

Аллометрия внутренних органов коллембол (Hexapoda: Collembola) в контексте миниатюризации членистоногих

Дарья Андреевна Румак, аспирантка, младший научный сотрудник МГУ имени М. В. Ломоносова

Алексей Алексеевич Полилов, член-корр. РАН, заведующий кафедрой энтомологии МГУ имени М. В. Ломоносова



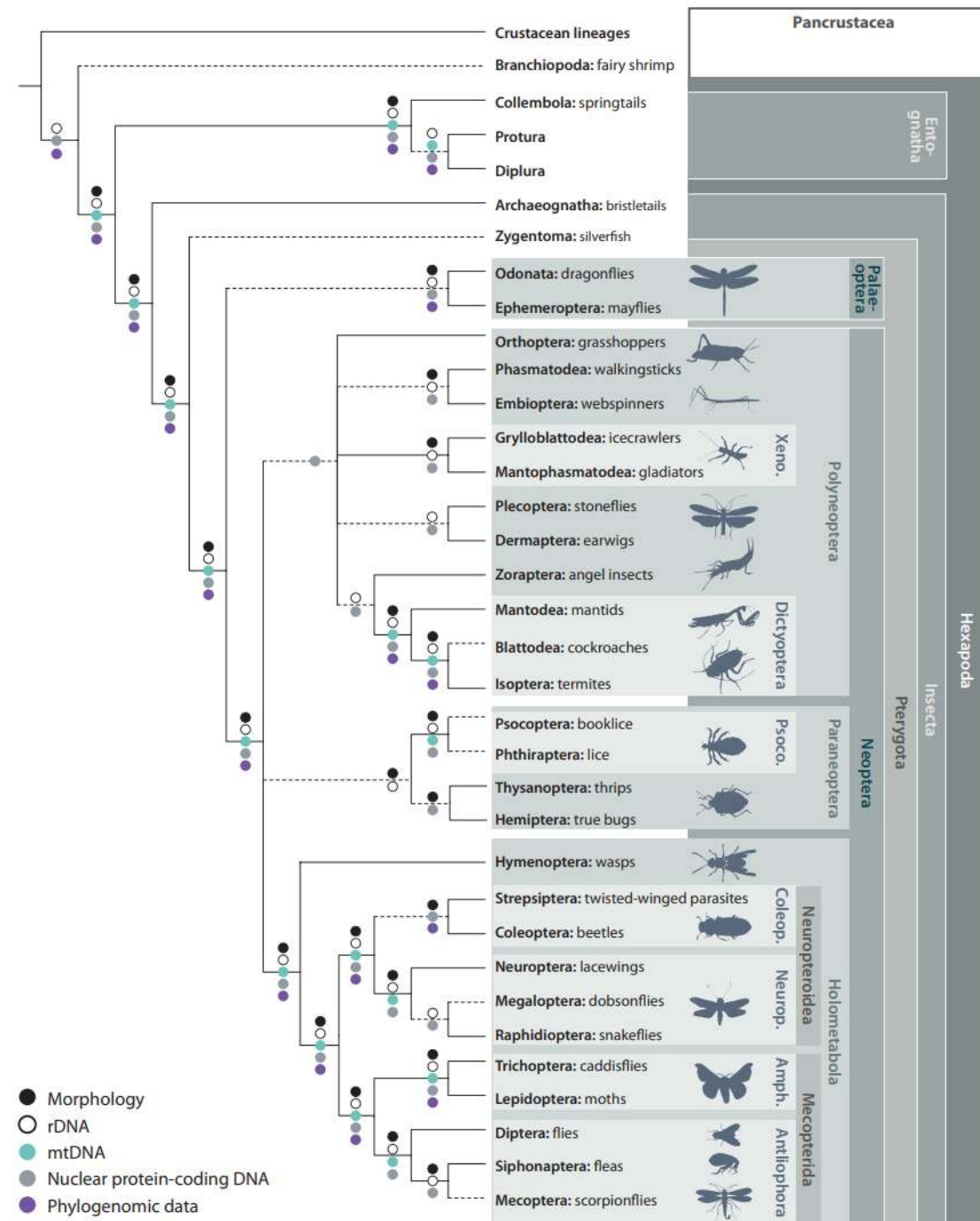
MicroInsectLab
Кафедра энтомологии
Биологический факультет
МГУ имени М. В. Ломоносова



План доклада

1. Литературные данные и понятийный аппарат
 - a) Миниатюризация
 - b) Аллометрия
 - c) Анатомия коллембол
 - d) Онтогенетическая аллометрия у коллембол
2. Аллометрия внутренних органов коллембол (Hexapoda: Collembola) в контексте миниатюризации членистоногих







200 μ m

*Megaphragma
mymaripenne*



*Dicopomorpha
echmepterygis*



Nanosella sp.

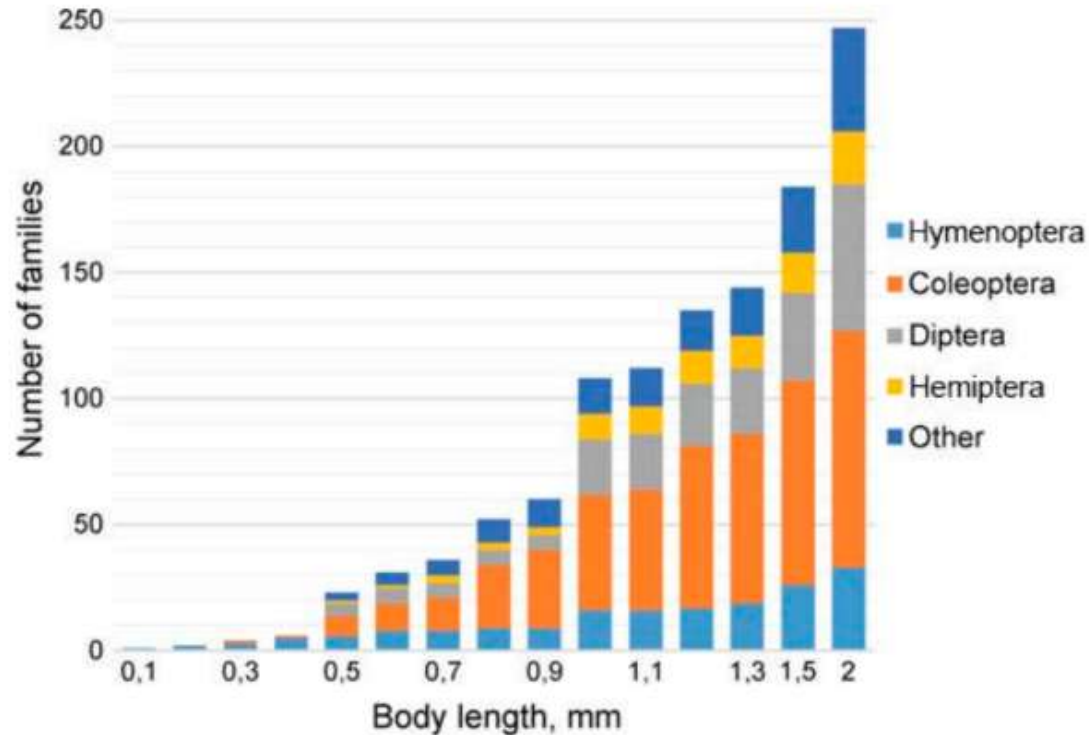


*Paramecium
caudatum*



*Amoeba
proteus*

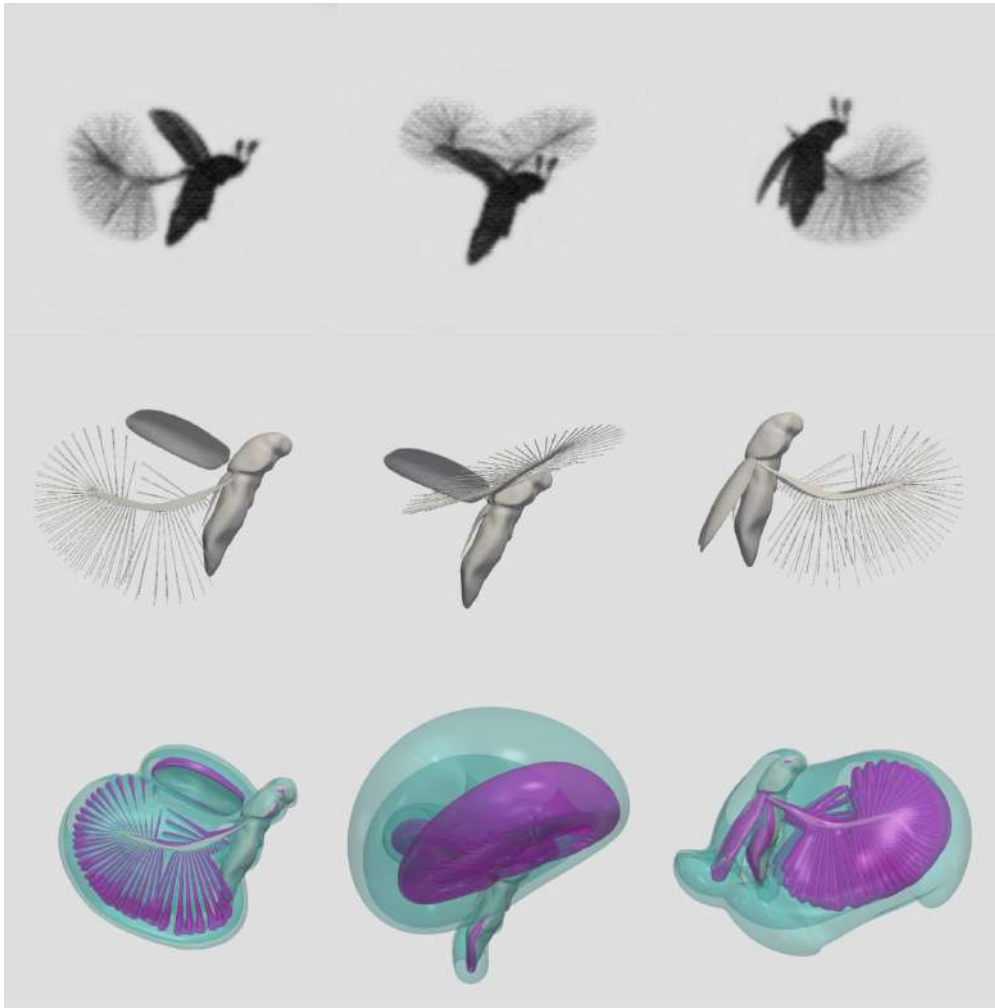
Миниатюризация членистоногих



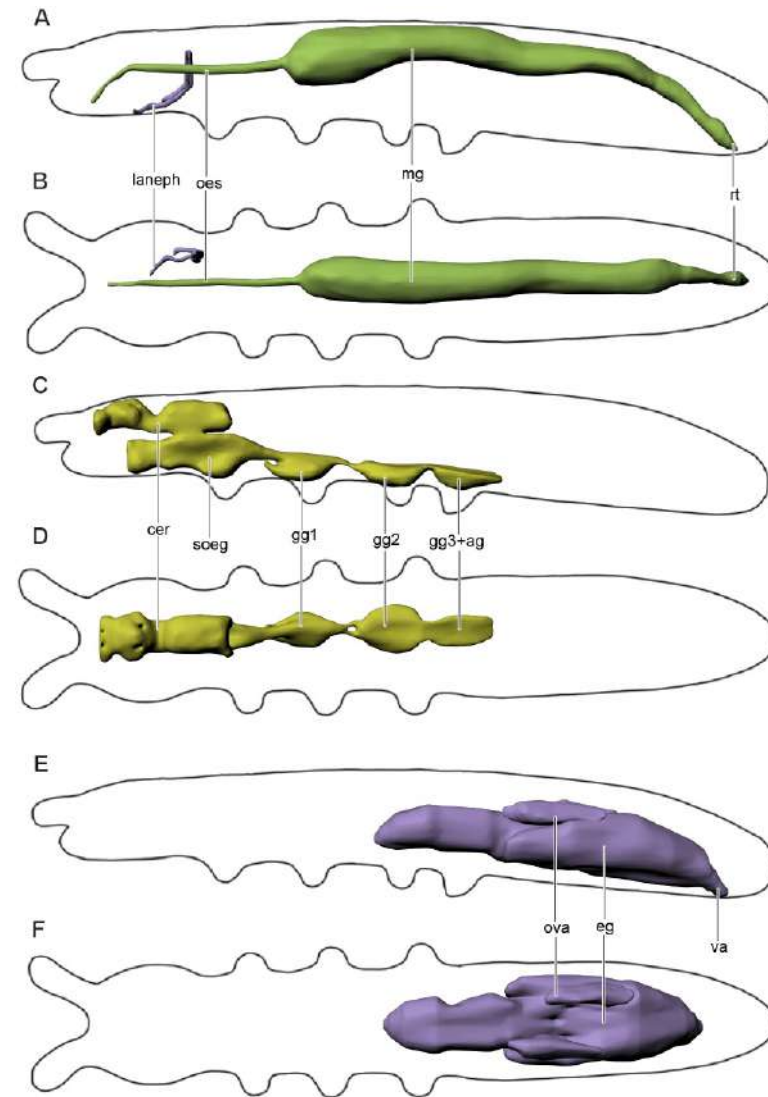
Существует по меньшей мере 245 семейств класса Insecta, включающих представителей с длиной тела менее 2 мм, и по меньшей мере 106 семейств этого класса, включающих представителей длиной 1 мм или меньше.

Количество семейств насекомых, включающих представителей с определённой длиной тела (Polilov, 2016)

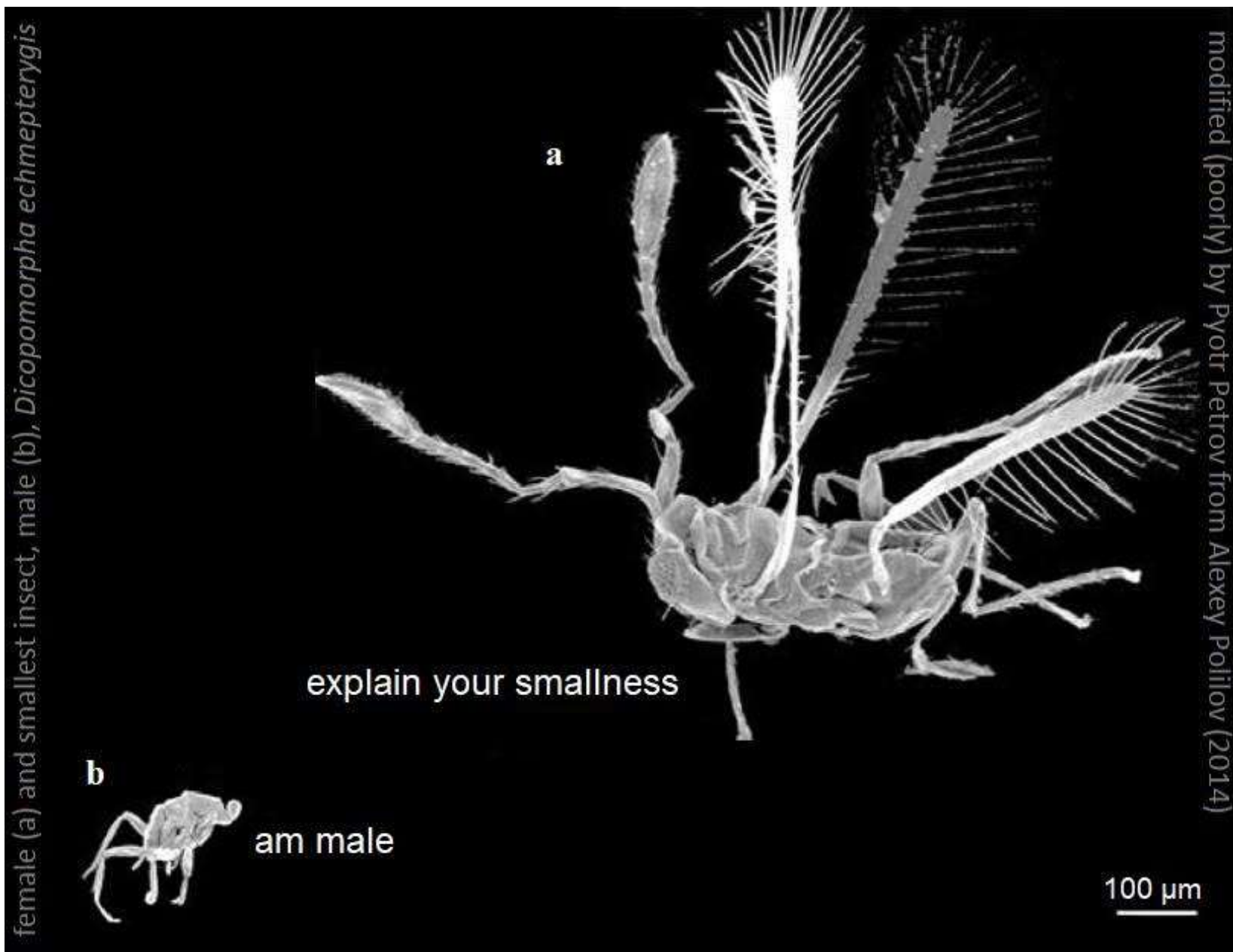




Реконструкция полёта *Paratuposa placensis* (Farisenkov et al., 2022)



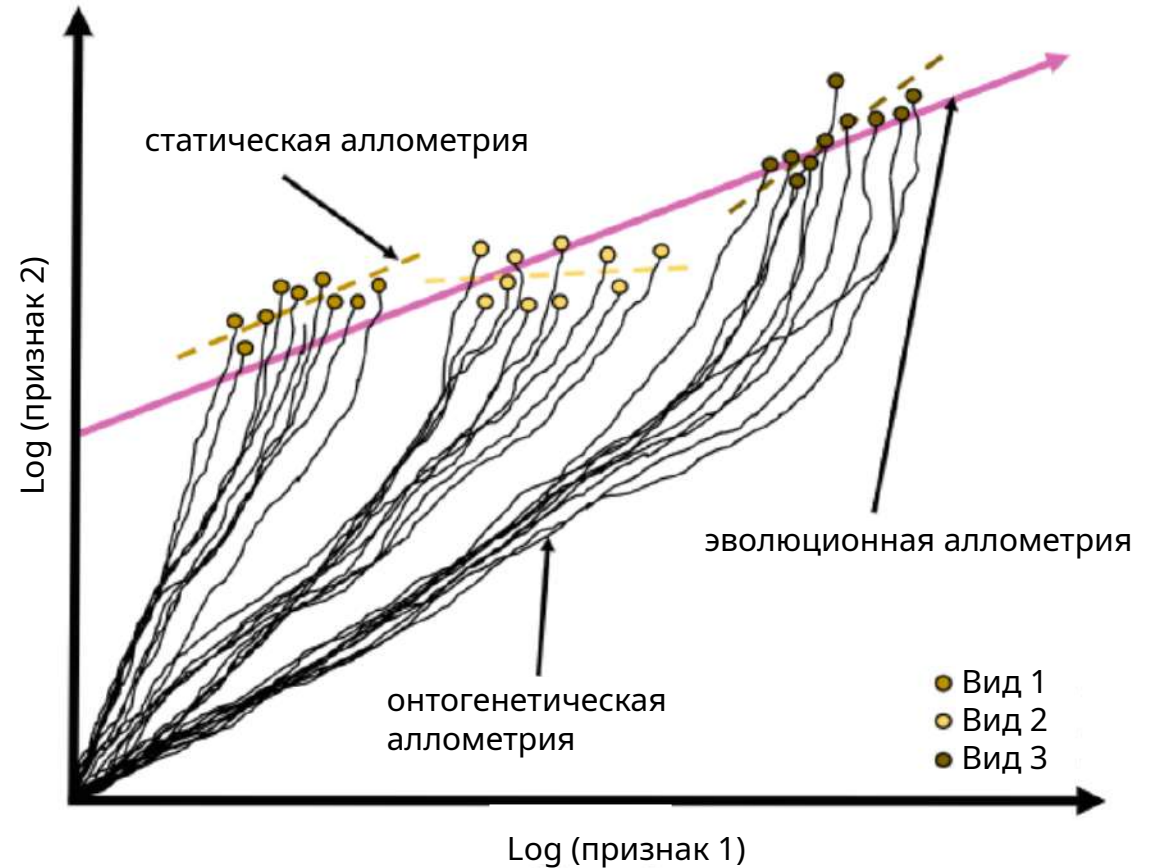
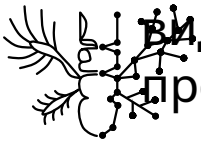
Пищеварительная и выделительная (A, B), нервная (C, D), и половая (E, F) системы *Mesaphorura sylvatica* (Collembola: Tullbergiidae) (Panina et al., 2019)



Аллометрия

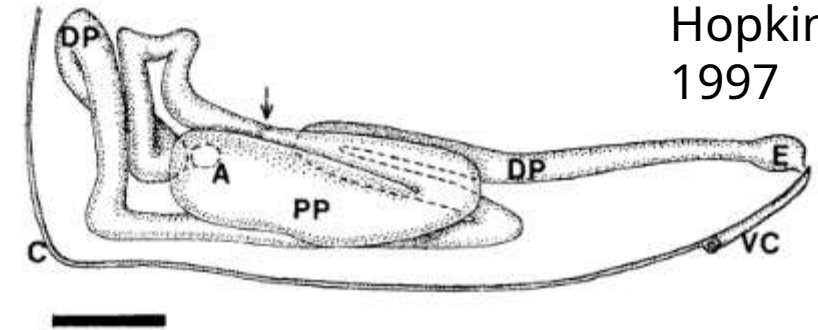
Аллометрия – закономерность роста, при которой отдельные системы организма изменяются непропорционально его общему объему.

- **Онтогенетическая аллометрия** прослеживается в ходе онтогенеза особи или устанавливается при сравнении разновозрастных особей одного вида.
- **Статическая аллометрия (внутри- и межвидовая)** – у особей одного возраста и разных размеров.
- **Эволюционная аллометрия** – у разных видов в ряду филогенетически преемственных форм.



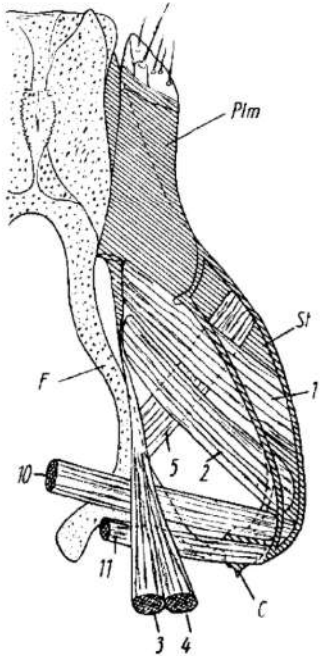
Mitchell, Sherratt, Weisbecker,
2024

Анатомия коллем



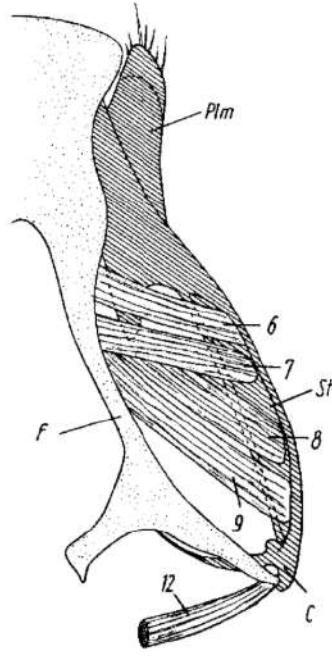
Hopkin,
1997

Fig. 4.12. Semi-schematic diagram of a labial nephridium of *Orchesella cincta* (Entomobryidae). A, aperture showing connection with sacculus (not shown); C, cuticle; DP, distal part; E, end sac; PP, proximal part; VC, ventral channel or groove; arrow, transition of PP to DP. Scale bar = 10 μ m. Reproduced from Verhoef *et al.* (1979) by kind permission of the authors and Springer-Verlag.



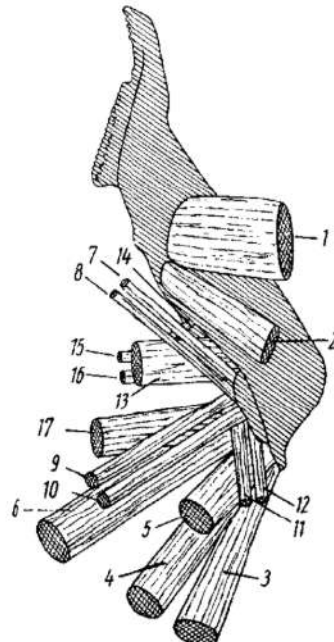
Maxille von dorsal

Wolter, 1963

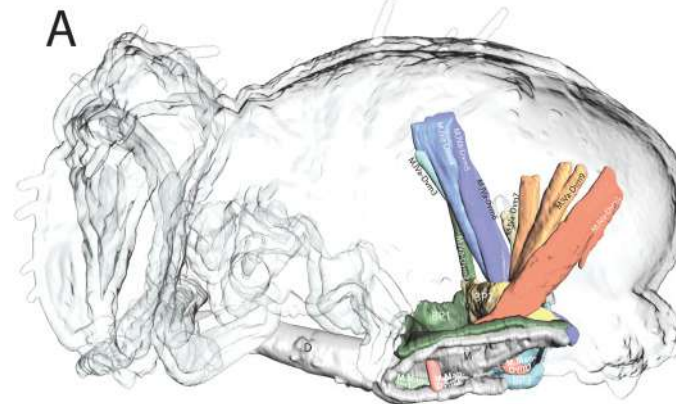


Maxille von ventral

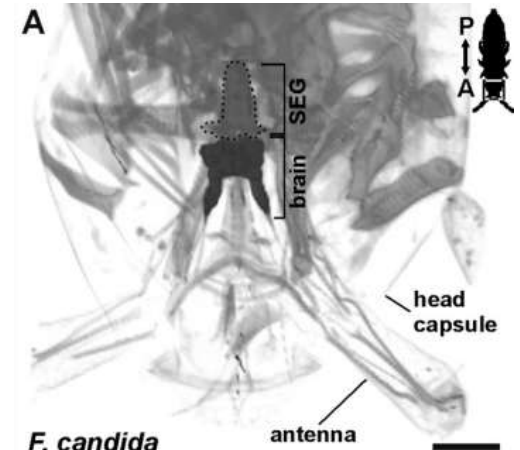
Tomocerus vulgaris (verändert nach Hoffmann)



Mandibel von dorsal



μ CT-based morphological reconstruction of the abdominal segments, cuticle and musculature of the basal plates in the *Dicyrtomina ornata* (Oliveira, Smith, 2024)

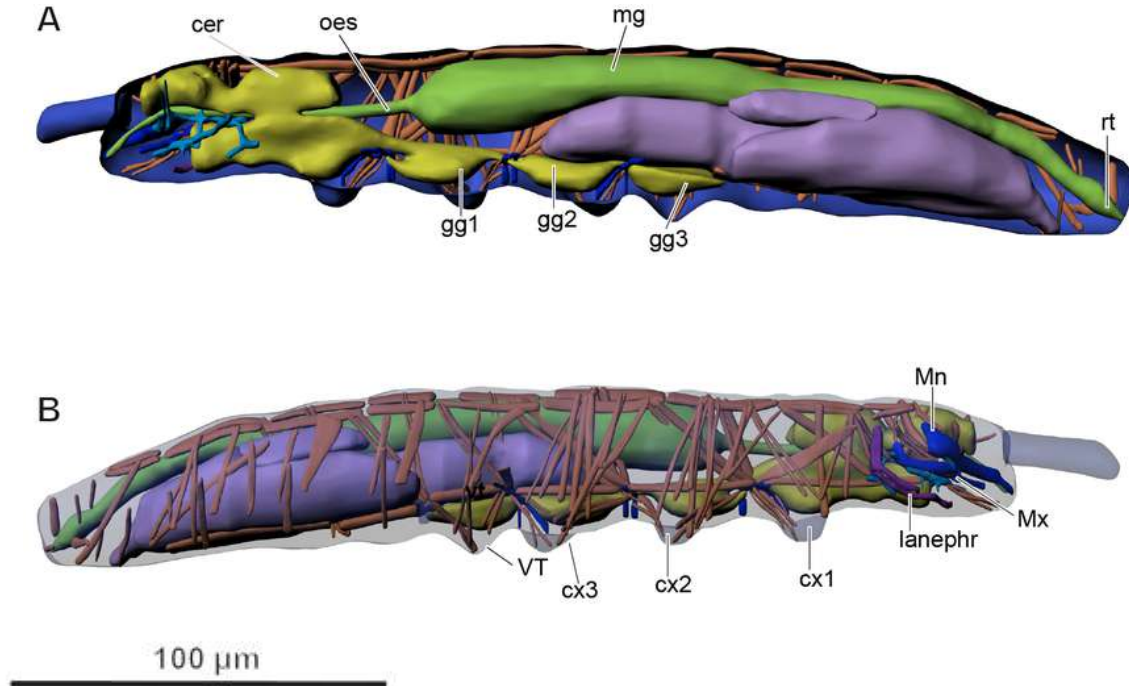


F. candida

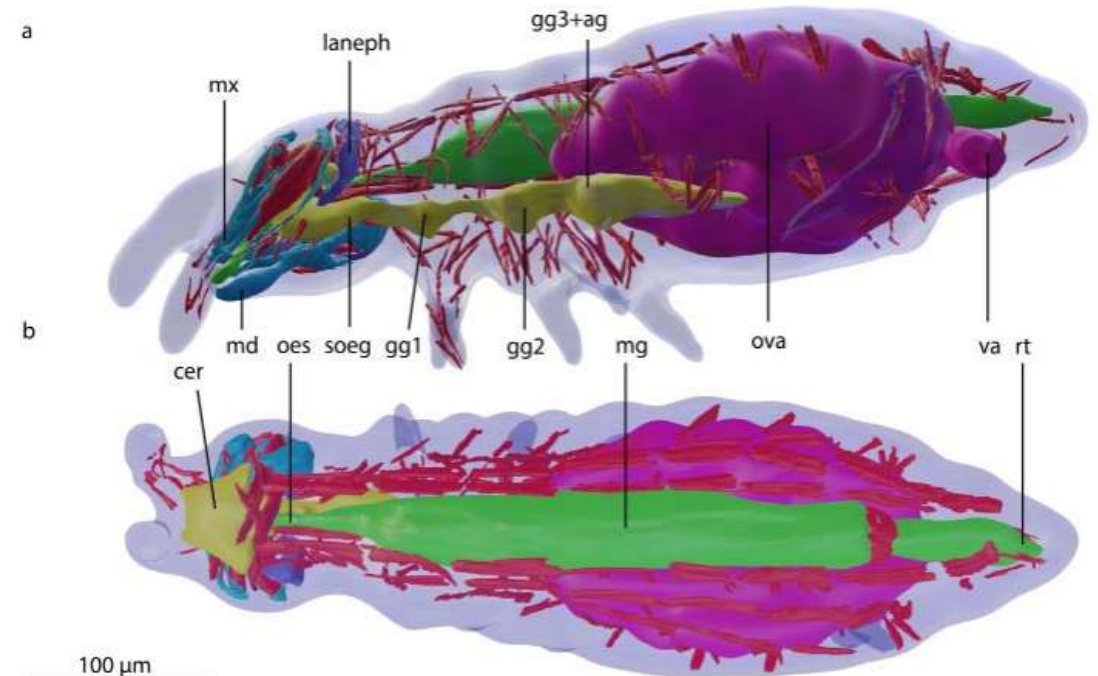
Мозг и подглоточный ганглий *Folsomia candida* (Kollmann *et al.*, 2011)



Анатомия коллембол

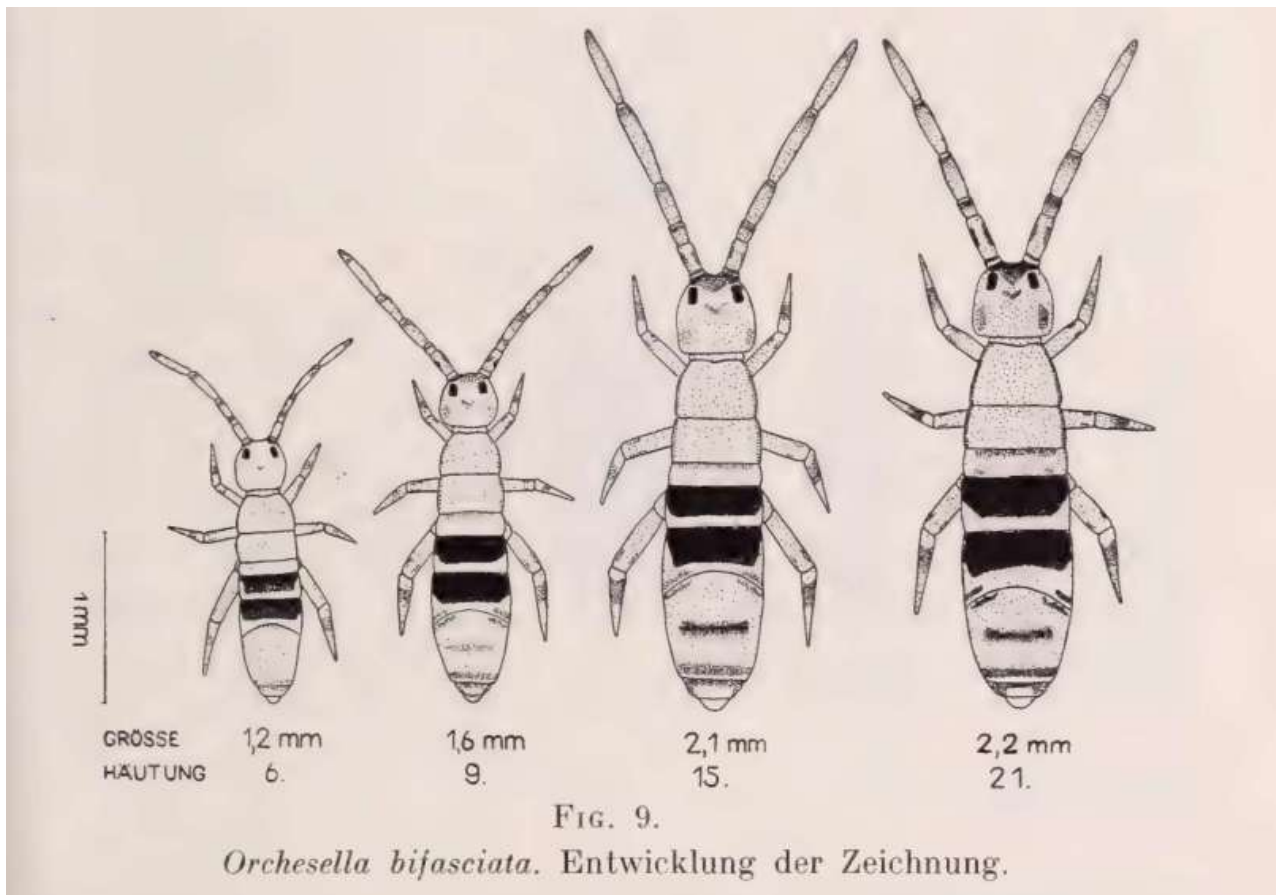


Внутренняя морфология *Mesaphorura sylvatica*, 3D. Цвета: синий — кутикула; светло-голубой — тенторий; зеленый — пищеварительная система; желтый — центральная нервная система; коричневый — мускулатура; пурпурный — репродуктивная система; темно-фиолетовый — выделительная система (Panina et al., 2019).

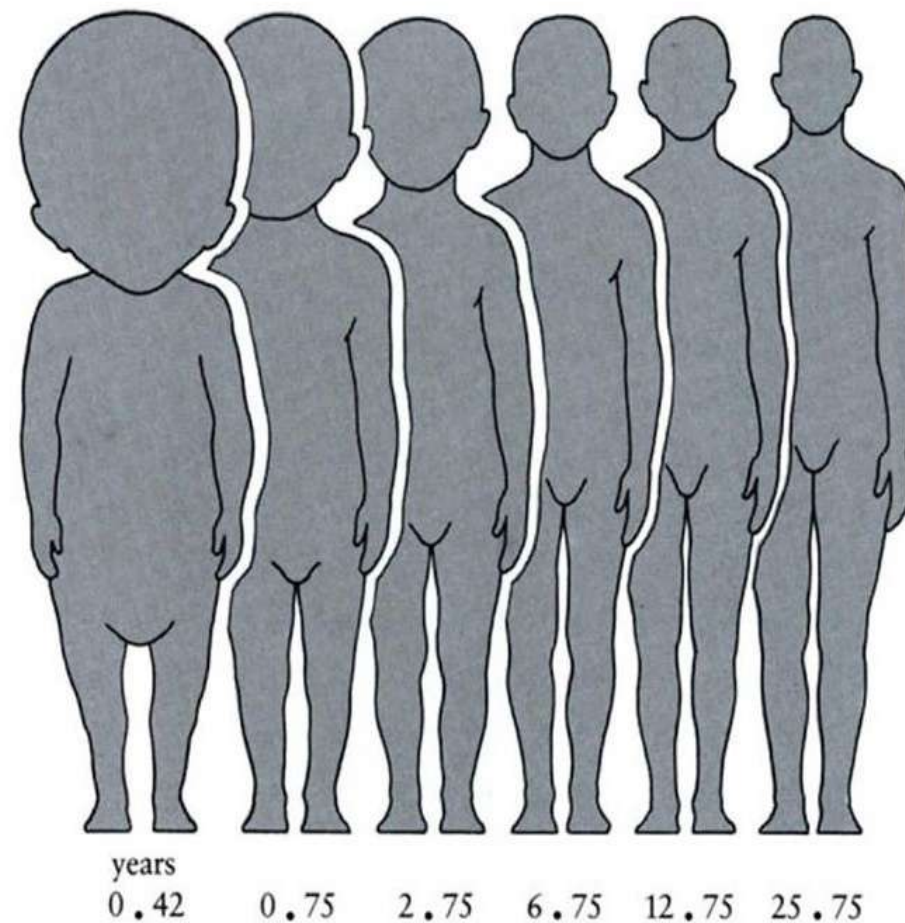


Общая анатомия *Hypogastrura serrata*, 3D. Цвета: синий — ротовые части, голубой — псевдотенториум, зеленый — пищеварительная система, желтый — центральная нервная система, красный — мускулатура, розовый — половая система, фиолетовый — выделительная система (Rumak, Polilov, 2025).

Онтогенетическая аллометрия



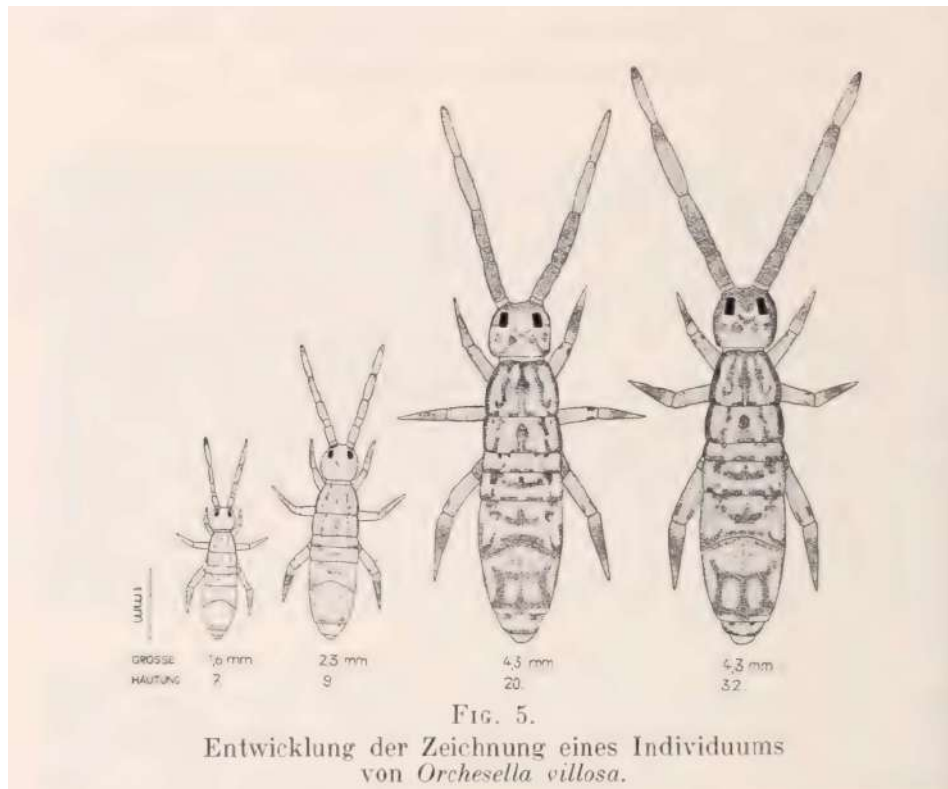
Онтогенетическая аллометрия (Lindenmann, 1950)



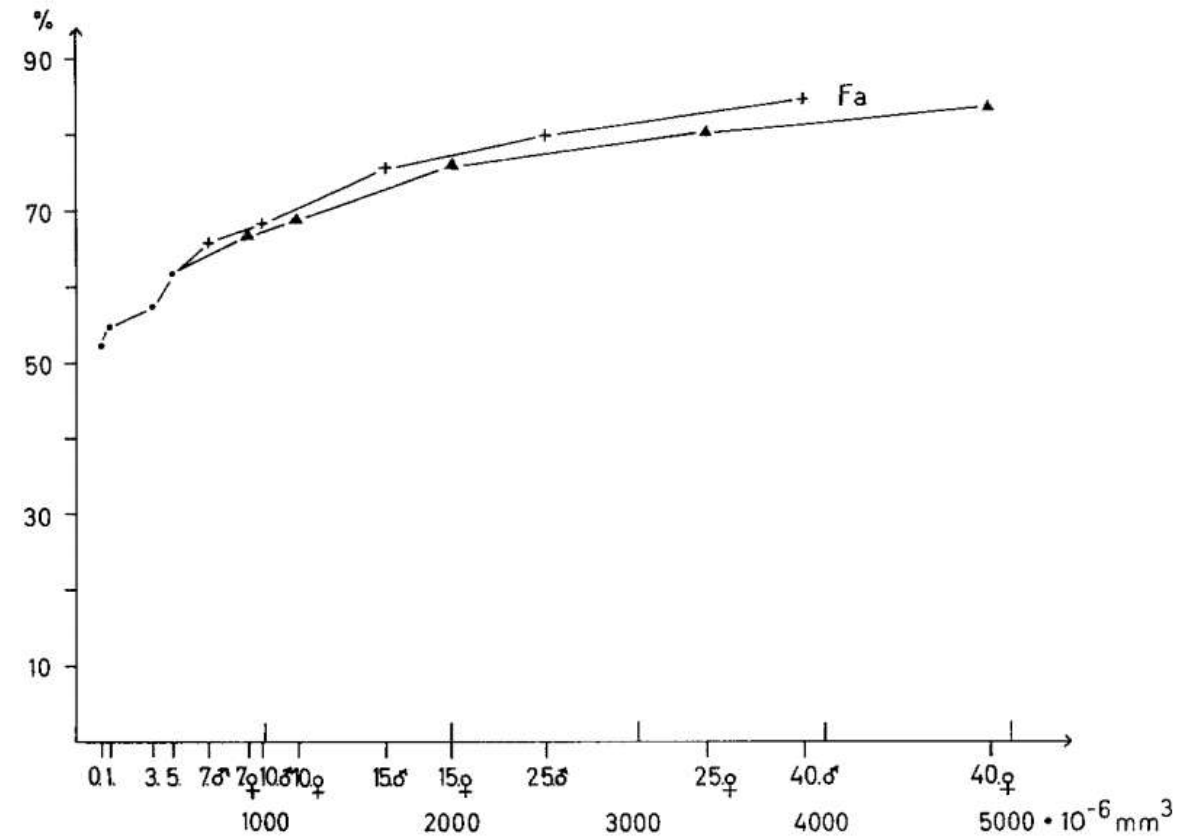
Онтогенетическая аллометрия (Taleb, 2014)

Изучение аллометрии у коллембол

Orchesella villosa в постнатальном развитии (Lindenmann, 1950).



Относительный объем нейропиля *Orchesella villosa* в постнатальном развитии (Korr, 1968).



Цель работы – исследовать внутреннее строение и онтогенетическую аллометрию органов в ходе постнатального развития коллемболы *Hypogastrura assimilis*

Задачи:

1. Изучить внутреннее строение коллемболы *H. assimilis* разных возрастов.
2. Исследовать онтогенетическую аллометрию систем органов *H. assimilis*.
3. Провести сравнительный анализ морфогенеза органов и их онтогенетической аллометрии в постнатальном развитии *H. assimilis* и других изученных гексапод.



Материалы и методы

Особи *Hypogastrura assimilis* (Krausbauer, 1898) (Collembola, Poduromorpha, Hypogastruridae) были собраны из культуры, поставленной в 2022 году.

Изучение внешнего строения:

Сканирующая электронная микроскопия (Jeol JSM-6380LA).

Изучение внутреннего строения:

Конфокальная микроскопия (Olympus FV-10i).

Трёхмерная реконструкция *H. assimilis* после микроскопии:

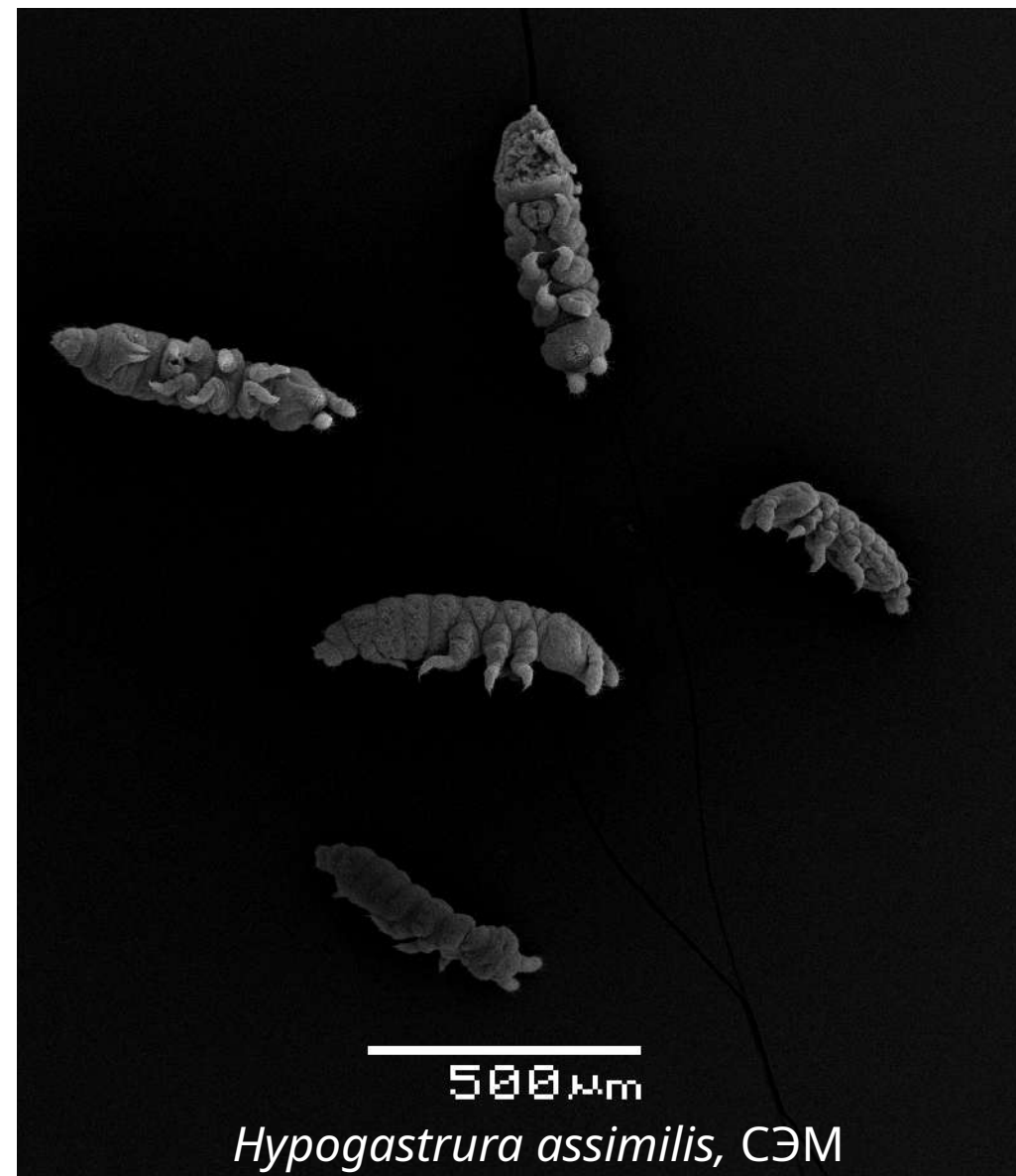
Трёхмерная реконструкция в программе Bitplane Imaris 9.5.1;

Обработка трёхмерной модели в программе Blender 2.92.0;

Подготовка рисунков с использованием программ Adobe Photoshop CC 2019, Adobe Illustrator CC 2019.

Изучение аллометрии:

Аллометрический анализ по методу главных осей (Major Axis Regression, MA) с помощью R 4.5.0, RStudio, с использованием пакета «smatr».



Материалы и методы

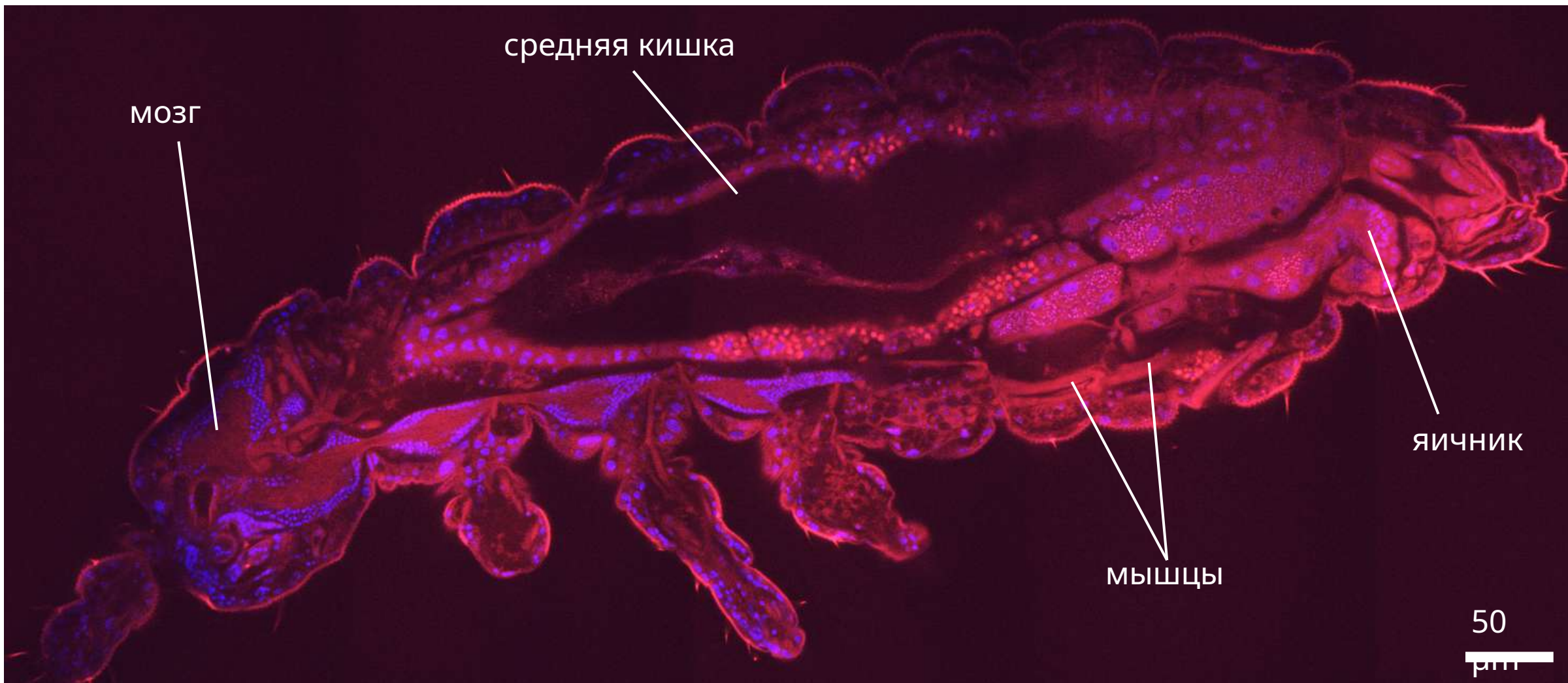


Hypogastrura assimilis, разные возрастные группы, СЭМ



Материалы и методы

Hypogastrura assimilis, конфокальная микроскопия



Пищеварительная и выделительная системы *Hyrogastrura assimilis*

I возраст
вид сбоку

Половозрелая особь
вид сбоку

вид
сверху

вид
сверху

задняя
кишка

средняя
кишка

лабиальный
нефридий

передняя
кишка

задняя
кишка

средняя
кишка

лабиальный
нефридий

передняя
кишка

50 μm

100 μm

Результаты



Нервная система *Hypogastrura assimilis*

I возраст

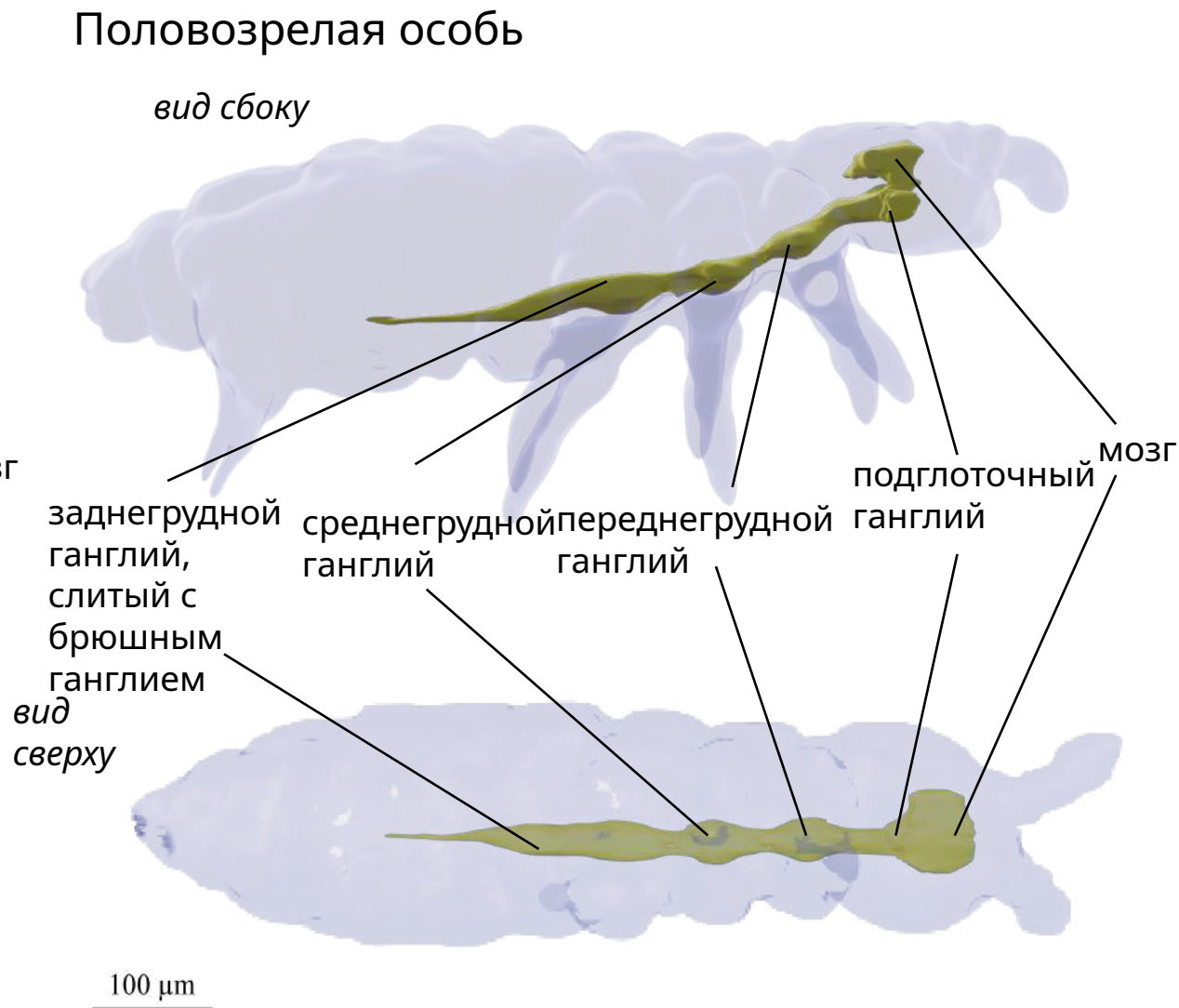
вид сбоку



вид
сверху

Половозрелая особь

вид сбоку

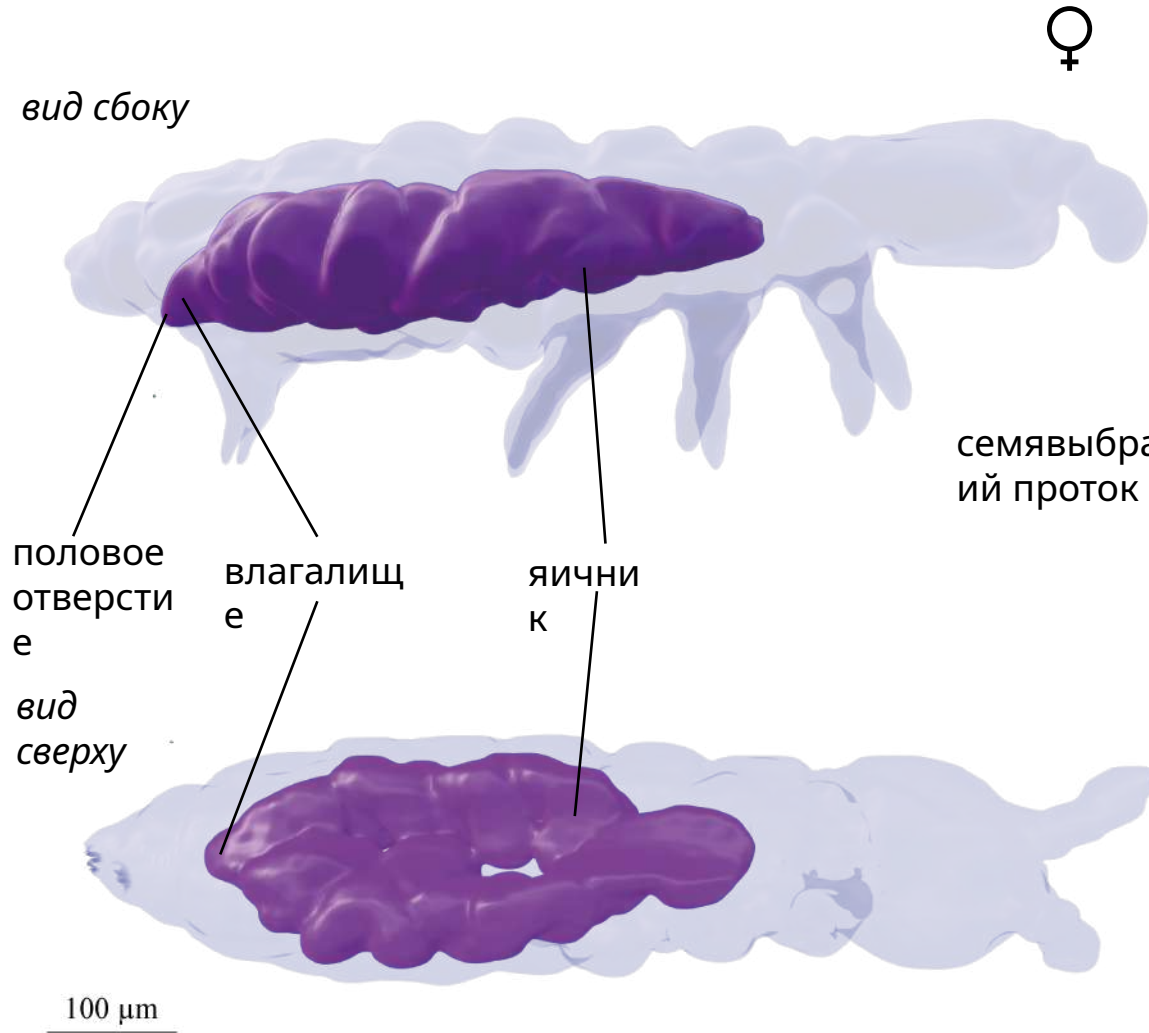


вид
сверху

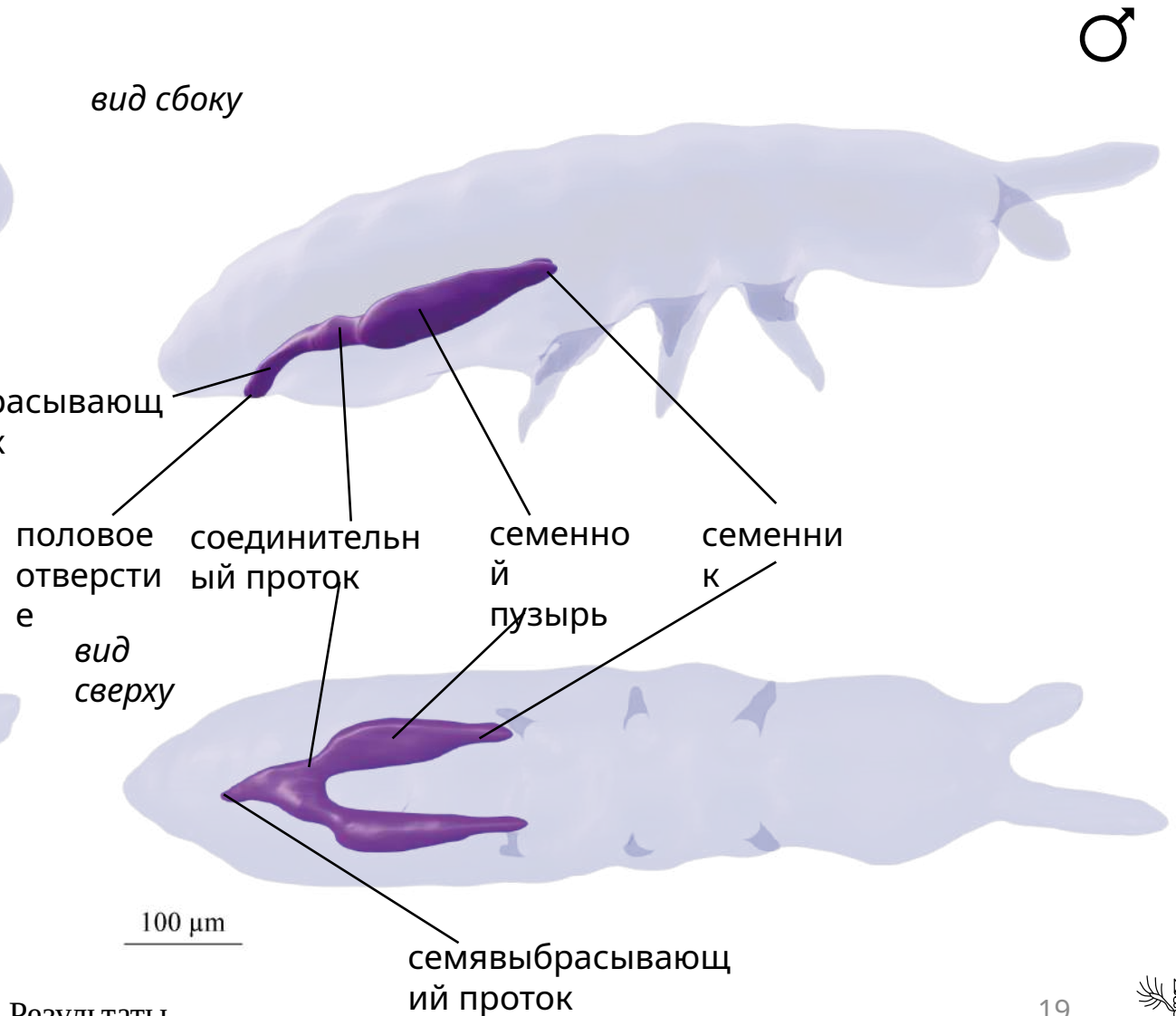
Результаты



Половая система половозрелых особей *Hypogastrura assimilis*



семявыбрасывающий проток

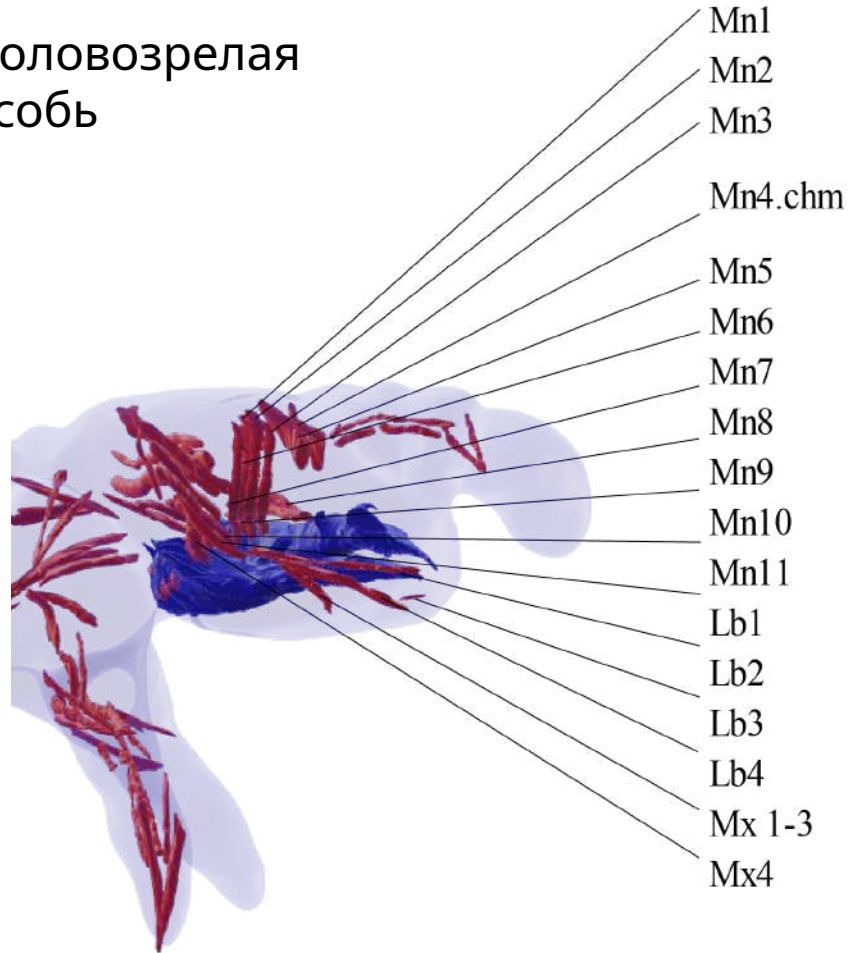


Результаты



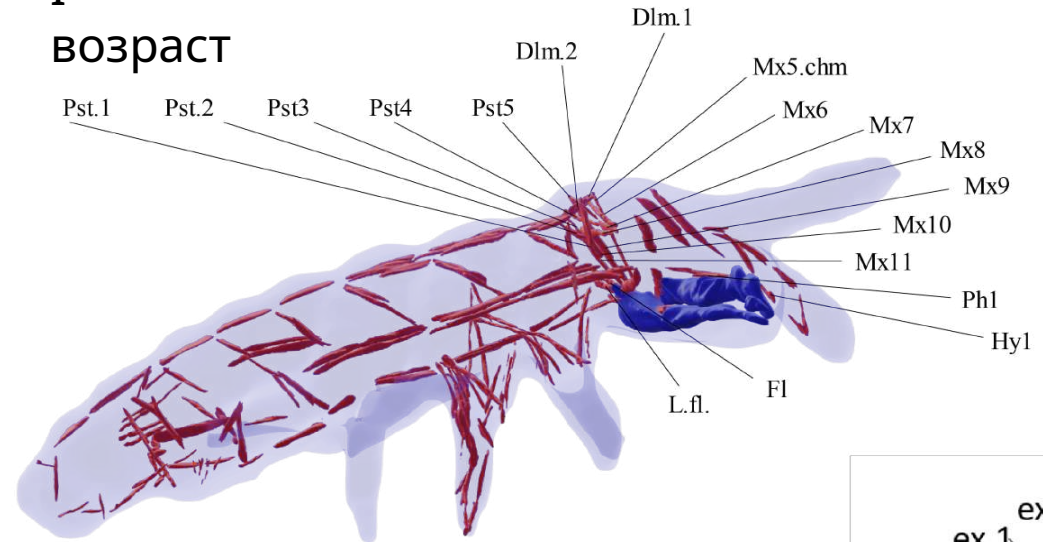
Мускулатура головы и антенн

Половозрелая
особь



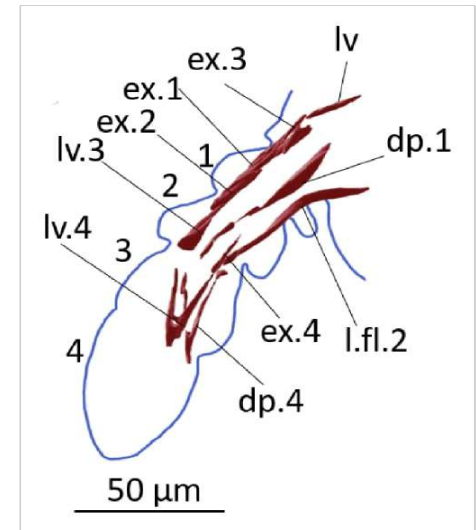
100 µm

I
возраст



50 µm

adult,
juv.1

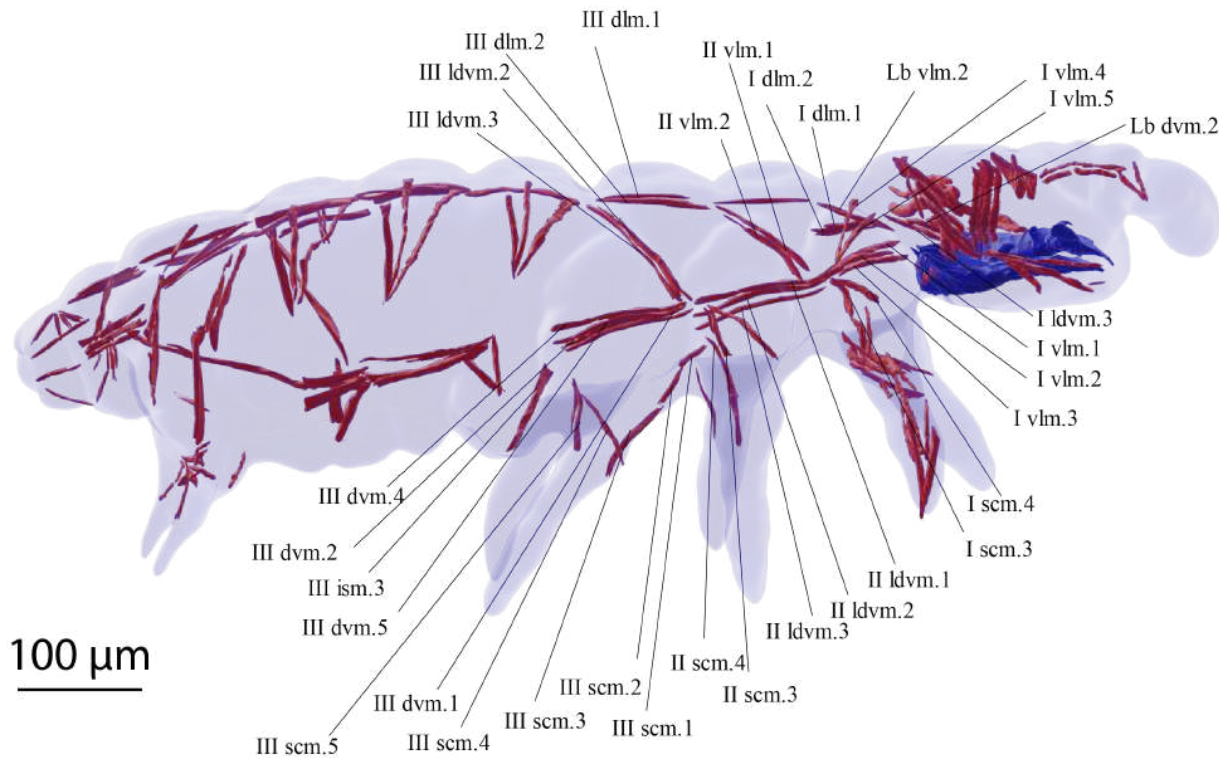


Номенклатура по Imms, 1977; Blanke, Machida, 2016

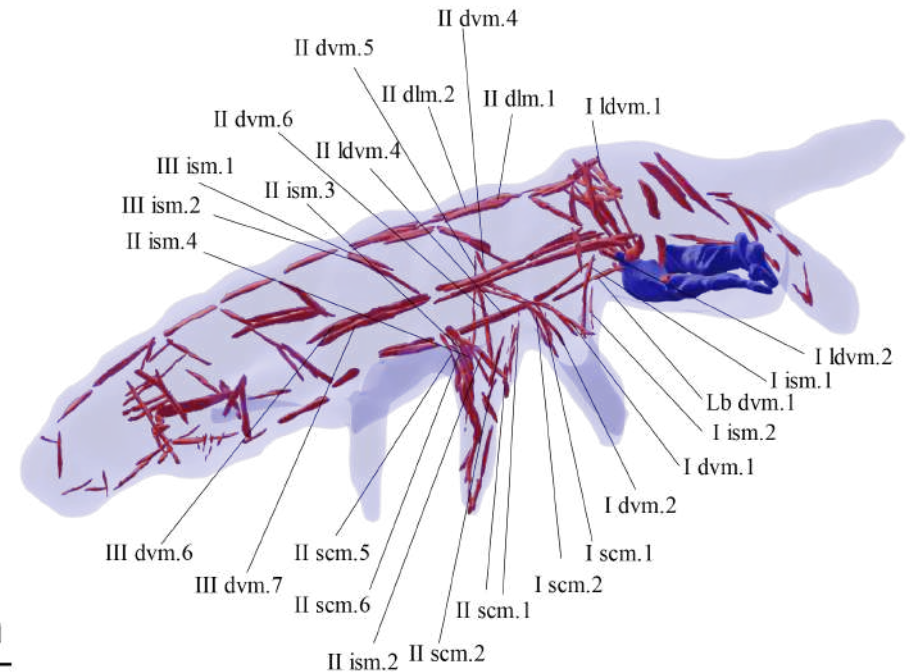


Мускулатура груди

Половозрелая
особь



I
возраст



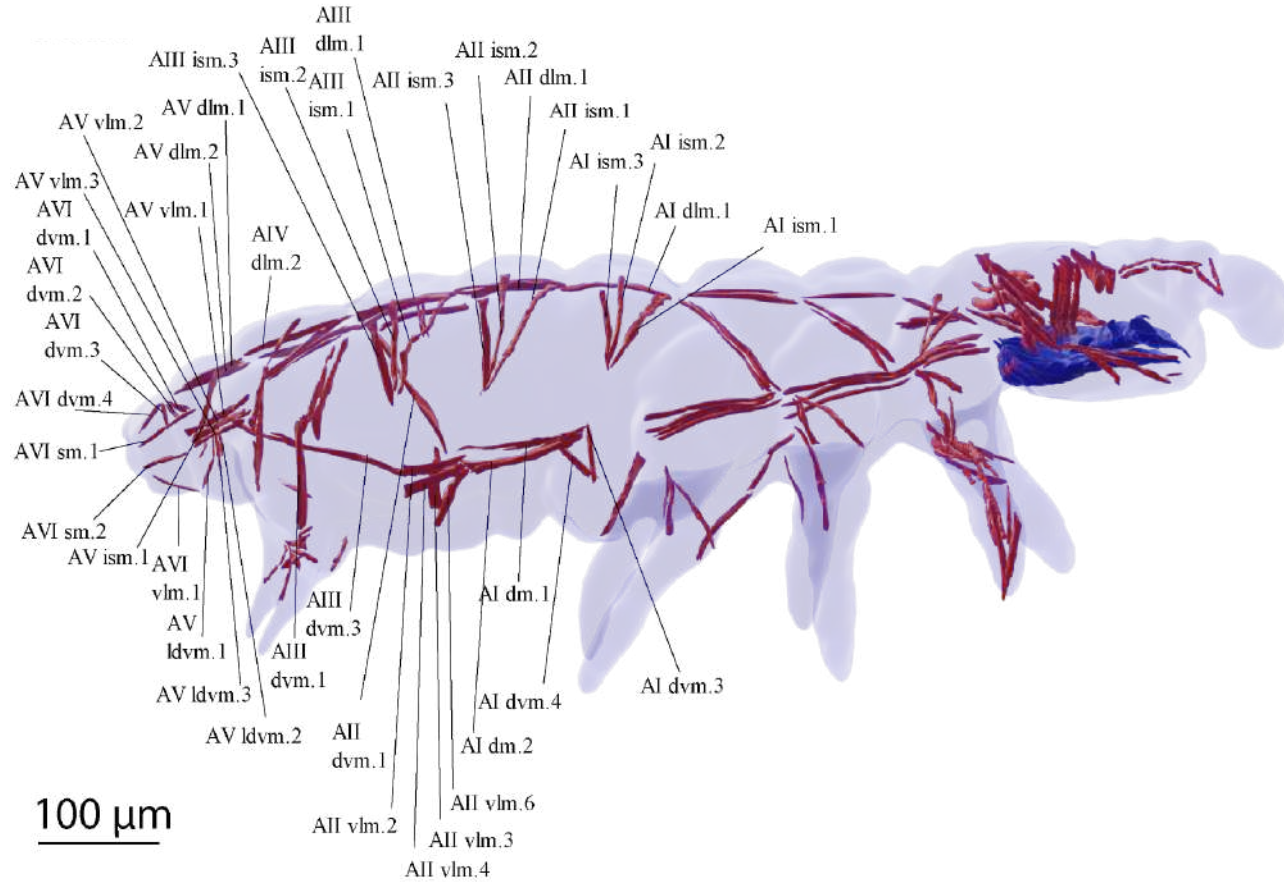
Номенклатура по Bretfeld, 1963

Результаты

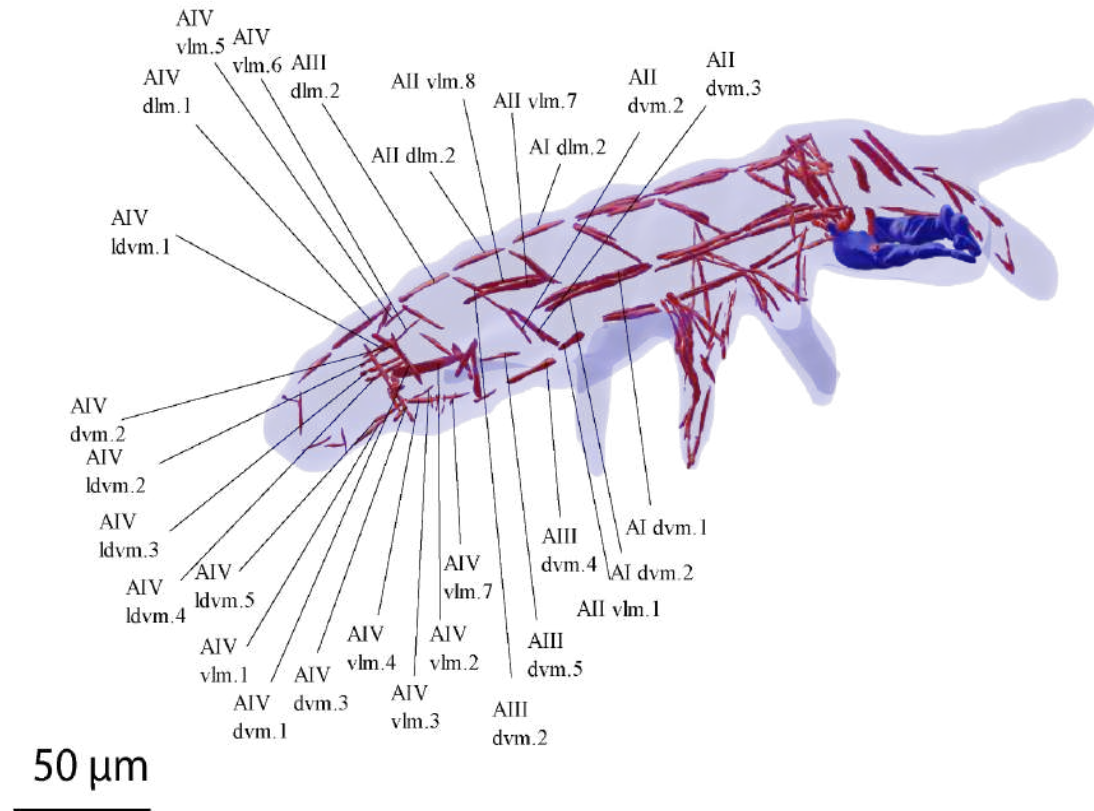


Мускулатура брюшка

Половозрелая особь



I возраст



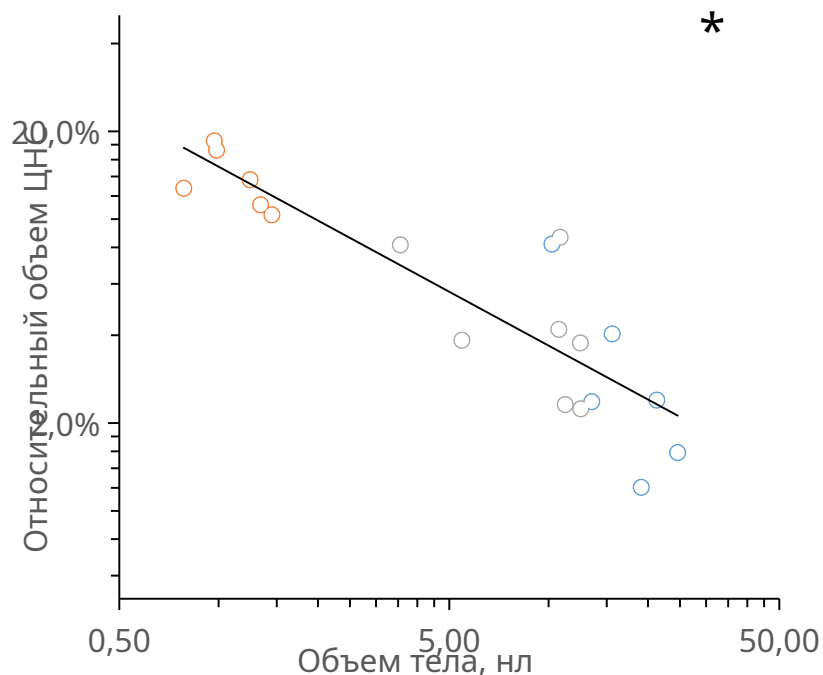
Номенклатура по Bretfeld, 1963

Результаты

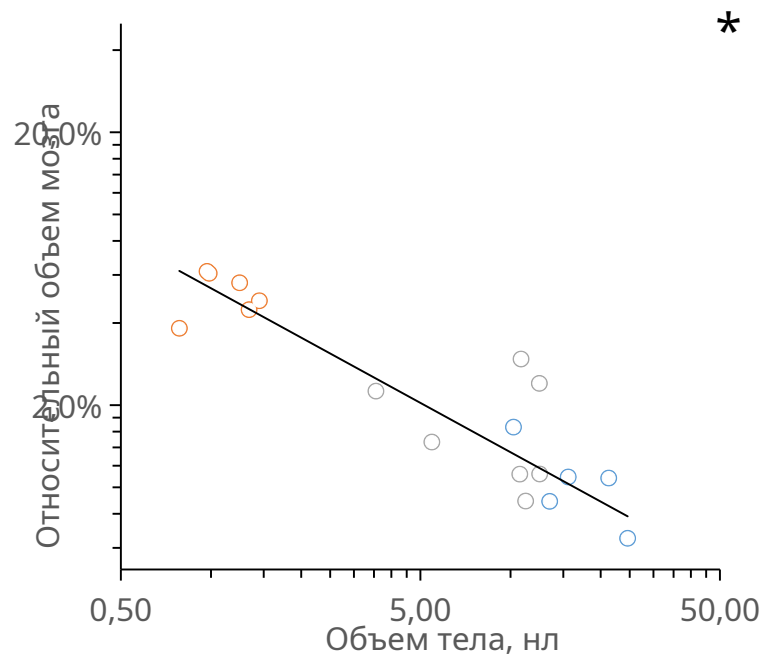


Онтогенетическая аллометрия в постнатальном развитии *Hypogastrura assimilis*

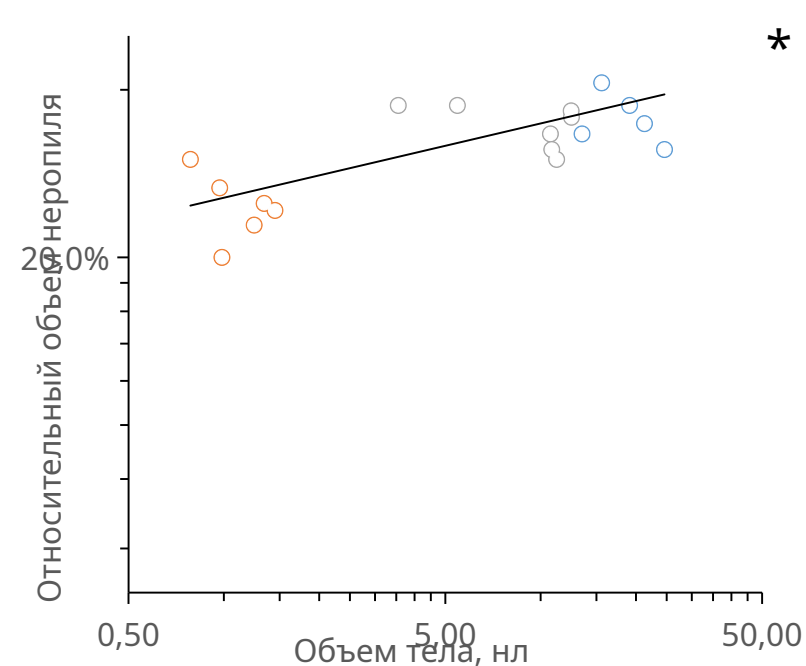
Относительный объем ЦНС
от объема тела



Относительный объем
мозга



Относительный объем
нейропиля от объема тела



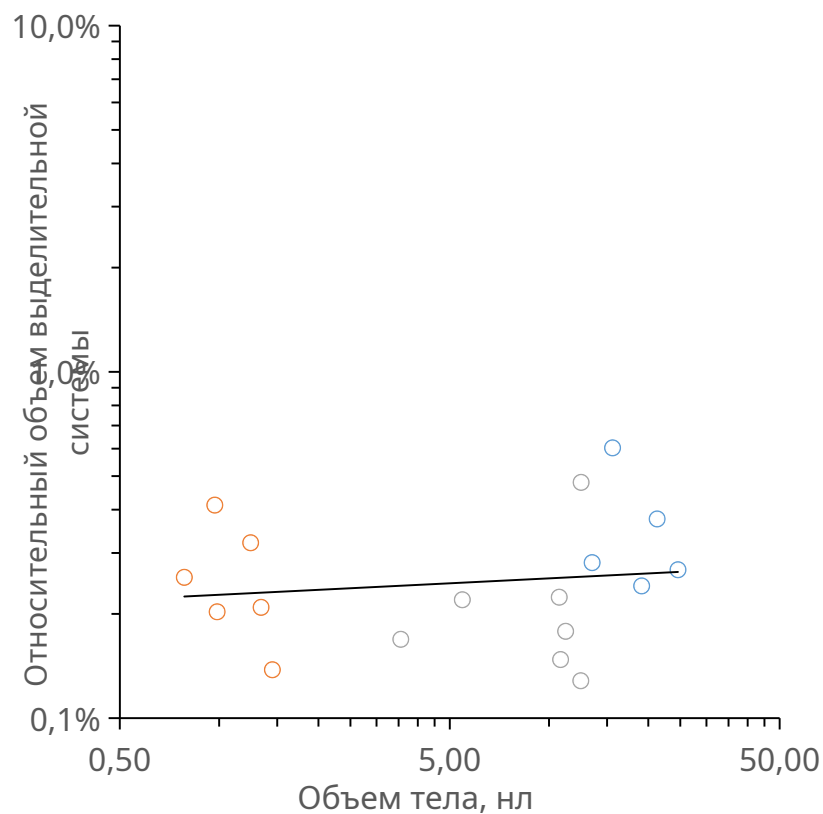
* $p < 0,001$

Результаты

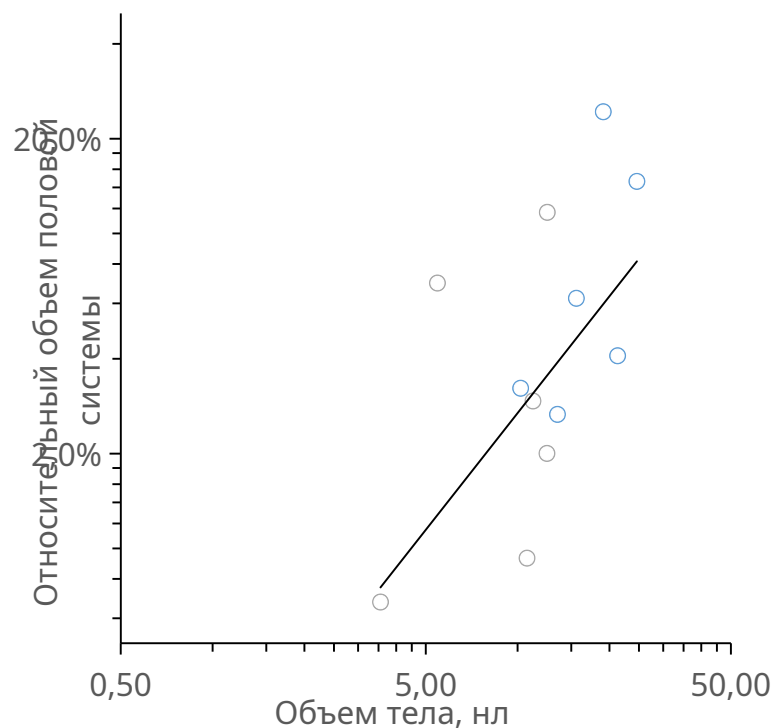


Онтогенетическая аллометрия в постнатальном развитии *Hypogastrura assimilis*

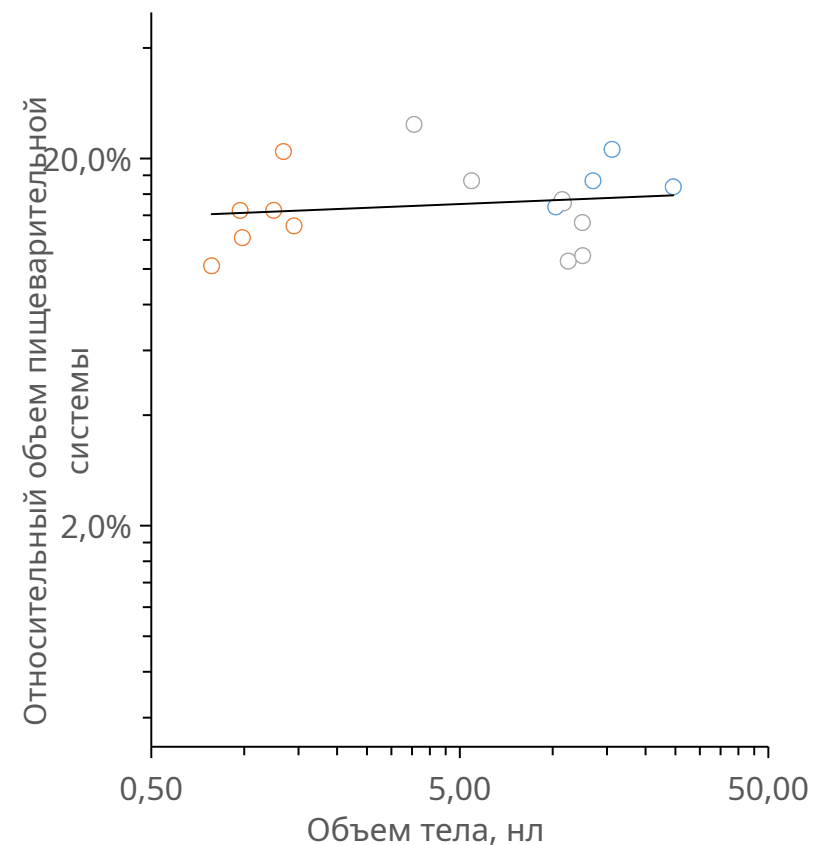
Относительный объем
выделительной системы
от объема тела



Относительный объем
половой системы
от объема тела



Относительный объем
пищеварительной системы
от объема тела

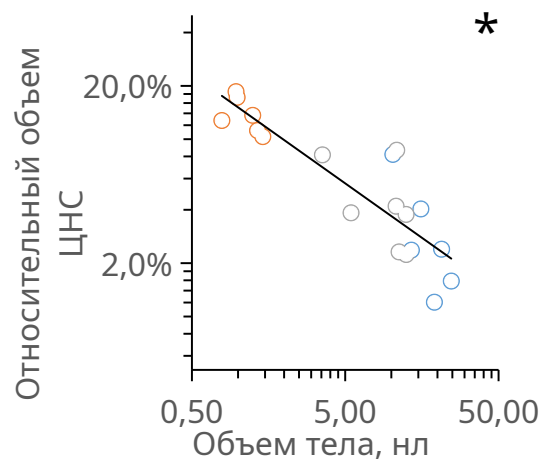


Результаты

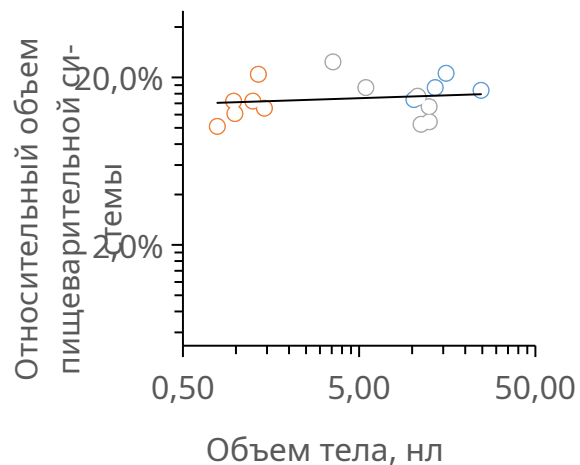


Обсуждение

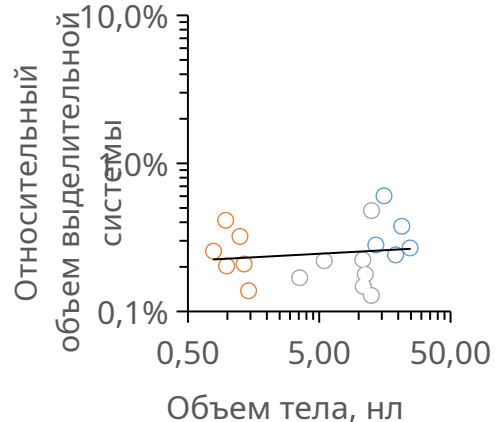
Аллометрия в развитии ЦНС
H. assimilis



Относительный объем
пищеварительной системы
H. assimilis от объема тела

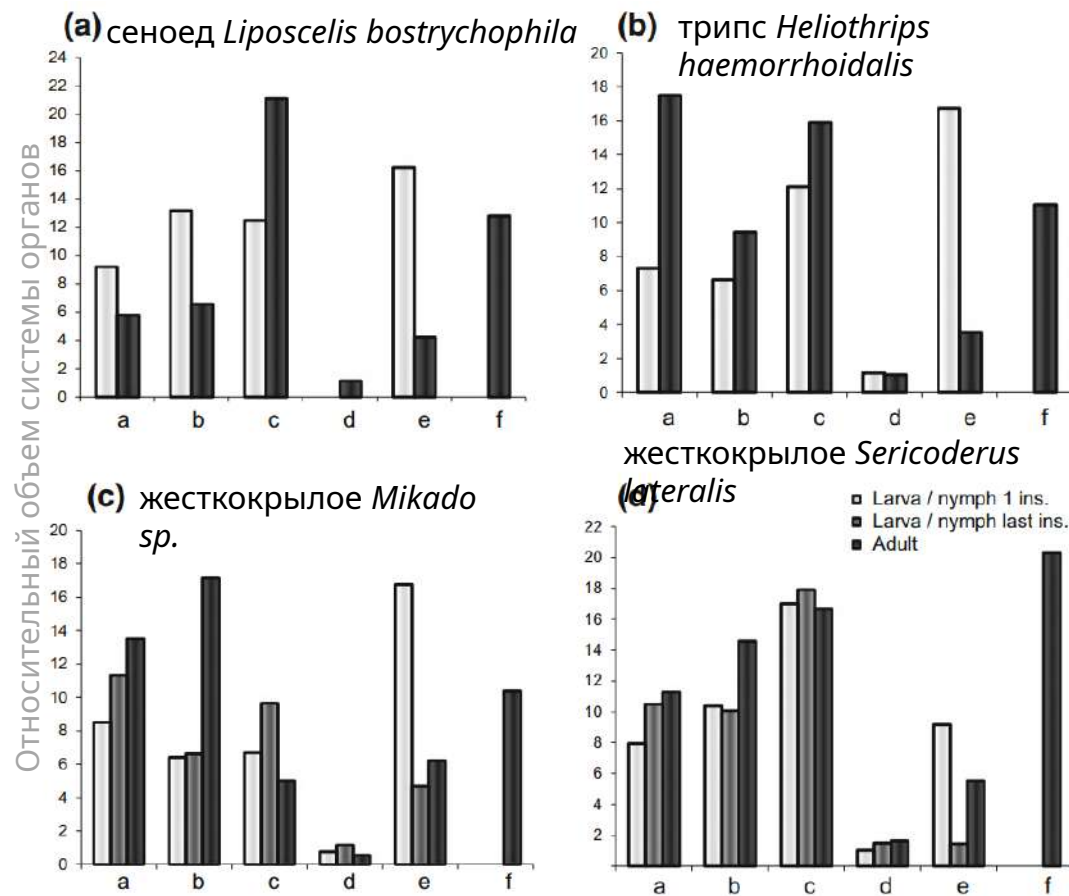


Относительный объем
выделительной
системы
H. assimilis
от объема тела



* $p < 0,001$

Относительный объем органов насекомых в
постнатальном развитии (Polilov, 2016)



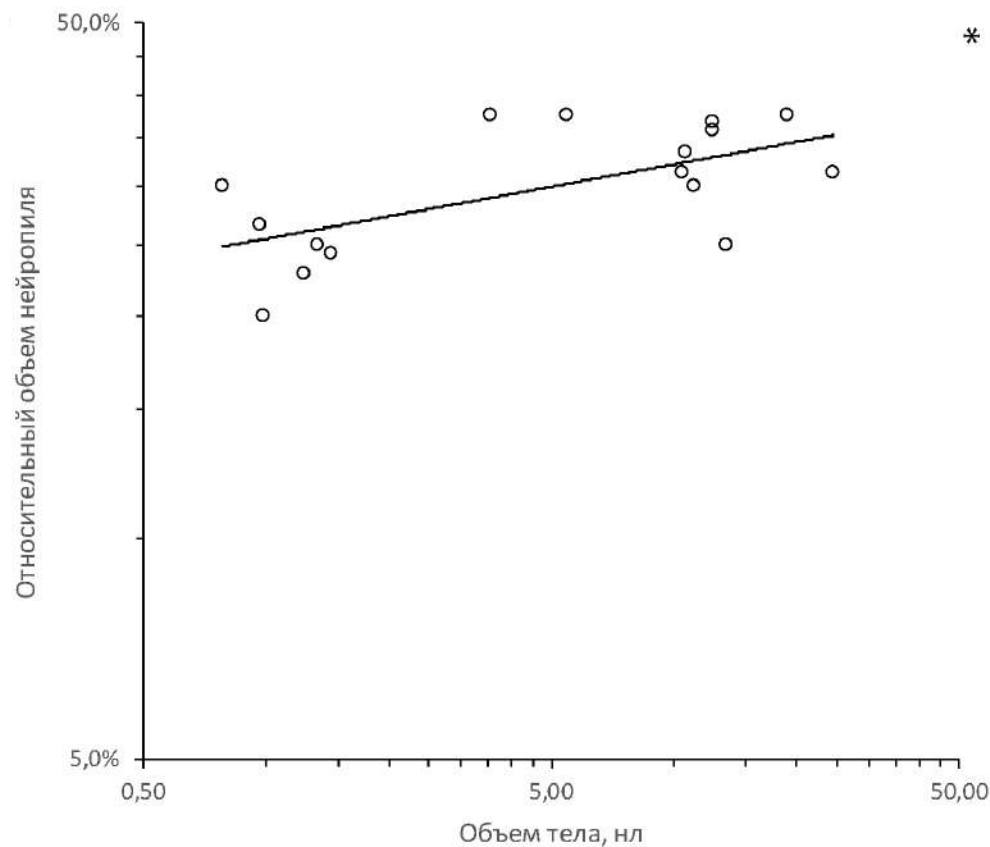
а – скелетные структуры, б – мускулатура, с –
пищеварительная система, д – выделительная система, е –
центральная нервная система, ф – половая система

Обсуждение



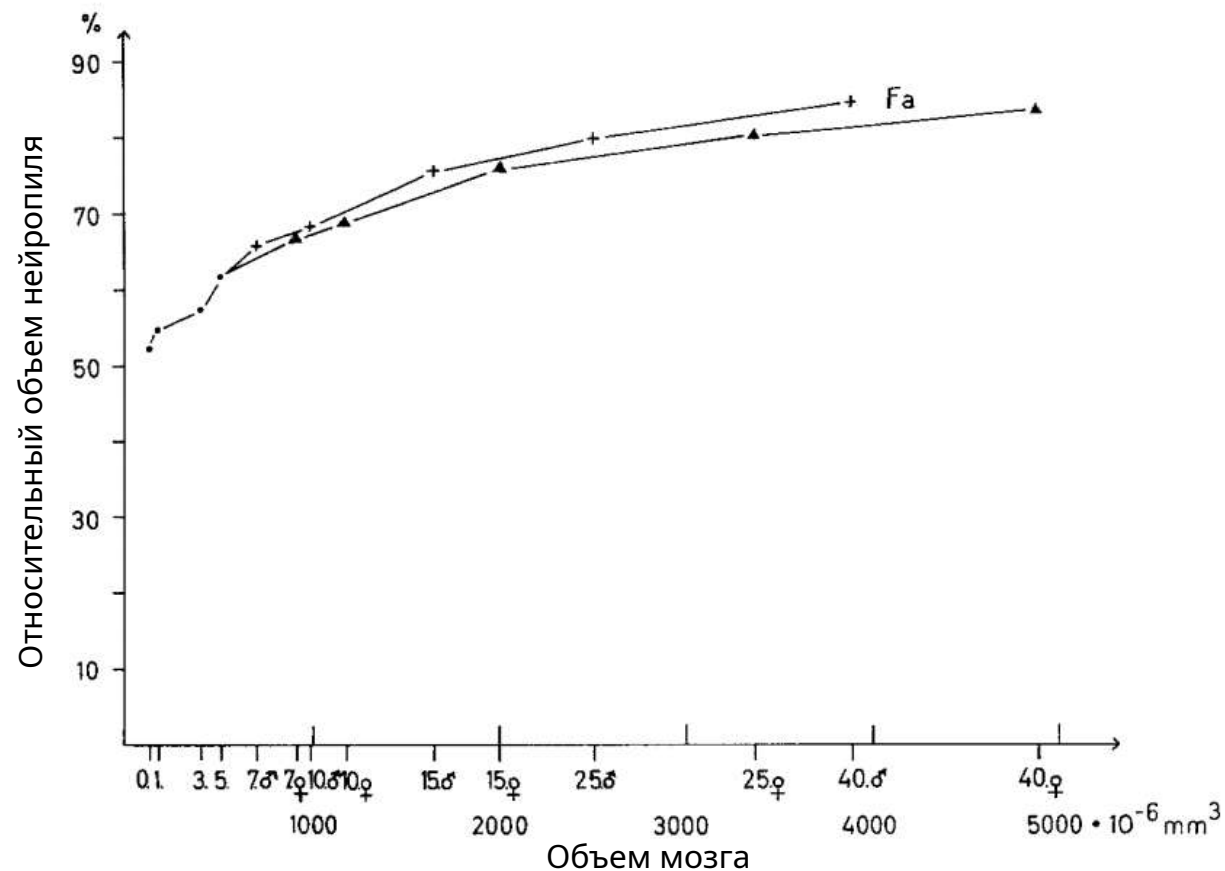
Обсуждение

Относительный объем нейропиля *H. assimilis* в постнатальном развитии



* $p < 0,001$

Относительный объем нейропиля *Orchesella villosa* в постнатальном развитии (Korr, 1968).



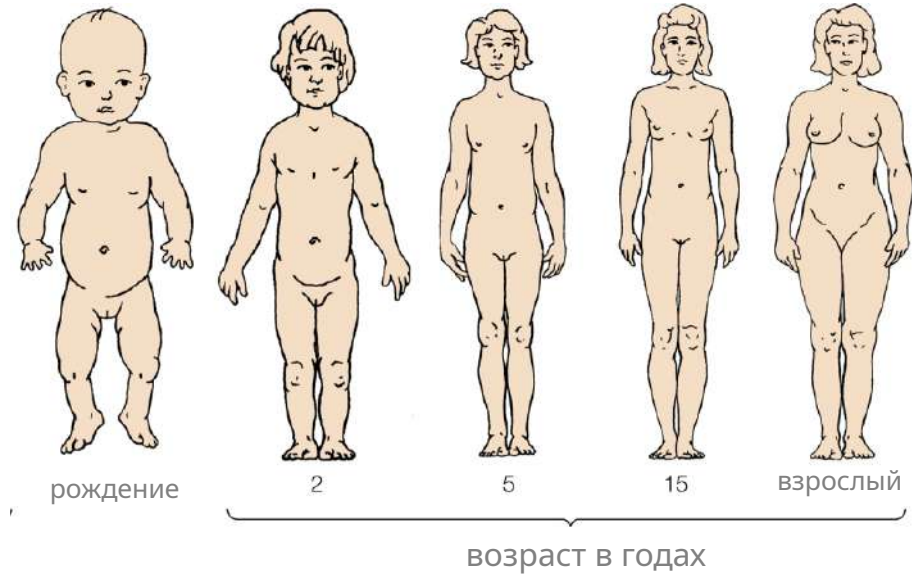
Обсуждение



Выводы

1. В результате исследования анатомии коллемболы *Hypogastrura assimilis* разных возрастов показано, что в ходе постнатального развития, общий план внутреннего строения почти не меняется, за исключением формирования половой системы, которое начинается у II возраста и заканчивается после 5 линьки.
2. Характер изменения размеров органов *H. assimilis* отличается для разных систем органов. Так относительный объём пищеварительной и выделительной системы, а также мускулатуры меняется изометрически, а относительный объем половой системы и ЦНС – аллометрически, для половой системы показано увеличение относительного объема в ходе постнатального развития, а для ЦНС, наоборот, – значительное уменьшение.
3. Максимальный относительный объем ЦНС *H. assimilis* отмечен у ювенильной особи первого возраста и достигает 19,0 % от объема тела, что значительно превышает этот показатель для взрослых форм гексапод, но сходно с таковым у личинок и нимф первого возраста микронасекомых. Это подтверждает гипотезу о том, что критической стадией морфогенеза ЦНС при миниатюризации является самый ранний возраст в постнатальном развитии.
4. Относительный объем нейропиля увеличивается в ходе постнатального развития *H. assimilis*, что совпадает с закономерностями, выявленными ранее на коллемболах и других гексаподах. Однако относительный объем нейропиля *H. assimilis* на всех изученных стадиях развития ^{Выводы} значительно ниже такового у других гексапод.





Благодарности

Выражаю глубокую признательность своему научному руководителю заведующему кафедрой энтомологии члену-корреспонденту РАН **Алексею Алексеевичу Полилову** за всестороннюю помощь на всех этапах проведения работы;

доценту кафедры зоологии и экологии ИБХ МПГУ к.б.н. **Анне Ивановной Боковой** и ассистенту кафедры зоологии и экологии ИБХ МПГУ **Ксении Сергеевне Паниной** за помощь в сборе материала, постановке и содержании культуры;

старшему научному сотруднику кафедры энтомологии к.б.н. **Анастасии Алексеевне Макаровой** за помощь в освоении методик обработки результатов по нервной системе;

коллективу лаборатории MicroInsectLab за ценные советы при подготовке отчётных материалов;

профессору кафедры зоологии и экологии ИБХ МПГУ **Наталии Александровне Кузнецовой** за консультации и советы.

Исследование выполнено по гранту РФФИ (проект 25-64-00002).

