

DOI: 10.7868/S3034574X26040087

Оригинальная статья

УДК 579.69

## УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ВСПЕНЕННОГО ПОЛИСТИРОЛА С ПОМОЩЬЮ ЖУКОВ *ULOMOIDES DERMESTOIDES* И АНАЛИЗ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ, АССОЦИИРОВАННЫХ С ИХ КИШЕЧНИКОМ

Л. И. Ширинкина<sup>1, \*</sup>, Ю. В. Тактарова<sup>1</sup>, А. И. Бастраков<sup>2</sup>,  
Н. А. Ушакова<sup>2</sup>, И. Б. Котова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, биологический факультет,  
Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Российская Федерация

\*E-mail: pro100tilka@gmail.com

**Аннотация.** Исследована способность жуков *Ulomoides dermestoides* утилизировать отходы вспененного полистирола (ПС). При начальном соотношении биомассы жуков к массе ПС 10:1 недельная убыль массы отходов ПС достигала  $11,11 \pm 3,75\%$  в случае использования в качестве корма только отходов ПС и  $19,73 \pm 4,16\%$  при добавлении в корм наряду с ПС отрубей. В кишечной микробиоте жуков *in vivo* присутствие отходов ПС привело к увеличению доли бактерий родов *Hafnia*-*Obesumbacterium*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*. Культивирование микробных сообществ из кишечника жуков *in vitro* в анаэробных условиях на минеральной среде в присутствии отходов ПС приводит к увеличению микробного разнообразия. Микробное сообщество, выделенное из кишечника жуков, получавших в качестве корма только отходы ПС, в присутствии отходов ПС в жидкой среде показало наибольшее содержание белка (до 40 мг/мл), наибольшую продукцию летучих жирных кислот (ЛЖК: формиат, ацетат, пропионат, валериат) и наибольшую продукцию углекислого газа (до 8,3 ммоль/л). После культивирования кишечного микробного сообщества в анаэробных условиях в присутствии отходов ПС среди доминирующих групп обнаружены бактерии родов *Anaerostignum*, *Sebaldella*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*.

**Ключевые слова:** вспененный полистирол, имаго *Ulomoides dermestoides*, микробные сообщества кишечника жуков, Tenebrionidae

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках научного проекта государственного задания МГУ №121032300094-7. Высокопроизводительное секвенирование фрагментов гена 16S рРНК было поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта №075-15-2021-1396. Лабораторный эксперимент с живыми жуками *U. dermestoides* был выполнен в рамках проекта РНФ №25-24-00273.

**Соблюдение этических стандартов.** Заключение этической комиссии не требуется.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи.

© Л. И. Ширинкина, Ю. В. Тактарова, А. И. Бастраков, Н. А. Ушакова, И. Б. Котова, 2026

Сокращения: ПС — вспененный полистирол; ЛЖК — летучие жирные кислоты.

*Благодарность.* Авторы выражают искреннюю благодарность с.н.с. лаборатории разнообразия и экологии экстремофильных микроорганизмов ЦКП “Биоинженерия” ФИЦ Биотехнологии РАН Меркелю А.Ю. за помощь в проведении молекулярных исследований.

*Ссылка для цитирования:* Ширинкина Л.И., Тактарова Ю.В., Бастрakov А.И., Ушакова Н.А., Котова И.Б. Утилизация отходов вспененного полистирола с помощью жуков *Ulomoides dermestoides* и анализ микробных сообществ, ассоциированных с их кишечником. *Прикладная биохимия и микробиология / Applied biochemistry and microbiology*. 2026. Т. 62. № 4. С. 608–626. <https://doi.org/10.7868/S3034574X26040087>

DOI: 10.7868/S3034574X26040087

Original Article

## DISPOSAL OF EXTRUDED POLYSTYRENE WASTE USING BEETLES *ULOMOIDES DERMESTOIDES* AND ANALYSIS OF MICROBIAL COMMUNITIES ASSOCIATED WITH THEIR INTESTINAL

L. I. Shirinkina<sup>1,\*</sup>, Yu. V. Taktarova<sup>1</sup>, A. I. Bastrakov<sup>2</sup>, N. A. Ushakova<sup>2</sup>, I. B. Kotova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS, Moscow, Russian Federation*

\*E-mail: [pro100tilka@gmail.com](mailto:pro100tilka@gmail.com)

**Abstract.** The ability of *Ulomoides dermestoides* beetles to utilize polystyrene foam (PS) waste was studied. At the initial beetle biomass to PS mass ratio of 10:1, the weekly loss in PS waste mass reached  $11.11 \pm 3.75\%$  in the case of using only PS waste as feed and  $19.73 \pm 4.16\%$  when bran was added to the feed along with PS. In the intestinal microbiota of beetles *in vivo*, the presence of PS waste led to an increase in the proportion of bacteria of the genera *Hafnia*-*Obesumbacterium*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*. Cultivation of microbial communities from the beetle intestine *in vitro* under anaerobic conditions on a mineral medium in the presence of PS waste leads to an increase in microbial diversity. The microbial community isolated from the intestines of beetles fed only with PS waste in the presence of PS waste in a liquid medium showed the highest protein content (up to 40 mg/ml), the highest production of VFA (formate, acetate, propionate, valerate) and the highest production of carbon dioxide (up to 8.3 mmol/l). After culturing the intestinal microbial community under anaerobic conditions in the presence of PS waste, bacteria of the genera *Anaerostignum*, *Sebaldella*, *Pseudomonas*, *Enterobacter* were found among the dominant groups.

**Keywords:** extruded polystyrene, *Ulomoides dermestoides*, imago, microbial communities of the intestines of beetles, Tenebrionidae

**Funding.** The work was supported by the State Assignment MSU no. 121032300094-7. High-throughput sequencing of 16S rRNA gene fragments was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under grant no. 075-15-2021-1396. A laboratory experiment with alive *U. dermestoides* beetles was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project No. 25-24-00273.

**Ethics declarations.** An ethics commission conclusion is not necessary.

**Conflict of interest.** The authors declare that they have no conflicts of interest.

**Authors contribution.** All authors made a significant contribution to the development of the concept, conduct of the study and preparation of the article.

*Acknowledgements.* The authors express their sincere gratitude to A.Yu. Merkel, Senior Researcher at the Laboratory of Diversity and Ecology of Extremophilic Microorganisms, Bioengineering Center, Federal Research Center of Biotechnology, Russian Academy of Sciences, for assistance in molecular research.

*For Citation:* Shirinkina L.I., Taktarova Yu.V., Bastrakov A.I., Ushakova N.A., Kotova I.B. Disposal of Extruded Polystyrene Waste Using Beetles *Ulomoides dermestoides* and Analysis of Microbial Communities Associated with Their Intestinal. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya / Applied biochemistry and microbiology*. 2026;62(4): 608–626. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034574X26040087>

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема высокого и быстрорастущего уровня загрязнения пластмассами имеет глобальный характер [3]. Преимущества пластика, такие как дешевизна, долговечность, легкий вес и устойчивость к деградации, привели к их широкому внедрению во множество секторов хозяйственной деятельности [7]. Однако именно эти свойства, обуславливающие выгоду использования пластмасс, способствуют их накоплению в окружающей среде с серьезными экологическими последствиями. Пластики устойчивы к естественным процессам разложения и сохраняются в окружающей среде столетиями, становясь причиной загрязнения наземных и водных экосистем [14]. Согласно расчетам глобального образования пластиковых отходов, Россия находится на пятом месте в мире по этому показателю, а образование пластиковых отходов на душу населения составляет 7,80–16,17 кг/сутки [12]. По разным оценкам, в России каждый год образуется 3,6–5 млн тонн пластиковых отходов, среди которых наибольшую долю массы составляют упаковка (42%), упаковочная пленка (35%), бутылки из полиэтилентерефталата (12%), все остальные пластиковые отходы суммарно составляют 11% [4, 5]. Перспективным решением может стать переработка отходов, однако по данным за 2021 год перерабатывается не более 12% от общей массы отходов [5]. При этом существуют различия в уровне переработки различных видов полимерных отходов. Наибольший показатель извлечения характерен для ПЭТ-тары: из общего объема образующихся 900 тыс. тонн в год перерабатывается около 210 тыс. тонн. Для других видов пластика показатели сбора и переработки ниже: полиэтилен – 20%, полипропилен – 17%, полистирол – 12% [6]. К причинам, ограничивающим эффективность переработки, относятся технологические сложности автоматизированной сортировки, а также визуальная схожесть пластика, затрудняющая их эффективную ручную сортировку на предприятиях по переработке отходов [1].

В упаковке широко используются две разновидности полистирола – пенопласт и вспененный полистирол. Легкость и дешевизна материала об-

уславливают экономическую нецелесообразность сбора отходов этих материалов, из-за чего компании отдают приоритет переработке других видов пластика [2]. При этом в природе отходы полистирола особенно устойчивы к разложению благодаря содержанию в своем составе ароматических групп [8].

В последнее время активно изучается способность насекомых взаимодействовать с отходами полистирола для разработки биотехнологии по утилизации. Способность разрушать полистирол показана для личинок двух разновидностей мучного хрущака (*Tenebrio molitor*, *T. obscurus*), при этом обнаружены значительные изменения состава кишечной микробиоты личинок со сменой доминирующих групп с молочнокислых и энтеробактерий на стрептококки, а затем спироплазмы и энтерококки. Из кишечника личинки *Zophobas atratus* был выделен штамм *Pseudomonas aeruginosa*, способный к деградации ПС, и показано, что в процессе разрушения ПС повышается экспрессия сериновой гидролазы [20]. Личинки жука *Plesiophthalmus davidis* способны выживать в течение 14 сут, питаясь исключительно отходами полистирола, при этом в микробиоте кишечника начинает значительно преобладать *Serratia marcescens* [39].

Целью настоящего исследования являлось изучение возможности утилизации отходов вспененного полистирола с помощью жуков *Ulomoides dermestoides* и сукцессии кишечных микробных сообществ *in vivo* и *in vitro* в контакте с этими отходами.

## МЕТОДИКА

**Исследуемые материалы.** В экспериментах применяли отходы бытового вспененного полистирола (ПС) темно-серого цвета, в виде подложек для овощей и кондитерских изделий (лоток-подложка, 175 × 85 × 20 мм, артикул 1363). Подложку нарезали на пластинки размером 1,5 см × 4 см (массой 71,7±7,0 мг) и 11 см × 4 см (массой 500,0±2,0 мг). Пластинки взвешивали, стерилизовали в течение 1 ч в 70% этиловом спирте и сушили в чашках Петри в течение 24 ч.

**Изучение способности жуков *Ulomoides dermestoides* к утилизации отходов ПС.** В работе использовали жуков (имаго) *Ulomoides dermestoides*,

выращенных в искусственных контролируемых условиях на сухих кормовых субстратах. В первой стадии эксперимента (I) имаго жуков со средней массой особи  $10,3 \pm 0,4$  мг в количестве 5 г помещали в контейнеры объемом 2 л при  $28^\circ\text{C}$ , содержащие в качестве корма либо пластины ПС

размером  $11 \text{ см} \times 4 \text{ см}$ , вырезанные из подложек для овощей, массой  $500,0 \pm 2,0$  мг, либо такие же пластины ПС и 200 г отрубей, либо только 200 г отрубей (рис. 1). Каждую неделю фиксировали убыль массы ПС, проводили удаление личинок и мертвых особей.

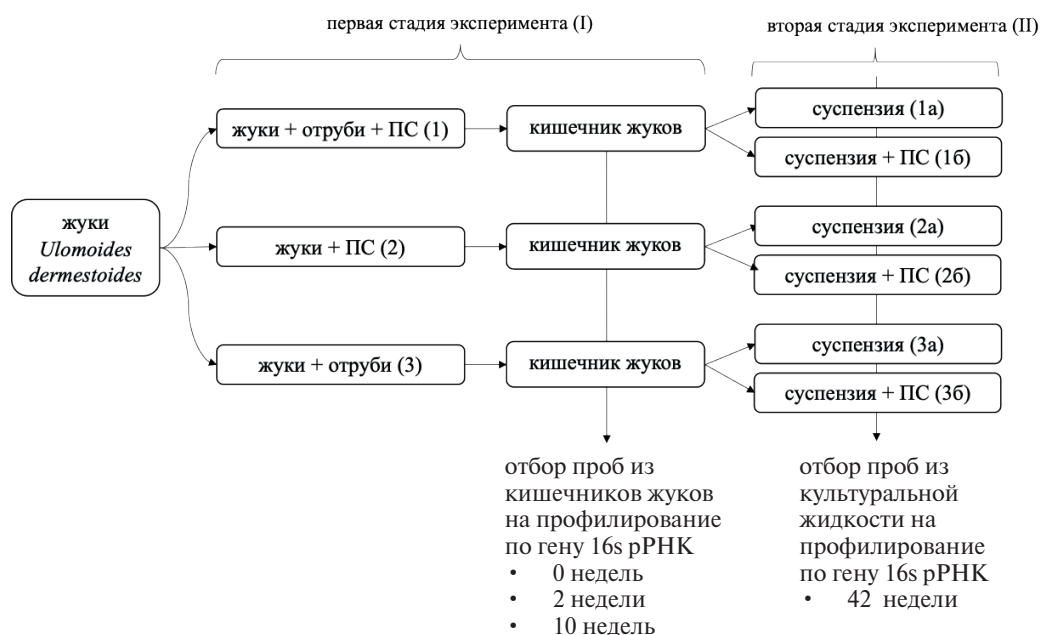


Рис. 1. Схема эксперимента по утилизации пластиковых отходов ПС жуками *Ulomoides dermestoides*  
Fig. 1. Scheme of the experiment on the utilization of plastic waste PS by *Ulomoides dermestoides* beetles

#### Изучение состава микробиоты кишечника жуков.

В точке начала опыта, спустя 2 недели и 10 недель первой стадии эксперимента (I) отбирали пробы кишечника жуков, питавшихся разными вариантами корма, для профилирования по гену 16S рРНК. Для отбора кишечной микробиоты жуков препарировали, отделяли кишечник и гомогенизировали содержимое в анаэробном физрастворе на микроцентрифуге-вортексе СМ-630 ("HsiangTai", Тайвань). Полученную суспензию использовали для анализа состава сообществ.

**Культивирование микробных сообществ.** Через 10 недель эксперимента отбирали пробы для получения накопительных культур. Отбор кишечной микробиоты осуществляли способом, описанным выше.

На второй стадии эксперимента (II) отобранную суспензию помещали в стеклянные флаконы объемом 100 мл, содержащие 50 мл жидкой минеральной среды (рис. 1). Использовали минеральную среду [35], мг/л:  $\text{NH}_4\text{Cl} - 280$ ;  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - 10$ ;  $\text{K}_2\text{HPO}_4 - 250$ ;  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 100$ ; ЭДТА - 1;  $\text{NaHCO}_3 - 5000$ ;  $\text{H}_3\text{BO}_3 - 0,05$ ;  $\text{FeCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 2$ ;  $\text{ZnCl}_2 - 0,05$ ;  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 0,05$ ;  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - 0,03$ ;  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - 2$ ;

$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - 0,05$ ;  $\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} - 0,1$ ; дрожжевой экстракт - 100; pH 7,0. Среду готовили на дистиллированной воде. Для создания анаэробных условий кислород удаляли из минеральной среды с помощью вакуумной установки, замещая газовую фазу инертным газом аргоном. Стеклянные флаконы герметично закрывали резиновыми пробками, зажатými алюминиевыми колпачками. Инкубацию проводили в статических условиях в темноте при температуре  $30^\circ\text{C}$ .

Основным субстратом был ПС в виде пластин  $1,5 \text{ см} \times 4 \text{ см}$ , массой  $71,7 \pm 7,0$  мг. В качестве контролей использовали минеральную среду, в которую были помещены образцы ПС, без микробных клеток (химический контроль), и минеральную среду без ПС, содержащую микробное сообщество (биологический контроль, контроль роста клеток).

**Изучение физиолого-биохимических свойств микробных сообществ.** Каждые 4 недели проводили визуальный мониторинг изменений культуральных характеристик и отбирали 1 мл культуральной жидкости для анализа состояния микробного сообщества.

Динамику роста микроорганизмов отслеживали по увеличению содержания общего белка в культуральной жидкости. Содержание общего белка измеряли методом количественного определения по Бредфорду [10]. Для проведения щелочного гидролиза клеток использовали 2 н NaOH, который добавляли к культуральной жидкости в соотношении 1:1 и инкубировали при 37°C в течение 2 ч. После гидролиза 50 мкл гидролизата переносили в микропробирки и смешивали с 950 мкл красителя Кумасси, избегая образования пены. Оптическую плотность исследуемого раствора и растворов сравнения с известной концентрацией белка измеряли на спектрофотометре (Shimadzu UV-1202, “Shimadzu”, Япония) при длине волны 595 нм. В качестве контрольного раствора использовали смесь 50 мкл дистиллированной воды и 950 мкл красителя Кумасси.

Для определения общего содержания белка в смывах с образцов отходов ПС образцы помещали в 10 мл физраствора и инкубировали на шейкере при 150 об/мин в течение 4 часов. Затем в полученном смыве проводили щелочной гидролиз клеток и последующее определение концентрации белка методом Бредфорда, как описано ранее.

Измерение pH культуральной жидкости отслеживали с использованием тест-полосок (“Johnson”, Великобритания).

Для определения наличия и содержания летучих жирных кислот (ЛЖК) в культуральной жидкости использовали газо-жидкостный хроматограф Кристалл 5000М (“Хроматэк”, Россия), используя капиллярную колонку 50 м × 0,32 мм, HP-FFAP, 0,5 мкм, пламенно-ионизационный детектор. Пробу предварительно осаждали центрифугированием при 15000 об/мин в течение 10 мин. Супернатант объемом 1 мкл вводили в прибор. Определение концентрации компонентов смеси осуществляли на основе вычисления отношения площадей пиков компонентов к соответствующим площадям пиков веществ в стандартных растворах.

Определение содержания газообразных продуктов осуществляли с помощью газового хроматографа ЛХМ 8 МД — модель 3 с катарометром (Россия). Использовали газ-носитель — аргон, скорость газа-носителя — 20 мл/мин. Колонки длиной 2 м были заполнены порапаком QS. Для анализа отбирали 1 мл пробы газовой фазы. Количественное определение компонентов проводили на основе вычисления площади под хроматографическим пиком. Избыточное давление во флаконах измеряли с помощью манометра (“Wika”, Германия) и учитывали эти данные при расчете конечных концентраций газовых метаболитов. Для преобразования численного значения объемной концентрации газа, выраженной в процентах, в молярную концентрацию (мМ/л) применялась следующая формула:

$$Y = \frac{(P_1 \times P_{\text{общ}} \times T_0 \times V_{\text{г.ф.}})}{P_0 \times 22.4 \times T_1 \times V_{\text{ж.ф.}}} \times 1000,$$

где  $P_1$  — парциальное давление газа, (%/100);  $V_{\text{ж.ф.}}$  — объем жидкой фазы во флаконе, мл;  $V_{\text{г.ф.}}$  — объем газовой фазы во флаконе, мл;  $T_0$  — температура при нормальных условиях, 273°K;  $T_1$  — рабочая температура, °K;  $P_0$  — давление при нормальных условиях, 1 атм.;  $P_{\text{общ}}$  — общее давление во флаконе, атм.; 22,4 — объем 1 моль газа при 273°K, л·моль<sup>-1</sup>. При этом делали допущение, что весь газ, образовавшийся в культуральной жидкости, выходит в газовую фазу флакона.

**Изучение состава культивируемых микробных сообществ.** В конечной (42 недели) точке второй стадии эксперимента (II) отбирали пробы культуральной жидкости для профилирования по гену 16S рРНК, как описано ранее.

**Выделение ДНК и профилирование по гену 16S рРНК.** Состав микробного сообщества анализировали с помощью высокопроизводительного секвенирования участков гена 16S рРНК. Следуя инструкциям производителя, выделяли из проб тотальную ДНК (набор FastDNA Spin Kit for Soil “MP Biomedicals”, США) и оценивали концентрацию и чистоту препаратов ДНК спектрофотометрически на приборе NanoDrop 2000C (“Thermo Fisher Scientific”, США) при  $\lambda$  260 и 280 нм. Амплификацию фрагментов генов 16S рРНК проводили с помощью ПЦР, используя “универсальные” праймеры для участка V4 по методике Fadrosh et al. [13]. Применяли систему праймеров 515F (5'-GTGBCAGCMGCCGCGGTAA-3') [16] и Pro-mod-805R (5'-GACTACNVGGGTMTCTAATCC-3') [25]. Полученные ПЦР-фрагменты секвенировали на платформе MiSeq (“Illumina”, США) с использованием набора реактивов для считывания 150 нуклеотидов с каждого конца. Анализ нуклеотидных последовательностей проводили при помощи программного пакета QIIME2 [9]. Относительное количество прочтений, входящих в ту или иную ОТЕ (операционная таксономическая единица), соответствует относительной представленности данного таксона микроорганизмов в исследуемом микробном сообществе. Тепловые карты для сравнительного анализа филогенетического состава микробных сообществ генерировали с помощью платформы ClustVis — <https://biit.cs.ut.ee/clustvis/> [26].

**Определение убыли массы отходов ПС, контактировавших с жуками и микробными сообществами.** В качестве первичной оценки изменений отходов ПС в ходе эксперимента определяли убыль массы образцов. Для этого образцы пластика извлекали из контейнеров (на первой стадии эксперимента) или флаконов (на второй стадии эксперимента),

трижды промывали дистиллированной водой, помещали в 2% раствор додецилсульфата натрия на 1 ч на ротационный шейкер со 160 об/мин при 30°C, после чего снова трижды промывали водой и сушили 24 ч в открытых чашках Петри в термостате при температуре 55°C. Отмытые и высушенные образцы взвешивали на электронных весах ER-60A ("A&D", Япония).

**Статистическая обработка результатов.** Эксперименты проводили в трехкратной повторности. Для каждой точки вычисляли среднее значение, которое сравнивали по показателям стандартного отклонения и доверительного интервала при  $P \leq 0,005$ . На графиках представлены значения в виде "среднее  $\pm$  среднее отклонение". Вычисления проводили в программе Microsoft Excel 2021

("Microsoft", США). Оценку экологических индексов  $\alpha$ -разнообразия (индекс Шеннона [33]; индекс Симпсона [34]), Chao 1 [11] проводили при помощи программного пакета QIIME2 [18]. Статистические подсчеты и визуализацию филогенетических данных осуществляли с помощью платформы MicrobiomeAnalyst - <https://www.microbiomeanalyst.ca/MicrobiomeAnalyst/home.xhtml> [23].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Контакт жуков и отходов ПС на первой стадии эксперимента (I) привел к образованию отверстий в пластинах ПС и последующему постепенному исчезновению пластины в течение 10 недель (рис. 2). При этом в варианте корма без отрубей убыль ПС происходила заметно медленнее.



**Рис. 2.** Исчезновение пластины отхода ПС в ходе первой стадии эксперимента (I). Верхний ряд — опытный вариант с ПС и отрубями (1), нижний ряд — опытный вариант с ПС без отрубей (2)

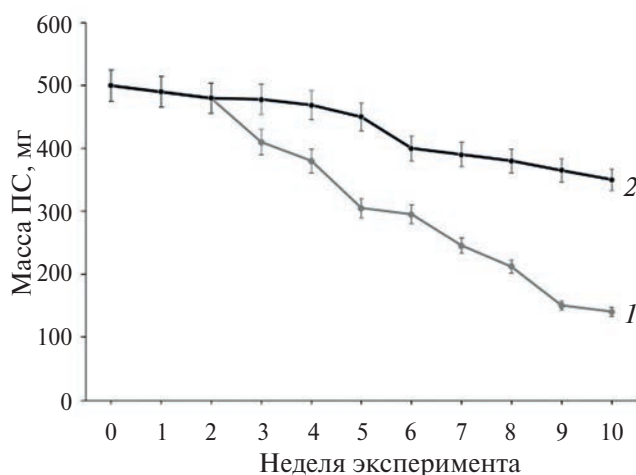
**Fig. 2.** Disappearance of the PS waste plate during the first stage of the experiment (I). Top row — experimental variant with PS and bran (1), bottom row — experimental variant with PS without bran (2)

Визуальная оценка убыли отходов ПС, а также различия в убыли отходов ПС с ко-субстратом в виде отрубей и без него подтверждена результатами гравиметрии (рис. 3).

Число исследований, посвященных изучению способности беспозвоночных к утилизации пластиковых отходов, в том числе ПС, растет. Для сравнения результатов проведен расчет такого показателя, как суточная скорость потребления вспененного ПС одной особью (мг/особь). В данной работе наблюдение утилизации вспененного ПС имаго жуков *Ulomoides dermestoides* показало, что суточная скорость потребления ПС в варианте без отрубей достигала 0,100 мг/особь при средней 0,004 мг/особь, а при добавлении отрубей макси-

мальное значение суточной скорости потребления ПС увеличилось до 0,150 мг/особь, среднее до 0,010 мг/особь. Личинок жуков еженедельно отделяли и удаляли из опыта. Это позволило отследить развитие микробиоты кишечника во взрослых особях на протяжении всего эксперимента, поскольку средняя продолжительность личиночной стадии жуков *Ulomoides dermestoides* составляет 60 сут, а для имаго достигает 135 сут [27]. Более высокая средняя суточная скорость потребления отходов вспененного ПС — 1,570 мг/особь в течение 4 недель — показана для личинок жуков *Galleria mellonella* [18]. В то же время, в другом исследовании личинок этого вида жуков средняя скорость потребления отходов ПС составила только 0,960 мг/особь в сутки на

протяжении 1 недели [41]. В отличие от наших результатов для жуков *Uromoides dermestoides*, оценка влияния добавки отрубей к отходам вспененного ПС в течение 3 недель для жуков *Galleria mellonella* показала, что в варианте без отрубей суточная скорость потребления ПС составила 0,279 мг/особь, а при добавлении отрубей уменьшилась до 0,102 мг/особь [22]. В экспериментах с личинками жуков *Zophobas atratus* суточная скорость потребления отходов ПС достигала значений 0,433–1,410 мг/особь при сроках экспериментов 4–5 недель [29, 30, 38]. Опыты с другими видами жуков (*Tenebrio molitor*, *Tenebrio obscurus*) показали меньшую суточную скорость убыли отходов вспененного ПС, от 0,032 до 0,324 мг/особь [18, 29, 40].



**Рис. 3.** Убыль массы отходов ПС в зависимости от корма, получаемого жуками. 1 — отходы ПС и отруби, 2 — отходы ПС

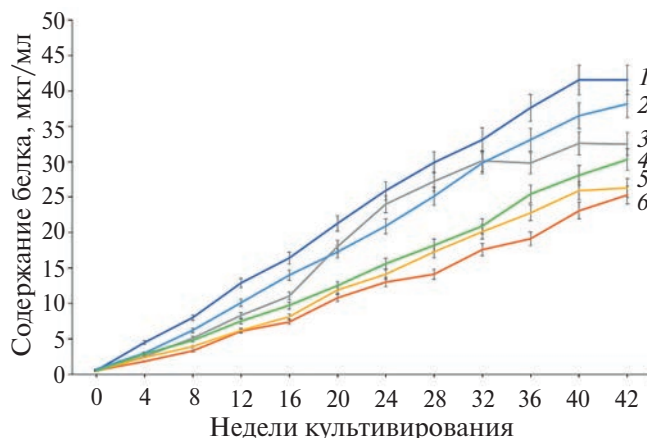
**Fig. 3.** Loss of PS waste mass depending on the feed received by the beetles. 1 — PS waste and bran, 2 — PS waste

На второй стадии эксперимента в ходе культивирования микробных сообществ в анаэробных условиях во всех опытных вариантах наблюдали помутнение минеральной среды. Рост культур подтверждается данными измерений содержания белка в культуральной жидкости, которое к 42-й неделе культивирования достигло уровня 30–40 мкг/мл (рис. 4). Наблюдается тенденция к стабильному росту содержания белка.

В присутствии ПС на минеральной среде наибольшее содержание белка на протяжении всей второй стадии эксперимента регистрировали в пробах с микробным сообществом, выделенным из кишечника жуков, получавших в качестве корма только отходы ПС. Это может быть следствием того, что кишечная микробиота жука *in vivo* адаптировалась к данному субстрату. При этом среди биоконтролей наибольшее значение содержания белка

показано в варианте с сообществом из кишечника жуков, получавших ПС вместе с отрубями.

Измерения pH в процессе культивирования показали колебания в пределах значений 6,5–8,0 во всех опытных вариантах в присутствии ПС. Для контрольных образцов без микробных сообществ показатели pH находились в диапазоне 6,5–7,0.



**Рис. 4.** Продукция белка анаэробными МС, культивируемыми на II стадии эксперимента. 1а — МС из флакона с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС и отрубями; 1б — МС из флакона с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС и отрубями; 2а — МС из флакона с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС; 2б — МС из флакона с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС; 3а — МС из флакона с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся отрубями; 3б — МС из флакона с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся отрубями

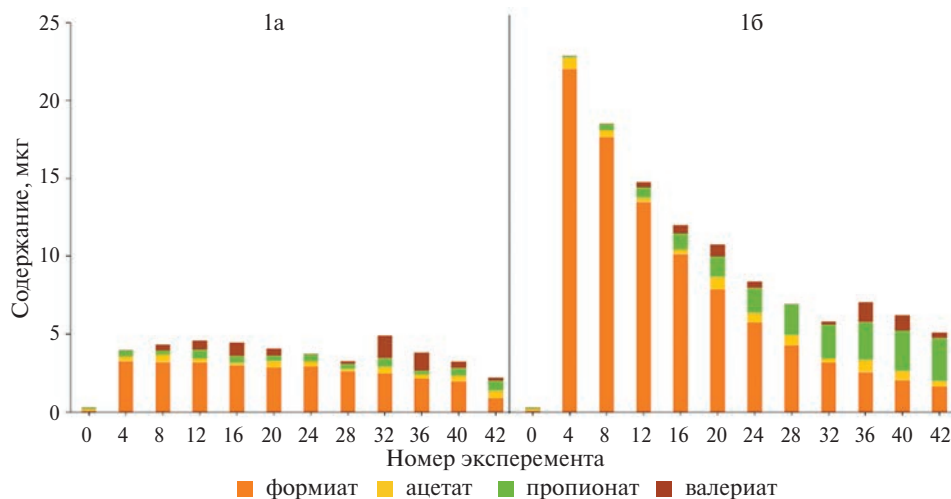
**Fig. 4.** Protein production by anaerobic MC cultured at stage II of the experiment. 1a — MC from a flask with a mineral medium and intestinal suspension of beetles fed on PS and bran; 1b — MC from a flask with a mineral medium, PS and intestinal suspension of beetles fed on PS and bran; 2a — MC from a flask with a mineral medium and intestinal suspension of beetles fed on PS; 2b — MC from a flask with a mineral medium, PS and intestinal suspension of beetles fed on PS; 3a — MC from a flask with a mineral medium and intestinal suspension of beetles fed on bran; 3b — MC from a flask with a mineral medium, PS and intestinal suspension of beetles fed on bran

Сообщество, выделенное из кишечника жуков, питавшихся ПС и отрубями, показало следующую разницу в образовании ЛЖК по сравнению с аналогичным микробным сообществом без добавления пластика: в 5,6 раз больше формата, в 1,7 раз больше ацетата, пропионата больше в 4,2 раза, превышение продукции валериата составило 0,1 раза (рис. 5).

Сообщество, выделенное из кишечника жуков, питавшихся отходами ПС, показало наибольшую

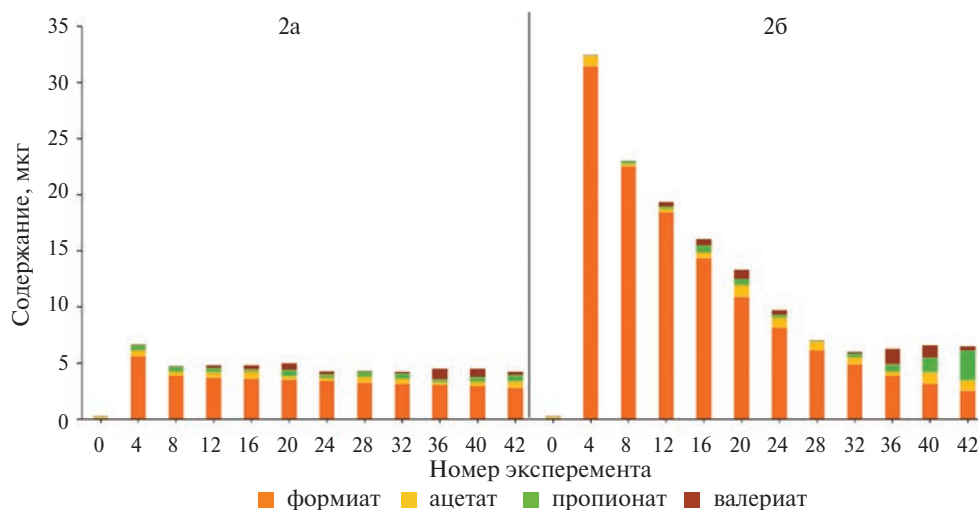
активность в образовании промежуточных летучих продуктов. Разница в образовании ЛЖК по сравнению с аналогичным микробным сообществом

без добавления пластика составила для формиата до 4,6 раз, для ацетата до в 3,3 раз, для пропионата 3,1 раза, для валериата 1,3 раза (рис. 6).



**Рис. 5.** Продукция ЛЖК анаэробными МС, культивируемыми на II стадии эксперимента. 1а — МС из флакона с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС и отрубями; 1б — МС из флакона с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС и отрубями

**Fig. 5.** VFA production by anaerobic MCs cultured at stage II of the experiment. 1a — MC from a flask with mineral medium and intestinal suspension of beetles fed on PS and bran; 1b — MC from a flask with mineral medium, PS, and intestinal suspension of beetles fed on PS and bran



**Рис. 6.** Продукция ЛЖК анаэробными МС, культивируемыми на II стадии эксперимента. 2а — МС из флакона с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС; 2б — МС из флакона с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС

**Fig. 6.** VFA production by anaerobic MCs cultured at stage II of the experiment. 2a — MC from a flask with mineral medium and intestinal suspension of beetles fed with PS; 2b — MC from a flask with mineral medium, PS, and intestinal suspension of beetles fed with PS

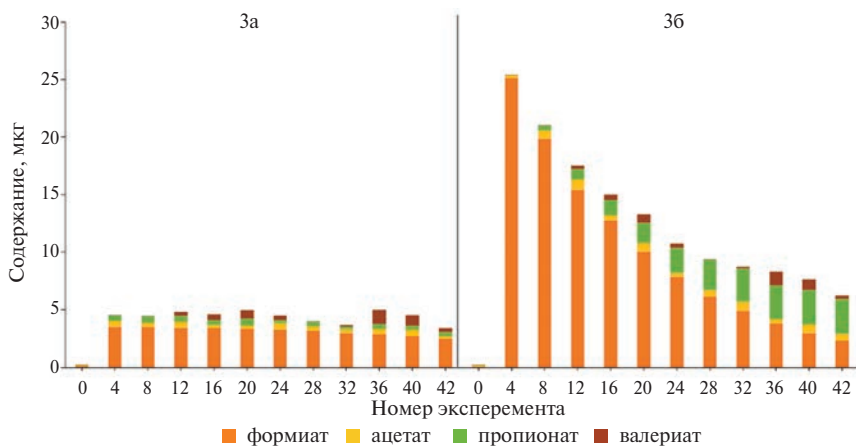
Для сообщества, выделенного из кишечника жуков, питавшихся отрубями, разница в образовании ЛЖК в присутствии ПС по сравнению с аналогичным микробным сообществом без добавления пластика составила для формиата до

6,1 раза, для ацетата до 1,7 раза, для пропионата до 6,6 раза, для валериата 0,3 раза (рис. 7).

Различия в продукции ЛЖК указывают на использование отходов ПС выделенными нами микробными сообществами в своем метаболизме.

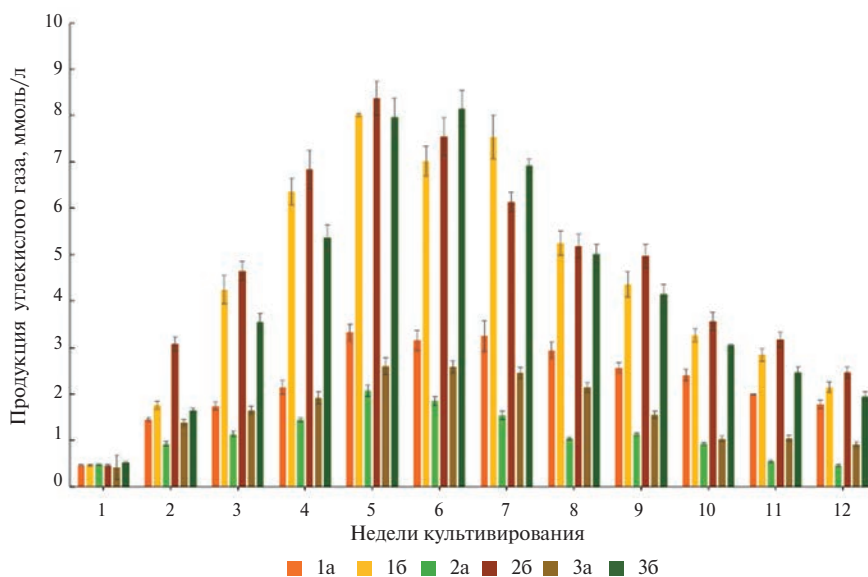
Анализ продукции газообразных метаболитов показал, что в присутствии отходов ПС анаэробные микробные сообщества, выделенные из кишечника жуков *Ulomoides dermestoides*

на второй стадии эксперимента, показали более высокую продукцию углекислого газа, чем те же варианты микробных сообществ без воздействия пластика (рис. 8).



**Рис. 7.** Продукция ЛЖК анаэробными МС, культивируемыми на II стадии эксперимента. 3а — МС из флакона с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся отрубями; 3б — МС из флакона с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся отрубями

**Fig. 7.** VFA production by anaerobic MCs cultured at stage II of the experiment. 3a — MC from a flask with mineral medium and intestinal suspension of beetles fed on bran; 3b — MC from a flask with mineral medium, PS, and intestinal suspension of beetles fed on bran



**Рис. 8.** Динамика образования углекислого газа во флаконах с анаэробными МС, выделенными из кишечника жуков *Ulomoides dermestoides*. 1а — МС из флакона с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС и отрубями; 1б — МС из флакона с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС и отрубями; 2а — МС из флакона с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС; 2б — МС из флакона с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС; 3а — МС из флакона с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся отрубями; 3б — МС из флакона с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся отрубями

**Fig. 8.** Dynamics of carbon dioxide formation in flasks with anaerobic MC isolated from the intestines of *Ulomoides dermestoides* beetles. 1a — MC from a flask with a mineral medium and an intestinal suspension of beetles fed on PS and bran; 1b — MC from a flask with a mineral medium, PS, and an intestinal suspension of beetles fed on PS and bran; 2a — MC from a flask with a mineral medium and an intestinal suspension of beetles fed on PS; 2b — MC from a flask with a mineral medium, PS, and an intestinal suspension of beetles fed on PS; 3a — MC from a flask with a mineral medium and an intestinal suspension of beetles fed on bran; 3b — MC from a flask with a mineral medium, PS, and an intestinal suspension of beetles fed on bran

Наибольшая продукция (до 8,3 ммоль/л в пике активности) углекислого газа показана микробным сообществом, выделенным из кишечника жуков, выросших на отрубях в присутствии отходов ПС.

Образование большого количества газа микробными сообществами в присутствии отходов ПС указывает на вовлеченность их в микробный метаболизм.

Анализ свойств отходов ПС методом гравиметрии показал колебания значений массы образцов отходов ПС до и после культивирования в пределах погрешности измерений. Видимые обрастания поверхности пластинок ПС не были обнаружены.

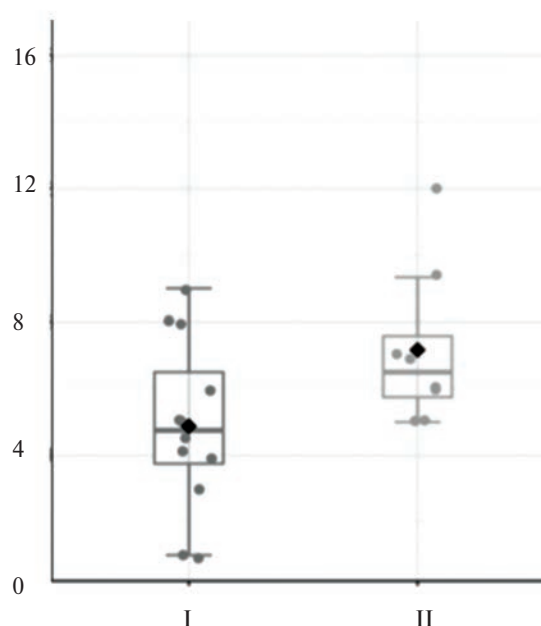
Изменения филогенетической структуры микробных сообществ отслеживали, сравнивая результаты высокопроизводительного секвенирования. Оценку богатства сообществ осуществляли с помощью индекса Чао 1, оценку разнообразия сообществ с помощью индексов Симпсона и Шеннона [32]. Микробные сообщества, выделенные из кишечника жуков-чернотелок в ходе эксперимента, характеризуются малым богатством и разнообразием, что показывают индексы Чао 1, Симпсона и Шеннона (табл. 1).

Культивирование микробных сообществ в анаэробных условиях привело к небольшому росту микробного разнообразия, что показано при расчете индекса  $\alpha$ -разнообразия Чао 1 (рис. 9).

**Таблица 1.** Индексы разнообразия микробных сообществ, выделенных из кишечника жуков *Ulomoides dermestoides* в присутствии отходов ПС в первой стадии эксперимента, и микробных сообществ, культивируемых в жидкой среде в присутствии отходов ПС во второй стадии эксперимента

**Table 1.** Diversity indices of microbial communities (MC) isolated from the intestines of *Ulomoides dermestoides* beetles in the presence of PS waste in the first stage of the experiment, and microbial communities cultivated in a liquid medium in the presence of PS waste in the second stage of the experiment

| Условное обозначение пробы | Описание пробы                                                                                                                                        | Индекс богатства Чао 1 | Индексы разнообразия |        |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|--------|
|                            |                                                                                                                                                       |                        | Симпсон              | Шеннон |
| 0                          | МС кишечной суспензии жуков в начале эксперимента, 0 недель                                                                                           | 5                      | 0,12                 | 0,28   |
| 1-2                        | МС кишечной суспензии жуков, питавшихся ПС и отрубями в течение 2 недель                                                                              | 4                      | 0,19                 | 0,44   |
| 1-10                       | МС кишечной суспензии жуков, питавшихся ПС и отрубями в течение 10 недель                                                                             | 6                      | 0,67                 | 1,39   |
| 2-2                        | МС кишечной суспензии жуков, питавшихся ПС в течение 2 недель                                                                                         | 4                      | 0,45                 | 0,84   |
| 2-10                       | МС кишечной суспензии жуков, питавшихся ПС в течение 10 недель                                                                                        | 4                      | 0,08                 | 0,22   |
| 3-10                       | МС кишечной суспензии жуков, питавшихся отрубями в течение 10 недель                                                                                  | 1                      | 0                    | 0      |
| 1a                         | МС из флакона, культивируемого в течение 42 недель с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС и отрубями в течение 10 недель     | 6                      | 0,49                 | 0,97   |
| 1б                         | МС из флакона, культивируемого в течение 42 недель с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС и отрубями в течение 10 недель | 12                     | 0,64                 | 1,41   |
| 2a                         | МС из флакона, культивируемого в течение 42 недель с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС в течение 10 недель                | 5                      | 0,49                 | 0,95   |
| 2б                         | МС из флакона, культивируемого в течение 42 недель с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС в течение 10 недель            | 7                      | 0,71                 | 1,53   |



**Рис. 9.** Сравнение микробного альфа-разнообразия сообществ, выделенных из кишечника жуков *Ulomoides dermestoides* в первой стадии эксперимента (I), и сообществ, культивируемых в анаэробных условиях в жидкой среде во второй стадии эксперимента (II). Альфа-разнообразие показано как мера индекса видового богатства Чао 1. Точки представляют собой рассчитанные показатели разнообразия микробных сообществ, тогда как прямоугольники охватывают межквартильный диапазон всех показателей

**Fig. 9.** Comparison of the microbial alpha diversity of communities isolated from the guts of *Ulomoides dermestoides* beetles in the first stage of the experiment (I) and communities cultured anaerobically in liquid medium in the second stage of the experiment (II). Alpha diversity is shown as a measure of the Chao species richness index 1. Dots represent the calculated indices of microbial community diversity, while rectangles cover the interquartile range of all indices

Большой межквартильный диапазон индексов видового богатства для микробных сообществ кишечника жуков *in vivo* отражает изменчивость состава микробиоты в соответствии с различиями в диете насекомых. Микробные сообщества, выделенные из кишечника жуков и культивируемые анаэробно во флаконах, характеризуются как большим таксономическим богатством, так и большей стабильностью численности групп.

Согласно результатам профилирования по гену 16S рРНК в составе микробиоты кишечника жуков в начале опыта (в нулевой точке) обнаружено 5 таксономических групп домена *Bacteria*, среди которых преобладали члены родов *Klebsiella* (92,2%), *Listeria* (4,1%), *Enterococcus* (1,9%), *Lactobacillus* (1,2%). Представители домена *Archaea* не выявлены (рис. 10).

К 10-й неделе эксперимента во всех вариантах значительно снизилась доля бактерий рода *Klebsiella*. В контрольном образце без отходов ПС (биоконтроль) доминирующей группой стали бактерии рода *Hafnia-Obesumbacterium*

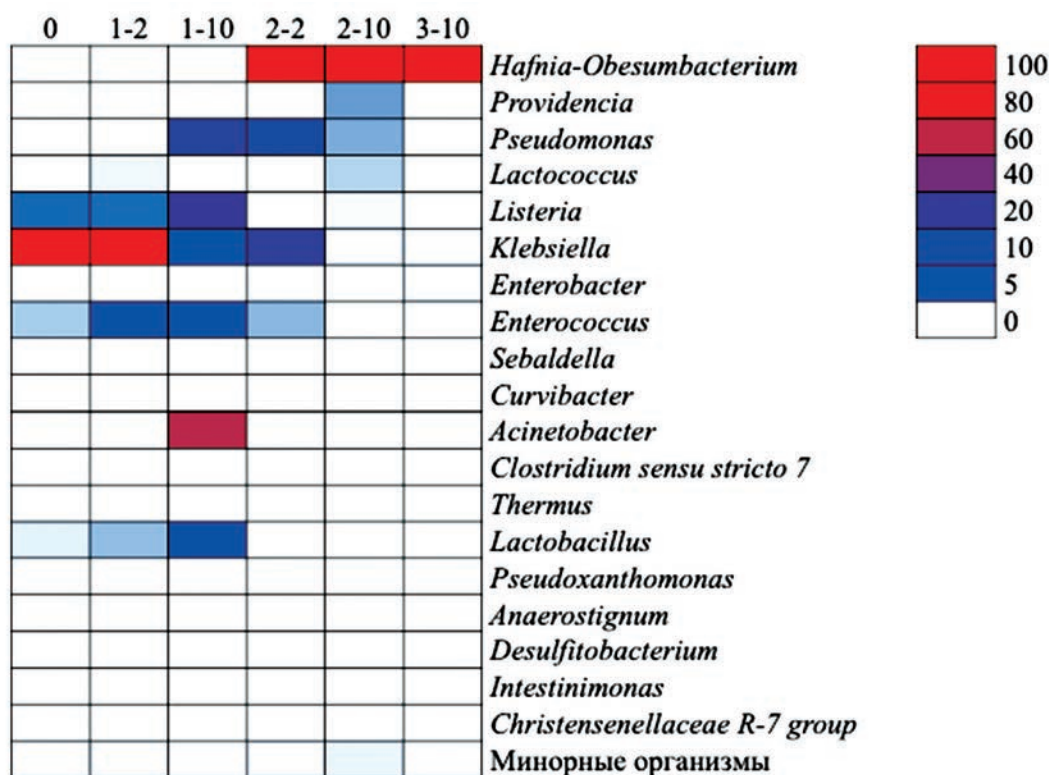
(98,4%). Эта группа также преобладала в варианте с ПС, но была малочисленной в варианте ПС с отрубями.

Анализ микробиоты кишечника жуков, выращиваемых на отрубях и отходах ПС, показал, что через 2 недели обнаруживались 5 групп с доминированием бактерий рода *Klebsiella* (87,2%), *Enterococcus* (5,3%), *Listeria* (3,8%), *Lactobacillus* (2,1%), *Lactococcus* (0,95%). Археи представлены минорной группой рода *Thermoplasma* (0,05%). После 10 недель опыта число групп увеличилось до 6, преобладающими стали бактерии родов *Acinetobacter* (50,9%), *Listeria* (18,9%), *Pseudomonas* (13,5%), *Lactobacillus* (6,3%), *Enterococcus* (5,6%), *Klebsiella* (4,5%). Археи обнаружены не были.

Кишечная микробиота жуков, выращенных исключительно на отходах ПС, через 2 недели была представлена 5 группами, со сменой доминирующего рода на *Hafnia-Obesumbacterium* (70,7%). Также значительные доли принадлежали *Klebsiella* (15,9%), *Pseudomonas* (9,8%), *Enterococcus* (2,3%), *Enterobacter* (0,43%). В конеч-

ной точке через 10 недель обнаружили 6 групп, доля бактерий рода *Hafnia-Obesumbacterium* увеличилась до 90,1%, уменьшилась доля *Pseudomonas* (2,5%), появились бактерии родов *Providencia* (2,8%), *Lactococcus* (2,8%) и *Listeria* (0,9%), снизилась доля *Klebsiella* (0,8%). Члены домена *Archaea* ни на одном этапе зарегистрированы не были.

Эксперимент с культивированием микробных сообществ на минеральной среде в анаэробных условиях показал дальнейшие изменения в составе сообщества (рис. 11). Перенос кишечных сообществ в минеральную среду сам по себе ведет к сукцессии микробных сообществ через 42 недели в сторону увеличения числа доминирующих групп.

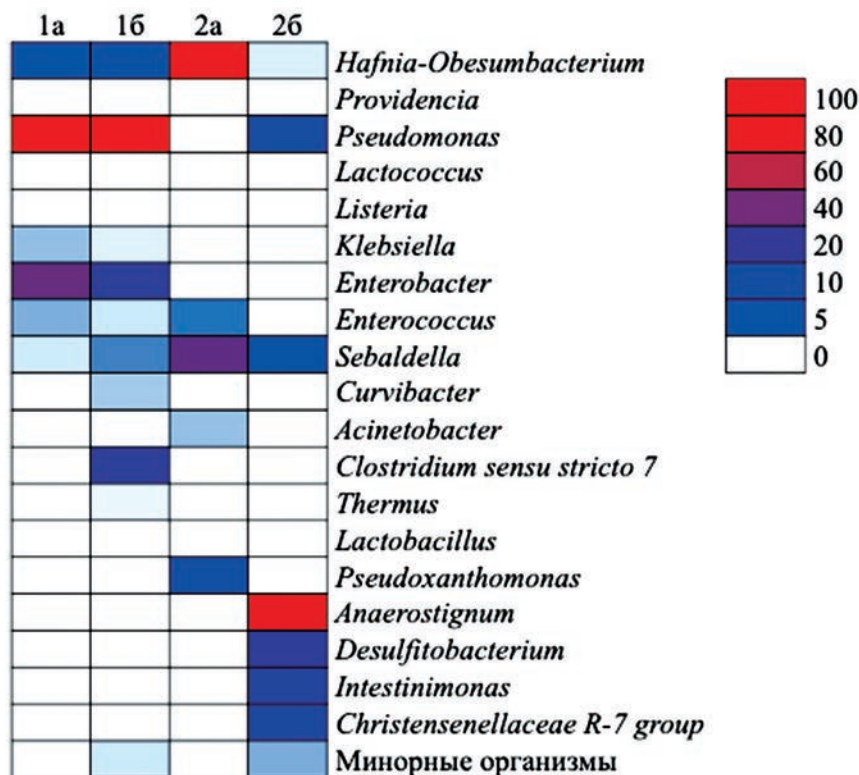


**Рис. 10.** Изменение состава микробных сообществ, выделенных из кишечника жуков на первой стадии эксперимента (I). 0 — МС кишечной суспензии жуков в начале эксперимента, 0 недель; 1–2 — МС кишечной суспензии жуков, питавшихся ПС и отрубями в течение 2 недель; 1–10 — МС кишечной суспензии жуков, питавшихся ПС и отрубями в течение 10 недель; 2–2 — МС кишечной суспензии жуков, питавшихся ПС в течение 2 недель; 2–10 — МС кишечной суспензии жуков, питавшихся ПС в течение 10 недель; 3–10 — МС кишечной суспензии жуков, питавшихся отрубями в течение 10 недель

**Fig. 10.** Changes in the composition of microbial communities isolated from the guts of beetles at the first stage of the experiment (I). 0 — MC of the intestinal suspension of beetles at the beginning of the experiment, 0 weeks; 1–2 — MC of the intestinal suspension of beetles fed with PS and bran for 2 weeks; 1–10 — MC of the intestinal suspension of beetles fed with PS and bran for 10 weeks; 2–2 — MC of the intestinal suspension of beetles fed with PS for 2 weeks; 2–10 — MC of the intestinal suspension of beetles fed with PS for 10 weeks; 3–10 — MC of the intestinal suspension of beetles fed with bran for 10 weeks

Микробное сообщество, выделенное из кишечника жуков, питавшихся отрубями и отходами ПС, при анаэробном культивировании в течение 42 недель претерпело следующие изменения: разнообразие составило 6 групп, доминирующими были бактерии родов *Pseudomonas* (62,7%), *Enterobacter* (24,2%), *Hafnia-Obesumbacterium* (5,2%), *Enterococcus* (2,7%), *Klebsiella* (2,4%), *Seballdella* (1,6%). Вариант с добавлением ПС как

основного источника углерода и энергии показал рост разнообразия с 6 до 10 групп, представленных родами бактерий *Pseudomonas* (56,5%), *Clostridium sensu stricto 7* (12,7%) и *Enterobacter* (12,6%), *Hafnia-Obesumbacterium* (5,7%), *Seballdella* (3,8%), *Curvibacter* (2,2%), *Enterococcus* (1,6%), *Klebsiella* (1,3%), *Thermus* (1,2%). Археи были представлены классом *Bathyarchaeia* (0,08%).



**Рис. 11.** Изменение состава микробных сообществ, выделенных из кишечника жуков на второй стадии эксперимента (II). 1a — МС из флакона с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС и отрубями; 16 — МС из флакона с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС и отрубями; 2a — МС из флакона с минеральной средой и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС; 26 — МС из флакона с минеральной средой, ПС и кишечной суспензией жуков, питавшихся ПС

**Fig. 11.** Changes in the composition of microbial communities isolated from the guts of beetles at the second stage of the experiment (II). 1a — MC from a flask with a mineral medium and intestinal suspension of beetles fed on PS and bran; 1b — MC from a flask with a mineral medium, PS, and intestinal suspension of beetles fed on PS and bran; 2a — MC from a flask with a mineral medium and intestinal suspension of beetles fed on PS; 2b — MC from a flask with a mineral medium, PS, and intestinal suspension of beetles fed on PS

В микробном сообществе, выделенном из кишечника питавшихся отходами ПС жуков, через 42 недели анаэробного культивирования было обнаружено 5 групп. Среди них *Hafnia-Obesumbacterium* снизили свое представительство до 62,9%, появились новые группы *Sebaldella* (22,9%), *Pseudoxanthomonas* (7,1%), *Enterococcus* (4,1%), *Acinetobacter* (2,4%). Археи не были обнаружены. В микробном сообществе, выделенном из кишечника питавшихся отходами ПС жуков, через 42 недели контакта с отходом ПС число групп, включающих бактерии родов *Anaerostignum* (48,1%), *Desulfitobacterium* (13,2%), *Intestinimonas* (10,8%) и *Christensenellaceae R-7 group* (10,1%), увеличилось с 4 до 7. Археи были представлены классом *Bathyarchaeia* (0,04%).

Сравнение микробных сообществ показало, что часть бактериальных таксонов регистрировали в нескольких вариантах опыта, однако относительная представленность таксонов в сообществе суще-

ственно различалась (табл. 2). Представители рода *Hafnia-Obesumbacterium* выявлены как в контрольной группе, питавшейся отрубями, так и опытной группе, получавшей в качестве корма отходы ПС. Бактерии рода *Hafnia-Obesumbacterium* — это способные к нитратредукции факультативно анаэробные микроорганизмы, ранее обнаруженные в составе кишечной микробиоты беспозвоночных. Описана их значительная роль в деструкции ПЭТ и ПС в составе кишечной микробиоты личинок жуков *Tenebrio molitor* [15]. Род *Pseudomonas* обнаружен только в вариантах с пластиком. Рост относительной численности данной группы в структуре микробного сообщества свидетельствует о ее участии в процессах адаптации к присутствию ПС. В опыте по кормлению полистиролом личинок жуков *Zophobas atratus* также показано увеличение численности бактерий родов *Hafnia-Obesumbacterium* и *Pseudomonas* [31].

**Таблица 2.** Доминирующие роды бактерий, выделенные из кишечника жуков, обнаруженные более чем в одном варианте в эксперименте по утилизации ПС (отмечены плюсом)

**Table 2.** Dominant bacterial genera isolated from the gut of beetles found in more than one variant in the PS utilization experiment (marked with a plus sign)

| Род                           | 0 | 1-2 | 1-10 | 2-2 | 2-10 | 3-10 |
|-------------------------------|---|-----|------|-----|------|------|
| <i>Enterococcus</i>           | + | +   | +    | +   |      |      |
| <i>Hafnia-Obesumbacterium</i> |   |     |      | +   | +    | +    |
| <i>Klebsiella</i>             | + | +   | +    | +   |      |      |
| <i>Lactobacillus</i>          | + | +   | +    |     |      |      |
| <i>Listeria</i>               | + | +   | +    |     |      |      |
| <i>Pseudomonas</i>            |   |     | +    | +   | +    |      |

Примечание: цветом выделены роды, упоминаемые в литературе в контексте потребления жуками разнообразных пластиков.

Note: The genera mentioned in the literature in the context of beetles consuming various plastics are highlighted in color.

Представители родов *Klebsiella* и *Enterococcus* обнаружены только в пробах кишечников жуков, получавших отходы ПС в качестве корма или добавки к отрубям. Известно, что кишечная микробиота выращенных на ПС личинок жуков *Zophobas morio* обогащается бактериями родов *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, что сопровождается увеличением деструкции этого полимера [36]. В опытах с жуками *Tenebrio molitor* [18], *Zophobas atratus* [17], *Tenebrio obscurus* [29] отмечено ассоциированное с потреблением ПС увеличение доли *Enterococcus* в микробном сообществе их кишечника.

Среди доминирующих групп микроорганизмов, выделенных из кишечника жуков в начале эксперимента, и в образцах из кишечников жуков, получавших в качестве корма отруби и отходы ПС, были также зарегистрированы *Lactobacillus* и *Listeria*. Роль представителей данных родов в кишечной микробиоте жуков и возможная связь с добавлением отходов ПС к корму насекомых требует дальнейшего изучения.

На втором этапе эксперимента при культивировании в анаэробной минеральной среде микробных сообществ, выделенных из кишечника жуков, признаки деструкции отходов ПС доступными в работе методами не были зарегистрированы. В то же время были показаны сдвиги в составе микробных сообществ в ответ на присутствие отходов ПС (табл. 3).

**Таблица 3.** Доминирующие роды бактерий, обнаруженные более чем в одном варианте в эксперименте (отмечены плюсом)

**Table 3.** Dominant bacterial genera found in more than one variant in the experiment (marked with a plus)

| Род                           | 1a | 1б | 2a | 2б |
|-------------------------------|----|----|----|----|
| <i>Enterobacter</i>           | +  | +  |    |    |
| <i>Enterococcus</i>           | +  | +  | +  |    |
| <i>Hafnia-Obesumbacterium</i> | +  | +  | +  | +  |
| <i>Klebsiella</i>             | +  | +  |    |    |
| <i>Pseudomonas</i>            | +  | +  |    | +  |
| <i>Sebaldella</i>             | +  | +  | +  | +  |

Примечание: цветом выделены роды, упоминаемые в литературе в контексте деструкции микробной культурой разнообразных пластиков.

Note: Genera mentioned in the literature in the context of microbial degradation of various plastics are highlighted in color.

В числе доминирующих групп присутствуют микроорганизмы, упоминаемые в других исследованиях по изучению кишечной микробиоты жуков в контакте с ПС как показавшие активность по отношению к пластику. Среди них бактерии родов *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Enterococcus* [19–22, 24, 37].

Представители родов *Hafnia-Obesumbacterium* и *Sebaldella* в литературе не охарактеризованы как деструкторы ПС или других сложных органических субстратов. Присутствие их среди доминирующих групп в микробном сообществе, контактирующем с отходами ПС, указывает на потенциальное участие этих родов в ферментативном расщеплении данного субстрата.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в модельном эксперименте на примере отходов ПС показана способность жуков *Ulomoides dermestoides* утилизировать пластиковые отходы. Убыль отходов вспененного ПС за 10 недель эксперимента составила до 70,45% массы. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что дополнение рациона жуков питательным субстратом вызывает значимое ускорение процесса утилизации пластиковых отходов. При начальном соотношении биомассы жуков к массе ПС 10:1 в присутствии отрубей убыль массы отходов ПС достигала  $75,0 \pm 3,7$  мг/неделю, в то время как для варианта с жуками, не получающими

дополнительно отруби, максимальное значение убыли составило  $50,1 \pm 2,3$  мг/неделю при средней скорости  $10,2 \pm 1,9$  мг/неделю. Контакт с отходами вспененного ПС не отражается отрицательно на функционировании микробных сообществ, выделенных из кишечника жуков *Ulomoides dermestoides*, и характеризуется большей продукцией углекислого газа и ЛЖК. Рассчитанные индексы разнообразия демонстрируют значительную изменчивость

состава кишечной микробиоты жуков *Ulomoides dermestoides* в ответ на присутствие отходов вспененного ПС. Показано увеличение доли микроорганизмов *Enterobacter*, *Enterococcus*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, известных в литературе как деструкторы сложных органических соединений. Роль микробного сообщества кишечника в разложении жуками отходов вспененного ПС требует дальнейшего изучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Запорников В.А. Рециклинг полимеров в России как часть мусорного кризиса // Полимерные материалы. 2020. Т.5. С. 34–36.
2. Клинков А.С. Утилизация и вторичная переработка тары и упаковки из полимерных материалов: учебное пособие / А.С. Клинков, П.С. Беляев, В.К. Скуратов, М.В. Соколов, В.Г. Однолько // Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. 2010. 100 с.
3. Резолюция, принятая Ассамблеей Организации Объединенных Наций по окружающей среде 2 марта 2022 года. UNEP/EA.5/Res.14.
4. Рзаев К.В. Российский рынок вторичной переработки пластмасс: состояние, тенденции, перспективы // Полимерные материалы. 2018. № 8. С. 8–14.
5. Сперанская О., Понизова О., Цитцер О., Гурский Я. Пластик и пластиковые отходы в России: ситуация, проблемы и рекомендации // Международная Сеть по Ликвидации Загрязнителей (International Pollutants Elimination Network). 2021.
6. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года, утверждена распоряжением правительства РФ от 25 января 2018 г. № 84-р.
7. Andrady A. L., Neal M. A. Applications and social benefits of plastics // Philos. Trans. of the R. Soc. B. Biol. Sci. 2009. V. 364. N 1526. P. 1977–1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
8. Ba Ho T., Roberts T.K., Lucas S. An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: the microbial approach // Crit. Rev. Biotechnol. 2018. V. 38. №2. P. 308–320. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1355293>
9. Bolyen E., Rideout J.R., Dillon M.R. et al. Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2 // Nature Biotechnol. 2019. V. 37. P. 852–857. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0209-9>
10. Bradford M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding // Anal. Biochem. 1976. V. 7. A. 7;72:248-54. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
11. Chao A., Bunge J. Estimating the Number of Species in a Stochastic Abundance Model // Biometrics. 2002. V.58. P.531–539. <https://doi.org/10.1111/j.0006-341x.2002.00531.x>
12. Cottom J.W., Cook E., Velis C.A. A local-to-global emissions inventory of macroplastic pollution // Nature. 2024. V.633. P.101–108. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07758-6>
13. Fadrosh D.W., Ma B., Gajer P. et al. An improved dual-indexing approach for multiplexed 16S rRNA gene sequencing on the Illumina MiSeq platform // Microbiome. 2014. V. 2. P. 1–7. <https://doi.org/10.1186/2049-2618-2-6>
14. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made // Sci. Advances. 2017. V.3. N 7. Article e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
15. He L., Yang S.-S., Ding J., He Z.-L. et al. Responses of gut microbiomes to commercial polyester polymer biodegradation in *Tenebrio molitor* Larvae // J. Hazard. Mater. 2023. V.457. Article 131759. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131759>
16. Hugerth L.W., Wefer H.A., Lundin S. et al. DegePrime: A program for degenerate primer design for broad taxonomic range PCR for microbial ecology studies // Appl. Environ. Microbiol. 2014. V. 80. P. 5116–5123. <https://doi.org/10.1128/aem.01403-14>
17. Jiang S., Su T., Zhao J., Wang Z. Isolation, Identification, and Characterization of Polystyrene-Degrading Bacteria From the Gut of *Galleria Mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae) Larvae // Front. Bioeng. Biotechnol. 2021. V.9. Article 736062. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.736062>

18. Jiang S., Su T., Zhao J., Wang Z. Biodegradation of Polystyrene by *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella*, and *Zophobas atratus* Larvae and Comparison of Their Degradation Effects // *Polymers*. 2021. V.13. N 20. Article 3539. <https://doi.org/10.3390/polym13203539>
19. Kang M.-G., Kwak M.-J., Kim Y. Polystyrene microplastics biodegradation by gut bacterial *Enterobacter hormaechei* from mealworms under anaerobic conditions: Anaerobic oxidation and depolymerization // *J. Hazard. Mater.* 2023. V.459. Article 132045. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132045>
20. Kim H.R., Lee H.M., Yu H.C. et al. Biodegradation of Polystyrene by *Pseudomonas* sp. Isolated from the Gut of Superworms (Larvae of *Zophobas atratus*) // *Environ. Sci. Technol.* 2020. V.54. N 11. P.6987–6996. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01495>
21. Lin W., Yao Y., Su T., Wang Z. Biodegradation of polystyrene by bacteria isolated from the yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) gut // *J. Environ. Chem. Engineering*. 2024. V.12. N 2. Article 112071. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112071>
22. Lou Y., Pererva E., Yang S.-S. et al. Biodegradation of Polyethylene and Polystyrene by Greater Wax Moth Larvae (*Galleria mellonella* L.) and the Effect of Co-diet Supplementation on the Core Gut Microbiome // *Environ. Sci. Technol.* 2020. V.54. P.2821–2831. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07044>
23. Lu Y., Zhou G., Ewald J. et al. MicrobiomeAnalyst 2.0: comprehensive statistical, functional and integrative analysis of microbiome data // *Nucleic Acids Res.* 2023. V.51. P. 310–318. <https://doi.org/10.1093/nar/gkad407>
24. Machona O., Chidzondo F., Mangoyi R. *Tenebrio molitor*: possible source of polystyrene-degrading bacteria // *BMC Biotechnol.* 2022. V.22. Article 2. <https://doi.org/10.1186/s12896-021-00733-3>
25. Merkel A.Y., Tarnovetskii I.Y., Podosokorskaya O.A., Toshchakov S.V. // *Microbiology*. 2019. V.13. P. 671–680. <https://doi.org/10.1134/S0026261719060110>
26. Metsalu T., Vilo J. Analysis of 16S rRNA Primer Systems for Profiling of Thermophilic Microbial Communities // *Nucleic Acids Res.* 2015. V.43. №1. P.566–570. <https://doi.org/10.1093/nar/gkv468>
27. Morillo-Garcia Y., Olivero-Verbel J., Caballero-Gallardo K. Life cycle of *Ulomoides dermestoides* (Fairmaire, 1893) (Coleoptera: Tenebrionidae) under laboratory conditions// *J. Stored Products Res.* 2016. V.69. P.272–275. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.09.007>
28. Peng B.Y., Li Y., Fan R. et al. Biodegradation of low-density polyethylene and polystyrene in superworms, larvae of *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae): Broad and limited extent depolymerization // *Environ. Pollut.* 2020. V.266. Article 115206. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115206>
29. Peng B.Y., Su Y., Chen Z. et al. Biodegradation of Polystyrene by Dark (*Tenebrio obscurus*) and Yellow (*Tenebrio molitor*) Mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae) // *Environ. Sci. Technol.* 2019. V.53. P.5256–5265. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06963>
30. Peng B.Y., Sun Y., Wu Z. et al. Biodegradation of polystyrene and low-density polyethylene by *Zophobas atratus* larvae: Fragmentation into microplastics, gut microbiota shift, and microbial functional enzymes // *J. Cleaner Production*. 2022. V.367. Article 132987. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132987>
31. Quan Z., Zhao Z., Liu Z. et al. Biodegradation of polystyrene microplastics by superworms (larve of *Zophobas atratus*): Gut microbiota transition, and putative metabolic ways // *Chemosphere*. 2023. V. 343. Article 140246. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140246>
32. Roswell M., Dushoff J., Winfree R. A conceptual guide to measuring species diversity // *Oikos*. 2021. V. 130. №. 3. P. 321–338. <https://doi.org/10.1111/oik.07202>
33. Shannon C.E. A mathematical theory of communication // *The Bell System. Technical Journal*. 1948. V.27. P.379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
34. Simpson E.H. Measurement of Diversity // *Nature*. 1949. V.163. Article 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
35. Sklyar V., Kalyuzhnyi S., Mosolova T. et al. Methanogenic biodegradation of aromatic amines// *Water Sci. Technol.* 2000. V.42. № 5. P.363–370. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0536>
36. Sun J., Prabhu A., Ariney S.T.N., Rinke C. Insights into plastic biodegradation: community composition and functional capabilities of the superworm (*Zophobas morio*) microbiome in styrofoam feeding trials // *Microb. Genom.* 2022. V.8. Article 000842. <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000842>
37. Tay J.H., Asib N., Aziz N.A.A., Tan G.H. Biodegradation of Expanded and Extruded Polystyrene with Different Diets by Using *Zophobas atratus* Larvae (Coleoptera: Tenebrionidae) // *Pertanika J. Tropical Agricultural Sci.* 2023. V.46. N.2. P. 459–483. <https://doi.org/10.47836/pjtas.46.2.06>
38. Wang Y., Luo L., Li X. et al. Different plastics ingestion preferences and efficiencies of superworm (*Zophobas atratus* Fab.) and yellow mealworm (*Tenebrio molitor* Linn.) associated with distinct gut microbiome changes // *Sci. Total. Environ.* 2022. V.837. Article 155719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155719>

39. Woo S., Song I., Joon Cha H. Fast and Facile Biodegradation of Polystyrene by the Gut Microbial Flora of *Plesiophthalmus davidis* Larvae // *Appl. Environ. Microbiol.* 2020. V.86. Article e01361-20. <https://doi.org/10.1128/aem.01361-20>
40. Yang Y., Yang J., Wu W.M. et al. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests // *Environ. Sci. Technol.* 2015. V.49. P.12080–12086. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02661>
41. Zhu P., Pan X., Li X. et al. Biodegradation of plastics from waste electrical and electronic equipment by greater wax moth larvae (*Galleria mellonella*) // *J. Cleaner Production.* 2021. V. 310. Article 127346. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127346>

## REFERENCES

1. Zapornikov V.A. Recycling of polymers in Russia as part of the waste crisis. *Polymer materials.* 2020. V. 5. P. 34–36.
2. Klinkov A.S. *Recycling and recycling of containers and packaging made of polymeric materials: a tutorial.* A.S. Klinkov, P.S. Belyaev, V.K. Skuratov, M.V. Sokolov, V.G. Odnolko. Tambov: Publishing house of Tambov state technical university. 2010. 100 p.
3. Resolution, adopted by the United Nations Environment Assembly on 2 March 2022. UNEP/EA.5/Res.14.
4. Rzaev K.V. The Russian plastics recycling market: status, trends, and prospects. *Polymer materials.* 2018. V. 8. P. 8–14.
5. Speranskaya O., Ponizova O., Tsitser O., Gursky Ya. Plastic and plastic waste in Russia: situation, problems and recommendations. *International Pollutants Elimination Network.* 2021.
6. The strategy for the development of the industry for the processing, recycling and disposal of production and consumption waste for the period up to 2030 was approved by the order of the Government of the Russian Federation of January 25, 2018, No. 84-r.
7. Andrady A. L., Neal M. A. Applications and social benefits of plastics. *Philos. Trans. of the R. Soc. B. Biol. Sci.* 2009. V. 364. N. 1526. P. 1977–1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
8. Ba Ho T., Roberts T.K., Lucas S. An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: the microbial approach. *Crit. Rev. Biotechnol.* 2018. V. 38. №2. P. 308–320. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1355293>
9. Bolyen E., Rideout J.R., Dillon M.R. et al. Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2. *Nature Biotechnol.* 2019. V. 37. P. 852–857. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0209-9>
10. Bradford M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.* 1976. V. 7. A. 7;72:248-54. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
11. Chao A., Bunge J. Estimating the Number of Species in a Stochastic Abundance Model. *Biometrics.* 2002. V.58. P.531–539. <https://doi.org/10.1111/j.0006-341x.2002.00531.x>
12. Cottom J.W., Cook E., Velis C.A. A local-to-global emissions inventory of macroplastic pollution. *Nature.* 2024. V.633. P.101–108. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07758-6>
13. Fadrosch D.W., Ma B., Gajer P. et al. An improved dual-indexing approach for multiplexed 16S rRNA gene sequencing on the Illumina MiSeq platform. *Microbiome.* 2014. V. 2. P. 1–7. <https://doi.org/10.1186/2049-2618-2-6>
14. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Advances.* 2017. V.3. N.7. Article e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
15. He L., Yang S.-S., Ding J., He Z.-L. et al. Responses of gut microbiomes to commercial polyester polymer biodegradation in *Tenebrio molitor* Larvae. *J. Hazard. Mater.* 2023. V.457. Article 131759. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131759>
16. Hugerth L.W., Wefer H.A., Lundin S. et al. DegePrime: A program for degenerate primer design for broad taxonomic5 range PCR for microbial ecology studies. *Appl. Environ. Microbiol.* 2014. V. 80. P. 5116–5123. <https://doi.org/10.1128/aem.01403-14>
17. Jiang S., Su T., Zhao J., Wang Z. Isolation, Identification, and Characterization of Polystyrene-Degrading Bacteria From the Gut of *Galleria Mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae) Larvae. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2021. V. 9. Article 736062. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.736062>
18. Jiang S., Su T., Zhao J., Wang Z. Biodegradation of Polystyrene by *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella*, and *Zophobas atratus* Larvae and Comparison of Their Degradation Effects. *Polymers.* 2021. V. 13. N. 20. Article 3539. <https://doi.org/10.3390/polym13203539>

19. Kang M.-G., Kwak M.-J., Kim Y. Polystyrene microplastics biodegradation by gut bacterial *Enterobacter hormaechei* from mealworms under anaerobic conditions: Anaerobic oxidation and depolymerization. *J. Hazard. Mater.* 2023. V.459. Article 132045. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132045>
20. Kim H.R., Lee H.M., Yu H.C. et al. Biodegradation of Polystyrene by *Pseudomonas* sp. Isolated from the Gut of Superworms (Larvae of *Zophobas atratus*). *Environ. Sci. Technol.* 2020. V.54. N.11. P.6987-6996. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01495>
21. Lin W., Yao Y., Su T., Wang Z. Biodegradation of polystyrene by bacteria isolated from the yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) gut. *J. Environ. Chem. Engineering.* 2024. V.12. N.2. Article 112071. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112071>
22. Lou Y., Pererva E., Yang S.-S. et al. Biodegradation of Polyethylene and Polystyrene by Greater Wax Moth Larvae (*Galleria mellonella* L.) and the Effect of Co-diet Supplementation on the Core Gut Microbiome. *Environ. Sci. Technol.* 2020. V.54. P.2821–2831. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07044>
23. Lu Y., Zhou G., Ewald J. et al. MicrobiomeAnalyst 2.0: comprehensive statistical, functional and integrative analysis of microbiome data. *Nucleic Acids Res.* 2023. V.51. P. 310–318. <https://doi.org/10.1093/nar/gkad407>
24. Machona O., Chidzondo F., Mangoyi R. *Tenebrio molitor*: possible source of polystyrene-degrading bacteria. *BMC Biotechnol.* 2022. V.22. Article 2. <https://doi.org/10.1186/s12896-021-00733-3>
25. Merkel A.Y., Tarnovetskii I.Y., Podosokorskaya O.A., Toshchakov S.V. Analysis of 16S rRNA Primer Systems for Profiling of Thermophilic Microbial Communities. *Microbiology.* 2019. V.13. P.671–680. <https://doi.org/10.1134/S0026261719060110>
26. Metsalu T., Vilo J. Analysis of 16S rRNA Primer Systems for Profiling of Thermophilic Microbial Communities. *Nucleic Acids Res.* 2015. V.43. №1. P.566–570. <https://doi.org/10.1093/nar/gkv468>
27. Morillo-Garcia Y., Olivero-Verbel J., Caballero-Gallardo K. Life cycle of *Uromyces dermestoides* (Fairmaire, 1893) (Coleoptera: Tenebrionidae) under laboratory conditions. *J. Stored Products Res.* 2016. V.69. P.272–275. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.09.007>
28. Peng B.Y., Li Y., Fan R. et al. Biodegradation of low-density polyethylene and polystyrene in superworms, larvae of *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae): Broad and limited extent depolymerization. *Environ. Pollut.* 2020. V.266. Article 115206. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115206>
29. Peng B.Y., Su Y., Chen Z. et al. Biodegradation of Polystyrene by Dark (*Tenebrio obscurus*) and Yellow (*Tenebrio molitor*) Mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae). *Environ. Sci. Technol.* 2019. V.53. P.5256–5265. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06963>
30. Peng B.Y., Sun Y., Wu Z. et al. Biodegradation of polystyrene and low-density polyethylene by *Zophobas atratus* larvae: Fragmentation into microplastics, gut microbiota shift, and microbial functional enzymes. *J. Cleaner Production.* 2022. V.367. Article 132987. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132987>
31. Quan Z., Zhao Z., Liu Z. et al. Biodegradation of polystyrene microplastics by superworms (larve of *Zophobas atratus*): Gut microbiota transition, and putative metabolic ways. *Chemosphere.* 2023. V. 343. Article 140246. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140246>
32. Roswell M., Dushoff J., Winfree R. A conceptual guide to measuring species diversity. *Oikos.* 2021. V. 130. №. 3. P. 321–338. <https://doi.org/10.1111/oik.07202>
33. Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *The Bell System. Technical Journal.* 1948. V.27. P.379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
34. Simpson E.H. Measurement of Diversity. *Nature.* 1949. V.163. Article 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
35. Sklyar V., Kalyuzhnyi S., Mosolova T. et al. Methanogenic biodegradation of aromatic amines. *Water Sci. Technol.* 2000. V.42. № 5. P.363–370. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0536>
36. Sun J., Prabhu A., Ariney S.T.N., Rinke C. Insights into plastic biodegradation: community composition and functional capabilities of the superworm (*Zophobas morio*) microbiome in styrofoam feeding trials. *Microb. Genom.* 2022. V.8. Article 000842. <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000842>
37. Tay J.H., Asib N., Aziz N.A.A., Tan G.H. Biodegradation of Expanded and Extruded Polystyrene with Different Diets by Using *Zophobas atratus* Larvae (Coleoptera: Tenebrionidae). *Pertanika J. Tropical Agricultural Sci.* 2023. V.46. N.2. P.459–483. <https://doi.org/10.47836/pjtas.46.2.06>
38. Wang Y., Luo L., Li X. et al. Different plastics ingestion preferences and efficiencies of superworm (*Zophobas atratus* Fab.) and yellow mealworm (*Tenebrio molitor* Linn.) associated with distinct gut microbiome changes. *Sci. Total. Environ.* 2022. V.837. Article 155719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155719>
39. Woo S., Song I., Joon Cha H. Fast and Facile Biodegradation of Polystyrene by the Gut Microbial Flora of *Plesiothalamus davidis* Larvae. *Appl. Environ. Microbiol.* 2020. V.86. Article e01361-20. <https://doi.org/10.1128/aem.01361-20>

40. Yang Y., Yang J., Wu W.M. et al. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests. *Environ. Sci. Technol.* 2015. V.49. P.12080–12086. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02661>
41. Zhu P., Pan X., Li X. et al. Biodegradation of plastics from waste electrical and electronic equipment by greater wax moth larvae (*Galleria mellonella*). *J. Cleaner Production.* 2021. V.310. Article 127346. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127346>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ширинкина Людмила Игоревна — научный сотрудник, кафедра микробиологии биологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация  
E-mail: [pro100tilka@gmail.com](mailto:pro100tilka@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0003-8968-3222>

Тактарова Юлия Валерьевна — кандидат биологических наук, доцент, кафедра микробиологии биологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация  
E-mail: [yvtaktarova@gmail.com](mailto:yvtaktarova@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-4248-7596>

Бастраков Александр Иванович — кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория инновационных технологий, институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской Академии Наук, Москва, Российская Федерация  
E-mail: [aibastrakov@gmail.com](mailto:aibastrakov@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-9647-0805>

Ушакова Нина Александровна — доктор биологических наук, профессор, заведующая лабораторией инновационных технологий, лаборатория инновационных технологий, институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской Академии Наук, Москва, Российская Федерация  
E-mail: [naushakova@gmail.com](mailto:naushakova@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-7914-1508>

Котова Ирина Борисовна — доктор биологических наук, профессор, профессор, кафедра микробиологии биологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация  
E-mail: [kira1959@gmail.com](mailto:kira1959@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0007-5727-057X>

Поступила в редакцию 01.09.2025

После доработки 02.02.2026

Принята к публикации 01.03.2026

## AUTHOR INFORMATION

Shirinkina, Lyudmila I. — research fellow, Biology faculty, Moscow State University, Moscow, Russian Federation  
E-mail: [pro100tilka@gmail.com](mailto:pro100tilka@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0003-8968-3222>

Taktarova, Yulia V. — Cand. Sci. in Biology, associate professor, Biology faculty, Moscow State University, Moscow, Russian Federation  
E-mail: [yvtaktarova@gmail.com](mailto:yvtaktarova@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-4248-7596>

Bastrakov, Alexandr I. — Cand. Sci. in Biology, research fellow, laboratory of innovative technologies, Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS, Moscow, Russian Federation  
E-mail: [aibastrakov@gmail.com](mailto:aibastrakov@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-9647-0805>

Ushakova, Nina A. — Dr. Sci. in Biology, professor, head of the laboratory of innovative technologies, Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS, Moscow, Russian Federation  
E-mail: [naushakova@gmail.com](mailto:naushakova@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-7914-1508>

Kotova, Irina B. — Dr. Sci. in Biology, professor, professor, Biology faculty, Moscow State University, Moscow, Russian Federation  
E-mail: [kira1959@gmail.com](mailto:kira1959@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0007-5727-057X>

Received September 01, 2025

Revised February 02, 2026

Accepted March 01, 2026