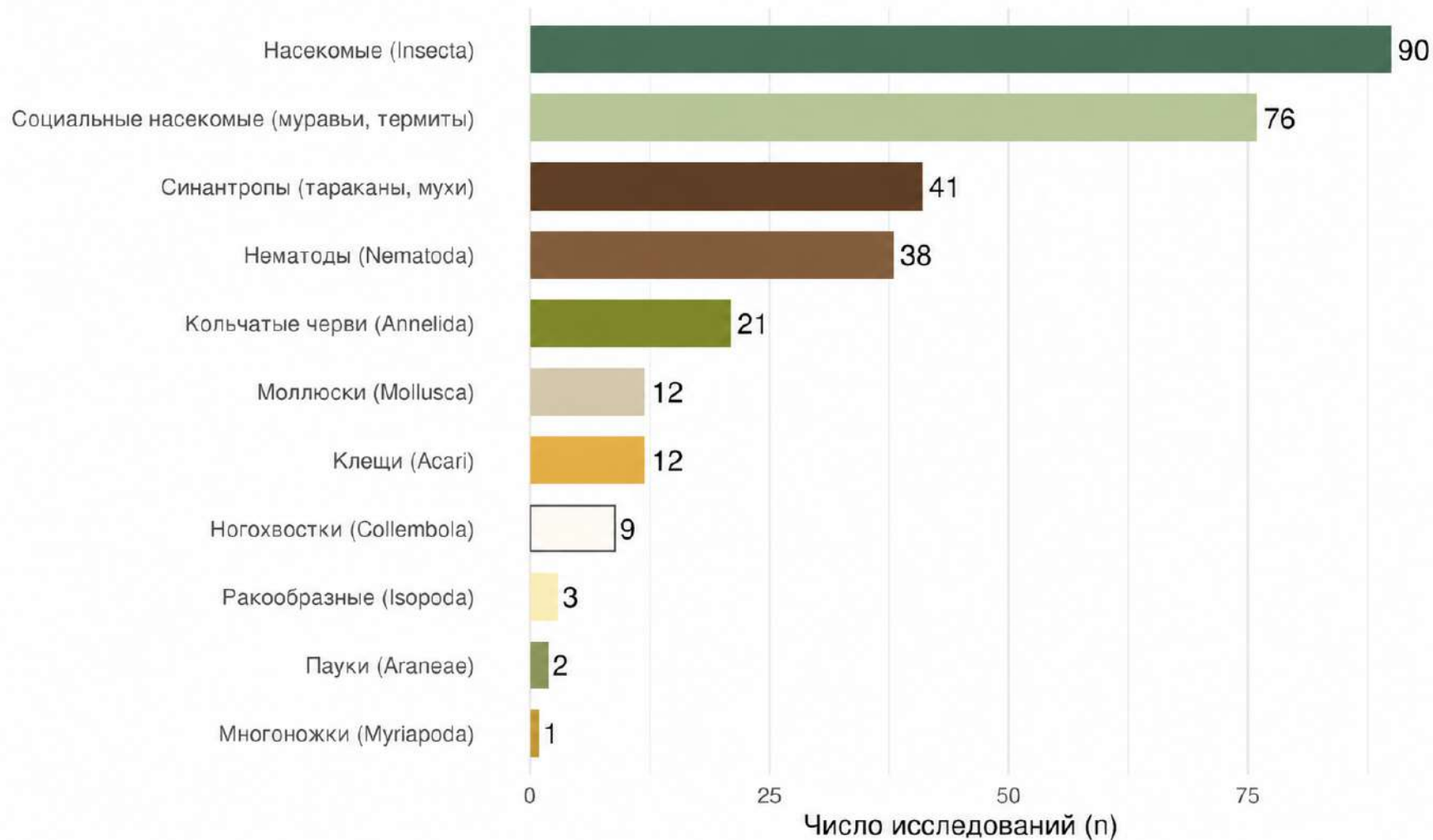
Метод: мета-регрессия (GLMM) + сравнение моделей по AIC

Результаты



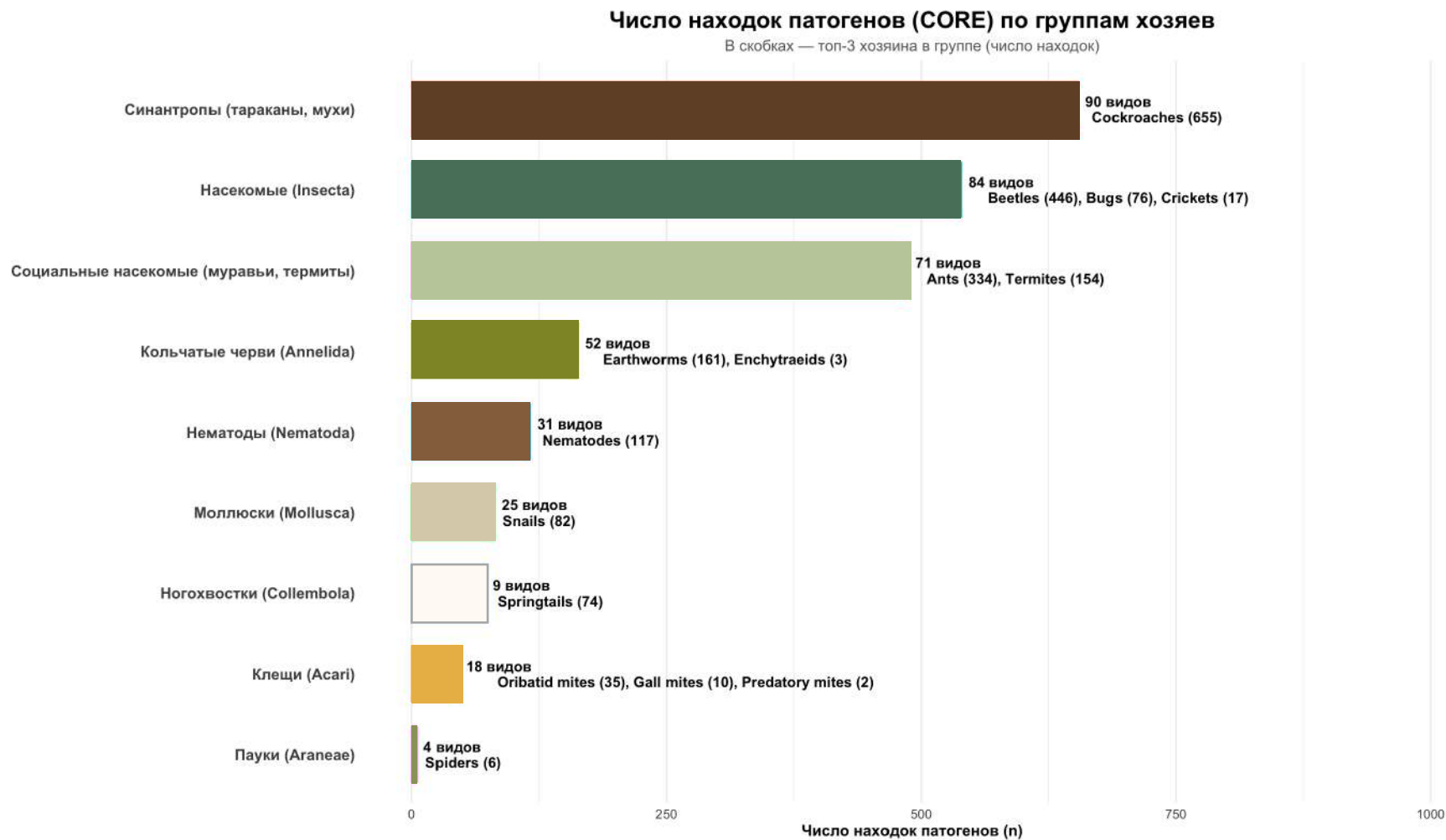
Какие почвенные животные попали в анализ?

Количество исследований по группам хозяев



- 36 типов беспозвоночных
- 292 уникальных вида

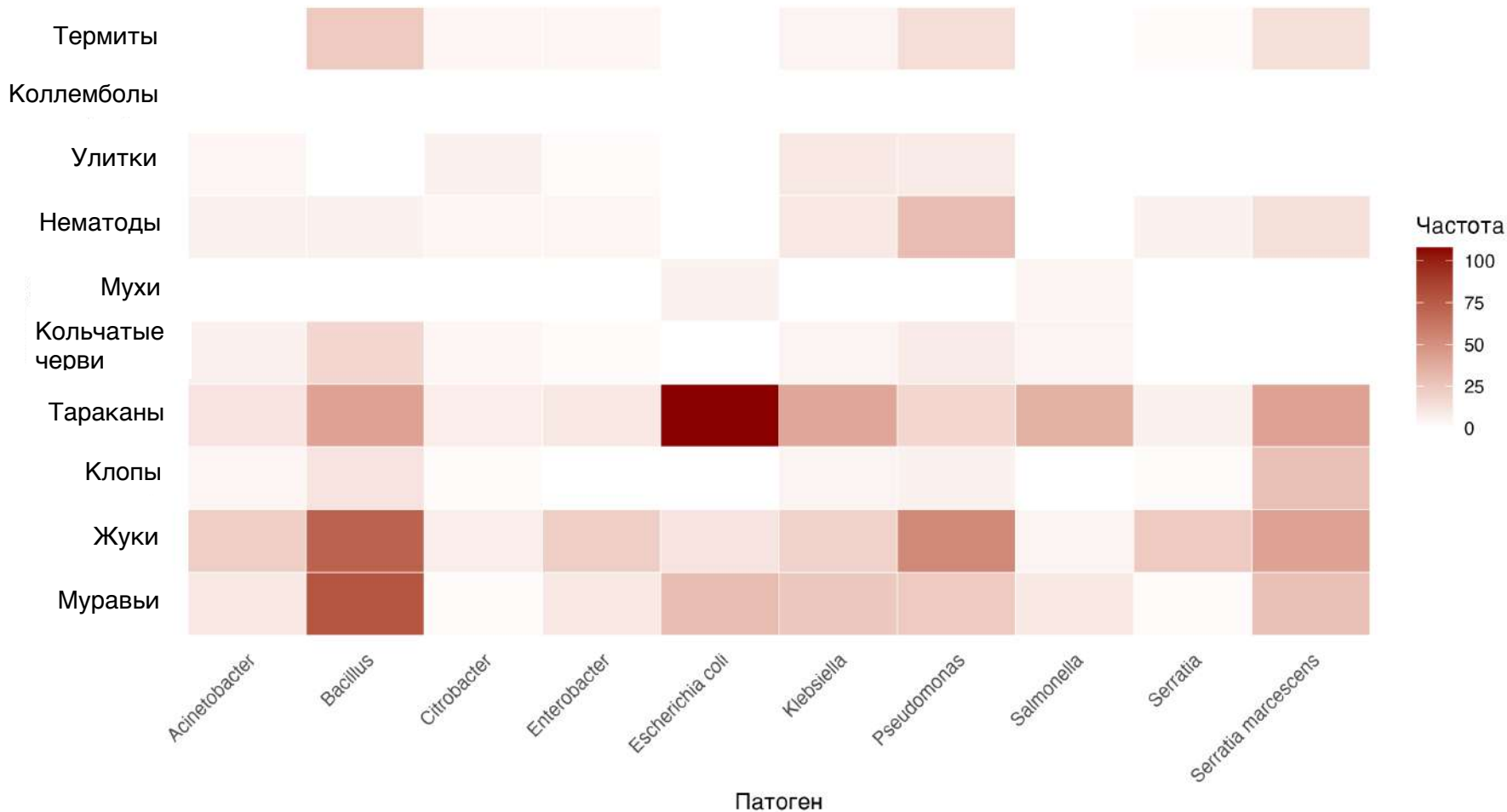
Кто из животных — «горячие точки» патогенов?



Специфические ассоциации «патоген — хозяин»

Ассоциации патогенов с хозяевами (CORE)

Топ-10 хозяев x топ-10 патогенов



✓ Синантропы → патогены человека (*E. coli*, *Salmonella*)

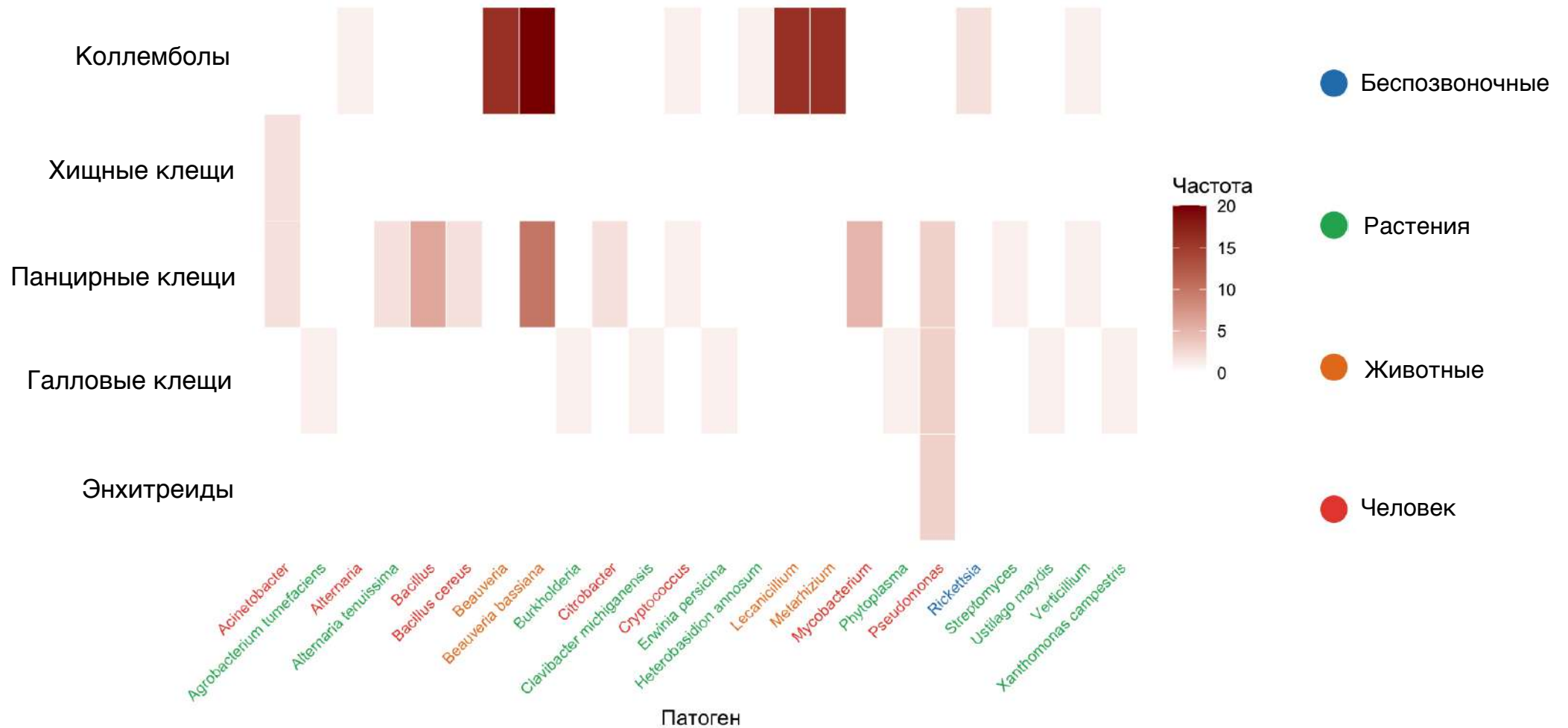
✓ Черви, улитки → зоонозы (*Mycobacterium*, *Bacillus anthracis*)

? Коллемболы, клещи → энтомопатогенные грибы (*Beauveria*, *Metarhizium*), но есть и виды-оппортунисты человека (*Mycobacterium*, *Bacillus cereus*, *Cryptococcus*)

Это «слепая зона» — мы не знаем, случайность это или реальный риск.

Ассоциации патогенов с MESOFAUNA (CORE)

Цвет подписи = тип патогенности (кому вредит)



Мезофауна — не только энтомопатогены. Это смесь патогенов разных типов, что делает её потенциальным вектором для широкого спектра инфекций.

Доля патогенов в микробиоме почвенных животных по размерным группам

Группа	Доля патогенов от общего числа микроорганизмов в группе (prevalence)	95% ДИ	Число исследований k	Гетерогенность (I^2)	Межиндивидуальная дисперсия (τ^2)
Макрофауна	15.9 %	12.4–20.1	108	64.5	1.473
Микрофауна (нематоды)	13.1 %	7.9–20.9	25	0.0	0.486
Мезофауна	5.8 %	1.1–25.0	11	84.6	1.653

Мезофауна, доминирующая в почве по численности относительно макрофауны на два порядка, изучена на порядок хуже. Это и есть «слепое пятно» почвенной эпидемиологии => данных по мезофауне критически (k=11) мало!

Достижение промежуточной цели: НЕУЧТЕННЫЕ ПАТОГЕНЫ

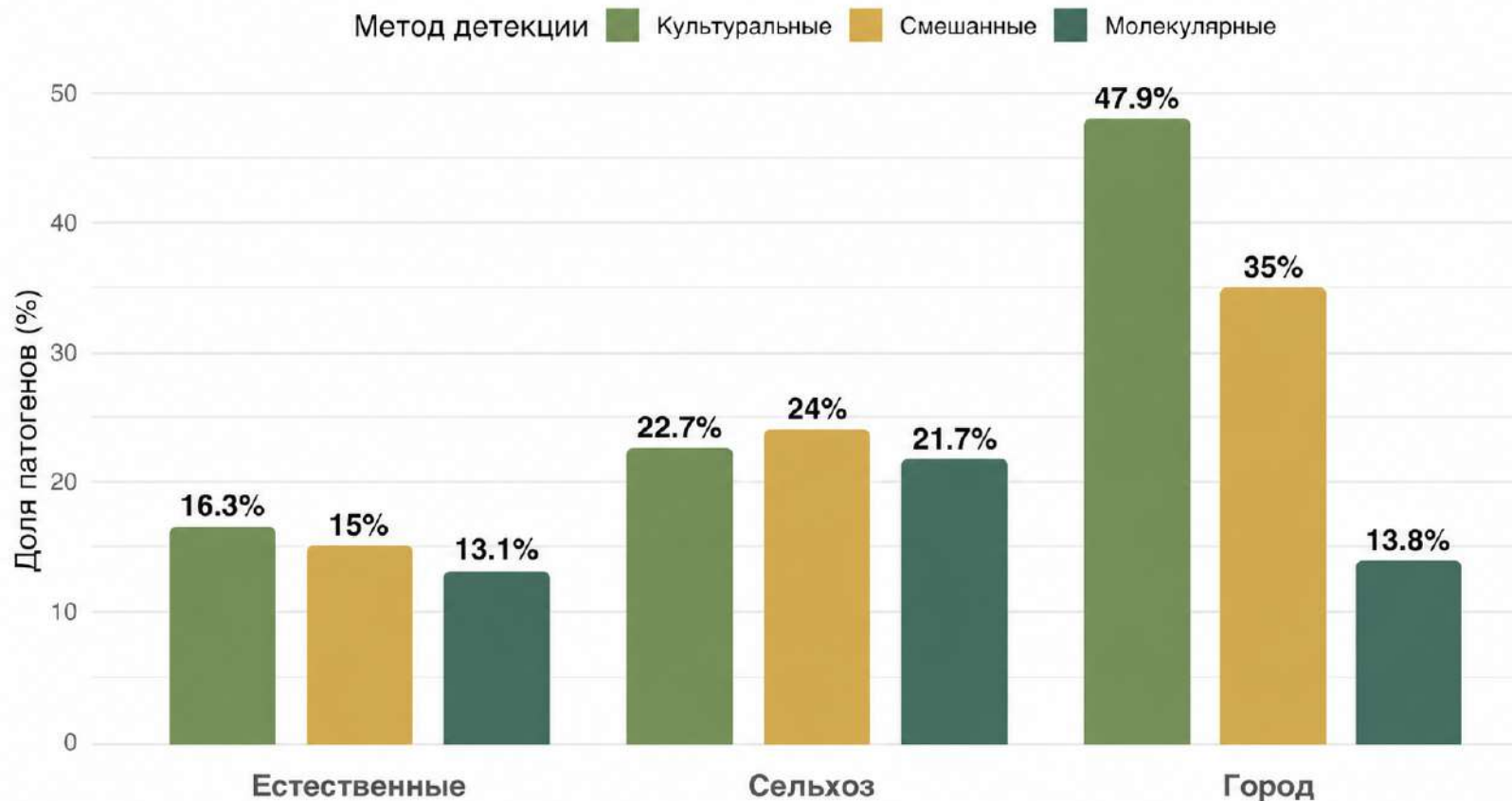
Категория	Кол-во наблюдений n	% от общего числа n	Что это значит
AUTHOR_CLAIMED_ONLY	64	7.2 %	Только авторы считают патогенами
Из них: патогены человека	29	45.5 %	Авторы видят угрозу для людей
Из них: у коллембол	17	100 %	Все найденные патогены у коллембол – отсутствуют в официальных базах данных

Это не доказательство угрозы, а указание на пробел в данных. Либо авторы ошибаются, либо ВОЗ/PHI отстают от реальности. В любом случае, эти 64 вида требуют приоритетной экспериментальной верификации. Это также подтверждает тезис о критической нехватке данных по мезофауне.

Мета-регрессия по степени урбанизации и методу детекции

Сравнение методов детекции по экосистемам

Смешанные методы: результаты мета-регрессии



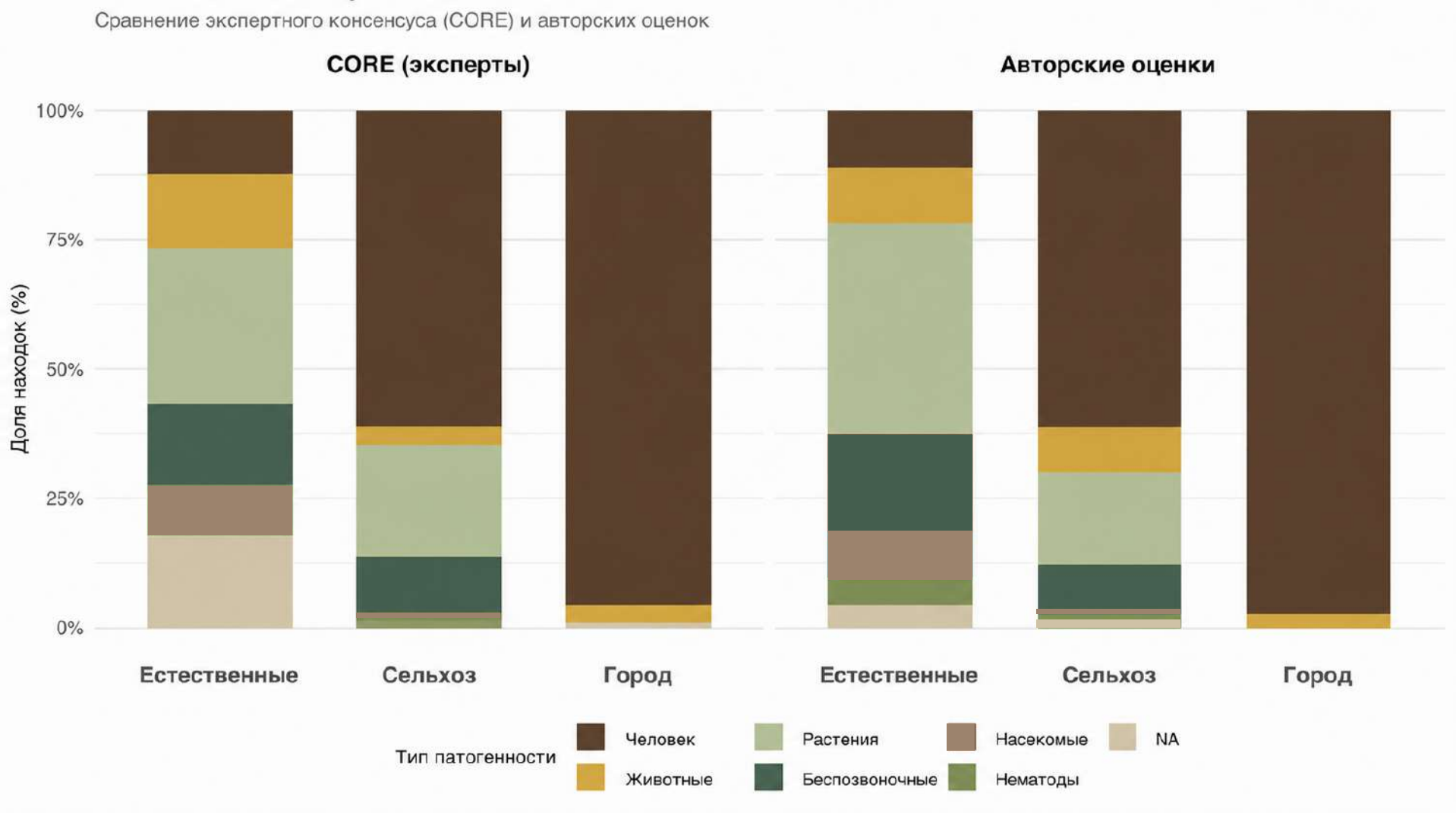
Метод детекции завышает оценки в 3.5 раза (47.9% → 13.8% в городе).

При этом на молекулярных данных:

- **Город (13.8%) значительно отличается от леса (13.1%)** — $p = 0.014$.
- **Сельхоз (21.7%) значительно не отличается ни от леса ($p = 0.325$), ни от города ($p = 0.126$)**

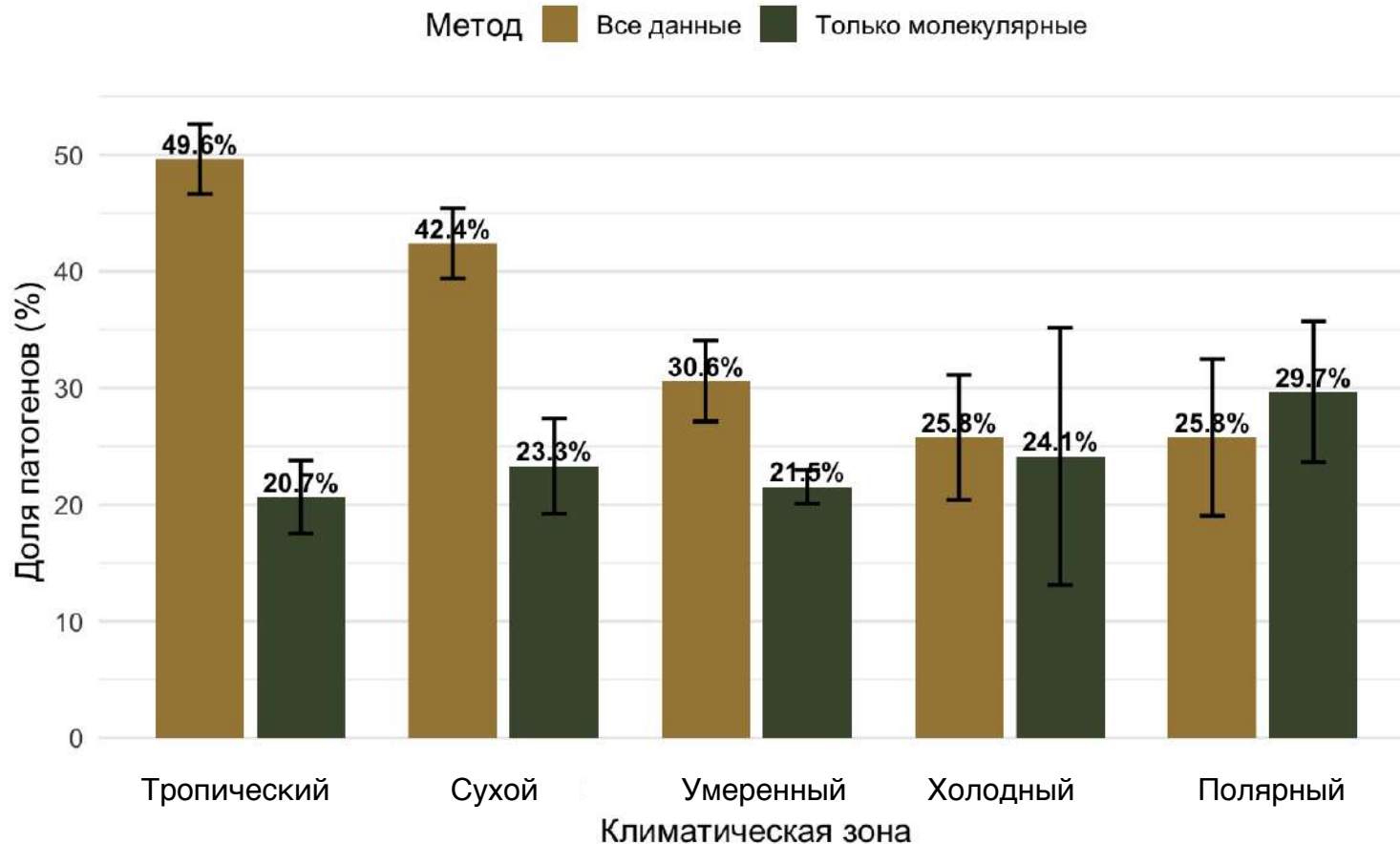
Парадокс: у сельхоза средняя доля патогенов выше, но разброс данных больше, поэтому эффект не подтверждается статистически.

Типы патогенов по степени урбанизации и строгости классификации



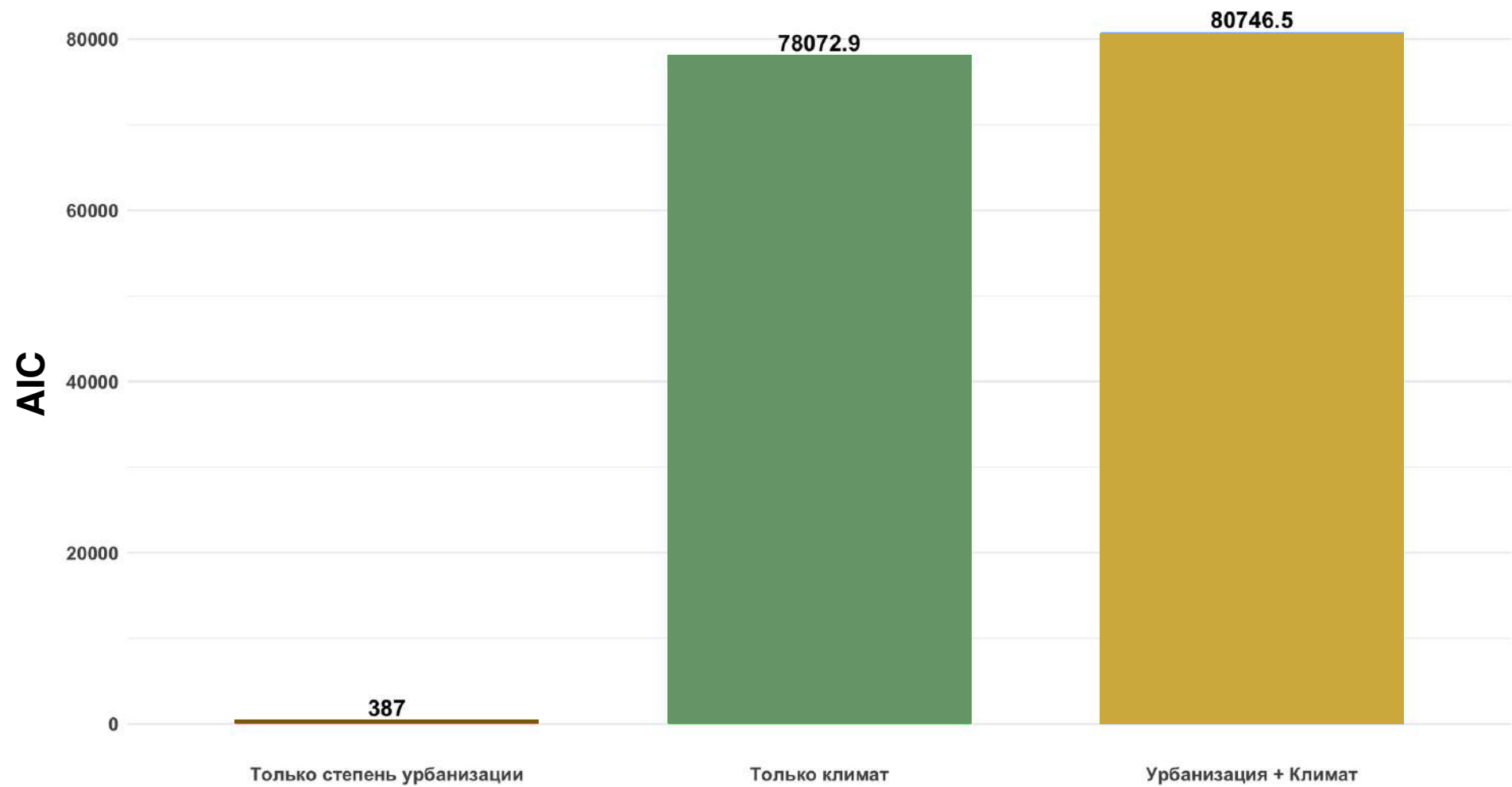
Мета-регрессия по климату (по Кёппену)

Все данные vs только молекулярные (с 95% ДИ)



- На **всех данных** в тропическом и сухом климате **доля патогенов значительно выше** ($p < 0.0001$).
- На молекулярных данных **климатический эффект в тёплых регионах — артефакт культуральных методов**.
- «Полярный эффект» — не артефакт: там 55.7% находок приходится на коллембол, у которых доля патогенов 28%. Это *эффект состава хозяев, а не климата*.
- **Вывод:** климат не является самостоятельным фактором — его эффект опосредован методом детекции и составом хозяев.

Сравнение моделей по информационному критерию Акаике



Мета-регрессия по локализации микробиома (макрофауна)

Группа микроорганизмов	Доля кишечных	Доля поверхностных	Шанс обнаружить патоген OR (Gut vs Surface)	p-value	Число исследований
Bacteria	18.7 %	40.1 %	1.15	0.926	18
Fungi	7.7 %	18.4 %	0.72	0.322	5

- Для **макрофауны** доли различаются в 2–3 раза, но это **артефакт разных статей**. При сравнении внутри статей (OR) разница незначима: $p = 0.926$ (бактерии), $p = 0.322$ (грибы).
- **Таксономический состав различается** (бактерии в кишечнике, грибы на поверхности) — это *качественный*, а не количественный результат.
- При учете **метода детекции**, результат **не меняется** ($p = 0.461$)
- Для оценки **мезо- и микрофауны** данных **недостаточно** ($k = 2$)

Предварительные выводы

1. **Влияние степени урбанизации неоднородно.** У конкретных хозяев (дождевые черви, улитки) городской эффект сохраняется и значим ($p = 0.008$ и $p = 0.056$ соответственно), но для окончательного вывода нужны исследования, сбалансированные по хозяевам и методам.
2. **Метод детекции — главный источник систематического смещения.** Культуральные методы завышают оценки в 3.5 раза (40.2% vs 14.0%). Смешанные = культуральные ($p = 0.425$). Молекулярные методы — единственный надёжный подход для оценки распространённости патогенов в естественных местообитаниях.
3. **Климатический эффект не является самостоятельным.** При учёте метода детекции климатические различия теряют значимость ($p > 0.2$), что указывает на их методологическую природу. Исключение — полярный климат, где повышенная доля патогенов объясняется специфическим составом хозяев.
4. **Мезофауна критически недоизучена.** Доля патогенов у коллембол и клещей составляет 5.8% при широчайшем интервале предсказания (0.1–84.5%) и крайне малом числе исследований ($k = 11$).
5. **Патогены мезофауны — не только энтомопатогены.** Помимо доминирующих энтомопатогенных грибов (*Beauveria*, *Metarhizium*, *Lecanicillium*), в микробиоме мезофауны присутствуют патогены человека (*Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Mycobacterium*, *Cryptococcus*) и фитопатогены (*Agrobacterium*, *Clavibacter*, *Xanthomonas*). Это делает мезофауну потенциальным вектором для широкого спектра инфекций.
6. **Выявлено 64 таксона, которые авторы считают патогенами, но которые отсутствуют в экспертных списках.** Для коллембол этот показатель достигает 100% (17 видов), что указывает на приоритетное направление для экспериментальной верификации и исследований.
7. **Локализация патогенов — критический пробел.** Различия в долях между кишечником и поверхностью (18.7% vs 40.1% для бактерий) не подтверждаются при сравнении внутри статей (OR = 1.15, $p = 0.926$).

Благодарю за внимание!

Если остались вопросы:

Анастасия Касаткина

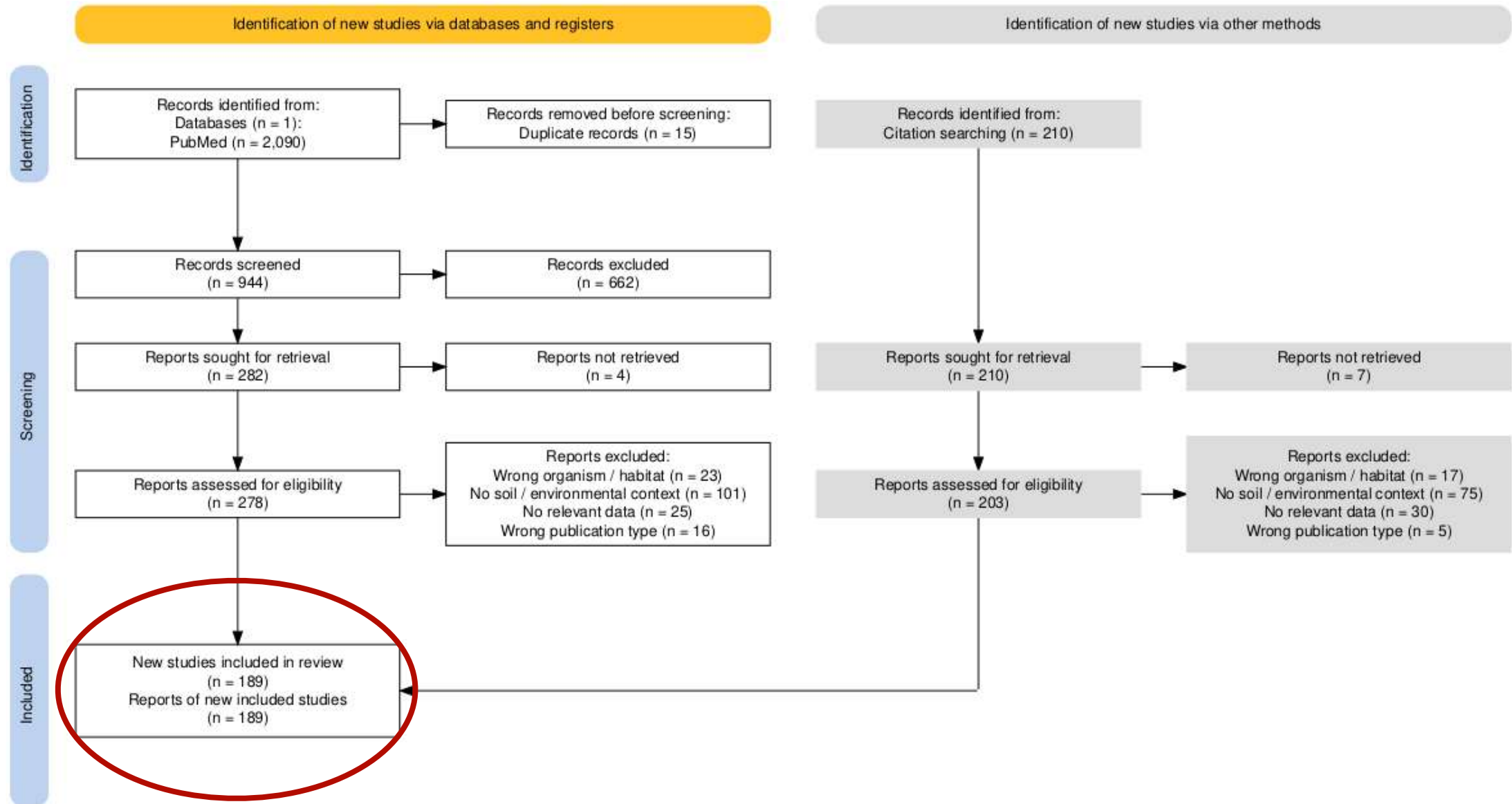
email: anakas@sev-in.ru



Что такое почвенный патоген?

- Для ответа на этот вопрос нужно **одновременно определить**:
 1. что считать патогеном;
 2. какого хозяина рассматриваем;
 3. что считать заболеванием/повреждением;
 4. насколько существенным должно быть повреждение;
 5. какова роль почвы в этом процессе.
- Что такое **патоген** и **почвенный патоген** – до сих пор нет строгого консенсуса → нет единого авторитетного источника, по которому можно верифицировать организм как патоген и в особенности как почвенный патоген.
- Самое близкое из существующих → Soil Borne Human Diseases EU Report (2011) → по степени облигатности присутствия в почве **классифицировано всего 48 видов патогенов!**
- Самые авторитетные: списки WHO, CDC (человек), WOAH (животные), CABI (растения) → суммарно **всего 483 уникальных патогена!**

Определение патогена не всеобъемлюще и в силу своей ограниченности трудно оценить через него дисфункцию экосистемы. Почвенных патогенов может быть больше, чем на данный момент подвержено эпидемиологическому контролю.



Методы: разработка единой системы оценки

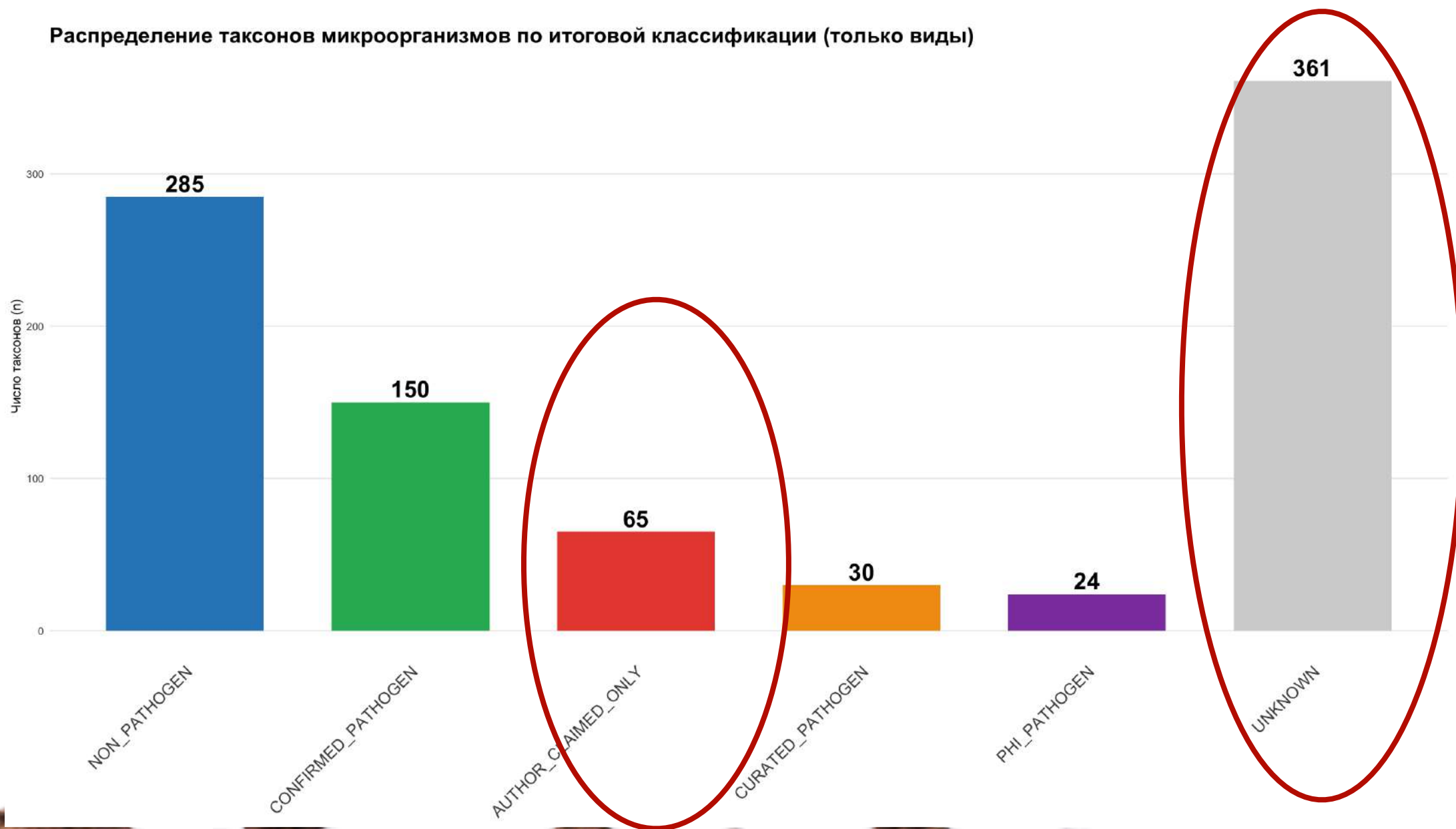
- Единой базы «почвенных патогенов» не существует →
- Был произведен синтез трех баз данных для установки консенсуса

Источник	Что учитывает	Ограничение
Экспертные списки (WHO, WOAH, CDC)	Клиническая значимость для человека и млекопитающих	Не включают энтомопатогены, фитопатогены, виды-оппортунисты
Авторы статей	Полевые данные, локальные наблюдения	Субъективны, часто не комментируют патогенность
PHI-база (Pathogen-Host Interactions)	Экспериментальные гены вирулентности	Привязаны к конкретным хозяевам, не всегда экологичны

Методы: единая система оценки

Категория	Автор	ВОЗ/CDC/ WOAH	PHI	Статус
«Ядро»	✓	✓	✓	Все три источника согласны (150)
Только автор	✓	✗	✗	«Тёмные материя» — требуют проверки
PHI патоген	✗	✗	✓	Экспериментально подтверждены, но не в экспертных списках
Экспертный патоген	✗	✓	✗	Есть в списках (человек/животные), но нет экспериментального подтверждения
Не патоген	✗	✗	✗	Все согласны: не патоген
Неизвестно	✗	✗	✗	Нет данных

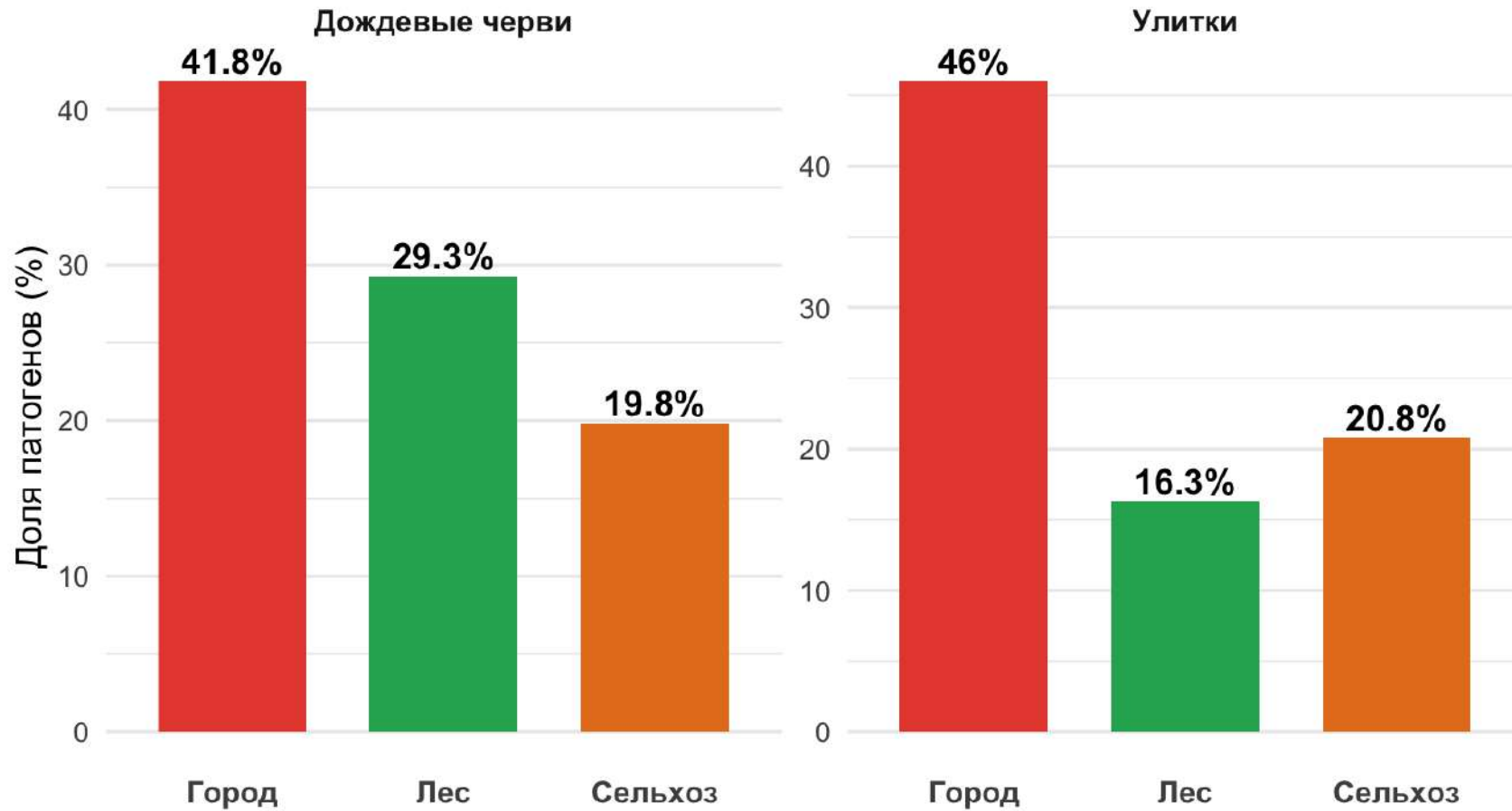
Распределение таксонов микроорганизмов по итоговой классификации (только виды)



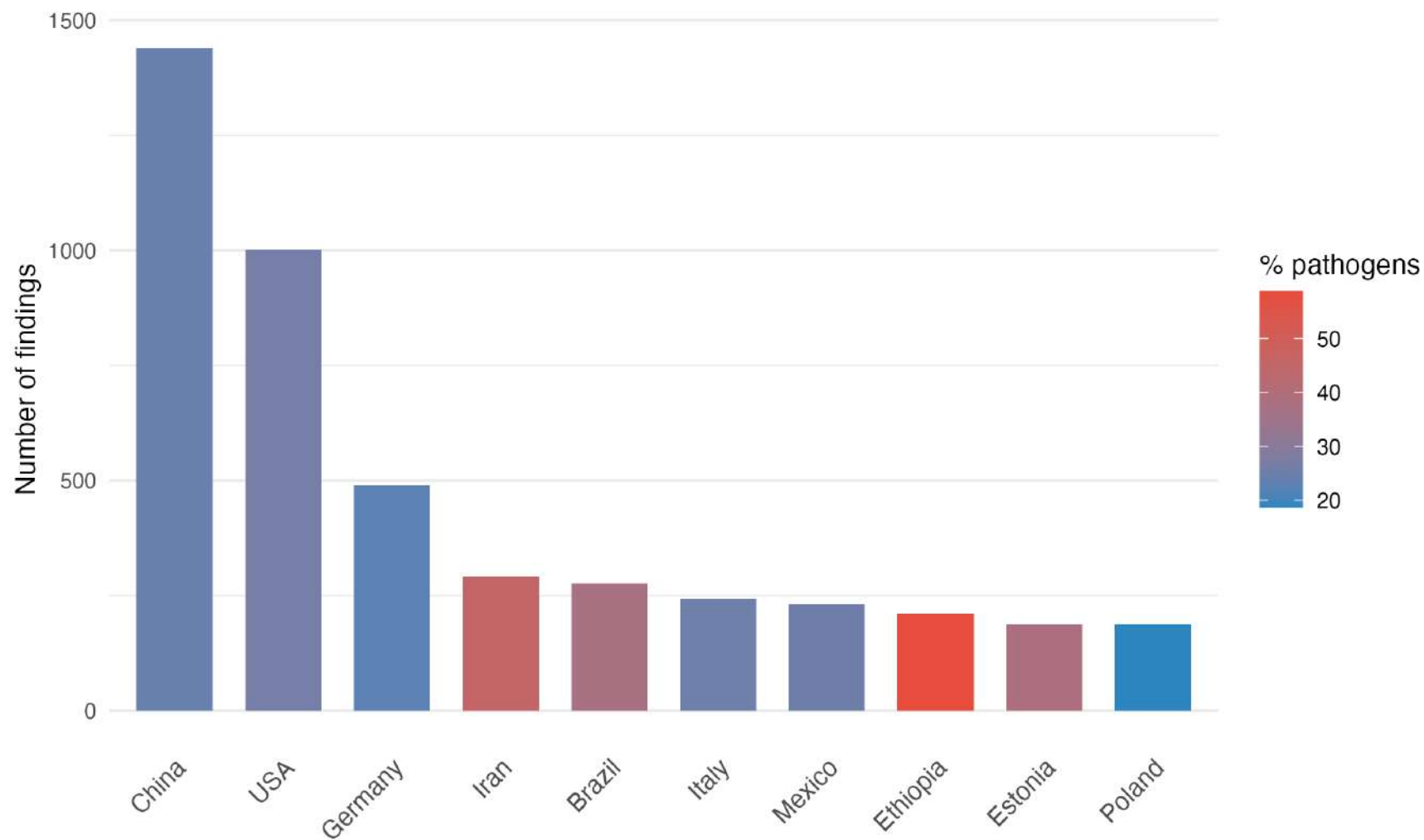
Prevalence у улиток и дождевых червей в разных экосистемах

Только молекулярные данные, CORE_PATHOGENS

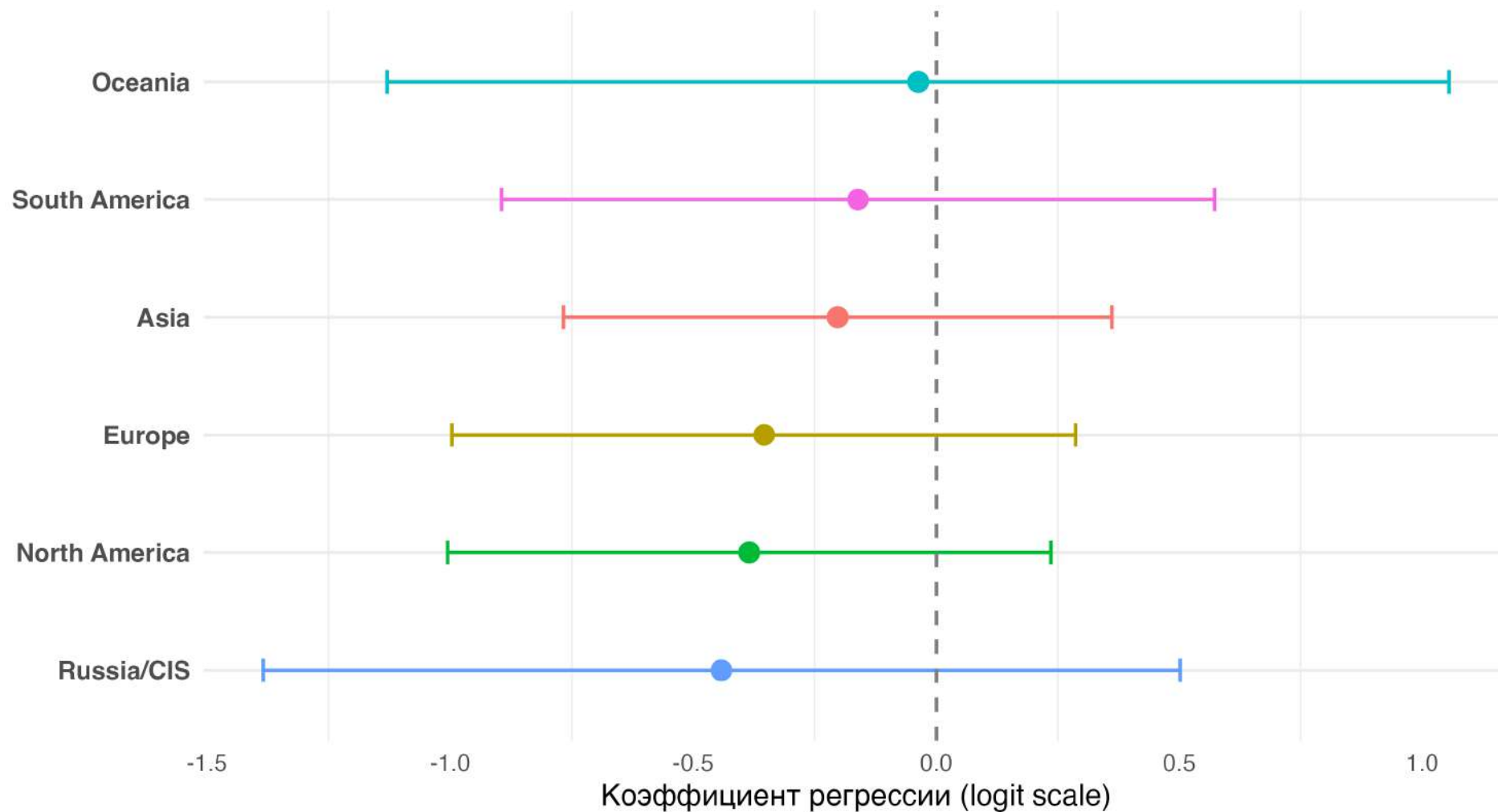
Экосистема ■ Город ■ Лес ■ Сельхоз



Географическое распределение доли патогенов и количества исследований

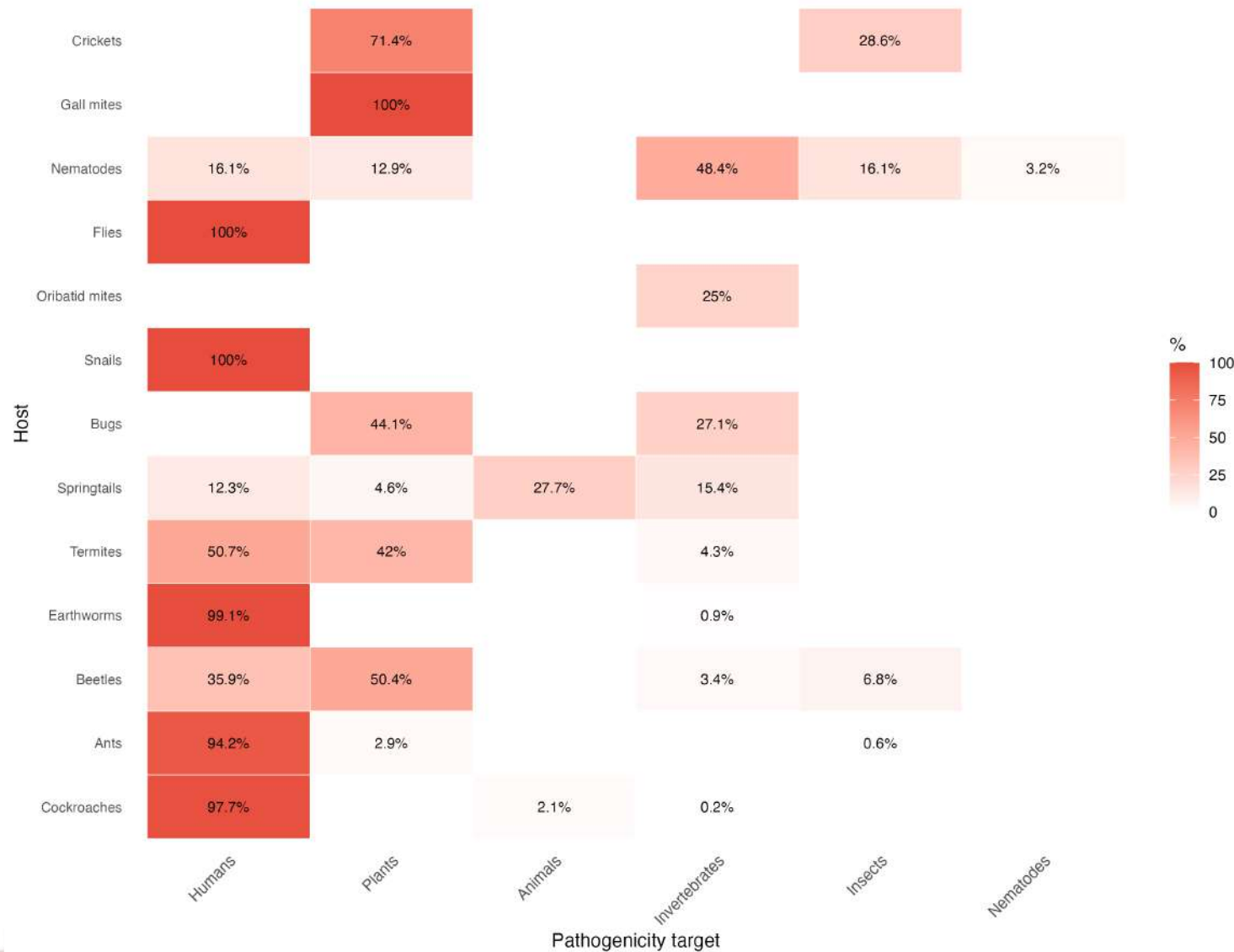


География как фактор не значима



Типы патогенов по разным типам животных

Pathogenicity type by host



ПУБЛИКАЦИОННЫЙ BIAS И УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сценарий	Prevalence (macrofauna)	95% CI	Разница с основным
Основной результат	22.4 %	19.2–26.1	—
Только high-quality статьи	21.6 %	15.0–30.1	-0.8 п.п.
Без синантропов	17.8 %	15.0–21.0	-4.6 п.п.
Только молекулярные методы	14.0 %	11.0–17.5	-8.4 п.п.

Вывод: тренды сохраняются во всех сценариях. Основные выводы устойчивы.

ПУБЛИКАЦИОННЫЙ BIAS И УСТОЙЧИВОСТЬ

1. Исключение low-quality статей не меняет результат (разница < 1 п.п.).
2. Исключение синантропов снижает общую prevalence на 4.6 п.п., но тренды сохраняются.
3. Исключение культуральных методов снижает prevalence на 8.4 п.п., но mesofauna остаётся самой низкой.
4. Ни одно отдельное исследование не определяет результат (leave-one-out: 22.2–22.8%).
5. Публикационный bias не выявлен для основных групп ($p > 0.05$).