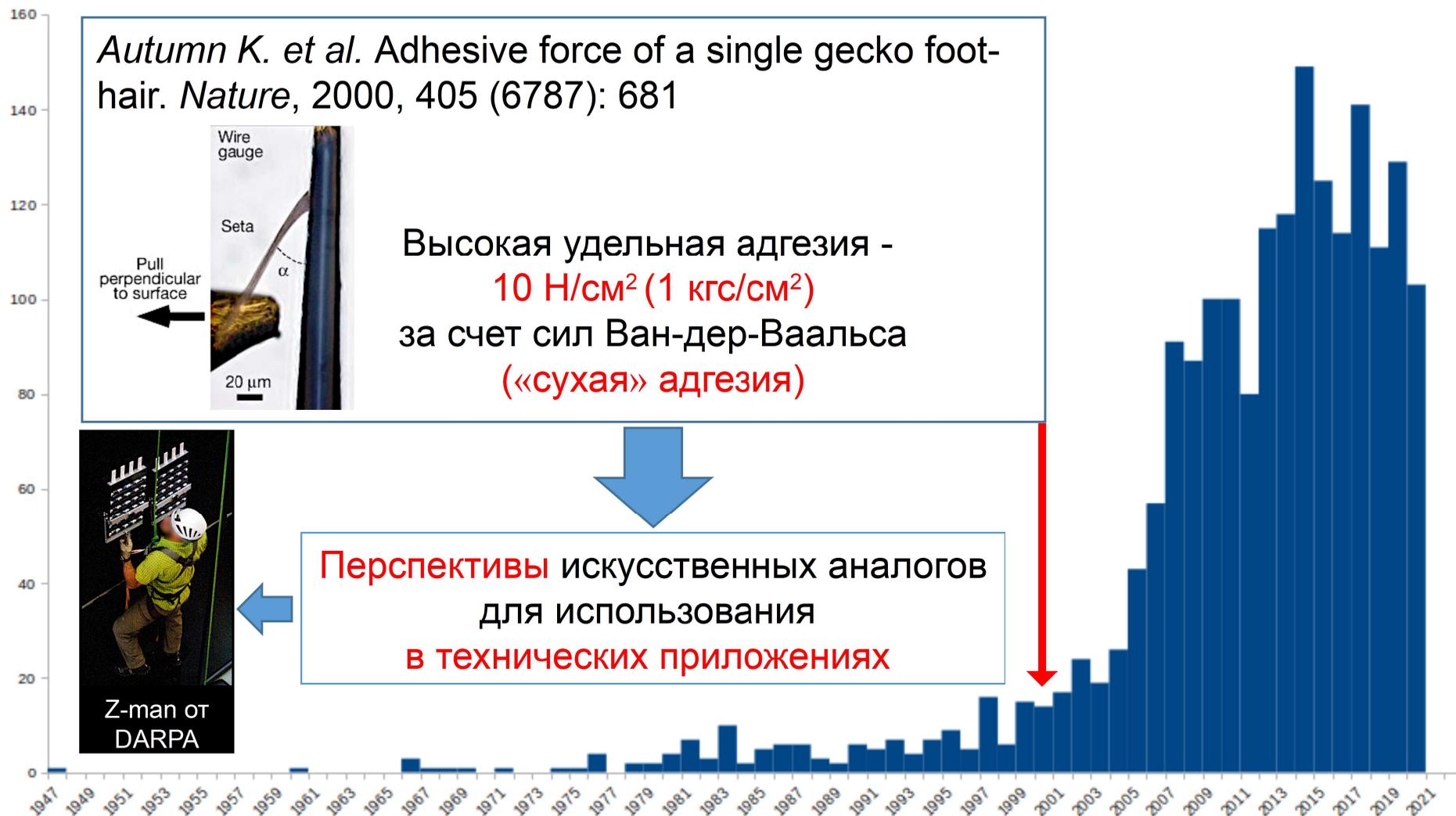


Парадоксы и загадки адгезионного аппарата геккононовых ящериц

Ю.Ф. Излев

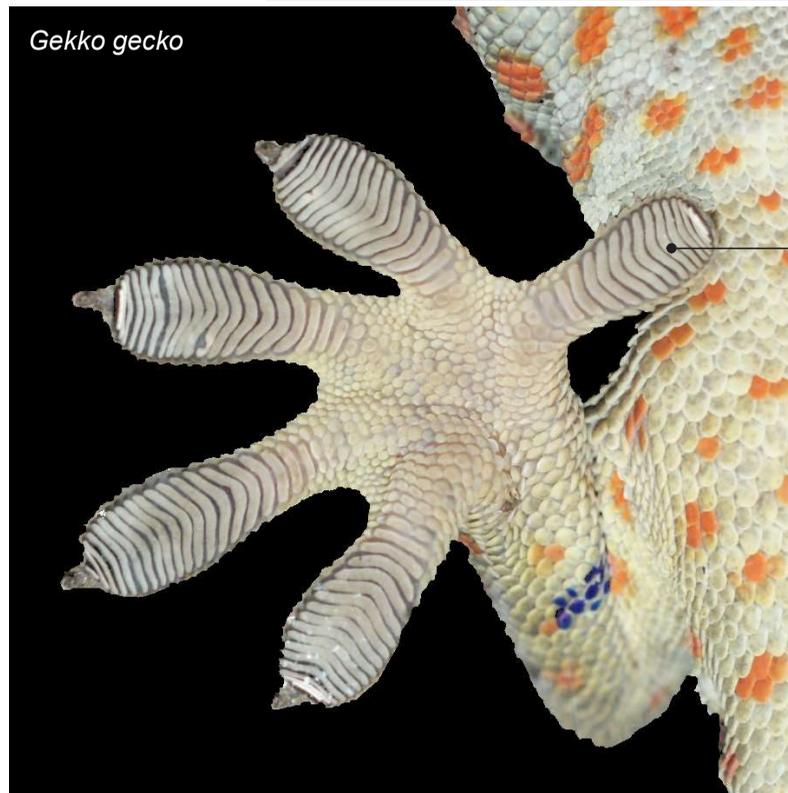
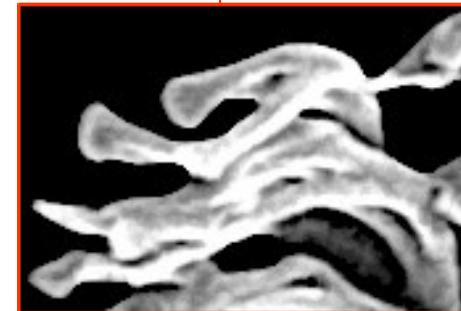
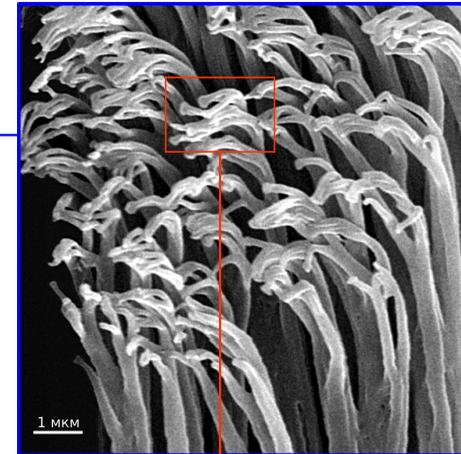
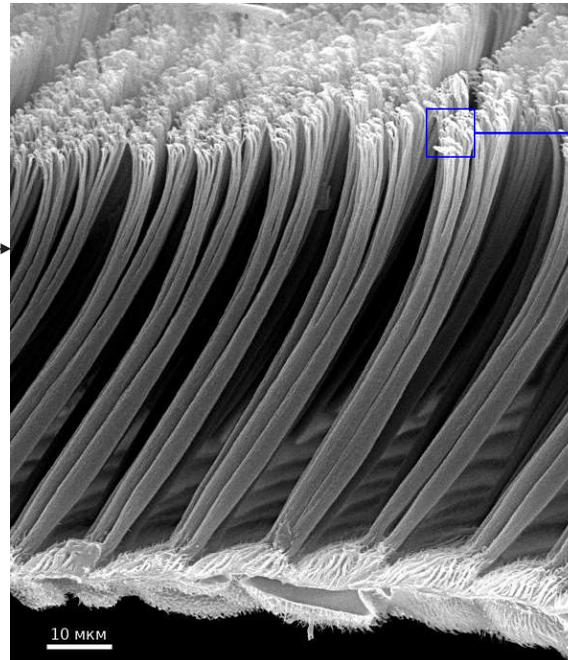
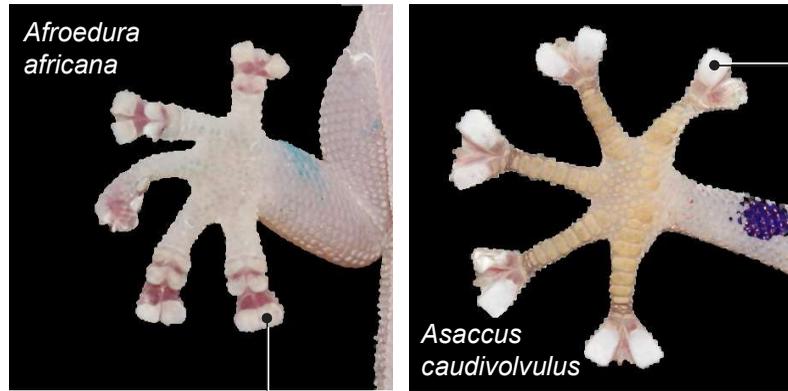
Стремительный рост интереса к адгезионному аппарату гекконов в 21 веке

Из **1910** работ в базе данных *WoS* на 31 января 2020 г., **1763**
опубликованы за последние **20 лет**



Адгезионный аппарат гекконов

Контактные площадки на подошвенной поверхности пальцев покрыты микрощетинками

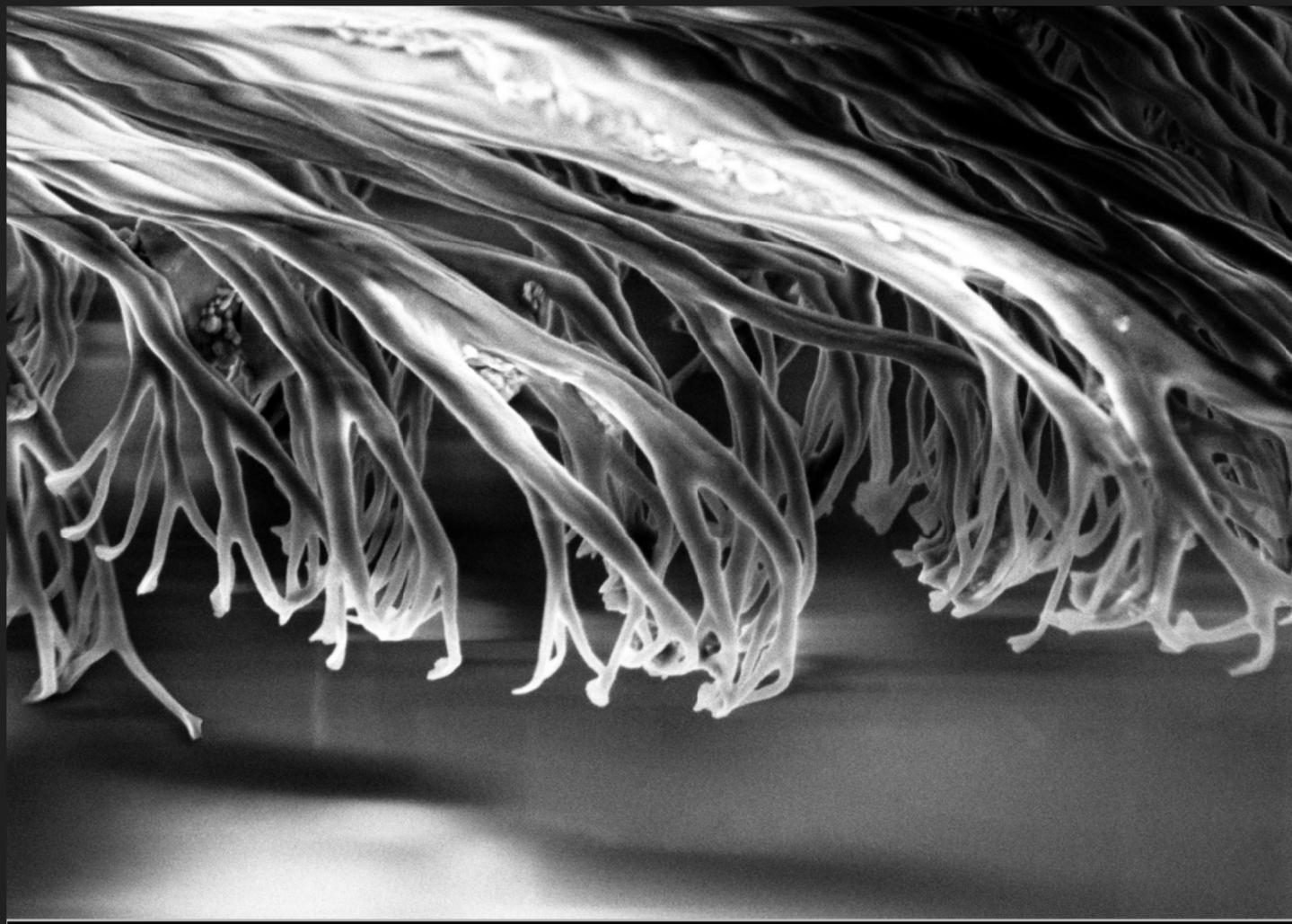


Массив адгезионных щетинок
плотность – около 10^6 см^{-2}
длина – до 150 мкм;
толщина – 2-7 мкм

Спатулы (10^9 см^{-2})
субмикронной
толщины (100-300 нм)

Сила адгезии **одной спатулы** к субстрату – около **10 нН**
Сила сцепления **одной щетинки** с субстратом – **10 мкН**

Теория непосредственного контакта с опорой



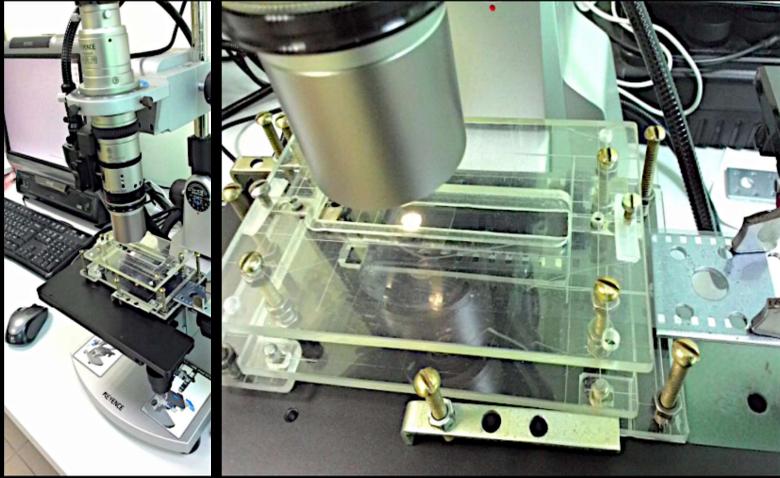
Реальная
контактная геометрия

Mag = 38.76 K X 300 nm WD = 5.3 mm EHT = 2.00 kV Signal A = InLens ESB Grid = 237 V Date :14 May 2018 Time :19:39:44
Auriga-39-52 FIB Imaging = SEM Noise Reduction = Frame Avg FIB Probe = 30KV:120pA System Vacuum = 4.09e-006 mbar

Нерешенные ключевые проблемы

- **Проблема самоочистки** – почему при высокой адгезии к субстрату адгезионное покрытие не загрязняется
- **Проблема предотвращения слипания** – почему адгезионные щетинки прилипают к субстрату, а не друг к другу

Самоочистка адгезива гекконов



Установка на базе микроскопа Keyence VHX-1000 для моделирования процесса «контакт-отрыв» адгезионного покрытия *G. gecko* в квазидинамическом режиме



Число пылевых частиц на поверхности ламелл уменьшается после каждого контактного цикла

Современный подход к конструированию адгезионных покрытий, способных к самоочистке:

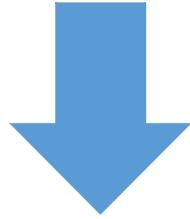
1. Как можно меньшая контактная адгезия покрытия
2. Как можно большая суммарная работа, необходимая для отрыва адгезива

(по Alizadehyazdi, V., Simaite, A. & Spenko, M. Evaluation of Material Properties for Practical Microstructured Adhesives: Low Dust Adhesion and High Shear Strength. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019,11: 8654)

Контактная адгезия и энергозатраты при отрыве от субстрата

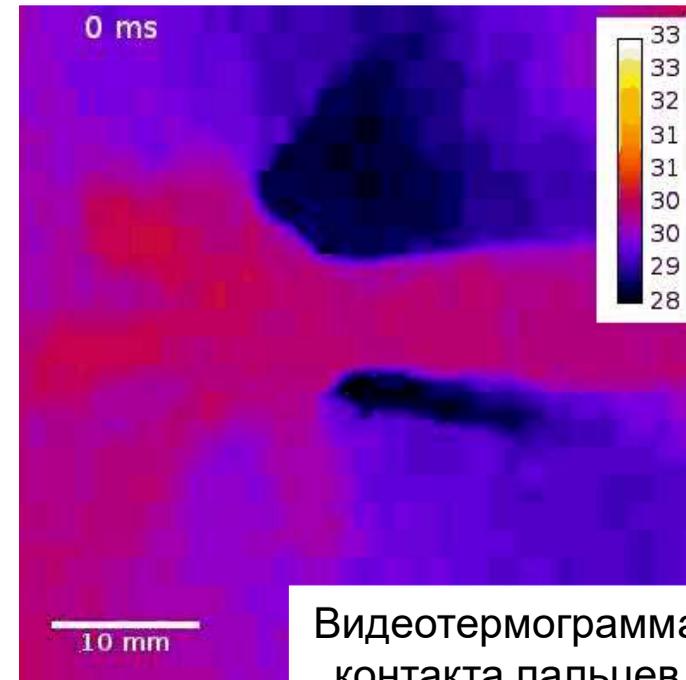
Энергия, необходимая для преодоления сил адгезии – около $5 \cdot 10^{-2}$ Дж/м²

Экспериментально измеренные значения работы по преодолению адгезии у гекконов – до 5 Дж/м² (*Gravish et al., 2008*)



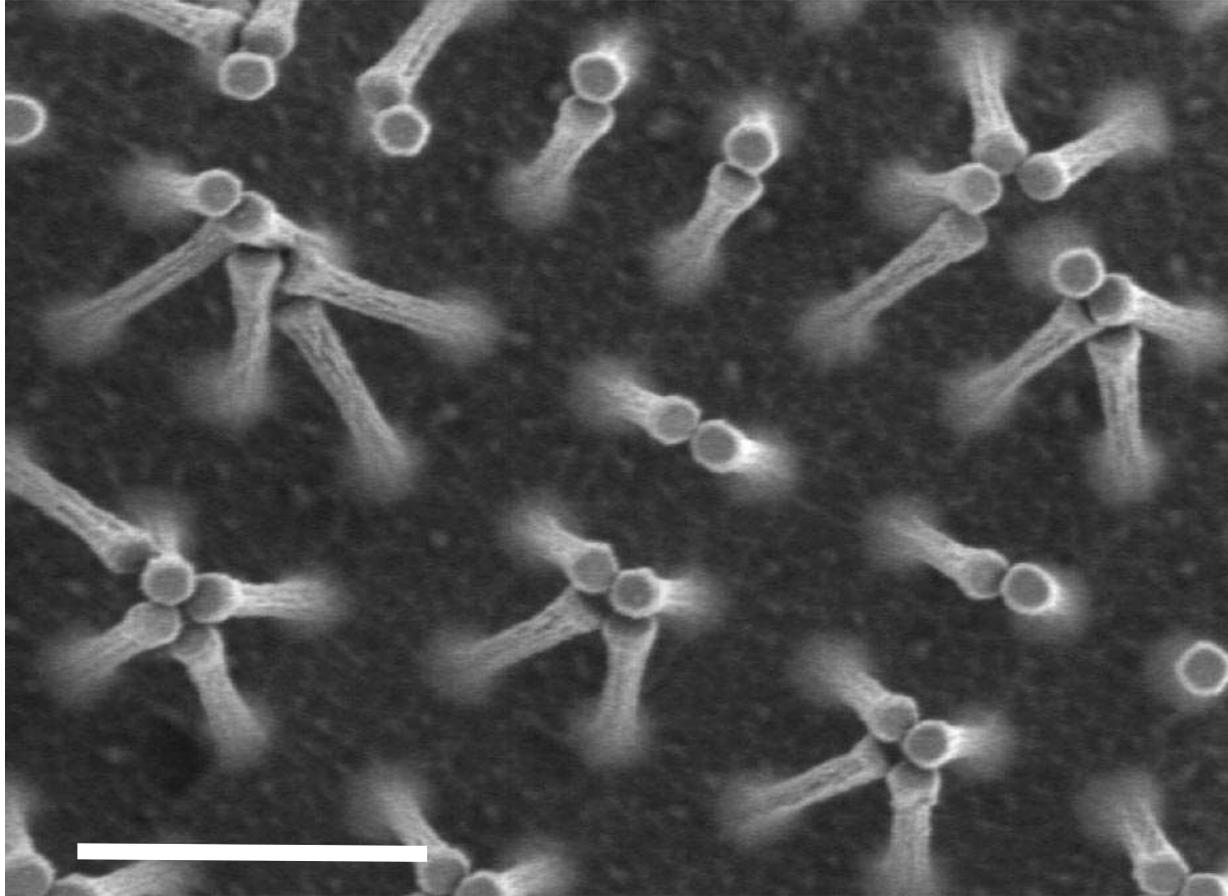
Суммарная работа адгезии гекконов может быть следствием:

1. энергозатрат на **преодоление вязкоупругих сил** при деформации адгезионных щетинок;
2. энергозатрат на **преодоление сил трения** между щетинками и между щетинками и субстратом



Видеотермограмма контакта пальцев геккона-токи с субстратом.

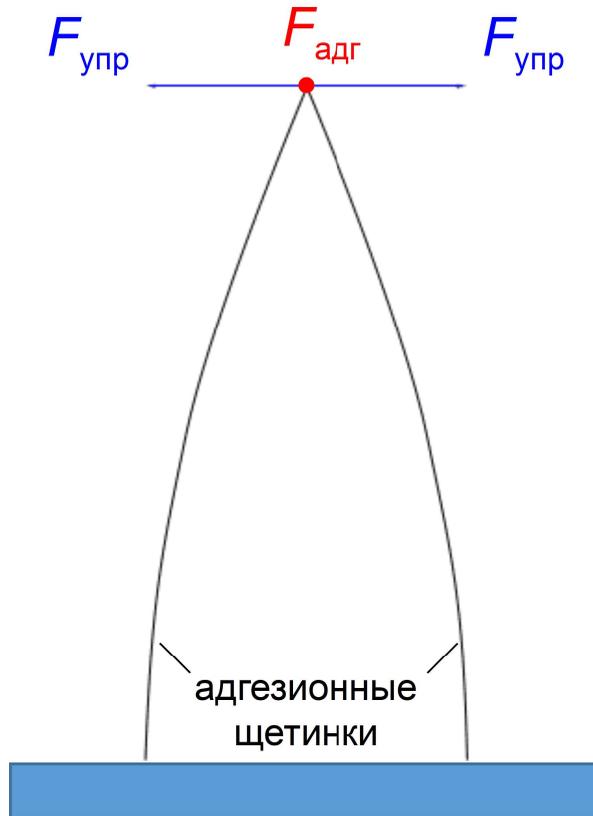
Почему щетинки не слипаются друг с другом?



Слипание искусственных фибрилл снижает адгезионные способности
фибриллярных адгезивов

Фибриллы из полиимида, слипшиеся дистальными концами; длина фибрилл – 1 мкм, толщина – 0.14 мкм, расстояние между ними – 0.7 мкм масштаб – 2 мкм (*Geim et al., 2003*)

Предотвратить слипание адгезионных щетинок могут силы упругости

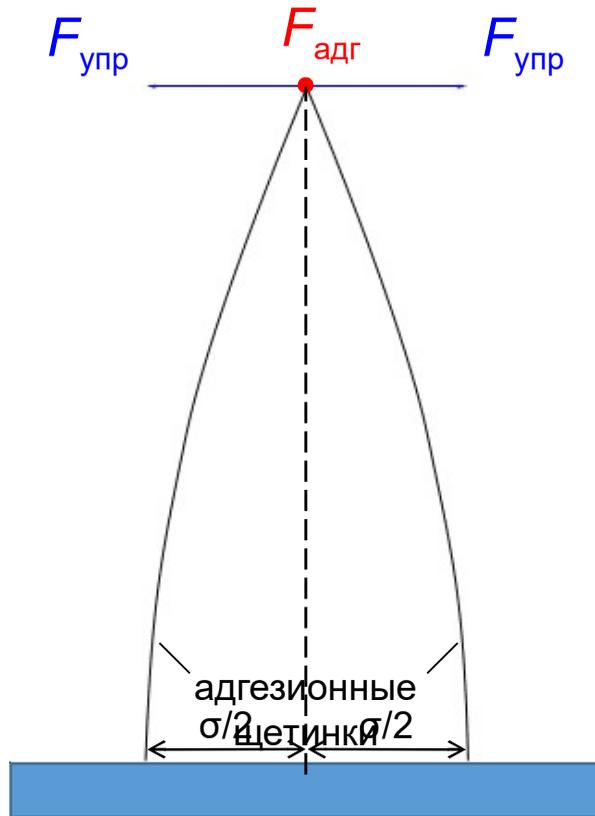


$F_{\text{адг}}$ – сила адгезии между щетинками
 $F_{\text{упр}}$ – сила упругости при деформации щетинкок

Щетинки не слипаются, если

$$F_{\text{упр}} > F_{\text{адг}}$$

Предотвратить слипание адгезионных щетинок могут силы упругости



$F_{\text{адг}}$ – сила адгезии между щетинками

$F_{\text{упр}}$ – сила упругости при деформации щетинкок

Щетинки не слипаются, если

$$F_{\text{упр}} > F_{\text{адг}}$$

$$F_{\text{адг}} = AN^{-1}$$

A – адгезия; N – плотность щетинок

$$F_{\text{упр}} = k\sigma/2 = kN^{-1/2}/2$$

k – коэффициент жесткости щетинки;

σ – расстояние между щетинками; $\sigma = N^{-1/2}$

Щетинки не слипаются, если

$$\underline{k > 2AN^{-1/2}}$$

$$A = 10 \text{ Н/см}^2 = 10^5 \text{ Н/м}^2 (10^5 \text{ Па})$$

$$N = 10^6 \text{ см}^{-2} = 10^{10} \text{ м}^{-2}$$

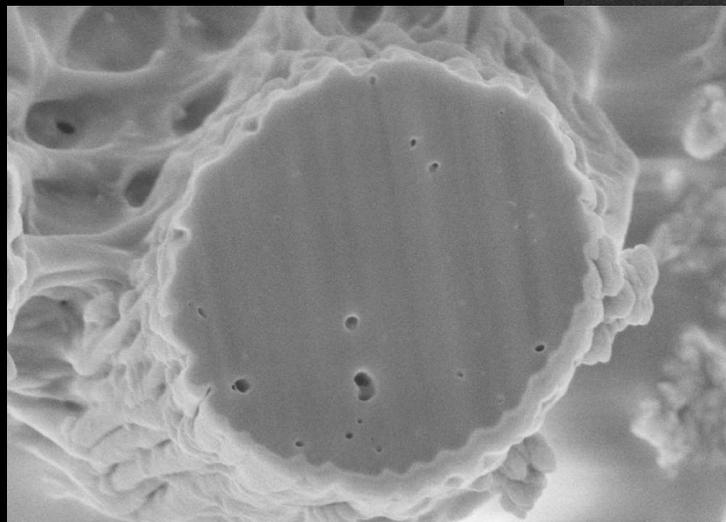
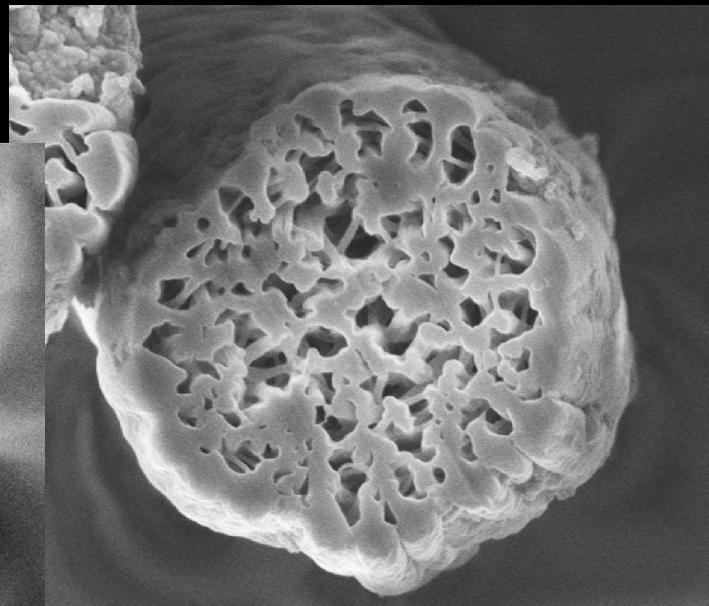
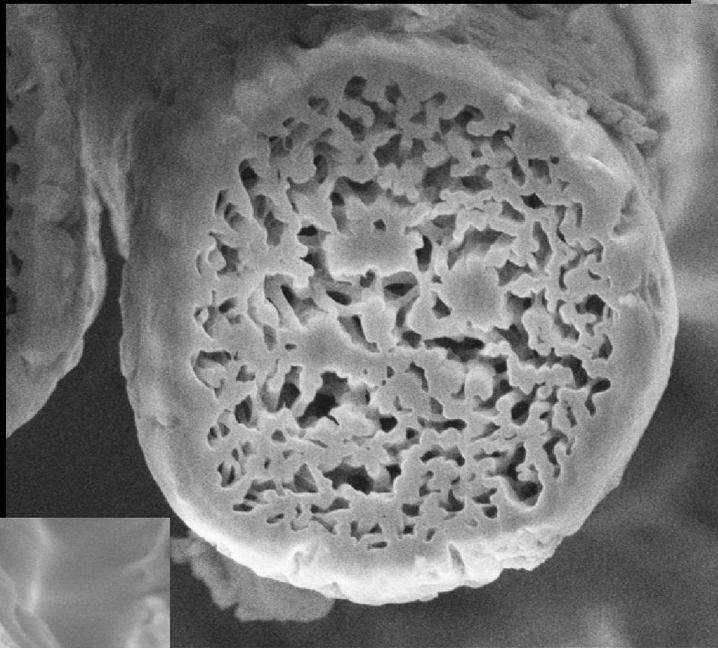
$$\underline{k > 2 \text{ Н/м}}$$

Как определить суммарную жесткость щетинок: расчет

Серийные срезы одной и той же щетинки на
разном расстоянии от поверхности кожи

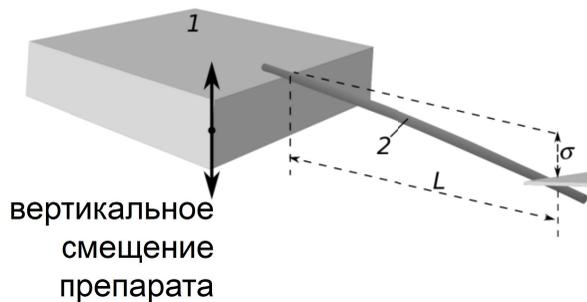
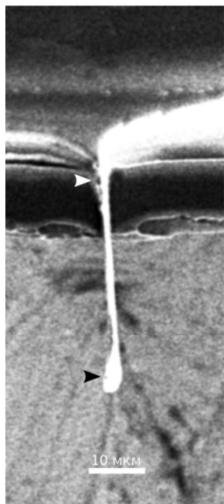
Срезы в получены
пучком ионов галлия

1 мкм

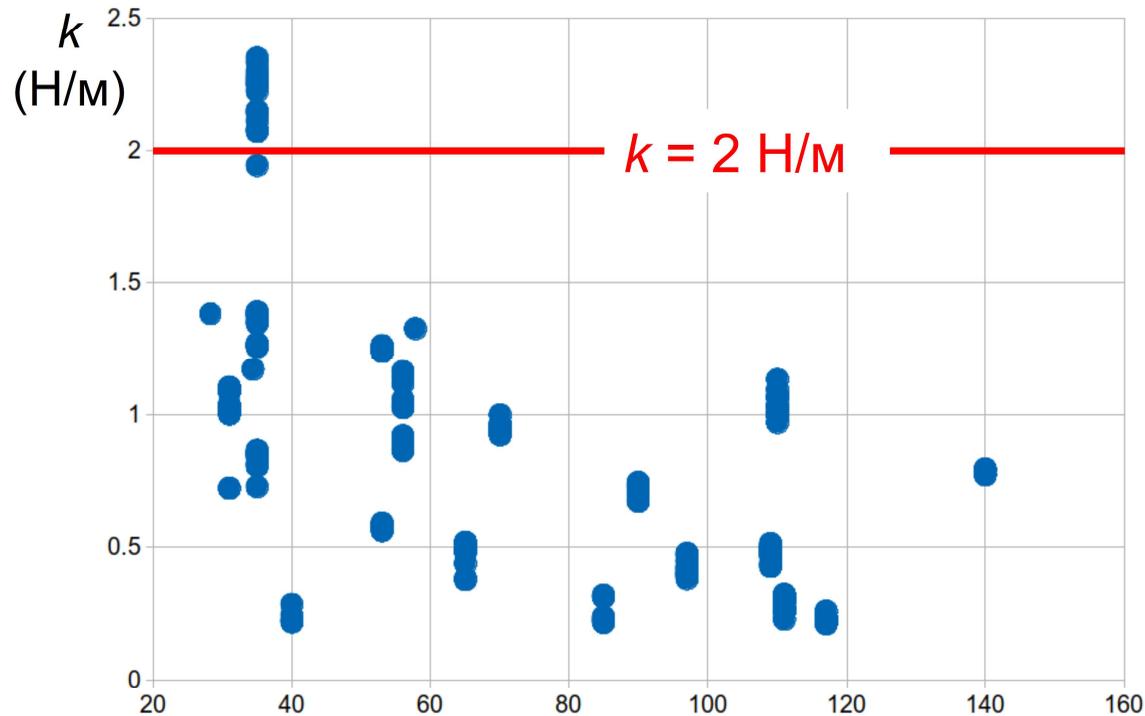


Разница в геометрии осевых сечений
обуславливает варьирование локальной
жесткости щетинок на порядки величин

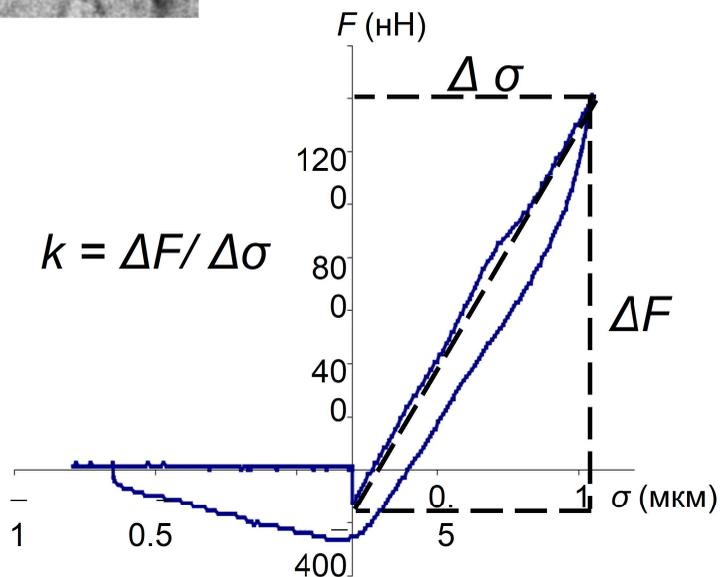
Как определить суммарную жесткость щетинок: атомно-силовая микроскопия



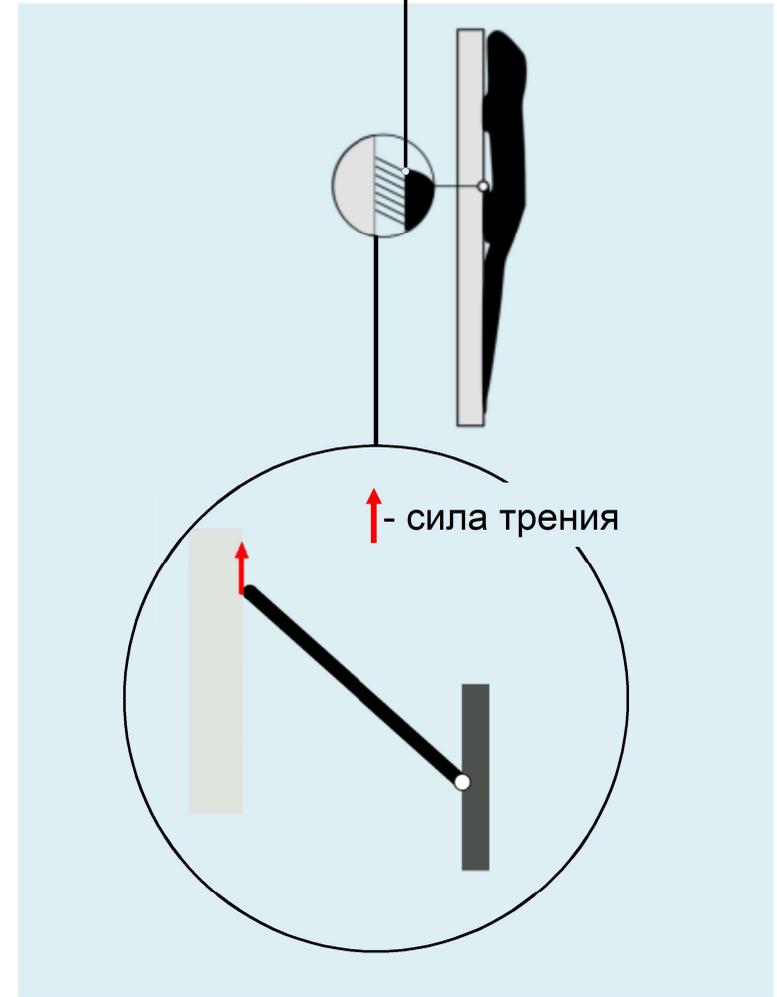
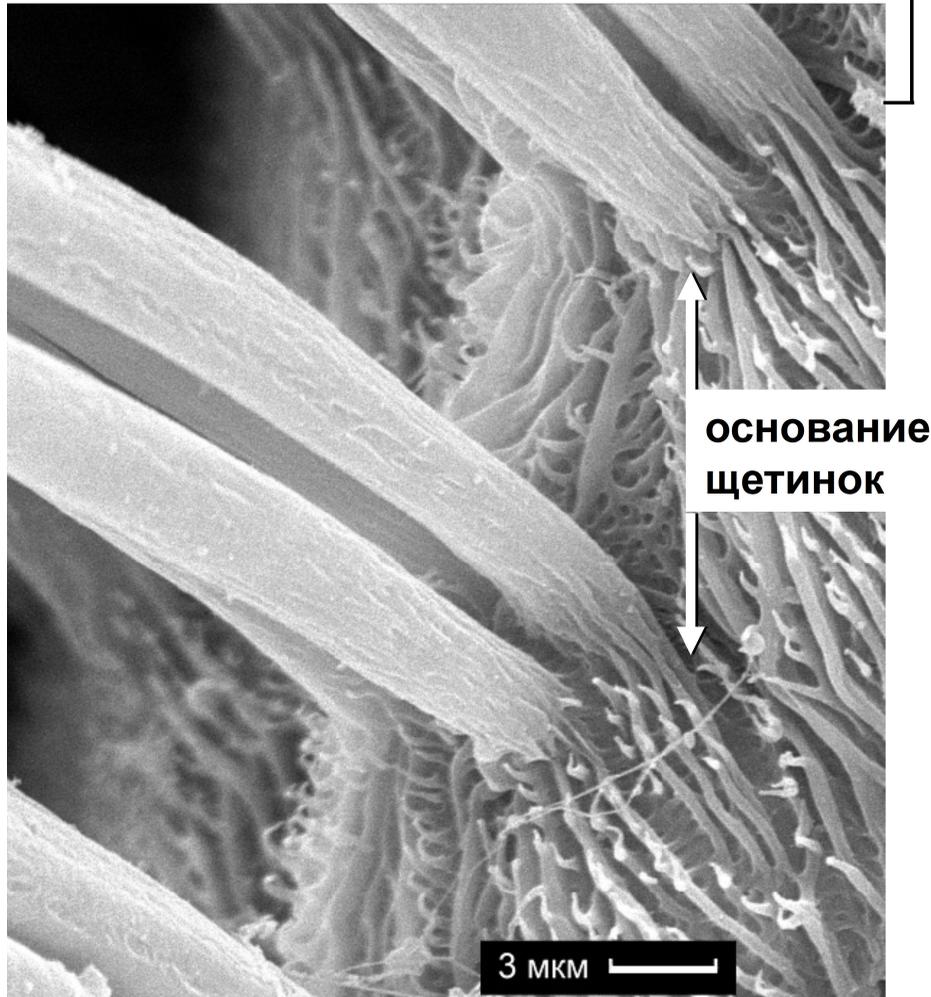
- 1 - кремниевая пластина
- 2 - щетинка на краю кремниевой пластины
- 3 - кантилевер, нагружающий свободный конец щетинки



длина нагруженного сегмента щетинки
(L, мкм)



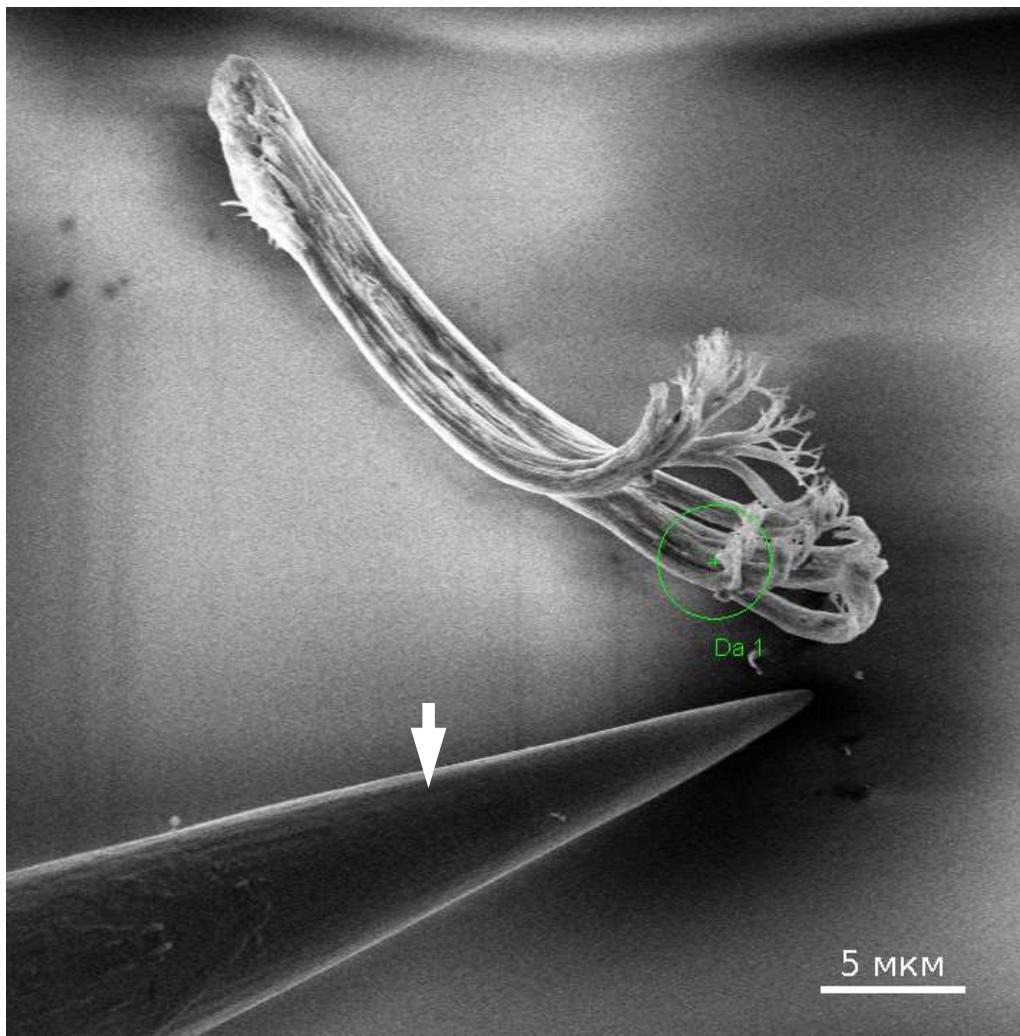
Основание щетинки как гибкий шарнир



Трение при скольжении дистальных концов щетинок за счет вращения на «гибком шарнире» у их основания считается причиной увеличения работы, требуемой для отрыва от субстрата (*Gravish et al., 2008*)

При наличии такого шарнира даже повышенная жесткость щетинок ($k \gg 2 \text{ Н/м}$) не будет препятствовать сползанию их дистальных концов

Электризация поверхности щетинок



Яркость свечения щетинок и спатул геккона токи под действием электронного пучка в РЭМ ($U = 5\text{кВ}$, $I = 100\text{ пА}$) свидетельствует об электризации их поверхности; дистальные концы щетинок намного светлее стальной иглы манипулятора (обозначена белой стрелкой) диэлектрической поверхности окисленного кремния

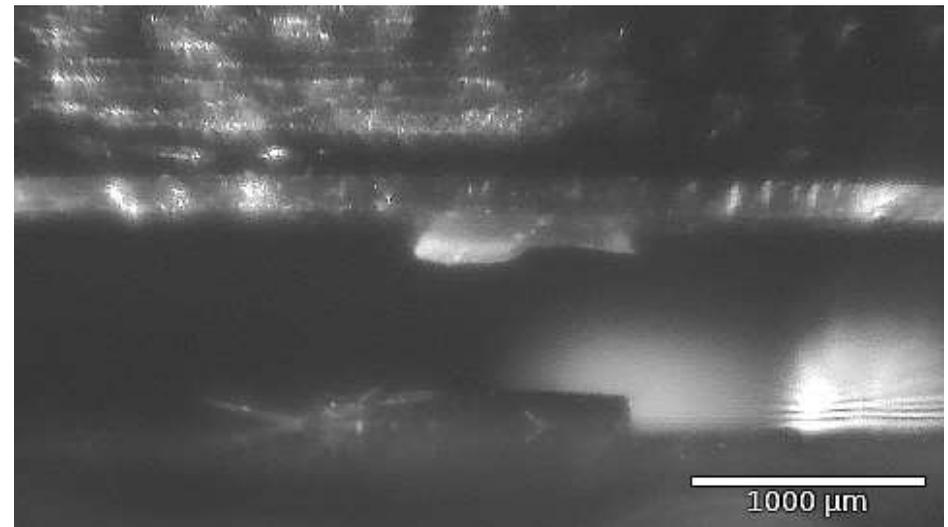
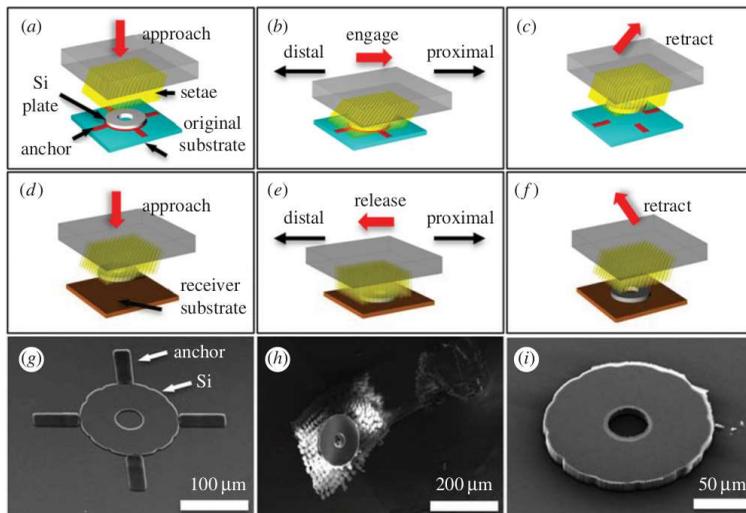
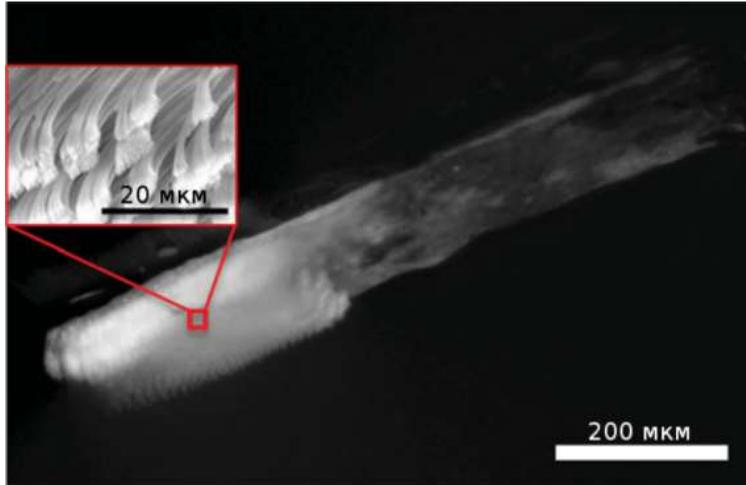
Отрицательная электризация поверхности соседних щетинок может предотвратить их слипание

В щетинках гекконов имеется **белок** класса бета кератинов с большим содержанием глицина и цистеина (**HGGS3**), имеющий **суммарный отрицательный заряд** (Alibardi 2013)

Пучок щетинок на поверхности окисленного кремния в РЭМ

Можно ли использовать естественные адгезивы в технических устройствах?

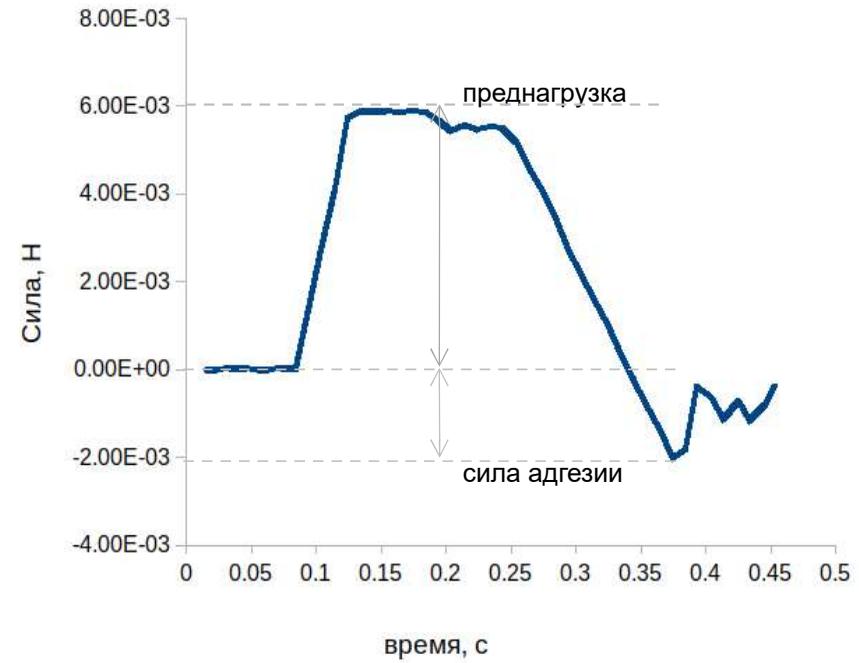
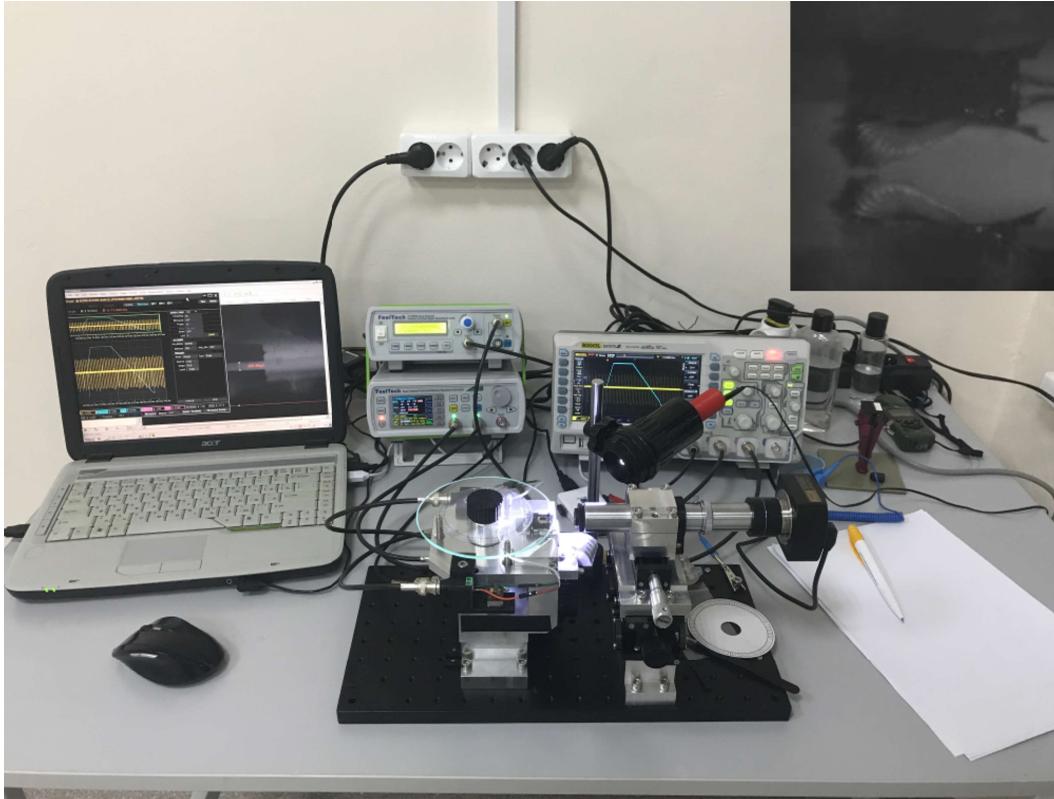
Грузоподъемность изолированных образцов адгезива геккона-токи (*Gekko gekko*)



масса предмета - 1 мкг
площадь - 0.05 мм²

масса предмета - 0.25 мг
площадь - 1.5 мм²

Надежная адгезия контактной площадки требует большой преднагрузки



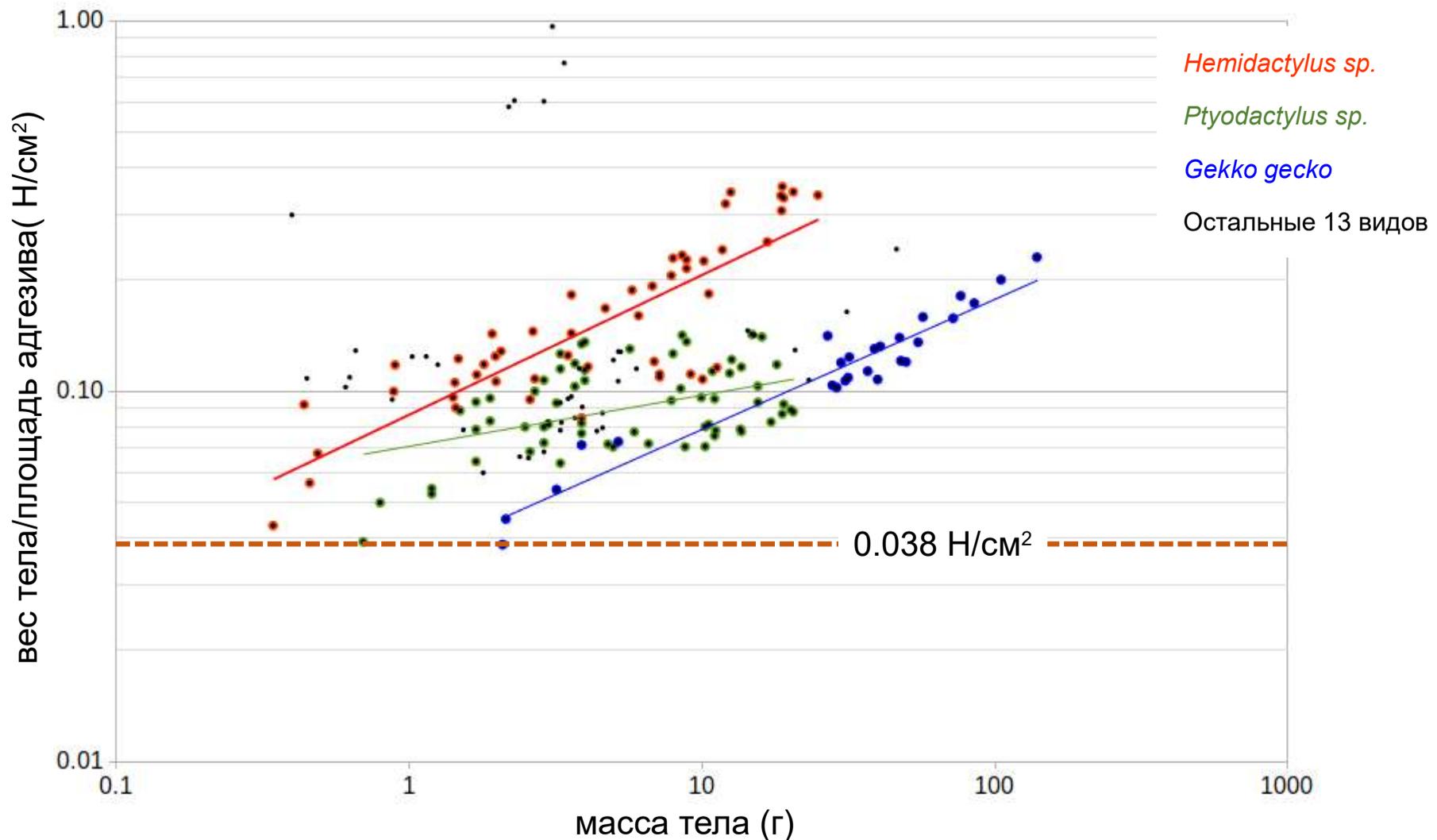
Преднагрузка:

у изолированных образцов подошвенного адгезива больше конечной адгезии
у живых гекконов значительно меньше конечной адгезии



У гекконов, по всей видимости, существует **механизм создания высокой локальной преднагрузки** на адгезив при постановке пальцев на опору

Адгезия и размеры

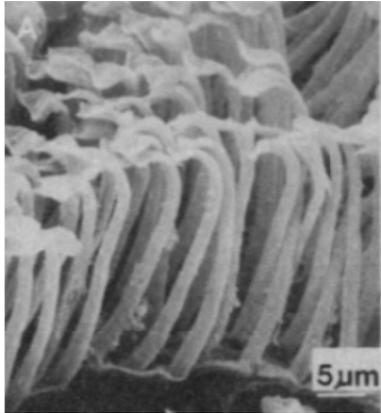


Необходимость обеспечить надежный адгезионный контакт может ограничивать не только максимальные, но и минимальные размеры животных

(по Лучкина и др. О размерах адгезионных площадок у гекконов. Зоол. ж. 2018. 97: 1164)

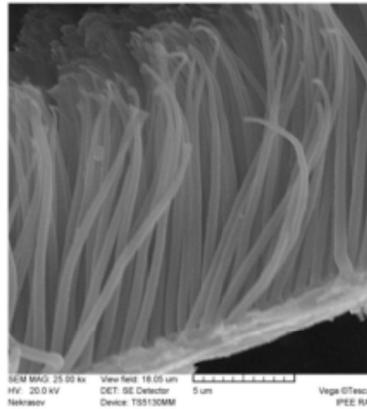
Развитие и эволюция адгезионных структур у Lacertilia

Scincidae



Сцинк
Prasinohaema virens
(Williams & Peterson,
1982)

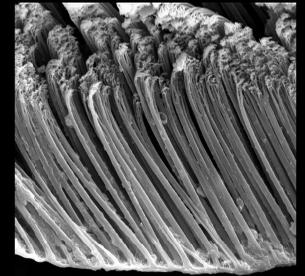
Polychrotidae



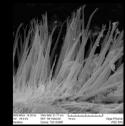
Анолис
Anolis carolinensis

Gekkonidae

палец



Matoatoa brevipes



ХВОСТ

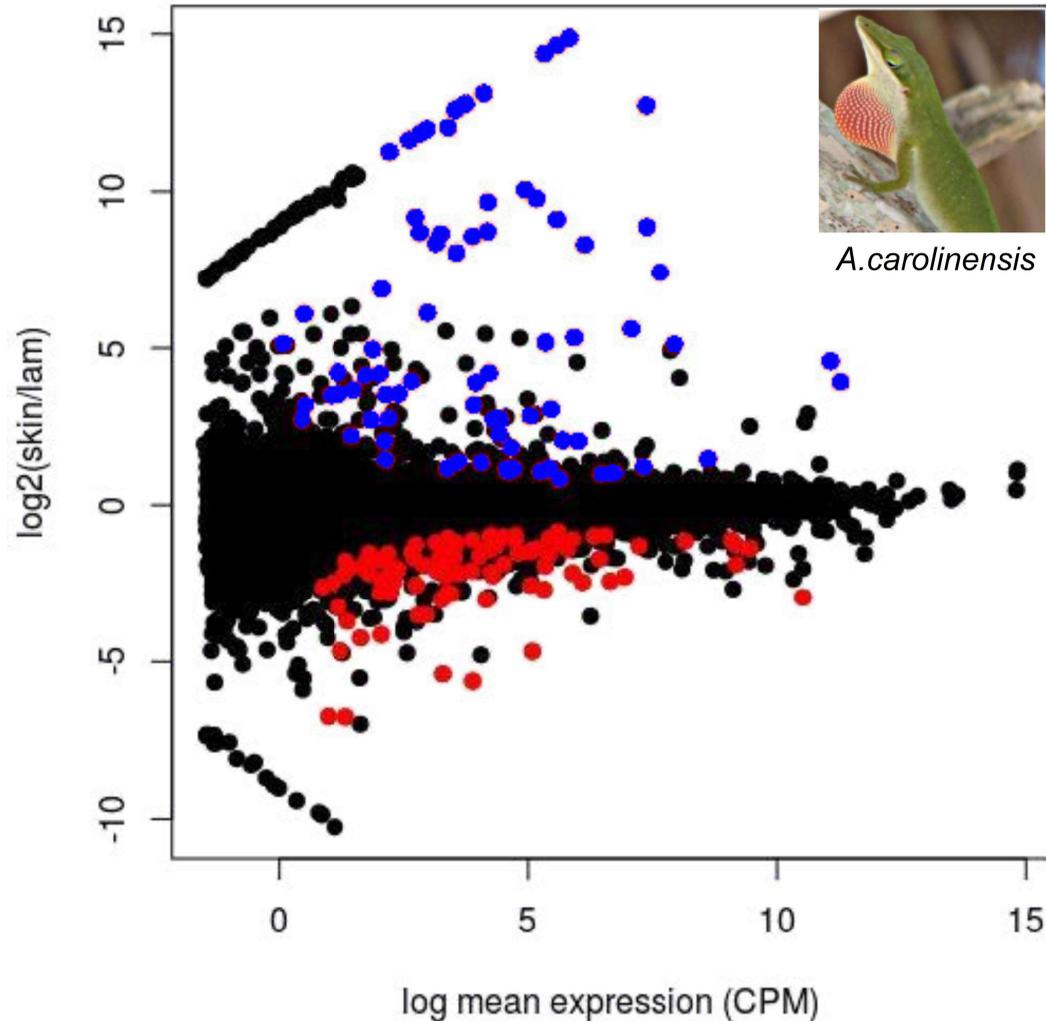


- Адгезионные структуры возникли, по меньшей мере 100 млн. лет назад
- Адгезионные структуры имеются у представителей трех семейств
- Адгезионные структуры могут присутствовать не только на подошве пальцев, но и на опорной поверхности хвоста
- Адгезионные структуры могли многократно возникать и исчезать в процессе эволюции одной клады

Формирование адгезивов у Lacertilia регулируется древним универсальным комплексом морфогенетических механизмов

Генетическая основа развития фибриллярного адгезива

Сравнительный анализ транскриптома образцов эпидермиса каролинского анолиса



Зависимость $\log_2(\text{fold change})$ от средней экспрессии («count per million» – CPM). Параметр «fold change» равен отношению частоты встречаемости генного транскрипта в разных образцах. Одной точке на графике соответствует один ген. Цветные точки – гены, транскрипция, которых статистически достоверно различается. Синие точки – гены, экспрессия которых выше в образцах без адгезива. Красные точки – гены, экспрессия которых выше в образцах с адгезивом.

Гены, экспрессия которых выше в образцах с адгезивом, в основном являются консервативными генами, имеющимися практически у всех позвоночных. Среди них большое число генов, кодирующих регуляторные белки и транскрипционные факторы.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!