



Индикация и идентификация опасных веществ

УДК 544.473:547.322

DOI: 10.25514/CHS.2024.1.26007

Изменение свойств и состава выбросов летучих органических соединений, выделяющихся при разложении отдельных фракций биоорганических отходов***М. Д. Харламова¹, К. С. Романовская^{1✉}, А. Р. Борисова^{1,2}, А. Б. Вышелесский³***

¹Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Институт экологии, Москва, Россия, e-mail: romanovskaya-ks@rudn.ru

²Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, НОРЦ «Фармация», Москва, Россия

³ОАО ВОЛНОВОД-7, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 18.02.2024 г.; после доработки: 15.04.2024 г.; принята в печать: 16.04.2024 г.

Аннотация – Изучен качественный состав выбросов, образующихся при разложении белковых и липидных фракций биоорганических отходов, а также птичьего помета, определено соотношение в них легколетучих органических соединений. Показано, что в составе выбросов на первой стадии компостирования присутствуют одиннадцать классов ЛОС, в том числе обладающие сильно выраженным запахом, такие как индол, метантиол, диметилсульфид и др. Оценена эффективность действия экспериментального биопрепарата «Ликвидатор-2», используемого для уменьшения запаха и ускорения биodeградации при воздействии на белковые фракции биоорганических отходов и птичьего помета, изучена динамика изменения состава выбросов при добавлении экспериментального биопрепарата «Ликвидатор-2». Показано, что в наибольшей степени биопрепарат оказывает воздействие на ЛОС, образующиеся при разложении рыбных фракций биоорганических отходов. Отмечена необходимость модификации состава биопрепарата для некоторых фракций отходов с целью обеспечения деструкции доминирующих веществ, обладающих сильно выраженным запахом. Предложена методика более простого и экономичного отбора проб и последующей идентификации летучих органических соединений (ЛОС), выделяющихся при разложении отдельных фракций биоорганических отходов, с использованием сорбента, которая позволяет заменить использование дорогостоящих сорбционных трубок Tenax.

Ключевые слова: летучие органические соединения (ЛОС), биоорганические отходы, белковые фракции биоорганических отходов, птичий помет, экспериментальный биопрепарат.

Indication and identification of hazardous substances

UDC 544.473:547.322

DOI: 10.25514/CHS.2024.1.26007

Characteristics and Composition of Volatile Organic Compound Emissions from the Decomposition of Selected Bioorganic Wastes Fractions***Marianna D. Kharlamova¹, Ksenia S. Romanovskaya^{1✉}, Alexandra R. Borisova^{1,2}, and Alexey B. Vyshellessky³***

¹Institute of Environmental Engineering, Peoples Friendship University of Russia, Moscow, Russia,
e-mail: romanovskaya-ks@rudn.ru

²Scientific and educational resource center “Pharmacy”, Peoples Friendship University of Russia,
Moscow, Russia

³JSC “VOLNOVOD-7”, Moscow, Russia

Received: February 18, 2024; Revised: April 15, 2024; Accepted: April 16, 2024

Abstract – The qualitative composition of emissions formed during the decomposition of protein and lipid fractions of bioorganic waste, as well as bird droppings, has been studied, and the ratio of light volatile organic compounds (VOCs) in them has been determined. It has been shown that the emissions at the first stage of composting contain eleven classes of VOCs, including those with strong odors such as indole, methanethiol, dimethyl sulfide, and others. The effectiveness of experimental biological product “Liquidator-2” used to reduce odor and accelerate biodegradation when exposed to protein fractions of bioorganic waste and bird droppings has been evaluated. The dynamics of changes in the composition of emissions when adding the experimental biological product “Liquidator-2” has been studied. The biological product has been shown to have the greatest impact on VOCs formed during the decomposition of fish fractions of bioorganic waste. The need to modify the composition of the biological product for some fractions of waste in order to ensure the destruction of dominant substances with a strong odor was noted. A method for simpler and more economical sampling and subsequent identification of VOCs emitted during the decomposition of individual fractions of bioorganic waste using a sorbent has been proposed, which allows for the replacement of expensive Tenax sorption tubes.

Keywords: volatile organic compounds (VOCs), bioorganic waste, protein fractions of bioorganic waste, bird droppings, experimental experimental biological product.

ВВЕДЕНИЕ

В результате разложения биоорганических отходов (пищевых, сельскохозяйственных, отходов переработки рыбной и мясной продукции, животноводства и птицеводства и др.) происходит деструкция многокомпонентного органического вещества, при этом образуются как простые неорганические соединения (аммиак, сероводород), так и летучие органические соединения (ЛОС), обладающие высокой биологической активностью и крайне неприятным запахом. Особенно неприятным запахом обладают продукты разложения белковых фракций отходов.

К ЛОС относятся предельные, непредельные, ароматические углеводороды, спирты, фенолы, альдегиды, кетоны, органические кислоты, амины, нитросоединения и другие вещества – всего более 650 соединений [1], загрязняющие атмосферный воздух и оказывающие негативное воздействие на здоровье и психоэмоциональное состояние человека [2, 3, 4]. Кроме того, ЛОС играют основную роль при образовании фотохимических окислителей (озон, пероксиацетилнитрат), которые приводят к появлению в воздухе промежуточных соединений, оказывающих токсическое воздействие на живые системы [5].

Доминирующими аминокислотами в белках мяса и рыбы являются аспарагиновая и глутаминовая кислоты, аргинин, лизин, а также лейцин (говядина и баранина), аспарагин (курица) [6, 7, 8]. Доминантами липидного

профиля мяса (курица, свинина) являются олеиновая, пальмитиновая, линолевая, стеариновая кислоты [9, 10]. Липидный профиль рыбы значительно отличается от мясного профиля [9]. Пальмитолеиновая кислота является доминантом, далее - пальмитиновая, эйкозапентаеновая и вакценовая кислоты. Куриный помет отличается по химическому составу, как от рыбных, так и от мясных отходов. В составе помета более 50% воды, и около 40% органических соединений, в т.ч. белки и липиды [11].

Скорость разложения органических соединений отходов может варьироваться в широких пределах (от нескольких дней до нескольких недель) в зависимости от многих факторов, включая состав отходов, температуру, концентрацию кислорода, влажность, наличие микроорганизмов и других условий окружающей среды.

На сегодняшний день выделены и проанализированы штаммы микроорганизмов-деструкторов, ускорителей ферментации, а также способных оказывать инсектицидное, противогрибковое воздействие [12, 13].

На практике в качестве биодеструкторов и для снижения образования ЛОС чаще всего используют гетеротрофные бактерии и грибы [14, 15], поскольку они способны потреблять органические соединения в ходе катаболических процессов для получения энергии или использовать ЛОС в качестве источника углерода для анаболических процессов. Ускорить разложение отходов и снизить концентрацию запахов можно с помощью применения биопрепаратов на основе микроорганизмов, например, рода *Clostridium*, *Pseudomonas* и *Achromobacter*, плесневых грибов и актиномицетов [16]. Среди протеобактерий роды *Alcaligenes*, *Acinetobacter*, *Burkholderia*, *Pseudomonas*, *Xanthobacter* наиболее эффективны для разложения ароматических и галогенсодержащих соединений [12]. Для обезвреживания сероуглерода могут использоваться бактерии рода *Methylovibrio* обладающие активностью CS₂ гидролазы [17].

Описаны биологические методы разложения ЛОС в сточных водах свиноферм. Питаясь субстратом биоорганических отходов, образованных на свинных фермах, биопрепарат снижает концентрации таких веществ, как пропионовая, масляная, изомасляная, валериановая, изовалериановая, капроновая и изокапроновую кислоты, фенол, *n*-крезол, *n*-этилфенол. В качестве бактериального препарата в работе [18] были использованы генномодифицированный анаэробный штамм *Geobacter sp.* Авторы работы наблюдали полное исчезновение запаха ЛОС, при этом общая концентрация ЛОС снижалась с 422 мкг/мл до 1 мкг/мл.

В то же время проблема образования ЛОС при разложении птичьего помета, мясных или рыбных отходов и возникновение неприятных запахов во время их утилизации остается малоизученной. Недостаточно представлено информации о количественном и качественном составе веществ, отвечающих за появление запаха.

Цель данного исследования состоит в определении состава и соотношения компонентов ЛОС, образующихся при разложении белковых фракций биоорганических отходов и птичьего помета, а также в изучении

динамики изменения состава ЛОС под действием экспериментального микробиологического препарата «Ликвидатор-2».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объекты и методы исследования

Для проведения эксперимента были подготовлены следующие пробы биоорганических отходов:

- проба № 1 – куриный фарш (300 г нежирного фарша+200 г воды);
- проба № 2 – свиной фарш (300 г жирного фарша+200 г воды);
- проба № 3 – морская свежемороженая рыба – мойва (300 г рыбы +200 г воды);
- проба № 4 – куриный помет (300 г помета + 200 г воды, влажный помет получен в учебно-производственном птичнике РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева).

Проба свиного фарша содержала 50% жира, проба куриного фарша была практически без жира. Таким образом, учитывались продукты разложения не только белковых фракций отходов, но и жировых.

Всего подготовлено восемь проб: четыре - контрольные пробы (без добавления культур микроорганизмов), и четыре пробы с добавлением 20 мл экспериментального биопрепарата «Ликвидатор-2».

Для отбора проб воздуха, содержащего ЛОС, предложен авторский метод пробоотбора (рисунок 1). Для проведения сбраживания субстрата пробы помещали в пластиковые банки, емкостью 1 л, субстрат не перемешивали. Для концентрирования выделяющихся газообразных веществ и создания условий, приближенных к реальным (на поверхности протекают аэробные процессы, в объеме – преимущественно анаэробные), емкости накрывали ПЭТ контейнерами объемом 5 л, с отрезанным дном и с отверстием для поступления воздуха. Для сорбирования выделяющихся при разложении ЛОС, использовали пористый сорбент - полимер Тенах (производство США). В случае проб № 1 и 2, сорбент помещали в пакет из мембранного материала, чтобы не допустить попадания влаги в сорбент.

В случае проб № 3 и 4 сорбент помещали в пакет, изготовленный из пористого укрывного материала «Спанбонд» (плотность 25 г/кв. м) размером 5х5 см. Масса навески сорбента в каждой пробе составляла примерно 1 мг.

Затем приготовленные пакеты с сорбентом размещали на лабораторных штативах на расстоянии 16 см над поверхностью разлагающегося субстрата. Сорбцию каждой пары проб проводили в течение 21 дня (с 10 декабря 2022 года по 31 декабря 2022 года).

После окончания подготовки проб, сорбент извлекали и исследовали методом термодесорбции с последующим разделением паров с помощью двумерной газовой хроматографии с криомодуляцией и масс-спектрометрическим детектированием. Модуль термодесорбера был установлен на место штатного инжектора газового хроматографа.

Исследование проб воздуха проводилось в лаборатории Института нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН (г. Москва).

Разделение десорбированной смеси анализов проводили методом двумерной газовой хроматографии с времяпролетной масс-спектрометрией и пламенно-ионизационной детекцией (GC×GC–TOFMS–FID). Прибор включает газовый хроматограф Agilent 7890A со встроенной второй печью, разделителем потоков, пламенно-ионизационным детектором, двухступенчатый криомодулятор и времяпролетный массанализатор Leco Pegasus BT [19].

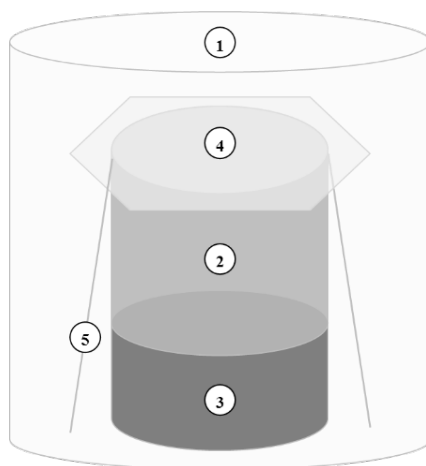


Рис. 1. Упрощенная схема лабораторной установки для проведения эксперимента: 1 – ПЭТ контейнер 3 л, 2 – пластиковая емкость 1 л, 3 – проба субстрата, 4 – пакет с сорбентом Tenax, 5 – штатив.

Fig. 1. Simplified diagram of the laboratory setup for conducting the experiment: 1 – 3L PET container, 2 – 1L plastic container, 3 – substrate sample, 4 – packet with Tenax sorbent, 5 – stand.

Режим работы термодесорбции: начальная температура - 50°C, изотерма 3 мин., далее нагрев со скоростью 600°C/мин. до 280°C, затем изотерма 5 мин. Температура линии подачи газа-носителя-280 °C, газ-носитель – гелий.

Режим работы хроматографа: газ-носитель гелий, скорость потока через колонку 1 мл/мин, сплит 500, обдув инжектора (септы) 3 мл/мин, режим работы- скорректированное давление для поддержания постоянного потока, температура инжектора 300°C; колонка 1 – полярная, фаза Rxi-17Sil (30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм), колонка 2 – неполярная, фаза Rxi-5Sil (1,7 м × 0,10 мм × 0,10 мкм); температурный режим 1-й печи: начальная температура 40 °C (2 мин), далее нагрев со скоростью 3°C/мин до 320°C, далее выдержка 5 минут; температура 2-й печи и модулятора поддерживается на 6 и 21 °C выше, чем температура 1-й печи, соответственно; время модуляции на модуляторе – 6 сек.

Режим работы масс-детектора: температура источника ионов - 280°C; частота - 100 Гц; диапазон обнаруживаемой массы - 35-520; скорость записи - 100 спектров в секунду; энергия электронов – 70 эВ. Длина линии до детектора составляет 3,0 м × 0,18 мм, температура – 280°C [16].

Для обработки полученных результатов анализа использовалась программа CromaTOF (Leco). Выделение масс-спектров компонентов проводилось с отсечением по соотношению сигнал/шум 500 и вычитанием двух усредненных масс-спектров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Всего в отобранных пробах газовых выбросов обнаружено одиннадцать классов ЛОС: алканы, серосодержащие соединения, азотсодержащие соединения, ароматические углеводороды, алкены, гетероциклические соединения, спирты, простые эфиры, сложные эфиры, терпены и кетоны. Среди них присутствуют сильно пахнущие вещества, содержащие атомы серы, такие как сероуглерод, метантиол, диметилсульфид и азота – индол. В результате проведенного анализа полученного массива данных были выбраны приоритетные ЛОС, присутствующие во всех пробах и имеющие содержание, достаточное для отслеживания динамики их изменения. Алканы исключены из анализа в силу слабого запаха или отсутствия в пробах. Массовые доли ЛОС в суммарном ионном токе (м. д.), образующиеся при разложении отдельных фракций биоорганических отходов, полученные в результате эксперимента представлены в таблице 1.

Проба № 1 (фарш свиной, жирный)

В анализируемых пробах были выделены пять классов ЛОС: серосодержащие соединения, азотсодержащие соединения, ароматические углеводороды, алкены, гетероциклические соединения. Результаты эксперимента представлены на рисунке 2.

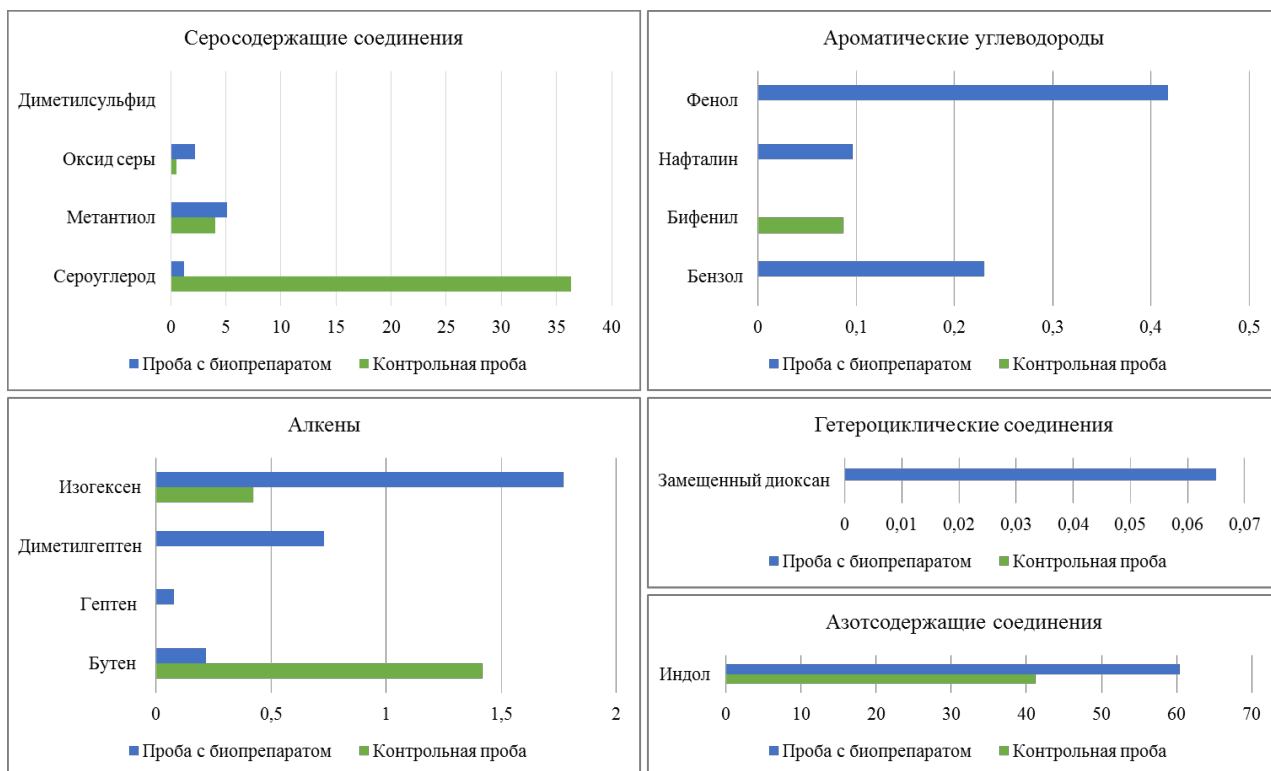


Рис. 2. Массовые доли контрольных веществ в пробе № 1, %

Fig. 2. Mass fractions of control substances in Sample № 1, %

В пробе № 1 (фарш свиной, жирный) действие биопрепарата выражается в том, что сера, практически не восстанавливается. Препарат выступает в качестве ингибитора процессов образования соединений с отрицательно

заряженной серой, а количество образующихся соединений с окисленной серой увеличивается. Общее количество серосодержащих соединений сокращается почти на 80%. Также препарат способствует процессу образования ароматических углеводородов, в том числе сильно пахнущего азотсодержащего индола, увеличивая суммарную м. д. веществ более чем на 30%. При добавлении биопрепарата обнаружен диоксан, который является продуктом окисления, ускоряется процесс образования алкенов.

Анализируя изменения в результате процесса разложения органического вещества при добавлении биопрепарата, можно сделать вывод, что препарат способствует более интенсивному окислению продуктов распада аминокислот и формированию углеводородов с более длинной углеродной цепью.

Соответственно, биопрепарат эффективен в части нейтрализации запаха из-за сильного снижения серосодержащих соединений.

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ И СОСТАВА ВЫБРОСОВ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 1. Массовые доли ЛОС до и после добавления биопрепарата «Ликвидатор-2»

Table 1. Mass fractions of VOCs before and after adding the biological product “Liquidator-2”

ЛОС	Пробы							
	№ 1 Куриный помет		№ 2 Фарш рыбный		№ 3 Фарш куриный		№ 4 Фарш свиной	
	К	БП	К	БП	К	БП	К	БП
Серосодержащие соединения								
Сероуглерод	36,348	1,183	1,507	2,305	0,72	0,081	0,127	2,896
Метантиол	4,034	5,116	6,204	4,059	2,675	0,625		
Оксид серы	0,494	2,196	0,191	2,075	1,842	0,126	0	4,482
Диметилсульфид	0,091	0,091						
Оксид-сульфид углерода			0,196	0				
Диметилтрисульфид			0,418	0,455	10,179	0,218		
Диметилдисульфид					3,166	0,564	0,043	0,087
Тиран					0,029	0		
Тиофен					0	0,015		
Всего	40,967	8,586	8,516	8,894	18,611	1,629	0,17	7,465
Азотсодержащие соединения								
Индол	41,186	60,452	59,1	69,16	43,571	25,201	0,597	0,593
Триметиламин							1,646	0,73
Всего	41,186	60,452	59,1	69,16	43,571	25,201	2,243	1,323
Ароматические углеводороды								
Бензол	0	0,23			2,676	12,919	24,105	18,934
Бифенил	0,087	0	0,08	0,184	0,054	0,141	0,23	0,221
Нафталин	0	0,096	0	0,107	0,107	0,248	0,817	2,141
Фенол	0	0,417			16,925	0,936		
Метилфенол			0,702	0				
Толуол					0,374	18,184	16,362	3,414
Этилбензол					0	0,234	0,114	0,222
Ксилол					0,054	1,086	0,51	0,992

ХАРЛАМОВА и др.

Стирол					0,101	0,802	0,084	0
Кумол					0	0,02	0,089	0,47
Фенэтиловый спирт					0,053	0	0	4,18
Фталевый ангидрид							0,06	0
Этилметилбензол							0	0,137
Триметилбензол							0	0,12
Всего	0,087	0,743	0,782	0,291	20,344	34,57	42,371	30,831
Алкены								
Бутен	1,418	0,217			0,05	0,301	4,044	1,174
Гептен	0	0,079						
Диметилгептен	0	0,731						
Изогексен	0,423	1,771	0	0,297				
Бутен-1			2,206	0				
Бутен-2			1,112	0				
Пентадиен			0,386	0				
Изогептен			0	0,718				
Изононен			0,244	0,474			0	0,51
Изобутен					0,164	0		
Пентен					0,03	0,013	0,118	0
Ундецен					1,096	0,33		
Изопрен							0,77	0
Метилциклопентен							0,123	0
Изооктен							0,47	0
Всего	1,841	2,798	3,948	1,489	1,34	0,644	5,525	1,684
Гетероциклические соединения								
Замещенный диоксан 1	0	0,065	2,436	0	0,119	0,463		
Замещенный диоксан 2			3,177	0				
Фуран					0	0,359		
Тетрагидрофуран					3,32	10,841	10,564	21,389

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ И СОСТАВА ВЫБРОСОВ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Дигидрофуран					0	0,063	0,13	0
Метилфуран							0,08	0
Метилентетрагидропиран							0,113	0
Метилдигидропиран							0,114	0
Диметилдиоксан							0,193	0
Производное диоксана 1							3,345	0,789
Производное диоксана 2							2,739	0,479
Индан							0	0,126
Всего	0	0,065	5,613	0	3,439	11,726	17,278	22,783
Спирты								
Этанол					0,548	0	0,271	0,404
Изопропанол					0,463	0,064	3,062	2,247
2-бутанол							0	1,2
Всего					1,011	0,064	3,333	3,851
Кетоны								
3-пентанон					0	1,042	0	0,263
2-ундеканон					0	1,443		
Всего					0	2,485	0	0,263
Простые эфиры								
Диэтиловый эфир					0	0,116	0,635	0
Сложные эфиры								
Этилацетат							0,131	0
Терпены								
Лимонен							0,435	1,517

Примечание. К – контроль, БП – проба с добавлением экспериментального биопрепарата «Ликвидатор-2»

Проба № 2 (фарш куриный, нежирный)

В анализируемых пробах были обнаружены пять классов ЛОС: серосодержащие соединения, азотсодержащие соединения, ароматические углеводороды, алкены и гетероциклические соединения. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.

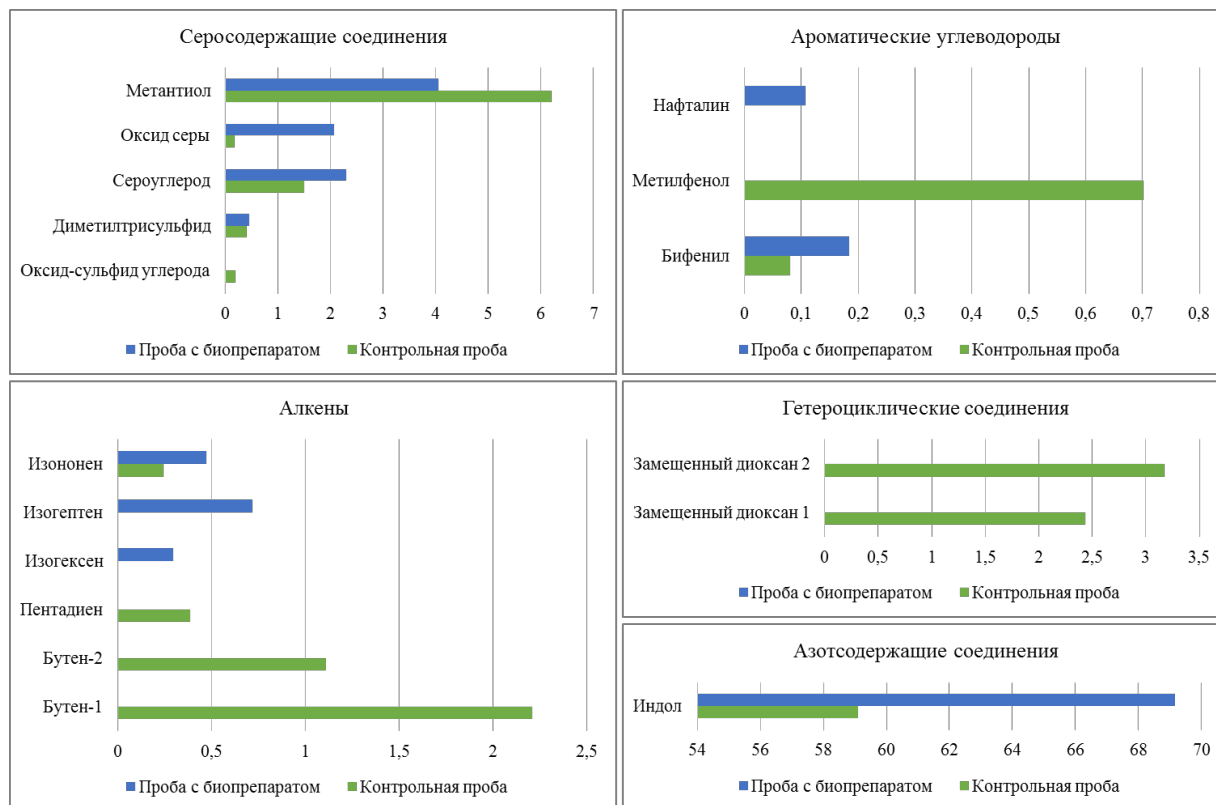


Рис. 3. Массовые доли контрольных веществ в пробе № 2, %

Fig.3. Mass fractions of control substances in Sample № 2, %

В пробе № 2 (фарш куриный, нежирный) действие биопрепарата на процесс разложения органических соединений выражается в незначительном изменении м.д. серосодержащих соединений: снижается м.д. метантиола, однако увеличиваются м.д. оксида серы, сероуглерода и демитилтрисульфида, полностью прекращается образование оксид-сульфида серы. Биопрепарат незначительно воздействует на образование ароматических углеводородов, а также полностью нейтрализует гетероциклические соединения, за исключением индола, который обладает слабой основностью, и в тоже время амфотерными свойствами. М.д. сильно пахнущего индола значительно увеличилась - более чем на 40%. Аналогично пробе № 1, алкены образуются в сопоставимом количестве с контрольной пробой, однако с более длинным углеродным скелетом. Можно сделать вывод, что биопрепарат положительно влияет на активность окислительных процессов, однако, в отличие от пробы № 1 не препятствует протеканию реакций с серосодержащими соединениями.

Проба № 3 (фарш рыбный из мойвы)

В анализируемых пробах обнаружены восемь классов ЛОС: серосодержащие соединения, азотсодержащие соединения, ароматические

углеводороды, алкены, гетероциклические соединения, спирты, кетоны, простые эфиры. Результаты анализа пробы представлены на рисунке 4.

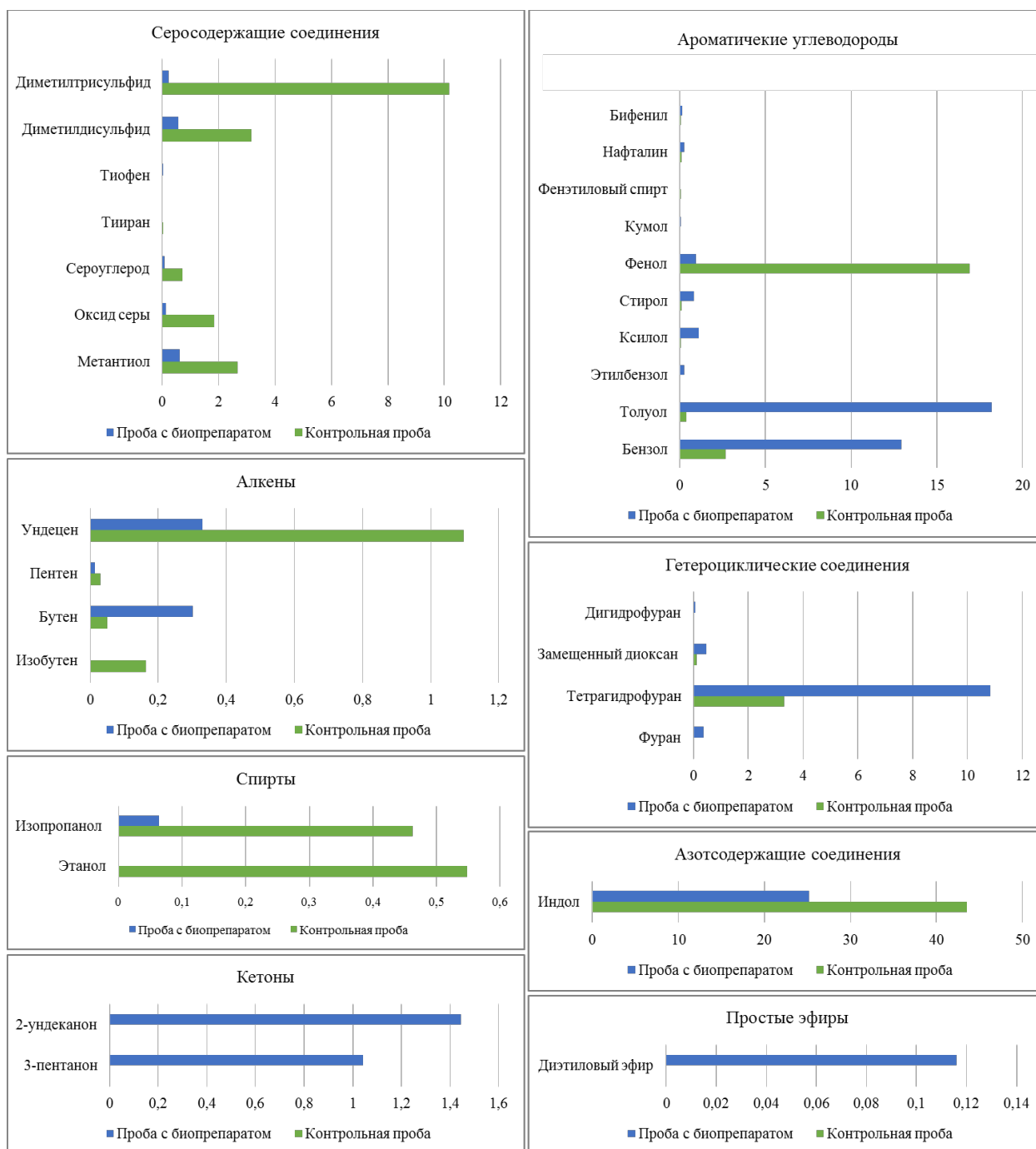


Рис. 4. Массовые доли контрольных веществ в пробе № 3, %

Fig. 4. Mass fractions of control substances in Sample № 3, %

В пробе № 3 (фарш рыбный из мойвы) более четко прослеживается действие биопрепарата. Серосодержащие ЛОС в целом образуются намного медленнее: м.д. веществ в сумме сокращаются более чем на 90%. Общее содержание ароматических углеводородов увеличивается, однако вместо фенола образуются арены – бензол, толуол, ксилол и стирол. Добавление биопрепарата способствует образованию кислородсодержащих углеводов

(кетонов и простых эфиров), но препятствует образованию спиртов. В пробе с препаратом алкены в абсолютном значении образуются медленнее и с меньшим углеродным скелетом, сокращается выделение азотсодержащего индола более чем на 40%, однако увеличивается содержание гетероциклических соединений. Отчетливо видно, что в реакциях с образованием серосодержащих соединений биопрепарат выступает в качестве ингибитора, способствуя образованию простых эфиров и кетонов, ароматические углеводороды образуются без гидроксильной группы.

Проба № 4 (куриный помет)

В анализируемых пробах обнаружены десять классов ЛОС: серосодержащие соединения, азотсодержащие соединения, ароматические углеводороды, гетероциклические соединения, алкены, спирты, кетоны, простые и сложные эфиры, терпены. Результаты эксперимента представлены на рисунке 5.

В эксперименте с пробой № 4 (куриный помет) биопрепарат способствует выделению серосодержащих соединений (в контрольной пробе их содержание незначительно). Также при добавлении биопрепарата в реакциях со спиртами наблюдается выделение веществ с более длинным углеродным скелетом. Полностью останавливается выделение простых и сложных эфиров, происходит образование кетона и увеличение выделяемых спиртов. На азотсодержащие соединения препарат действует незначительно. Полученные данные свидетельствуют о положительном действии биопрепарата на окислительные реакции и повышении кислотности в целом.

Соединения, содержащие серу и азот, образуются преимущественно из аминокислот, то есть имеют белковое происхождение. При разложении серосодержащих аминокислот выделяются соединения серы, такие как диметилсульфид, сероуглерод. На ранних стадиях компостирования из биоразлагаемой органической серы быстро образуются летучие сульфиды, что приводит к значительному увеличению выбросов диметилдисульфида и сероуглерода. Однако по мере компостирования содержание биоразлагаемой органической серы уменьшается, а поступление кислорода увеличивается, что сокращает выбросы сероуглерода и диметилдисульфида. Куриный помет, как распространенный материал для компостирования, богат белками, содержащими группы SH, которые под действием ферментов вырабатывают серосодержащие аминокислоты, такие как цистин, цистеин и метионин. Затем эти аминокислоты подвергаются десульфуризации в анаэробных условиях, что приводит к образованию H_2S , который может быть окислен до сульфата путем сульфидирования в аэробных условиях. Однако, когда при компостировании отсутствует достаточное поступление кислорода, медленное сульфидирование приводит к накоплению H_2S и образованию метилсульфида и диметилсульфида в качестве промежуточных продуктов реакции обессеривания. Обеспечение адекватной подачи кислорода имеет решающее значение для контроля образования и выбросов серосодержащих ЛОС.

Из класса азотсодержащих соединений нами выявлен преимущественно индол, который образуется при разложении аминокислоты триптофана.

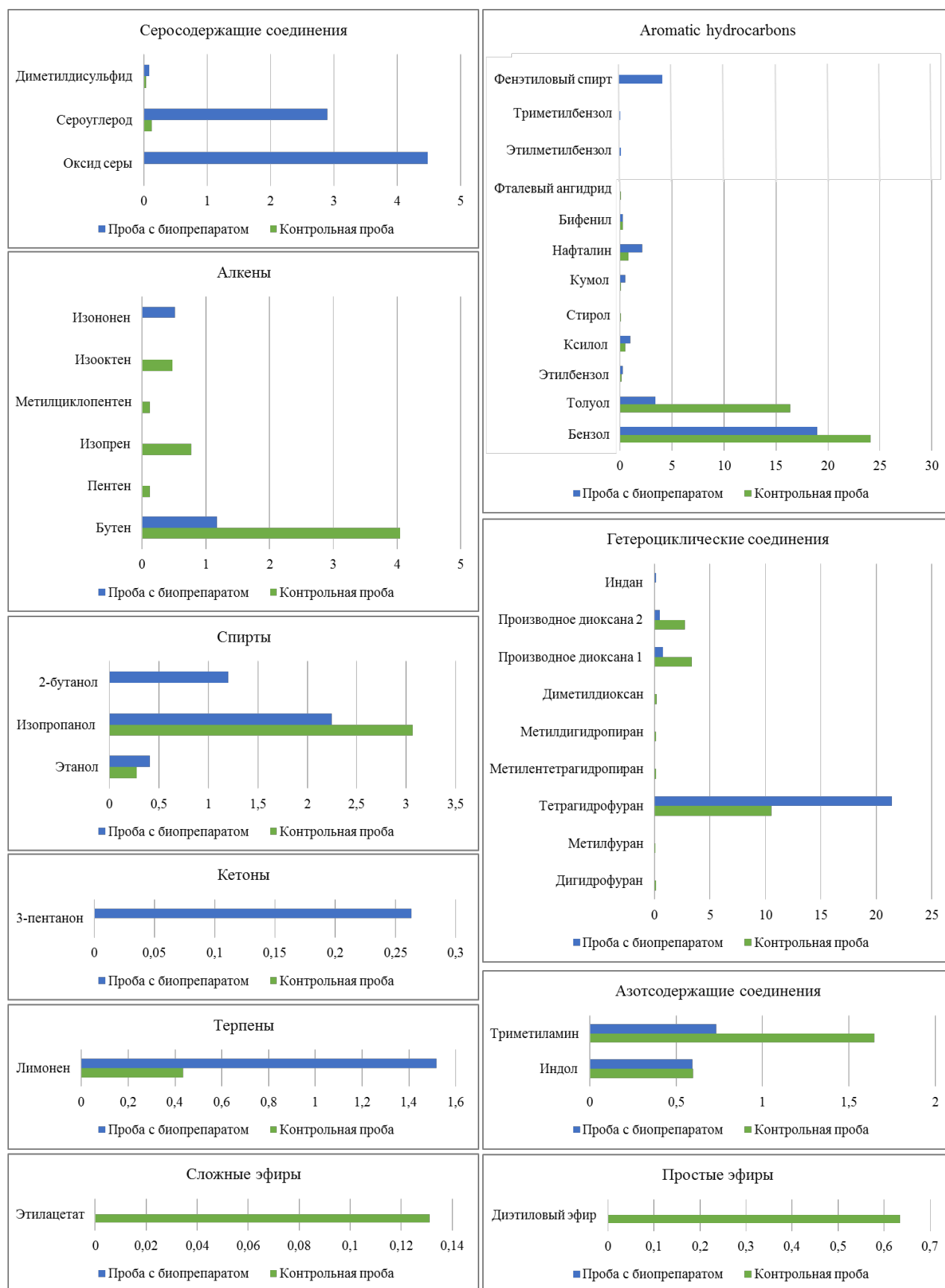


Рис. 5. Массовые доли контрольных веществ в пробе № 4, %

Fig. 5. Mass fractions of control substances in Sample No. 4, %

Разложению непосредственно индола в аэробных и анаэробных условиях посвящены многие исследования, например [20]. Микроорганизмы полностью минерализуют индол, либо трансформируют его в другие соединения в присутствии дополнительного источника углерода.

Расчетные данные по чувствительности ЛОС к биопрепарату «Ликвидатор-2» представлены в таблице 2. Положительные значения указывают на рост, отрицательные – на снижение м.д. ЛОС в пробе с биопрепаратом по отношению к м. д. вещества в контрольной пробе.

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ И СОСТАВА ВЫБРОСОВ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 2. Чувствительность ЛОС, образующихся при разложении отдельных фракций биоорганических отходов, к биопрепарату «Ликвидатор-2»

Table 2. Susceptibility of VOCs formed during the decomposition of individual fractions of bioorganic waste to the biological product “Liquidator-2”

ЛОС		Свиной фарш, %	Куриный фарш, %	Рыба морская мойва, %	Куриный помет, %
Проба					
Серосодержащие соединения	Сероуглерод	-96,75	52,95	-88,75	2180,32
	Метантиол	26,82	-34,57	-76,64	
	Оксид серы	344,53	986,39	-93,16	x
	Диметилсульфид	0			
	Оксид-сульфид углерода		-100		
	Диметилтрисульфид		8,85	-97,86	
	Диметилдисульфид			-82,19	102,33
	Тиран			-100	
	Тиофен			x	
Азотсодержащие соединения	Индол	46,78	17,02	-42,16	-0,67
	Триметиламин				-55,65
	Бензол			382,77	-21,45
	Бифенил	-100	130	161,11	-3,91
	Нафталин			131,78	162,06
	Фенол	x		-94,47	
	Метилфенол		-100		
	Толуол			4762,03	-79,13
	Этилбензол				94,74
	Ксилол			1911,11	94,51
	Стирол			694,06	-100
	Кумол				428,09
	Фенэтиловый спирт			-100	
	Фталевый ангидрид				-100
	Этилметилбензол				x
	Триметилбензол				x

Продолжение таблицы 2.

Гетероциклические соединения	Замещенный диоксан 1		-100	289,08	
	Замещенный диоксан 2		-100		
	Фуран			x	
	Тетрагидрофуран			226,54	102,47
	Дигидрофуран				-100
	Метилфуран				-100
	Метилентетрагидропиран				-100
	Метилдигидропиран				-100
	Диметилдиоксан				-100
	Производное диоксана 1				-76,41
	Производное диоксана 2				-82,51
	Индан				x
Спирты	Этанол			-100	49,08
	Изопропанол			-86,18	-26,62
	2-бутанол				x
Кетоны	3-пентанон			x	x
	2-ундеканон			x	
Простые эфиры	Диэтиловый эфир				-100
Сложные эфиры	Этилацетат			x	-100
Терпены	Лимонен				248,74

● – слабая степень подверженности,

● – средняя степень подверженности,

● – сильная степень подверженности,

X – вещество обнаружено только в пробе с биопрепаратом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные нами исследования показали, что:

– в составе выбросов, образующихся при разложении белковых фракций отходов и птичьего помета, присутствуют различные группы ЛОС, часть которых обладает сильно выраженным неприятным запахом. Наиболее сильный запах имеют: индол, метантиол, диметилсульфид;

– использование экспериментального биопрепарата «Ликвидатор-2» продемонстрировало положительную динамику воздействия на состав исследуемых ЛОС. По степени подверженности воздействию биопрепарата ЛОС могут быть разделены на три группы: с изменением м.д. менее 10% – слабо подверженные, до 100% – средне подверженные, до 1000% – сильно подверженные;

– большая часть веществ средне подверженные действию препарата. При этом наибольшая чувствительность к биопрепарату наблюдается среди ЛОС, образующихся при разложении рыбных фракций биоорганических отходов. В пробе с рыбной фракцией отмечено также наибольшее снижение м.д. серосодержащих соединений и индола.

Таким образом, биопрепарат «Ликвидатор-2» особенно эффективен в отношении рыбных фракций отходов и может быть использован как готовый препарат для снижения запаха при хранении рыбных отходов рыбоводческих хозяйств и рыбоперерабатывающих предприятий.

Для других компонентов биоорганических отходов и птичьего помета принцип работы биопрепарата следует модифицировать. Необходимы дальнейшие исследования в направлении подбора, выделения микроорганизмов и оценки их биотехнологического потенциала, а также уточнение механизмов биodeградации доминирующих веществ, входящих в состав отходов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Бракович И.С. (2020). *Инженерная экология: учебное пособие*. Минск: Вышэйшая школа.
2. Jayathilakan K., Sultana K., Radhakrishna K., Bawa A.S. (2012). Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review. *J Food Sci Technol*, 49(3), 278–293. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0290-7>.
3. Kharlamova M., Adamovich M., Romanovskaya K., Spirin M., Mustaeva L., Adamovich N. (2023). Decomposition of individual components of bio-organic waste: volatile organic compounds and the impact on health and psycho-emotional state. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 31(3). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/decomposition-of-individual-components-of-bio-organic-waste-volatile-organic-compounds-and-the-impact-on-health-and-psycho>.
4. Smith C.J., Scott S.M., Ryan B.A. (1999). Cardiovascular effects of odors. *Toxicol Ind Health*, 15(7), 595–601. <https://doi.org/10.1177/074823379901500701>.

5. Кнунянц И.Л. (1998). *Большой энциклопедический словарь. Химия*. Большая Российская энциклопедия.
6. Almeida J., Perassolo M., Camargo J., Bragagnolo N., Gross J. (2006). Fatty acid composition and cholesterol content of beef and chicken meat in Southern Brazil. *Revista Brasileira De Ciencias Farmaceuticas*, 42(1). <https://doi.org/10.1590/S1516-93322006000100012>.
7. Cai Z., Xiao-Feng Z., Jiang X., Yu-Chang Y., Chun-Jiang Z., Ning-Ying X., Chang-Xin W. (2010). Comparison of muscle amino acid and fatty acid composition of castrated and uncastrated male pigs at different slaughter ages. *Italian Journal of Animal Science*, 9(2) <https://doi.org/10.4081/ijas.2010.e33>.
8. Paura, L., Degola, L., Jonkus, D., Gramatina, I. (2019). Analysis of Chemical Composition in Pork Longissimus Muscle of Latvian Breed Pigs. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 67(5), 1189–1194. <https://doi.org/10.11118/actaun201967051189>.
9. Акулин В.Н., Касьянов С.П., Рыбин В.Г., Караулов А.Е., Юрьева М.И. (2005). Исследования липидов гидробионтов. *Известия ТИПРО*. <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-lipidov-gidrobiontov>.
10. Naščík P., Pavelková A., Tkáčová J. et al. (2020). The amino acid profile of broiler chicken meat after dietary administration of bee products and probiotics. *Biologia*, 75, 1899–1908. <https://doi.org/10.2478/s11756-020-00451-9>.
11. Ernst T. (2012). *Fragrance Chemistry: The Science of the Sense of Smell*. Publisher: Elsevier.
12. Medić A.B., Karadžić I.M. (2022). Pseudomonas in environmental bioremediation of hydrocarbons and phenolic compounds- key catabolic degradation enzymes and new analytical platforms for comprehensive investigation. *World J Microbiol Biotechnol*, 38(10), 165. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03349-732>.
13. Qu, Y., Shen, E., Ma, Q., Zhang, Z., Liu, Z., Shen, W., Wang, J., Li, D., Li, H., & Zhou, J. (2015). Biodegradation of indole by a newly isolated *Cupriavidus* sp. SHE. *Journal of environmental sciences (China)*, 34, 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.01.023>.
14. Гусев М.В. (2009). Микробиология: Учебник для вузов. М.: Академия.
15. Кузнецов А.Е. (2010). Прикладная экобиотехнология: учебное пособие: в 2 т. Т.1. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний.
16. Харламова М., Жияев Д., Мазина С., Луканин А., Вышелесский А., Адамович М., Борисова А., Сорокин И. (2022). Анализ выбросов летучих органических соединений и устранение неприятных запахов при хранении и накоплении биоорганических отходов рыбоводческих форелевых хозяйств в Карелии. *Экология и промышленность России*, 26(12), 38-45. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-12-38-45>.
17. Hartikainen T., Ruuskanen J., Martikainen P. J. (2001). Carbon disulfide and hydrogen sulfide removal with a peat biofilter. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(3), 387–392. <https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464275>.
18. Haze S., Sakai K., Gozu Y. (2002). Effects of fragrance inhalation on sympathetic activity in normal adults. *Jpn J Pharmacol*, 90(3), 247–53. <https://doi.org/10.1254/jjp.90.247>.
19. Другов Ю.С., Родин А.А. (2006). *Газохроматографический анализ загрязненного воздуха: практическое руководство*. М.: Бином, Лаборатория знаний.
20. Pankaj K.A., Ashutosh S., Hanhong B. (2015). Microbial Degradation of Indole and Its Derivatives. *Journal of Chemistry*, 13. <https://doi.org/10.1155/2015/129159>.

References:

1. Brakovich I.S. (2020). *Engineering ecology: textbook*. Minsk: Higher School. (in Russ).
2. Jayathilakan K., Sultana K., Radhakrishna K., Bawa A.S. (2012). Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review. *J Food Sci Technol*, 49(3), 278–293. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0290-7>.

3. Kharlamova M., Adamovich M., Romanovskaya K., Spirin M., Mustaeva L., Adamovich N. (2023). Decomposition of individual components of bio-organic waste: volatile organic compounds and the impact on health and psycho-emotional state. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 31(3). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/decomposition-of-individual-components-of-bio-organic-waste-volatile-organic-compounds-and-the-impact-on-health-and-psycho>.
4. Smith C.J., Scott S.M., Ryan B.A. (1999). Cardiovascular effects of odors. *Toxicol Ind Health*, 15(7), 595–601. <https://doi.org/10.1177/074823379901500701>.
5. Knunyants I.L. (1998). *Large encyclopedic dictionary. Chemistry*. Great Russian Encyclopedia (in Russ).
6. Almeida J., Perassolo M., Camargo J., Bragagnolo N., Gross J. (2006). Fatty acid composition and cholesterol content of beef and chicken meat in Southern Brazil. *Revista Brasileira De Ciencias Farmaceuticas*. 42(1). <https://doi.org/10.1590/S1516-93322006000100012>.
7. Cai Z., Xiao-Feng Z., Jiang X., Yu-Chang Y., Chun-Jiang Z., Ning-Ying X., Chang-Xin W. (2010). Comparison of muscle amino acid and fatty acid composition of castrated and uncastrated male pigs at different slaughter ages. *Italian Journal of Animal Science*. 9(2) <https://doi.org/10.4081/ijas.2010.e33>.
8. Paura, L., Degola, L., Jonkus, D., Gramatina, I. (2019). Analysis of Chemical Composition in Pork Longissimus Muscle of Latvian Breed Pigs. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 67(5), 1189–1194. <https://doi.org/10.11118/actaun201967051189>.
9. Akulin V.N., Kasyanov S.P., Rybin V.G., Karaulov A.E., Yuryeva M.I. (2005). Research on lipids of hydrobionts. *Izvestia TINRO*. <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-lipidov-gidrobiontov>.
10. Haščík P., Pavelková A., Tkáčová J. et al. (2020). The amino acid profile of broiler chicken meat after dietary administration of bee products and probiotics. *Biologia*, 75, 1899–1908. <https://doi.org/10.2478/s11756-020-00451-9>.
11. Ernst T. (2012). *Fragrance Chemistry: The Science of the Sense of Smell*. Publisher: Elsevier.
12. Medić A.B., Karadžić I.M. (2022). Pseudomonas in environmental bioremediation of hydrocarbons and phenolic compounds- key catabolic degradation enzymes and new analytical platforms for comprehensive investigation. *World J Microbiol Biotechnol*, 38(10), 165. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03349-732>.
13. Qu Y., Shen E., Ma Q., Zhang Z., Liu Z., Shen W., Wang J., Li D., Li H., Zhou J. (2015). Biodegradation of indole by a newly isolated *Cupriavidus* sp. SHE. *Journal of environmental sciences (China)*, 34, 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.01.023>.
14. Gusev M.V. (2003). *Microbiology: Textbook for students of biological specialties of universities*. M: Academy Publisher.
15. Kuznetsov A.E. (2010). *Applied ecobiotechnology: textbook: in 2 vol. V.1*. M.: BINOM. Knowledge Laboratory.
16. Kharlamova M., Zhilyaev D., Mazina S., Lukanin A., Vyshelsssky A., Adamovich M., Borisova A., Sorokin I. (2022). Analysis of emissions of volatile organic compounds and elimination of unpleasant odors during storage and accumulation of bioorganic waste from trout fish farms in Karelia. *Ecology and industry of Russia*, 26(12), 38–45. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-12-38-45>.

17. Hartikainen T., Ruuskanen J., Martikainen P. J. (2001). Carbon disulfide and hydrogen sulfide removal with a peat biofilter. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(3), 387–392. <https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464275>.
18. Haze S., Sakai K., Gozu Y. (2002). Effects of fragrance inhalation on sympathetic activity in normal adults. *Jpn J Pharmacol*, 90(3), 247–53. <https://doi.org/10.1254/jjp.90.247>.
19. Drugov Yu.S., Rodin A.A. (2006). *Gas chromatographic analysis of polluted air: practical guide*. M.: Binom, Knowledge Laboratory.
20. Pankaj K.A., Ashutosh S., Hanhong B. (2015). Microbial Degradation of Indole and Its Derivatives. *Journal of Chemistry*, 13. <https://doi.org/10.1155/2015/129159>.