

УДК 636.085:585.77

# Влияние тяжелых металлов на перспективы использования личинок *Hermetia illucens* для переработки отходов: обзор предметного поля

Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

## КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Мещеряков Анатолий Анатольевич  
E-mail: anmeshcheryak@gmail.com

## ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

## ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мещеряков, А.А., Ситнов, В.Ю., & Рябухин, Д.С. (2023). Влияние тяжелых металлов на перспективы использования личинок *Hermetia illucens* для переработки отходов. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (4), 165–174. <https://doi.org/10.36107/spfrp.2023.4.464>

ПОСТУПИЛА: 18.06.2023

ПРИНЯТА: 15.12.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2023

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ:

Статья опубликована в рамках выполнения тем НИР FGUS 2022-0017 и FGUS 2022-0018 государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.



А. А. Мещеряков, В. Ю. Ситнов, Д. С. Рябухин

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** Насекомые считаются многообещающим альтернативным источником белка для животных. Их можно выращивать на органических отходах, что одновременно позволяет снизить затраты на утилизацию и повторно использовать побочные продукты сельского хозяйства. Однако, дальнейшее использование полученной биомассы может быть небезопасно, т.к. насекомые способны аккумулировать тяжелые металлы и передавать их дальше по пищевой цепи. Более того, тяжелые металлы также влияют на скорость роста и микробиом личинок.

**Цель:** Целью данной работы является анализ современных представлений о влиянии аккумуляции тяжелых металлов в личинках мухи Черная львинка на потенциал применения данного вида насекомых для переработки отходов с дальнейшим использованием в качестве кормовой добавки.

**Материалы и методы:** Поиск информации осуществлялся в базах PubMed и ScienceDirect, по ключевым словам: «black soldier fly heavy metals», «black soldier fly heavy metals bioaccumulation», «Hermetia illucens heavy metals», «Hermetia illucens heavy metals bioaccumulation». Принимались во внимание работы, опубликованные с 2000 по 2023 годы. В результате в основу данного обзора вошли 54 источника на английском языке.

**Результаты:** Основными факторами, определяющими влияние тяжелых металлов на применение личинок Черной львинки, полученных при переработке органических отходов, в качестве кормовых добавок, являются: способность биоаккумуляции тяжелых металлов насекомыми, содержание металлов в кормовом субстрате, стадия развития Черной львинки, способы переработки личинок перед использованием в качестве кормовых добавок, а также способность животных, употребляющих в пищу Черную львинку, накапливать тяжелые металлы. В большинстве рассмотренных работ объектами исследования являлись такие элементы, как Cd, Cu, Fe, Hg, Pb, Zn, что является оправданным и необходимым в случае производства кормов по причине токсичности перечисленных металлов. Однако, в случае использования личинок мухи Черная львинка для очистки донных отложений и переработки отходов следует также уделять внимание остальным тяжелым металлам.

**Выводы:** К способам, снижающим содержание исследуемых элементов в данном виде насекомых, можно отнести: использование «чистого» кормового субстрата, разбавление отходов «чистым» кормовым субстратом, очистка при дальнейшей переработке биомассы личинок в корм. Исследования показывают, что целесообразным с точки зрения уменьшения дальнейшей передачи по пищевой цепочке тяжелых металлов является использование черной львинки в качестве кормовой добавки, а не самостоятельного корма.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

насекомые, личинки мухи Чёрная львинка, тяжелые металлы, безопасность, корма

# The Impact of Heavy Metals on the Prospects of Using *Hermetia Illucens* Larvae for Waste Processing: A Scoping Review

All-Russia Research Institute for Food Additives – Branch of V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS, St. Petersburg, Russian Federation

## CORRESPONDENCE:

**Meshcheriakov Anatolii Anatolevich**  
E-mail: anmeshcheryak@gmail.com

## DATA AVAILABILITY:

Data from the current study are available upon request from the corresponding author.

## FOR CITATIONS:

Meshcheriakov, A.A., Sitnov, V.Yu., & Ryabukhin, D.S. (2023). The impact of heavy metals on the prospects of using hermetia illucens larvae for waste processing: A scoping review. *Storage and Processing of Farm Products*, (4), 165–174. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.4.464>

**RECEIVED:** 18.06.2023

**ACCEPTED:** 15.12.2023

**PUBLISHED:** 30.12.2023

## DECLARATION OF COMPETING

**INTEREST:** none declared.

## FUNDING:

The article was published within the framework of the implementation of research topics FGUS 2022-0017 and FGUS 2022-0018 of the state assignment of the Federal State Budgetary Institution “Federal Research Center for Food Systems named after V.M. Gorbатов» RAS.

Anatolii A. Meshcheriakov, Veniamin Y. Sitnov, Dmitry S. Ryabukhin

## ABSTRACT

**Background:** Insects are considered a promising alternative source of protein for animals. They can be grown on organic waste, which simultaneously reduces disposal costs and reuses agricultural by-products. However, further use of the obtained biomass may be unsafe, because insects are capable of accumulating heavy metals and transmitting them further along the food chain. Moreover, heavy metals also affect the growth rate and microbiome of larvae.

**Purpose:** Thus, the purpose of this work is to analyze modern ideas about the influence of the accumulation of heavy metals in the larvae of the black soldier fly on the potential of using this type of insect for waste processing with further use as a feed additive.

**Materials and Methods:** The search for information was carried out in the PubMed and ScienceDirect databases using the keywords: “black soldier fly heavy metals”, “black soldier fly heavy metals bioaccumulation”, “*Hermetia illucens* heavy metals”, “*Hermetia illucens* heavy metals bioaccumulation”. Works published from 2000 to 2023 were taken into account. As a result, 54 English language sources were used as the basis for this review.

**Results:** The main factors determining the influence of heavy metals on the use of Black Soldier Fly larvae obtained from processing organic waste as feed additives are: the ability of bioaccumulation of heavy metals by insects, the content of metals in the feed substrate, the stage of development of the Black Soldier Fly, methods of processing larvae before use as feed additives, as well as the ability of animals that eat black soldier fly to accumulate heavy metals. In most of the studies reviewed, the objects of study were elements such as Cd, Cu, Fe, Hg, Pb, Zn, which is justified and necessary in the case of feed production due to the toxicity of the listed metals. However, in the case of using black soldier fly larvae for cleaning bottom sediments and recycling waste, attention should also be paid to other heavy metals.

**Conclusion:** Methods that reduce the content of the studied elements in this type of insect include: using a “clean” feed substrate, diluting waste with a “clean” feed substrate, and cleaning the biomass of larvae into feed during further processing. Research shows that it is advisable to use black soldier fly as a feed additive, rather than as a feed on its own, from the point of view of reducing further transmission of heavy metals through the food chain.

## KEYWORDS

insects, black soldier fly larvae, heavy metals, safety, feed



## ВВЕДЕНИЕ

Увеличение численности населения земного шара приводит к острой конкуренции мирового сообщества за ресурсы. Но несмотря на достижения агропромышленного комплекса, развития селекции и основных направлений биотехнологии, одним из ключевых факторов, сдерживающих развитие ряда стран, является отсутствие доступных источников белковой пищи. Традиционные протеины постепенно уступают свое доминирующее место новым, альтернативным продуцентам белка, но все равно кратно превосходят конкурентов по своим объемам. Рост числа сельскохозяйственных животных приводит к колоссальному ухудшению экологической обстановки планеты Земля, в частности Китая (Wu et al., 2020). С каждым годом проблема загрязнения навозом земельного фонда привлекает все большее внимание общественности, ввиду насыщения его тяжелыми металлами, остаточными антибиотиками и метаболитами активных фармацевтических субстанций, включаемых в состав кормовых премиксов (Yan-xia Li et al., 2010; Zhu et al., 2013). Значительный негативный вклад в экологию вносит образование парниковых газов, возникающих при разложении продуктов жизнедеятельности, особенно при компостировании. Разрабатываемые методы переработки навоза с получением метана и удобрений, требуют больших капиталовложений в оборудование и технологии, также данное направление отличается длительностью процесса (Awasthi et al., 2022).

Во всем мире, только за 2014 год, накопление навоза от выращивания птицы и животных, оценивалось в 587 миллиардов тонн в год (Afazeli, Jafari, Rafiee, & Nosrati, 2014). Его утилизация является актуальной проблемой, требующей немедленного решения. Тем не менее, это также проблема в отношении безопасности кормов для насекомых и производства продуктов питания. Медь (Cu), кадмий (Cd), свинец (Pb) и алюминий (Al) содержатся в навозе домашней птицы и скота (Moral et al., 2008; Wang et al., 2013), показатели которых значительно превышают национальные ограничения Китая по содержанию тяжелых металлов в кормах (GB13078–2001) и пороговые значения ЕС в отношении нежелательных веществ в кормах для животных (2002/32/ЕС). Например, исследование образцов экскрементов с ферм на северо-востоке Китая, показало типичное содержания кадмия

в свином навозе 15,1 мг/кг сухого вещества (Gao et al., 2017). Это намного выше допустимых пределов в ЕС и Китае, которые составляют 2 мг/кг сухого вещества. Другие исследования (Wang et al., 2014; Wang et al., 2013), показали, что с 1990 по 2010 год в одном из сельскохозяйственных регионов Китая, содержание Cu, Cd и ряда других металлов в помете животных с ферм неуклонно росло.

Конверсия животных экскрементов насекомыми, является новым, быстрым и экономически эффективным методом переработки. Среди многочисленных насекомых-сапрофагов, личинки мухи Чёрная львинка (Black Soldier Flies; BSF; *Hermetia illucens*) (Diptera: Stratiomyidae) и домашней мухи (House Fly; HF; *Musca domestica*) (Diptera: Muscidae) рассматриваются как наилучшие кандидаты по утилизации органических отходов, дополнительно давая энтомологическую биомассу, богатую белками и жирами (Wynants et al., 2019). Однако, тяжелые металлы, содержащиеся в экскрементах, могут накапливаться в личинках, циркулируя дальше по пищевой цепи (Diener et al., 2015). Токсичные металлы представляют потенциальную опасность для насекомых, предназначенных для кормления животных (Schrögel & Wätjen, 2019). Несколько исследований, изучающих накопление тяжелых металлов в насекомых на их развитие и рост, свидетельствует, что характер накопления токсичных элементов различается по применяемому металлу и используемым концентрациям (Biancarosa et al., 2018; Cai et al., 2018; Diener et al., 2015; Gao et al., 2017; Wu et al., 2020).

Каждое из предложенных насекомых-сапрофитов, обладает своим набором сильных и слабых сторон. Домашняя муха, развивается быстрее, переносит широкий диапазон абиотических условий, требует меньше знаний и опыта при размножении. К недостаткам следует отнести их меньший размер, большую вероятность переноса болезней во взрослом возрасте (активно передвигаются и питаются). Так же домашняя муха традиционно используется в качестве модельного организма в научных исследованиях на протяжении десятилетий, в то время как муха Чёрная львинка стала популярна только в последние десятилетия, и важные аспекты ее биологии до сих пор не известны (van Huis, Oonincx, Rojo, & Tomberlin, 2020). Несравненным преимуществом BSF является ее всеядность. В настоящее время в мире уже проведен ряд работ, посвященных мо-

делированию и изучению процесса переработки органических отходов личинками BSF (Gold et al., 2018; Huang et al., 2021; Liew et al., 2022; Liu et al., 2020; Miranda et al., 2021; Pleissner & Rumpold, 2018; Salam et al., 2021; Song et al., 2021; Xu et al., 2021; Yuvaraj et al., 2021; Zhang et al., 2021).

Необходимым условием создания модели перерабатывающей установки органических отходов, является стабильная, дающая жизнеспособные яйца и производящая здоровое потомство популяция сапрофитных насекомых. Тяжелые металлы могут влиять на особенности жизненного цикла насекомых. Загрязненные медью и свинцом растения отрицательно влияют на плодовитость и скорость естественного роста капустной тли *Brevicoryne brassicae* L. (Görür, 2006), снижение массы тела потомства жужелиц *Pterostichus oblongopunctatus* так же наблюдается в загрязненной металлами среде (Lagisz & Laskowski, 2008). Также, обнаруживается четкая взаимосвязь между увеличивающейся концентрацией токсикантов в субстрате и усилением негативного воздействия на детерминанты жизненного цикла диких пчел, *Osmia rufa* (Moroi et al., 2014).

Зачастую к тяжелым металлам относят и полуметаллы. Поэтому, в данном исследовании термин «тяжелые металлы» включает в себя помимо металлов также и такие токсические элементы, как As и Se. Основной целью данного обзора является анализ влияния тяжелых металлов на потенциал применения Черной львинки (BSF) при переработке отходов, с дальнейшим использованием личинок (BSFL) в качестве кормовой добавки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Базы данных и протокол

Проводили поиск источников, содержащих информацию о биоаккумуляции тяжелых металлов личинками мух Черная львинка (Black Soldier Fly), в базах данных ScienceDirect и PubMed.

### Критерии включения источников

Использовали следующие ключевые слова для первичного поиска: «*Hermetia illucens* биоаккумуля-

ция тяжелых металлов», «Черная львинка биоаккумуляция тяжелых металлов», «*Hermetia illucens* тяжелые металлы», «Черная львинка тяжелые металлы», «black soldier fly heavy metals», «black soldier fly heavy metals bioaccumulation», «*Hermetia illucens* heavy metals», «*Hermetia illucens* heavy metals bioaccumulation». Всего в результате первичного поиска был найден 741 источник.

Критерии включения статей были следующими:

- (1) статья написана в период с 2000 по 2023 гг.;
- (2) типами исследуемых работ являются оригинальные исследовательские и обзорные статьи;
- (3) статья соответствует теме исследования;
- (4) наличие доступа к публикации.

В результате были отобраны 54 источника.

### Отбор источников

В результате первичного поиска был отобран 741 источник. Затем, после ограничения поиска обзорами и оригинальными исследовательскими статьями, их число сократилось до 332. В результате дальнейшего сканирования текстов в основу настоящего обзора были включены 54 источника на английском языке.

### Табуляция и анализ данных

Для извлечения данных авторы сканировали публикации независимо друг от друга, и через обмен мнениями в обсуждении приходили к общему решению спорных вопросов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Факторами, влияющими на потенциал применения личинок в качестве кормовых добавок и связанными с тяжелыми металлами, являются: способность биоаккумуляции тяжелых металлов, содержание металлов в кормовом субстрате, стадия развития Черной львинки, способы переработки перед использованием в качестве кормовых добавок, а также способность животных, употребляющих в пищу Черную львинку, накапливать тяжелые металлы.

## Биоаккумуляция тяжелых металлов личинками Черной львинки

Тяжелые металлы, такие как кадмий, свинец, ртуть и мышьяк, накапливаются в насекомых. Металлом, вызывающим наибольшую озабоченность, является кадмий, из-за его способности накапливаться в Черной львинке, представляющей большой интерес для использования в качестве корма (Giroto & Cossu, 2019; Imathiu, 2020).

Proc, Bulak, Wiącek, & Bieganowski (2020) продемонстрировали способность *H. illucens* к биоаккумуляции Cu, Fe, Hg, Mg, Mo, Se и Zn, происходившей на всех стадиях развития насекомых и в куколках, тогда как биоаккумуляция As, Co и Pb не наблюдалась. Эти результаты могут быть полезны в контексте биоремедиации.

Bohm, Hatley, Robinson, & Gutiérrez-Ginés (2022) определили характеристики биоконверсии BSF на различных типах твердых биологических веществ и смесей твердых биологических веществ и проанализировали биоаккумуляцию тяжелых металлов в личинках. Несмотря на первоначальные высокие концентрации в твердых биологических веществах (< 8700 мг/кг), тяжелые металлы в значительной степени распределялись в остатках вместо зрелой BSF, что приводило к низкой биоаккумуляции этих элементов в BSF (< 180 мг/кг). Эти концентрации были даже ниже пределов, установленных международными стандартами для кормов для животных. Таким образом, это исследование показало, что биоконверсия на основе BSF может быть инновационной и устойчивой технологией обращения с отходами и восстановления ресурсов для быстрого сокращения объемов твердых биологических веществ при одновременном преобразовании их в ценную биомассу с низким содержанием тяжелых металлов.

Селен (Se) является важным микроэлементом, который играет важную роль в развитии животных и человека. (Fertier, Montarnal, Truptil, & Bénaben (2020) рассматривается роль селена в окружающей среде, растениях и организмах животных, а также обсуждаются данные о биообогащении селеном с использованием различных источников добавок, от неорганических до органических форм, с особым акцентом на дрожжи, обогащенные селеном (дрожжи Se22). Хотя селеновые дрожжи остаются одним из основных источников органического се-

лена, рассматриваются другие появляющиеся и инновационные источники, такие как обогащенные селеном насекомые и наночастицы селена, и их потенциальное использование в кормлении животных. Обогащенные селеном насекомые обсуждаются как способ обогащения селеном в органической форме рациона скота. Также обсуждаются наночастицы селена, поскольку они представляют собой более биосовместимый и менее токсичный источник неорганического селена для животных организмов по сравнению с селенитом и селенатом. Из научных данных, имеющихся в литературе, можно сделать вывод, что среди неорганических форм селенит натрия по-прежнему является одним из основных вариантов, тогда как Se-дрожжи остаются основной органической формой. Однако другие потенциальные источники, такие как обогащенные селеном насекомые и наночастицы селена, изучаются, поскольку они потенциально могут сочетать высокую биодоступность и снижение выбросов селена в окружающую среду (Ferrari et al., 2023).

Attigbe, Ayim, & Martey (2019) изучили влияние компостирования органических отходов, содержащих тяжелые металлы, в частности ртуть (Hg), с использованием личинок черной львинки. Органические пищевые отходы (вареный рис, сырой батат и овощи), смешанные с куриными фекалиями и опилками, дозировали различными концентрациями ртутной соли 10 мг, 20 мг и 30 мг. Затем в дозированные образцы вносили 100, 200 и 300 личинок на 13-дневный период, в течение которого их изучали. Авторы установили, что скорость удаления ртути из компоста была относительно пропорциональна количеству личинок в образце. Личинки смогли аккумулировать разумное количество ртути из образца. Авторы также отмечают, что уровни ртути в компосте после 13-го дня были ниже пороговых значений Европейского союза (ЕС) в 0.7–10 мг Hg/кг.

Wu et al. (2020) изучили влияние Cu и Cd на распределение накопленных тяжелых металлов в личинках и их фекалиях. При повышенных дозах содержание как Cu, так и Cd, накопленных в телах и фекалиях BSFL, заметно увеличивается. В фекалиях BSFL Cu в основном существует в виде остатков, в то время как Cd преимущественно существует либо в водорастворимом состоянии (в случае низкого исходного содержания), либо в виде остатков (в случае высокого исходного содержания). *In vivo* показано, что Cd легче обогащается (47,1–91,3%),

чем Cu (<30%),. Предполагается, что Cd транспортируется в личинках с помощью белков теплового шока и проходит через кальциевые каналы независимо от эндоцитоза. BSFL имеют высокое содержание Ca, по сравнению с другими видами кормовых насекомых, что может объяснить значительное поглощение Cd (Somroo et al., 2019).

### Тяжелые металлы из кормового субстрата

Использование кормового субстрата, не содержащего тяжелые металлы (например, куриный корм (Chiam et al., 2021) позволяет избежать рисков, связанных с дальнейшей передачей металлов по пищевой цепи. Однако, биоконверсия промышленных пищевых отходов в источник белка путем переваривания насекомыми является способом повышения ценности отходов, что в свою очередь позволяет достичь экономики замкнутого цикла. Тем не менее, потенциальное обогащение тяжелыми металлами насекомых после переваривания отходов создает ограничение (Hu et al., 2023; Raksasat et al., 2020; Sampathkumar, Yu, & Loo, 2023; Tan et al., 2021).

Воздействие низких концентраций тяжелых металлов, таких как свинец, кадмий, ртуть и мышьяк, вызывает токсические и неблагоприятные последствия для здоровья как у животных, так и у людей. Хотя сообщалось о возможном накоплении тяжелых металлов у съедобных насекомых, имеется ограниченная информация о пищевой безопасности насекомых в этом отношении. Загрязнение тяжелыми металлами можно уменьшить путем контролируемого производства съедобных насекомых (Lange & Nakamura, 2021). Gligorescu et al. (2022) провели оценку использования пищевых отходов в качестве кормового субстрата для личинок черной львинки в долгосрочных и полупромышленных условиях. Различные смеси на основе пищевых продуктов и различная плотность посадки BSFL использовались в течение 20 партий, и были проведены оценки качества и безопасности по основным результатам, а именно по производительности BSFL, примесям муки, профилям питательных веществ личинок и муки и содержанию тяжелых металлов. В целом, содержание тяжелых металлов как в муке BSFL, так и в муке BSFL, полученной в ходе исследования, было намного ниже максимальных пределов ЕС для кормов и органических удобрений. Таким образом, пита-

тельные вещества из бывших пищевых продуктов могут быть успешно и безопасно переработаны при производстве BSFL.

Личинки черной львинки также обладают потенциалом для переработки навоза домашнего скота. В работах (WANG, WU, CAI, GENG, & XU, 2021; Wu et al., 2021) рассмотрена биоаккумуляция Черной львинкой тяжелых металлов при переработке свиного навоза. В телах личинок при прохождении через кишечник свиного навоза сохраняется менее 10% Cu и Zn, (Wu et al., 2021) а также 38–47% Cd, 6–9 % Cr и около 7% As, остальное выходит с фекалиями. Этот факт нужно учитывать при выборе отходов в качестве кормового субстрата.

### Роль стадии развития Черной львинки

Черная львинка имеет 5 стадий развития: яйцо, личинка, предкуколка, куколка и имаго (взрослая особь). В процессе жизни личинка линяет, сбрасывая верхнюю оболочку (экзувий), а переход из куколки в имаго сопровождается отделением пупария, что оказывает влияние на содержание в насекомом тяжелых металлов. Bohm et al. (2022) кормили личинок Черной львинки серией пищевых субстратов с различным содержанием тяжелых металлов: пшеничными отрубями, бытовыми пищевыми отходами, а также пшеничными отрубями с добавлением обезвоженного шлама и осадка сточных вод в смеси с активным илом, извлеченных из очистных сооружений. Авторы установили, что Черная львинка может производить ценную биомассу, богатую белком и жиром, и при этом тяжелые металлы накапливаются не в зрелой мухе, а преимущественно в остатках (экскрементах и экзувии).

Diener et al. (2015) авторы изучали степень накопления тяжелых металлов (Cd, Pb и Zn) на разных этапах жизни Черной львинки. Исследование показывает, что концентрации свинца и цинка в личинках или предкуколках остаются ниже исходных количеств в пище. При этом кадмий накапливается в предкуколках, что потенциально может ограничивать использование предкуколок в производстве кормов для животных. В случае свинца и цинка опасения по поводу использования предкуколок в кормах для животных менее важны (Diener et al., 2015; Raheem et al., 2019).

## Влияние способов переработки

При рассмотрении Черной львинки в качестве кормовой добавки стоит учитывать способы ее переработки. Так, например, Queiroz et al. (2021) продемонстрировали, что минеральный состав муки из BSFL и белкового концентрата значительно отличается: в белковом концентрате, по сравнению с мукой, содержится меньше Mn в 19 раз, Co — в 1.6, Zn — в 3.1, As — в 6.5, Sr — в 18, Cd — в 1.5, Pb — в 1.8 раз; при этом увеличивается содержание Cu в 2.7 раз, Se — в 1.7 и Hg — в 2 раза.

Bessa et al., (2021) исследовали влияние корма (рацион бройлеров, побочный продукт пивоваренного ячменя, зерновые злаки) и способа умерщвления (бланширование и заморозка) личинок Черной львинки на содержание в них тяжелых металлов (Al, Cr, As, Cd, Pb, Fe, Mn, Sn, Zn). При использовании бланширования по сравнению с другим способом умерщвления при кормлении каждым из трех рассмотренных в данной работе кормов наблюдалось меньшее содержание в личинках тяжелых металлов, что можно объяснить вымыванием их водой при бланшировании.

## Накопление тяжелых металлов животными, питающимися Черной львинкой

Личинки черной львинки (*Hermetia illucens*) являются одними из наиболее часто используемых насекомых в кормах для животных (Aguilar-Ascón, Pariona-Velarde, Loayza-Muro, & Albrecht-Ruíz, 2023). При этом известно, что большинство насекомых являются источниками Zn, Cd, Pb и As, которые обладают высокой токсичностью и представляют угрозу для здоровья животных и человека. Следовательно, используемые концентрации должны быть определены для безопасного использования насекомых в качестве кормовых добавок для животных (Malematja et al., 2023). Так, уже изучено влияние кормовой добавки черной львинки на накопление тяжелых металлов в мускусной утке (Gariglio et al., 2021), большеротом окуне (Fischer et al., 2021), канальном соме (Romano et al., 2023), цыпленке-бройлере (Schiaivone et al., 2019), свинье (DiGiacomo & Leury, 2019), норвежском лососе (Zlaugotne et al., 2022) и в других лососевых (English et al., 2021; Yanxian Li et al., 2019).

В случае кормления мускусных уток частично обезжиренной мукой из черной львинки (Gariglio et al.,

2021), содержание тяжелых металлов, за исключением Cu, не превышало значения для контрольной группы. При кормлении личинками большеротого окуня (Fischer et al., 2021) наблюдалось увеличение количества общего количества меди, а также ртути в печени рыб, при этом содержание остальных исследованных тяжелых металлов (Fe, Pb) оставалось неизменным относительно контроля.

Также существуют исследования, сосредоточенные на опасностях для здоровья человека, связанных с поеданием насекомых, включая тяжелые металлы (а именно, кадмий и ртуть) (Montevecchi, Licciardello, Masino, Miron, & Antonelli, 2021).

## ВЫВОДЫ

Ряд работ посвящен изучению способности к биоаккумуляции тяжелых металлов Черной львинки. При этом, объектами исследований становятся преимущественно такие элементы, как Cd, Cu, Fe, Hg, Pb, Zn. С точки зрения производства кормов очевидно, что необходимо контролировать содержание этих токсичных тяжелых металлов, но с точки зрения возможности очистки донных отложений и переработки отходов следует также уделять внимание остальным тяжелым металлам.

Говоря о способах уменьшения содержания тяжелых металлов в личинках Черной львинки можно выделить несколько направлений: использование «чистого» кормового субстрата, разбавление отходов «чистым» кормовым субстратом, очистка при дальнейшей переработке биомассы личинок в корм.

Исследования показывают, что целесообразным с точки зрения уменьшения дальнейшей передачи по пищевой цепочке тяжелых металлов является использование черной львинки в качестве кормовой добавки, а не самостоятельного корма.

Для улучшения понимания данной темы необходимо проведение исследований, в которых изучается влияние большего спектра тяжелых металлов, а не только наиболее токсичных. Помимо этого, дальнейшим направлением исследований может стать изучение влияния других токсичных агентов (микотоксины, пестициды) на личинок Черной львинки и определение степени их накопления в пищевой цепочке.

## АВТОРСКИЙ ВКЛАД

**Анатолий Анатольевич Мещеряков:** сбор и обработка полученных данных; написание рукописи.

**Вениамин Юрьевич Ситнов:** руководство исследованием, идея и дизайн исследования, написание и редактирование рукописи.

**Дмитрий Сергеевич Рябухин:** сбор и обработка полученных данных.

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCE

- Afazeli, H., Jafari, A., Rafiee, S. & Nosrati, M. (2014). An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 380–386. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.016>
- Aguilar-Ascón, E., Pariona-Velarde, D., Loayza-Muro, R. & Albrecht-Ruíz, M. (2023). Use of the sludge obtained from the electrocoagulation process of pumping waters of fishmeal factories for feeding *Tenebrio molitor* larvae. *Heliyon*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16200>
- Attiogbe, F. K., Ayim, N. Y. K. & Martey, J. (2019). Effectiveness of black soldier fly larvae in composting mercury contaminated organic waste. *Scientific African*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00205>
- Awasthi, S. K., Kumar, M., Sarsaiya, S., Ahluwalia, V., Chen, H., Kaur, G., Sirohi, R., Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., Rathour, R., Kumar, S., Singh, L., Zhang, Z., Taherzadeh, M.J. & Awasthi, M. K. (2022). Multi-criteria research lines on livestock manure biorefinery development towards a circular economy: From the perspective of a life cycle assessment and business models strategies. *Journal of Cleaner Production*, 341, 130862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130862>
- Bessa, L. W., Pieterse, E., Marais, J., Dhanani, K. & Hoffman, L. C. (2021). Food safety of consuming black soldier fly (*Hermetia illucens*) Larvae: Microbial, Heavy metal and cross-reactive allergen risks. *Foods*, 10(8), 1934. <https://doi.org/10.3390/foods10081934>
- Biancarosa, I., Liland, N. S., Biemans, D., Araujo, P., Bruckner, C. G., Waagbø, R., Torstensen, B.E., Lock & E.-J., Amlund, H. (2018). Uptake of heavy metals and arsenic in black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae grown on seaweed-enriched media. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(6), 2176–2183. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8702>
- Bohm, K., Hatley, G. A., Robinson, B. H. & Gutiérrez-Ginés, M. J. (2022). Black Soldier Fly-based bioconversion of biosolids creates high-value products with low heavy metal concentrations. *Resources, Conservation and Recycling*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106149>
- Cai, M., Hu, R., Zhang, K., Ma, S., Zheng, L., Yu, Z. & Zhang, J. (2018). Resistance of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to combined heavy metals and potential application in municipal sewage sludge treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(2), 1559–1567. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0541-x>
- Chiam, Z., Lee, J. T. E., Tan, J. K. N., Song, S., Arora, S., Tong, Y. W., & Tan, H. T. W. (2021). Evaluating the potential of okara-derived black soldier fly larval frass as a soil amendment. *Journal of Environmental Management*, 286(January), 112163. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112163>
- Diener, S., Zurbrügg, C. & Tockner, K. (2015). Bioaccumulation of heavy metals in the black soldier fly, *Hermetia illucens* and effects on its life cycle. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(4), 261–270. <https://doi.org/10.3920/JIFF2015.0030>
- DiGiacomo, K. & Leury, B. J. (2019). Review: Insect meal: A future source of protein feed for pigs? *Animal*, 13(12), 3022–3030. <https://doi.org/10.1017/S1751731119001873>
- English, G., Wanger, G. & Colombo, S. M. (2021). A review of advancements in black soldier fly (*Hermetia illucens*) production for dietary inclusion in salmonid feeds. *Journal of Agriculture and Food Research*, 5, 100164. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100164>
- Ferrari, L., Cattaneo, D. M. I. R., Abbate, R., Manoni, M., Ottoboni, M., Luciano, A., Luciano, A., von Holst, C. & Pinotti, L. (2023). Advances in selenium supplementation: From selenium-enriched yeast to potential selenium-enriched insects, and selenium nanoparticles. *Animal Nutrition*, 14, 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.05.002>
- Fischer, H., Romano, N., Renukdas, N., Kumar, V. & Sinha, A. K. (2021). Comparing black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae versus prepupae in the diets of largemouth bass, *Micropterus salmoides*: Effects on their growth, biochemical composition, histopathology, and gene expression. *Aquaculture*, 546, 737323. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737323>
- Gao, Q., Wang, X., Wang, W., Lei, C. & Zhu, F. (2017). Influences of chromium and cadmium on the development of black soldier fly larvae. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(9), 8637–8644. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8550-3>
- Gariglio, M., Dabbou, S., Gai, F., Trocino, A., Xiccato, G., Holodova, M., Gresakova, L., Nery J., Bellezza Oddon, S., Biasato, I., Gasco, L. & Schiavone, A. (2021). Black soldier fly larva in Muscovy duck diets: effects on duck growth, carcass property, and meat quality. *Poultry Science*, 100(9), 101303. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101303>

- Giroto, F. & Cossu, R. (2019). Role of animals in waste management with a focus on invertebrates' biorefinery: An overview. *Environmental Development*, 32(March), 100454. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.08.001>
- Gligorescu, A., Macavei, L. I., Larsen, B. F., Markfoged, R., Fischer, C. H., Koch, J. D., Jensen, K., Heckmann, L.H.L., Nørgaard, J.V. & Maistrello, L. (2022). Pilot scale production of *Hermetia illucens* (L.) larvae and frass using former foodstuffs. *Cleaner Engineering and Technology*, 10(August), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100546>
- Gold, M., Tomberlin, J. K., Diener, S., Zurbrugg, C. & Mathys, A. (2018). Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review. *Waste Management*, 82, 302–318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.022>
- Görür, G. (2006). Developmental instability in cabbage aphid (*Brevicoryne brassicae*) populations exposed to heavy metal accumulated host plants. *Ecological Indicators*, 6(4), 743–748. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.09.001>
- Hu, C., Yang, L., Wang, H., Xiao, X., Wang, Z., Gong, X., Liu, X. & Li, W. (2023). Analysis of heavy metals in the conversion of lake sediment and restaurant waste by black soldier fly (*Hermetia illucens*). *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11(March), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1163057>
- Huang, S., Zheng, X., Luo, L., Ni, Y., Yao, L. & Ni, W. (2021). Biostimulants in bioconversion compost of organic waste: A novel booster in sustainable agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 319(August), 128704. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128704>
- Imathiu, S. (2020). Benefits and food safety concerns associated with consumption of edible insects. *NFS Journal*, 18(August 2019), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2019.11.002>
- Lagisz, M. & Laskowski, R. (2008). Evidence for between-generation effects in carabids exposed to heavy metals pollution. *Ecotoxicology*, 17(1), 59–66. <https://doi.org/10.1007/s10646-007-0176-7>
- Lange, K. W. & Nakamura, Y. (2021). Edible insects as future food: chances and challenges. *Journal of Future Foods*, 1(1), 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2021.10.001>
- Li, Yan-xia, Xiong, X., Chun-ye, L., Feng-song, Z., Wei, L. & Wei, H. (2010). Cadmium in animal production and its potential hazard on Beijing and Fuxin farmlands. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1–3), 475–480. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.057>
- Li, Yanxian, Kortner, T. M., Chikwati, E. M., Munang'andu, H. M., Lock, E. J. & Krogdahl, Å. (2019). Gut health and vaccination response in pre-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal. *Fish and Shellfish Immunology*, 86(November 2018), 1106–1113. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2018.12.057>
- Liew, C. S., Yunus, N. M., Chidi, B. S., Lam, M. K., Goh, P. S., Mohamad, M., Sin, J.C., Lam, S.M. & Lim, J. W. (2022). A review on recent disposal of hazardous sewage sludge via anaerobic digestion and novel composting. *Journal of Hazardous Materials*, 423(PA), 126995. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126995>
- Liu, T., Awasthi, M. K., Awasthi, S. K., Zhang, Y. & Zhang, Z. (2020). Impact of the addition of black soldier fly larvae on humification and speciation of trace elements during manure composting. *Industrial Crops and Products*, 154(June), 112657. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112657>
- Malematja, E., Manyelo, T. G., Sebola, N. A., Kolobe, S. D. & Mabelebele, M. (2023). The accumulation of heavy metals in feeder insects and their impact on animal production. *The Science of the Total Environment*, 885(December 2022), 163716. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163716>
- Miranda, C. D., Crippen, T. L., Cammack, J. A. & Tomberlin, J. K. (2021). Black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae), and house fly, *Musca domestica* L. (Diptera: Muscidae), larvae reduce livestock manure and possibly associated nutrients: An assessment at two scales. *Environmental Pollution*, 282, 116976. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116976>
- Montevecchi, G., Licciardello, F., Masino, F., Miron, L. T. & Antonelli, A. (2021). Fortification of wheat flour with black soldier fly prepupae. Evaluation of technological and nutritional parameters of the intermediate doughs and final baked products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 69(March), 102666. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102666>
- Moral, R., Perez-Murcia, M. D., Perez-Espinosa, A., Moreno-Caselles, J., Paredes, C. & Rufete, B. (2008). Salinity, organic content, micronutrients and heavy metals in pig slurries from South-eastern Spain. *Waste Management*, 28(2), 367–371. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.009>
- Moroń, D., Szentgyörgyi, H., Skórka, P., Potts, S. G. & Woyciechowski, M. (2014). Survival, reproduction and population growth of the bee pollinator, *Osmia rufa* (Hymenoptera: Megachilidae), along gradients of heavy metal pollution. *Insect Conservation and Diversity*, 7(2), 113–121. <https://doi.org/10.1111/icad.12040>
- Pleissner, D. & Rumpold, B. A. (2018). Utilization of organic residues using heterotrophic microalgae and insects. *Waste Management*, 72, 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.020>
- Proc, K., Bulak, P., Wiącek, D. & Bieganski, A. (2020). *Hermetia illucens* exhibits bioaccumulative potential for 15 different elements – Implications for feed and food production. *Science of the Total Environment*, 723. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138125>
- Queiroz, L. S., Regnard, M., Jessen, F., Mohammadifar, M. A., Sloth, J. J., Petersen, H. O., Ajallouieian F., Brouzes C.M.C., Fraihi W., Fallquist H., de Carvalho A.F. & Casanova F. (2021). Physico-chemical and colloidal properties of protein extracted from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *International Journal of Biological Macromolecules*, 186(June), 714–723. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.081>
- Raheem, D., Raposo, A., Oluwole, O. B., Nieuwland, M., Saraiva, A. & Carrascosa, C. (2019). Entomophagy: Nutritional, ecological, safety and legislation aspects. *Food Research International*, 126, 108672. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108672>
- Raksasat, R. and Lim, J.W. and Kiatkittipong, W. and Kiatkittipong, K. and Ho, Y.C. and Lam, M.K. and Font-Palma, C., Mohd Zaid, H.F. & Cheng, C.K. (2020). A review of organic waste enrichment for inducing palatability of black soldier fly larvae: Wastes to

- valuable resources. *Environmental Pollution*, 267, 115488. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115488>
- Romano, N., Datta, S. N., Pande, G. S. J., Sinha, A. K., Yamamoto, F. Y., Beck, B. H. & Webster, C. D. (2023). Dietary inclusions of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae frass enhanced production of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) juveniles, stevia (*Stevia rebaudiana*), and lavender (*Lavandula angustifolia*) in an aquaponic system. *Aquaculture*, 575(June), 739742. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739742>
- Salam, M., Alam, F., Dezhi, S., Nabi, G., Shahzadi, A., Hassan, S. U., Ali, M., Saeed, M. A., Hassan, J., Ali, N. & Bilal, M. (2021). Exploring the role of Black Soldier Fly Larva technology for sustainable management of municipal solid waste in developing countries. *Environmental Technology and Innovation*, 24, 101934. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101934>
- Sampathkumar, K., Yu, H. & Loo, S. C. J. (2023). Valorisation of industrial food waste into sustainable aquaculture feeds. *Future Foods*, 7(June), 100240. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100240>
- Schiavone, A., Dabbou, S., Petracci, M., Zampiga, M., Sirri, F., Biasato, I., Gai, F. & Gasco, L. (2019). Black soldier fly defatted meal as a dietary protein source for broiler chickens: Effects on carcass traits, breast meat quality and safety. *Animal*, 13(10), 2397–2405. <https://doi.org/10.1017/S1751731119000685>
- Schrögel, P. & Wätjen, W. (2019). Insects for Food and Feed-Safety Aspects Related to Mycotoxins and Metals. *Foods*, 8(8), 288. <https://doi.org/10.3390/foods8080288>
- Somroo, A. A., ur Rehman, K., Zheng, L., Cai, M., Xiao, X., Hu, S., Mathys, A., Gold, M., Yu, Z. & Zhang, J. (2019). Influence of *Lactobacillus buchneri* on soybean curd residue co-conversion by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) for food and feedstock production. *Waste Management*, 86, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.022>
- Song, S., Ee, A. W. L., Tan, J. K. N., Cheong, J. C., Chiam, Z., Arora, S., Lam, W.N. & Tan, H. T. W. (2021). Upcycling food waste using black soldier fly larvae: Effects of further composting on frass quality, fertilising effect and its global warming potential. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125664>
- Tan, J. K. N., Lee, J. T. E., Chiam, Z., Song, S., Arora, S., Tong, Y. W. & Tan, H. T. W. (2021). Applications of food waste-derived black soldier fly larval frass as incorporated compost, side-dress fertilizer and frass-tea drench for soilless cultivation of leafy vegetables in biochar-based growing media. *Waste Management*, 130, 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.025>
- van Huis, A., Oonincx, D. G. A. B., Rojo, S. & Tomberlin, J. K. (2020). Insects as feed: House fly or black soldier fly? *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(3), 221–229. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.x003>
- Wang, H., Dong, Y. & Wang, H. (2014). Hazardous metals in animal manure and their changes from 1990 to 2010 in China. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 96(9), 1346–1355. <https://doi.org/10.1080/02772248.2015.1023305>
- Wang, H., Dong, Y., Yang, Y., Toor, G. S. & Zhang, X. (2013). Changes in heavy metal contents in animal feeds and manures in an intensive animal production region of China. *Journal of Environmental Sciences*, 25(12), 2435–2442. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(13\)60473-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(13)60473-8)
- WANG, X. bo, WU, N., CAI, R. jie, GENG, W. na & XU, X. yan. (2021). Changes in speciation, mobility and bioavailability of Cd, Cr and As during the transformation process of pig manure by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*). *Journal of Integrative Agriculture*, 20(5), 1157–1166. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63333-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63333-0)
- Wu, N., Wang, X., Xu, X., Cai, R. & Xie, S. (2020). Effects of heavy metals on the bioaccumulation, excretion and gut microbiome of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 192(February), 110323. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110323>
- Wu, N., Wang, X., Yan, Z., Xu, X., Xie, S. & Liang, J. (2021). Transformation of pig manure by passage through the gut of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*): Metal speciation, potential pathogens and metal-related functional profiling. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211(January), 111925. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111925>
- Wynants, E., Frooninckx, L., Crauwels, S., Verreth, C., De Smet, J., Sandrock, C., Wohlfahrt, J., Van Schelt, J., Depraetere, S., Lievens, B., Van Miert, S., Claes, J. & Van Campenhout, L. (2019). Assessing the Microbiota of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*) Reared on Organic Waste Streams on Four Different Locations at Laboratory and Large Scale. *Microbial Ecology*, 77(4), 913–930. <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1286-x>
- Xu, H., Hong, C., Yao, Y., Liu, L., Wang, W., Zhu, W., Hong, L., Weng, J., Zhou, Y., Zhu, F. (2021). The process of biotransformation can produce insect protein and promote the effective inactivation of heavy metals. *Science of the Total Environment*, 776, 145864. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145864>
- Yuvaraj, A., Thangaraj, R., Karmegam, N., Ravindran, B., Chang, S. W., Awasthi, M. K. & Kannan, S. (2021). Activation of biochar through exoenzymes prompted by earthworms for vermibiochar production: A viable resource recovery option for heavy metal contaminated soils and water. *Chemosphere*, 278, 130458. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130458>
- Zhang, J., Shi, Z., Gao, Z., Wen, Y., Wang, W., Liu, W., Wang, X., & Zhu, F. (2021). Identification of three metallothioneins in the black soldier fly and their functions in Cd accumulation and detoxification. *Environmental Pollution*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117146>
- Zhu, Y.-G., Johnson, T. A., Su, J.-Q., Qiao, M., Guo, G.-X., Stedtfeld, R. D., Hashsham, S.A. & Tiedje, J. M. (2013). Diverse and abundant antibiotic resistance genes in Chinese swine farms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(9), 3435–3440. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222743110>
- Zlaugotne, B., Pubule, J. & Blumberga, D. (2022). Advantages and disadvantages of using more sustainable ingredients in fish feed. *Heliyon*, 8(9), e10527. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10527>