The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Муха может потерять запах и всё же повернуть обратно. В виртуальном шлейфе ей помогало запомненное направление

Закреплённые плодовые мушки многократно возвращались к границе запаха после выхода в чистый воздух. Поведение, моделирование и нейронные вмешательства поддерживают компактную память о направлении, а не полную карту. Результат получен в контролируемом тесте виртуальной реальности и пока не показывает ту же стратегию в свободном природном полёте.

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Matteo, Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila*, Andrew F. Siliciano, Sun Minni, Chad Morton, Charles K. Dowell, Noelle B. Eghbali, Silas E. Busch, Juliana Y. Rhee, L. F. Abbott and Vanessa Ruta, Nature (2026) · DOI: 10.1038/s41586-026-10827-7

Муха может потерять запах и всё же повернуть обратно к нему

Муха уже оставила запах позади.

Она продолжала идти через чистый воздух — иногда десятки секунд и сотни виртуальных миллиметров. Затем поворачивала к пересечённой границе и снова находила запах. В этот момент сам запах уже не мог указать путь назад.

Это центральное наблюдение нового исследования навигации плодовых мушек в Nature. Авторы утверждают, что мушки использовали компактную память о направлении: не карту всего запахового шлейфа и не память о пройденном расстоянии, а сохранённый курс к границе, которую больше нельзя было обнаружить.

Результат впечатляет тем, насколько малого объёма сохранённой информации может быть достаточно. Но его легко преувеличить. Эти мушки не летали свободно в природном ландшафте. Они шли, закреплённые над поддерживаемым воздухом шаром, внутри строго контролируемого виртуального мира. Исследование поддерживает векторную стратегию в этой установке; оно не показывает, что мухи строят мысленные карты, не объясняет все способы следования животных за запахами и не выявляет клетки, где физически хранится память.

Невидимый коридор создавался программой

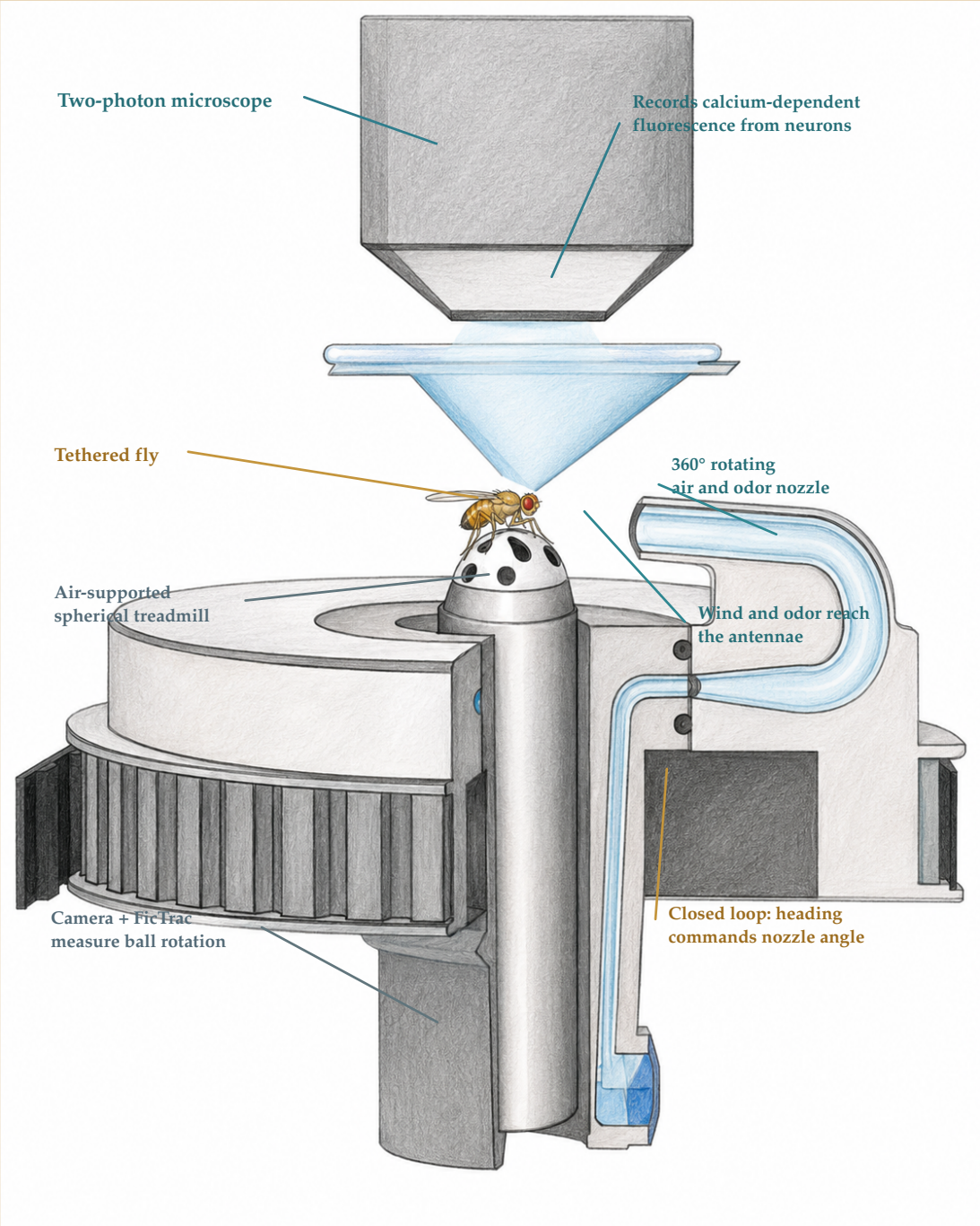
Запаховый шлейф — движущаяся область запаха, переносимого воздухом. На открытом воздухе шлейф изгибается, распадается и соединяется снова при изменении ветра. Поэтому трудно точно знать, что животное ощущало в каждый момент.

Исследователи сделали задачу управляемой с помощью **виртуальной реальности с замкнутой обратной связью**. Тело мушки фиксировали над лёгким шаром, плавающим на воздушной подушке. Когда мушка шла, камера измеряла вращение шара примерно 60 раз в секунду. Программа переводила вращение в виртуальную двумерную позицию и направление движения.

Это направление управляло моторизованным соплом, способным вращаться на 360 градусов. Когда виртуальный курс мушки менялся, сопло перемещалось вокруг неё, удерживая ветер в постоянном направлении виртуального мира. Одновременно регуляторы массового расхода меняли долю чистого воздуха и запаха яблочного уксуса, поступавших к антеннам, в зависимости от виртуальной позиции мушки. Пересечение заданной программой границы включало или выключало запах, создавая воображаемый коридор шириной 50 миллиметров и длиной один метр, хотя мушка никогда не покидала шар.

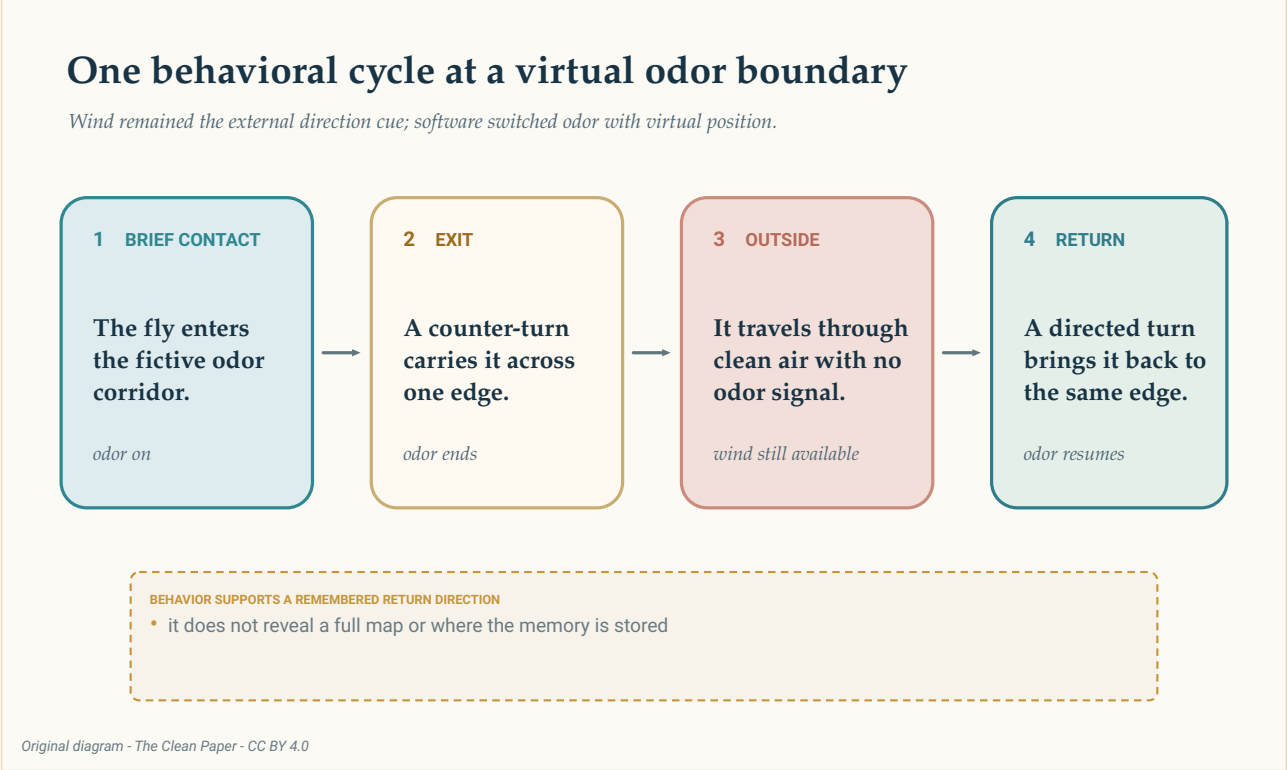
Установка создавала синхронизированную запись виртуальной позиции, курса,

наличия запаха и параметров воздушного потока в каждый момент. По ней исследователи восстанавливали траектории, отмечали каждый вход и выход и измеряли прямолинейность возвращения. Ветер давал внешний ориентир направления; собственное движение мушки определяло, когда она встречала ту или другую сторону виртуальной границы запаха.



Мушка оставалась закреплённой над шаром на воздушной подушке. Камера и FicTrac превращали вращение шара в виртуальное перемещение и курс; затем программа поворачивала сопло воздуха и запаха и переключала запах в зависимости от виртуальной позиции. В отдельных опытах с нейровизуализацией двухфотонный микроскоп над мушкой регистрировал кальций-зависимую флуоресценцию нейронов EPG или FC2, позволяя сопоставить нервную активность с поведением. Микроскоп использовался не во всех поведенческих опытах.

The Clean Paper CC BY 4.0



В контролируемом тесте мушка ненадолго входила в виртуальный запаховый коридор, выходила из него, проходила через воздух без запаха и направленно возвращалась. Поведение поддерживает идею запомненного направления возврата, но не показывает, где эта информация хранится.

The Clean Paper CC BY 4.0

В основном эксперименте с **вертикальным коридором 40 мушек** многократно входили в запах, контрповоротом выходили из него и возвращались к той же границе. «Вертикальный» — название геометрии 0 градусов в статье: длинная ось коридора шла параллельно направлению против ветра. Это не означает, что установка стояла вертикально.

Авторы называют это **отслеживанием края**. **Эпизод** — один непрерывный промежуток между пересечениями границы: внутренний эпизод идёт от входа до выхода, внешний — от выхода до возвращения. В 755 внутренних эпизодах пребывание в запахе длилось в среднем 4,9 секунды. Во время возвратов среднее расстояние от границы составляло 10,4 миллиметра. Менее 4% из 793 эпизодов пересекли весь коридор до противоположного края.

Последние два числа относятся к эпизодам, а не к сотням независимых мушек. Это важно, поскольку одно животное могло внести много эпизодов.

Возвращения не были простым фиксированным рефлексом движения против ветра

Несколько экспериментов проверили более простые объяснения.

Сначала исследователи меняли, что происходило **вдоль** коридора, когда мушка шла против ветра. Запах мог усиливаться к виртуальному источнику, оставаться постоянным или ослабевать. Во всех трёх случаях траектории были сходными. Следовательно, простое правило вроде «иди туда, где запах усиливается» не объясняет отслеживание края в этой установке.

Затем боковую границу коридора сделали плавной, с гауссовым профилем концентрации вместо резкого переключения. Мушки собирались возле склона, где концентрация менялась быстрее всего, а не в центре, где запах был сильнее. Значимым сигналом было поперечное изменение, обозначавшее эффективную границу, а не обязательное усиление запаха в направлении источника.

Это не означает, что градиенты концентрации никогда не важны в природе. Это означает, что в проверенных условиях для данного поведения не требовалось усиление запаха к источнику.

Исследователи также меняли ориентацию коридора. Отдельные группы отслеживали коридоры под 0, 45 и 90 градусов, а другая группа встречала коридор, который после выхода скачком смещался в сторону. Размеры групп составляли соответственно 40, 21, 20 и 24 мушки. Внешние траектории менялись вместе с геометрией. Общее правило «всегда поворачивай против ветра» не объясняет такую гибкость.

В этой установке запах достигал двух антенн с разницей около двух миллисекунд. Двусторонняя оптогенетическая активация в сочетании с ветром могла воспроизвести поведение, похожее на отслеживание края. **Оптогенетика** использует светочувствительные белки для изменения активности выбранных клеток. Здесь результат указывает, что для этого поведения не требовалась разница во времени прихода запаха слева и справа. Он не делает двустороннее сравнение неважным для свободно движущихся животных в других шлейфах.

Вектор меньше карты

Вектор — это направление вместе с величиной. Полезная сохранённая величина здесь была главным образом направлением: куда мушке повернуть, чтобы достичь границы шлейфа? Исследование не нашло свидетельств того, что мушка хранит полную схему шлейфа или собственную позицию внутри него.

Сначала авторы построили искусственные траектории, перемешивая элементы настоящего движения мушек. Они случайным образом выбирали наблюдавшиеся

длины пробежек и углы поворотов и соединяли их. Некоторые синтетические ходоки в конце концов снова попадали на границу запаха, но уходили дальше и возвращались менее прямыми маршрутами, чем настоящие мушки. Даже добавление обычной склонности мушек поворачивать против ветра не воспроизводило короткие направленные возвраты. Поэтому реальное поведение содержало больше информации о направлении, чем случайная перестановка тех же движений.

Затем исследователи построили модель с двумя режимами: **покидать границу** и **возвращаться к границе**. Это были не метки для каждого момента внутри или снаружи запаха, а альтернативные правила управления, которые могли переключаться во время движения.

Каждое пересечение границы давало модели направление для запоминания. При выходе обновлялось направление, используемое во время ухода. При входе обновлялось отдельное направление возврата: фактически «когда я нашла границу, я двигалась вот так». При последующем возвращении это сохранённое направление смещало движение симулированной мушки обратно к краю.

Модель подгоняли по траекториям коридоров 0, 45 и 90 градусов. В итоговом сравнении 72 настоящие мушки и 75 симуляций дали сходную статистику путей. Когда из модели убрали направление возврата, выученное при входе, отслеживание стало менее эффективным при всех ориентациях. Это поддерживает полезность памяти о направлении входа, но не доказывает, что мозг мушки буквально решает уравнения модели.

> **Что означает «память» в этой статье?**
>
> Исследователи не прочитали сохранённую стрелку напрямую из мозга мушки. «Память направления» — вывод, поддержанный поведением, моделью и нейронными измерениями. Модель показывает, что несколько меняющихся направлений способны воспроизводить важную статистику траекторий. Она не доказывает, что мушка буквально реализует эти уравнения или что одна названная группа нейронов является местом хранения.

Дополнительный опыт с сегментом под противоположно ориентированным углом 45 градусов изменил последующее поведение 10 мушек; рядом анализировались 29 модельных симуляций. Это делает направленное объяснение более конкретным, чем описание постфактум, но оно остаётся модельной интерпретацией.

Ориентир курса и текущая цель

Затем исследователи измеряли и нарушали активность **центрального комплекса** мозга мушки, участвующего в навигации.

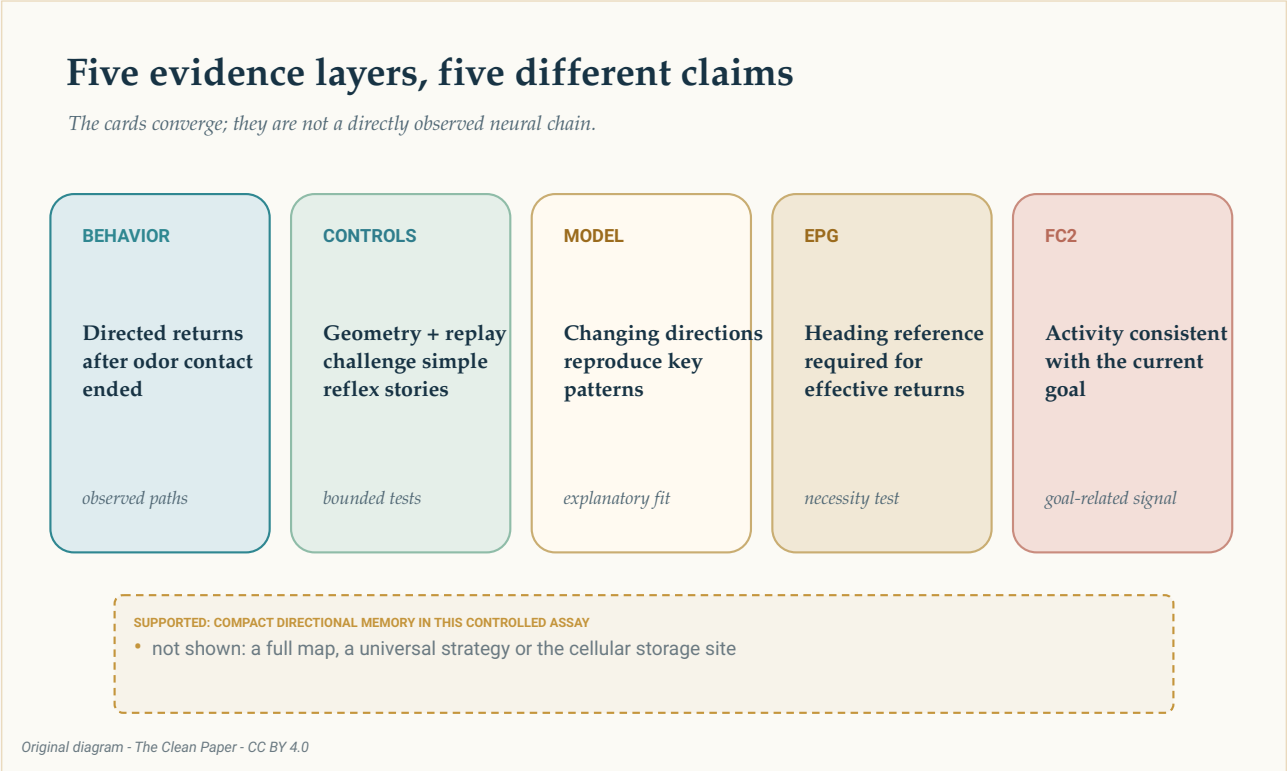
> **Два сигнала с разными задачами**
>
> EPG и FC2 — названия двух популяций нейронов центрального комплекса. Активность EPG работает как компас: отслеживает, куда мушка сейчас обращена относительно ветра. Активность FC2 связана с направлением, в котором мушка пытается двигаться. Нижележащая рулевая цепь может сравнивать текущий курс с целью. Исследование проверяет обе популяции, но не показывает, что одна из них сама хранит всю память.

Нейроны EPG несут сигнал курса: их паттерн активности отслеживает направление, куда обращена мушка, относительно внешнего ориентира. С помощью кальциевой визуализации — непрямого оптического показателя нервной активности — авторы обнаружили, что фаза активности EPG следовала за курсом относительно ветра во время отслеживания края. Анализ включал 16 опытов у 9 мушек.

Чтобы подавить EPG, исследователи заставили эти нейроны экспрессировать **GtACR1**, анионный канал, включаемый зелёным светом. Светодиод оставался включённым всё испытание, активируя канал и подавляя выбранные нейроны; такое же освещение не нарушало поведение генетического контроля.

При таком подавлении EPG 12 экспериментальных мушек совершали менее эффективные направленные возвраты, чем 6 генетических контролей. Ограниченный вывод: ориентир курса, переносимый активностью EPG, был необходим для эффективного отслеживания края в проверенных условиях. Это не доказательство, что EPG сами хранили направление границы.

Нейроны FC2 показывали другую связь. Их популяционная активность была связана с текущей навигационной целью и перед поворотами в тесте указывала к границе шлейфа. Визуализация включала 6 мушек, а сравнения с подавлением — группы от 9 до 14 в зависимости от анализа. Подавление ухудшало отслеживание края.



Поведение, изменённая геометрия шлейфа, подогнанная модель и два нейронных вмешательства поддерживают разные части объяснения через память направления. Вместе они поддерживают компактное направление цели в контролируемом тесте, но не полную карту и не доказанное клеточное место хранения.

The Clean Paper CC BY 4.0

Это сходящиеся доказательства, а не сфотографированная причинная цепь. Активность EPG давала необходимый ориентир курса. Активность FC2 соответствовала направлению цели и была нужна для эффективного поведения. Эксперименты не нашли единственную «энграмму» памяти и не доказали, что направление физически хранится в синапсах FC2.

Грубая человеческая аналогия: представьте, что вы вышли из узкой полосы тумана, а устойчивый ветер по-прежнему сообщает, где север. Компас показывает, куда вы смотрите, но для возвращения к туману нужно ещё помнить курс к его краю. Сравнение текущего курса с желаемым говорит, куда повернуть. Именно такое разделение труда предполагается для сигналов EPG и FC2. Это поясняющая аналогия, а не свидетельство, что люди используют те же клетки или алгоритм.

Память зависела от действия, а не только от времени запаха

В эксперименте воспроизведения мушки получали ту же последовательность времён запаха, что и раньше, но она больше не зависела от их текущих действий. Выученное направленное смещение ослабевало в последовательных эпизодах. Это поддерживает **оперантное**, связанное с действием обновление: важна была не только пассивная последовательность запаха, а связь между запахом и движением мушки.

Знаменатель меняется между анализами. Панели дополнительных данных включают 8 или 9 мушек в зависимости от сравнения; серия последовательных эпизодов использует 8 мушек; панели траекторий требуют как минимум 10 эффективных входов; парные модельные панели используют 21 симулированную траекторию, также прошедшую порог входов. Это не одна объединённая выборка из восьми.

Более нерегулярный шлейф был полезен, но оставался виртуальным

Исследователи также воспроизвели ранее записанный более нерегулярный шлейф. Его увеличили в пять раз в пространстве и времени, чтобы закреплённые мушки могли достаточно часто с ним встречаться. **Десять из 12 мушек** подошли на расстояние менее 50 виртуальных миллиметров от источника.

Это не десять мушек, нашедших настоящий источник в открытом воздухе. Это результат в контролируемом воспроизведении натуралистичного шлейфа.

Для каждого типа динамического шлейфа модель генерировала 2 000 траекторий. В сравнении масштабированного шлейфа анализировались 1 850 из 2 000 после требования эффективного входа и исключения траекторий, начавшихся слишком близко к источнику. Память помогала больше возле источника, где последовательные встречи сохраняли согласованную направленную структуру, и меньше в более турбулентной области дальше по ветру.

Оговорка — часть результата. Компактное направление помогает только тогда, когда мир остаётся достаточно согласованным, чтобы предыдущая встреча сообщала что-то полезное о следующей.

Чего исследование не показывает

- Оно **не показывает**, что мушка строит полную пространственную карту.
- Оно **не показывает** свободный полёт через неизменённый природный шлейф.

- Оно **не устанавливает**, что вся навигация по запаху использует эту стратегию.
- Оно **не показывает**, что нейроны EPG или FC2 являются единственным физическим местом хранения памяти.
- Оно **не превращает** подогнанную модель в буквальный биологический алгоритм мушки.
- Оно **не переносится напрямую** на человеческую навигацию.

Исследование наиболее сильно там, где наиболее конкретно. Замкнутая обратная связь дала точный доступ к каждой встрече с запахом. Изменения геометрии, воспроизведение, моделирование, кальциевая визуализация и подавление проверили разные части одного объяснения. Но поведенческие, визуализационные и подавляющие когорты были разными; размеры выборок не задавались заранее; сбор и анализ данных не были рандомизированы или ослеплены; менее 10% закреплённых мушек исключили из-за проблем акклиматизации, реакции или отслеживания.

Эти ограничения не стирают явление. Они задают его границы.

Краткий итог

Закреплённые плодовые мушки, идущие через виртуальный запаховый коридор, многократно возвращались к границе после выхода в чистый воздух. Изменения концентрации и геометрии коридора, подогнанная переключающаяся модель, нейронная визуализация и оптогенетическое подавление поддерживают объяснение через компактно запомненное направление, а не полную карту. Нейроны EPG давали необходимый ориентир курса, а активность FC2 соответствовала текущему направлению цели. Результат ограничен контролируемым тестом ходьбы; он не выявляет клеточное место хранения памяти и не показывает ту же вычислительную стратегию в свободном природном полёте.

Проверка без преувеличений

Что показывает статья: в тесте с закреплёнными мушками и замкнутой обратной связью они направленно возвращались к виртуальным границам запаха, которые больше не могли ощущать. Несколько поведенческих контролей, моделирование и нейронные вмешательства поддерживают векторную стратегию.

Что является выводом: что поведение использует компактную память направления и что популяционная активность FC2 представляет текущую навигационную цель. Содержимое памяти напрямую не считывалось.

Чего работа не показывает: полной мысленной карты, универсальной обонятельной стратегии, свободного полёта в природном шлейфе, единственного места хранения

памяти или человеческого аналога.

Главные ограничения: один вид и контролируемая установка; разные когорты мушек и единицы анализа в экспериментах; непрямые кальциевые сигналы; проверки необходимости, не доказывающие достаточность; натуралистичный шлейф был воспроизведён и масштабирован.

Насколько уверенным может быть обычный читатель? Высокая уверенность, что направленное возвращение реально в этой установке и что активность центрального комплекса, связанная с курсом и целью, имеет значение. Умеренная уверенность в модели как компактном объяснении. Низкая уверенность в любом утверждении, без изменений переносящем результат в открытый воздух или называющем его полной картой.

Источники

Siliciano et al., A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila, Nature (2026)
https://doi.org/10.1038/s41586-026-10827-7

Siliciano et al., data archive for A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila
https://doi.org/10.5281/zenodo.20751812

Ruta Laboratory, Edge-Tracking-Model
https://github.com/rutalaboratory/Edge-Tracking-Model