



Научная статья

МИКРОБНЫЕ И ХИМИЧЕСКИЕ РИСКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ЖИВОТНОВОДСТВА

**М.В. Кузнецова^{1,2}, Д.О. Егорова¹, Д.А. Кочергина¹, Т.Д. Кирьянова¹,
И.Н. Жданова³, Д.С. Фомин³, Э.С. Горовиц²**

¹Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук (ИЭГМ УрО РАН) – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (ПФИЦ УрО РАН), Российской Федерации, 614081, г. Пермь, ул. Голева, 13

²Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 26

³Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (ПФИЦ УрО РАН), Российской Федерации, Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12

Агропромышленные комплексы являются значимым источником загрязнения окружающей среды. Органические удобрения на основе побочных продуктов животноводства могут содержать патогенные микроорганизмы, остаточные концентрации антибиотиков, вакцин, тяжелых металлов, пестицидов и, попадая в почву, обуславливать их микробное и химическое загрязнение.

Осуществлена оценка рисков здоровью населения на базе анализа микробного и химического загрязнения побочных продуктов животноводства разных сроков и условий хранения.

*Объектом исследования служили пробы органических отходов, различающихся по срокам и условиям хранения (некомпостированные и компостированные), отобранные в трех крупных промышленных животноводческих комплексах Прикамья. Из отходов выделены и изучены штаммы *Escherichia coli*, у которых детектированы гены патогенности диареегенерных эшерихий. В побочных продуктах животноводства определено содержание токсичных веществ (свинец, кадмий, медь, марганец, магний, цинк, кобальт, железо), пестицидов (гамма-изомер гексахлорциклогексана – ГХЦГ, дихлордифенилтрихлорэтан – ДДТ) и полихлорированных бифенилов (ПХБ). Оценены риски здоровью населения.*

*Показано, что в отходах в течение одного месяца могут сохраняться бактерии рода *Salmonella*, а также представители условно-патогенных энтеробактерий. Концентрации тяжелых металлов в некоторых образцах оказались несколько выше ПДК для почв. Санитарные показатели удобрений (побочных продуктов со сроком один год) не превышали нормативы, в образцах отсутствовали диареегенные *E. coli*, хлорорганические пестициды и полихлорированные бифенилы. Показатели, характеризующие риск распространенности микробной антибиотикоустойчивости и опасности тяжелых металлов, были в пределах допустимого. Риски, формируемые тяжелыми металлами, находились в допустимом диапазоне. Побочные продукты животноводства со сроком хранения один год являются безопасными в микробном и химическом отношении и могут быть использованы в дальнейшем в качестве удобрения.*

Ключевые слова: побочные продукты животноводства, загрязнение окружающей среды, риски здоровью населения, микробная обсемененность, *Escherichia coli*, тяжелые металлы, пестициды, полихлорированные бифенилы.

© Кузнецова М.В., Егорова Д.О., Кочергина Д.А., Кирьянова Т.Д., Жданова И.Н., Фомин Д.С., Горовиц Э.С., 2025

Кузнецова Марина Валентиновна – доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярной биотехнологии; профессор кафедры микробиологии и вирусологии (e-mail: mar@iegm.ru; тел.: 8 (342) 212-44-76; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2448-4823>).

Егорова Дарья Олеговна – доктор биологических наук, доцент, заместитель директора по научным вопросам (e-mail: daryao@rambler.ru; тел.: 8 (342) 280-77-00; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8018-4687>).

Кочергина Дарья Андреевна – лаборант лаборатории молекулярной биотехнологии (e-mail: kocdas@yandex.ru; тел.: 8 (342) 212-44-76; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8630-3197>).

Кирьянова Татьяна Денисовна – лаборант лаборатории молекулярной иммунологии (e-mail: kitadi2101@gmail.com; тел.: 8 (342) 280-75-60; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3161-6444>).

Жданова Ирина Николаевна – старший научный сотрудник лаборатории биологически активных кормов (e-mail: saratov_perm@mail.ru; тел.: 8 (904) 848-16-44; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0260-6917>).

Фомин Денис Станиславович – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией прецизионных технологий в сельском хозяйстве (e-mail: akvilonag@mail.ru; тел.: 8 (342) 297-62-40; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8261-7191>).

Горовиц Эдуард Семенович – заведующий кафедрой микробиологии и вирусологии (e-mail: eduard.gorovitz@mail.ru; тел.: 8 (342) 236-44-85; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4320-8672>).

Побочные продукты агропромышленных животноводческих комплексов давно и широко применяются в качестве органических удобрений. В них в большом количестве концентрируются органические и минеральные вещества, которые, попадая в почву, увеличивают биомассу почвенной микробиоты и усиливают ее ферментативную активность [1, 2]. Объемы производства органических удобрений на ограниченных территориях, использование некомпостированных или «неправильно компостированных» удобрений обуславливают высокие риски микробного и химического загрязнения окружающей среды и, как следствие, риски здоровью населения, так как они могут содержать токсичные вещества, тяжелые металлы, биоциды, в том числе антибиотики, а также патогенные и условно-патогенные микроорганизмы [3].

Во всех странах существуют законодательные акты, регулирующие подготовку побочных продуктов животноводства к применению в качестве удобрения. Действующее законодательство РФ побочные продукты животноводства рассматривает как отходы и регламентирует обязательный контроль в отношении их микробного и химического загрязнения Федеральным законом от 14.07.2022 № 248-ФЗ «О побочных продуктах животноводства»¹. В законодательных документах прописаны требования к хранению отходов, установлены нормативы содержания токсичных элементов, пестицидов и патогенных микроорганизмов. В обработанных и / или переработанных побочных продуктах животноводства нормируется содержание тяжелых металлов (свинец, кадмий, ртуть, мышьяк), пестицидов (гамма-изомер гексахлорциклогексана – ГХЦГ и дихлордифенилтрихлорэтан – ДДТ), а также возбудителей инфекционных и паразитарных заболеваний. Эти показатели нормируются также в почве, в воде и в пищевой продукции, так как химические вещества / микроорганизмы могут переходить по пищевой цепи. В связи с этим обозначенную проблему следует рассматривать не только как экологическую или ветеринарную, но и медицинскую. Сегодня политика государства направлена на снижение до приемлемого уровня риска негативного воздействия опасных химических и биологических факторов, минимизацию рисков и интегрирование анализа риска здоровью в решении стратегических задач государственного социально-экономического развития [4].

В настоящее время большое внимание уделяется изучению вопросов распространения устойчивых к антибиотикам микроорганизмов, ассоциированных с сельскохозяйственной деятельностью человека [5–7]. Особую значимость представляет резистентность бактерий к антимикробным препа-

ратам класса цефалоспоринов, так как эта группа входит в список антибиотиков ВОЗ, критически важных для медицины. Кроме того, продуктивные животные могут служить основным резервуаром для многих патогенов, таких как *Campylobacter* spp., non-Typhi серотипов *Salmonella enterica*, *Listeria monocytogenes* и шига-токсинпродуцирующих *Escherichia coli*, которые попадают в организм человека с продуктами питания [8–10]. Патогенный потенциал данных микроорганизмов определяется, в первую очередь, их способностью вырабатывать токсины, обуславливающие острые кишечные и тяжелые системные заболевания. Патогенные и условно-патогенные штаммы микроорганизмов с множественной лекарственной устойчивостью, циркулирующие в популяции крупного рогатого скота, могут попадать в органические удобрения, сохраняться там, что создает дополнительные риски здоровью населения.

Еще одной важной проблемой является загрязнение почв щелочными (Na, K), щелочноземельными (Ca, Mg) и тяжелыми металлами (Cu, Pb, Mn, Zn, Ni, Cd, Fe) [11]. Установлено, что присутствие тяжелых металлов в почве является фактором опасности для человека [12, 13]. Многочисленными исследованиями показано, что тяжелые металлы могут поглощаться из почв сельскохозяйственными растениями и таким образом продвигаться по цепям питания, что неизбежно приводит к их проникновению в организм человека [14–18]. Многолетнее внесение таких удобрений приводит к росту концентраций тяжелых металлов в сельскохозяйственных почвах, в ряде случаев до опасных уровней [14, 15, 18, 19]. Есть данные, что Cd, Cu, Zn, Pb и Ni, поступая в почву с удобрением, накапливались в овощах, в частности в редисе, что привело к повышению неканцерогенного риска для детей при его употреблении [15].

Показано, что неконтролируемое применение пестицидов и ряда хлорорганических соединений имело следствием контаминацию почв [20–23]. Для большинства соединений данной группы характерно свойство биомагнификации, то есть продвижение по пищевым цепям с накоплением на верхних трофических уровнях [24]. Мировым сообществом указано на опасность для здоровья человека хлорорганических соединений, таких как гамма-изомер гексахлорциклогексана (ГХЦГ), дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и полихлорированных бифенилов (ПХБ) [25, 26]. Поступление пестицидов в организм сельскохозяйственных животных возможно с растительными кормами, полученными на загрязненных полях [24]. Так как данные соединения практически не подвержены разложению под действием ферментов животных, то велика вероятность их присутст-

¹ О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 14.07.2022 № 248-ФЗ [Электронный ресурс] // Официальное опубликование правовых актов. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207140005> (дата обращения: 21.04.2025).

вия в побочных продуктах животноводства [26–28]. Использование таких органических удобрений может привести к распространению пестицидов на «чистых» территориях и последующему поступлению их в организм человека.

В Пермском крае функционируют несколько крупных промышленных животноводческих комплексов, а также многочисленные частные фермерские хозяйства, поэтому, как и в других регионах, проблема безопасности органических удобрений и возможных рисков для здоровья человека требует особого внимания.

Цель исследования – оценка микробного и химического загрязнения побочных продуктов животноводства разных сроков и условий хранения, а также анализ рисков здоровью населения.

Материалы и методы. Объектом исследования служили пробы органических отходов, полученные из трех крупных животноводческих хозяйств Пермского края (ООО «Агрофирма Труд», д. Кужлево (Х1), СПК «Хохловка», д. Скобелевка (Х2), ООО «Русь», с. Большая Соснова (Х3), по 4–8 проб из каждого хозяйства), с разными сроками и условиями хранения. Характеристика образцов для исследования представлена в табл. 1.

Оценка общей микробной обсемененности. Общее количество микроорганизмов (ОМЧ), в том числе представителей семейств *Enterobacteriaceae* и *Pseudomonadaceae*, определяли методом прямого высея последовательных децимальных разведений почвенных суспензий на универсальные и селективные агариевые питательные среды. Навеску удобрения 1 г помещали в коническую колбу с 50 мл фосфатно-буферной среды (рН 7,0–7,2), взбалтывали и трехкрат-

но дезинтегрировали ультразвуком в течение 1 мин при 37 кГц в ультразвуковой ванне Elma Ultrasonic 30S (Elma, Германия). Для подсчета ОМЧ использовали универсальную агариевую среду Лурия – Бергани (LBA) (Becton, USA). Для определения энтеробактерий и псевдомонад – среды Endo agar (Becton, USA) и Pseudomonas CN agar (Conda S.A., Spain) соответственно. Ампициллиноустойчивые бактерии учитывали на универсальных и селективных средах с добавлением ампициллина (100 мкг/мл). Численность микроорганизмов определяли по количеству колониообразующих единиц (КОЕ) в пересчете на 1 г сухого удобрения. Выделение и идентификацию культур проводили традиционным методом.

Бактериологическое исследование на патогенные кишечные микроорганизмы (*Shigella*, *Salmonella*) проводили согласно СанПиН 3.3686-21². Расширенный скрининг возбудителей острых кишечных инфекций вирусной и бактериальной природы (*Adenovirus* F, *Astrovirus*, *Norovirus* GII, *Rotavirus* A, *Campylobacter* spp., *Salmonella* spp., *Shigella* spp., *Escherichia coli* (Enteroinvasive *Escherichia coli* – EIEC)) проводили методом ПЦР в реальном времени с использованием набора «РеалБест-ОКИ» («Вектор-Бест», г. Новосибирск). Исследования проведены на базе ООО «Централизованная клинико-диагностическая лаборатория» (г. Пермь).

Оценку проб компостированных удобрений (со сроком хранения один год) осуществляли согласно Федеральному закону № 248-ФЗ: индекс БГКП (бактерии группы кишечной палочки), индекс энтерококков, наличие патогенных микроорганизмов, яиц и личинок гельминтов (экз./кг), цист простейших (экз./100 г) (ГОСТ Р 33379-2015³, ГОСТ Р 54001-2010⁴

Таблица 1

Характеристика образцов органических отходов

№	Шифр	Срок хранения	Условия хранения	Локация*
1	X1.1	1–3 дня (апрель, 2024)	н/п**	57.464644, 56.532670
2	X2.1	1–3 дня (май, 2024)	н/п	
3	X2.2	Один месяц (апрель, 2024 – май, 2024)	Аэробное / анаэробное хранение	58.231397, 56.291829
4	X2.3	12 мес. (май, 2023 – май, 2024)	Аэробное / анаэробное хранение	
5	X3.1	1–3 дня (май, 2024)	н/п	
6	X3.2	Один месяц (апрель, 2024 – май, 2024)	Аэробное / анаэробное хранение	57.670633, 54.593398
7	X3.3	12 месяцев (май, 2023 – май, 2024)	Аэробное / анаэробное хранение	

Примечание: * – координаты местоположения; ** н/п – не применимо; X1, X2, X3 – хозяйства № 1, 2, 3 соответственно.

² СанПиН 3.3686-21. Санитарно-эпидемиологические требования по профилактике инфекционных болезней / утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 4 [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573660140> (дата обращения: 25.04.2025).

³ ГОСТ 33379-2015. Удобрения органические. Методы определения наличия патогенных и условно-патогенных микроорганизмов: межгосударственный стандарт / утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 ноября 2015 г. № 1802-ст [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200126890> (дата обращения: 28.04.2025).

⁴ ГОСТ Р 54001-2010. Удобрения органические. Методы гельминтологического анализа: Национальный стандарт РФ / утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 ноября 2010 г. № 591-ст [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200083316> (дата обращения: 28.04.2025).

и ГОСТ 57782-2017⁵). Исследования проведены на базе Государственного центра агрохимической службы «Пермский» ФГБУ.

*Идентификация и типирование изолятов *E. coli*.* Верификация изолятов *E. coli* проведена с помощью Микротест-системы «ENTEROtest 16». Методом ПЦР с помощью праймеров uidA-F/uidA-R, согласно L. Heijnen et al. [29], проведена детекция специфического фрагмента гена бета-глюкуронидазы для определения принадлежности штаммов к виду *E. coli*. Типирование выделенных изолятов было проведено методом гер-ПЦР с праймерами ERIC1R/ERIC2⁶.

Определение антибиотикочувствительности. Определение чувствительности штаммов к антибактериальным препаратам проводили диско-диффузионным методом с использованием агара Мюллера – Хинтона (ФБУН ГНЦ ПМБ, Россия) и дисков с антибиотиками (НИЦФ, г. Санкт-Петербург) согласно клиническим рекомендациям «Определение чувствительности микроорганизмов к антимикробным препаратам» Межрегиональной ассоциации по клинической микробиологии и антимикробной химиотерапии (МАКМАХ, Версия-2018-03). Изучена чувствительность к следующим группам антибиотиков: беталактамам (ампициллину, цефоперазону, цефтриаксону, азtreонаму, меропенему), аминогликозидам (гентамицину, амикацину), фторхинолонам (ципрофлоксацину, левофлоксацину), а также к хлорамфениколу и тетрациклину. Индекс множественной антибиотикорезистентности (MARI) для каждого изолята рассчитывали как отношение количества антибиотиков, к которым изолят был устойчив, к общему количеству протестированных антибиотиков по формуле (1):

$$MARI = \frac{a}{b}, \quad (1)$$

где *a* – число изолятов, устойчивых к антибиотикам, *b* – общее количество изолятов⁷. Оценку совокупного индекса устойчивости к противомикробным препаратам (ARI) для выборки штаммов (из конкретного хозяйства) рассчитывали как соотношение между количеством устойчивых бактериальных изолятов и общим количеством протестированных комбинаций (количество антибиотиков · количество протестированных изолятов) согласно методу, предложенному P.H. Krumperman (1983)⁸, по формуле (2):

$$ARI = \frac{a}{b \cdot c}, \quad (2)$$

где *a* – совокупный показатель устойчивости к антибиотикам всех изолятов выборки, *b* – количество антибиотиков, *c* – количество изолятов в выборке.

Значение индекса 0,2 используется для дифференциации низкого и высокого риска для здоровья: *ARI* больше 0,2 предполагает, что штамм (-ы) бактерий происходят из среды с высоким уровнем загрязнения или использования антибиотиков [30].

*Определение диареегенных патотипов *E. coli*.* Методом ПЦР по конечной точке в штаммах *E. coli* детектировали гены, кодирующие токсины / энтеротоксины (*astA/east1*, *estI/estA*, *estII/estB*, *eltA*, *stx1*, *stx2*, *eaeA*) и другие факторы патогенности диареегенных эшерихий (*subAB*, *ehxA*, *ipaH*, *ial*). Патотип энтерогеморрагических / продуцирующих шига-токсин *E. coli* EHEC/STEC определяли по наличию *stx1/2*, *ehxA* – генов шига-подобного токсина и энтерогемолизина соответственно. Патотип энтеротоксигенной *E. coli* (ETEC) – по присутствию *estI/estA*, *estII/estB* – генов термостабильных и термомодулируемых энтеротоксинов соответственно. Энтероинвазивные *E. coli* (EIEC) определяли по плазмидному (*ipaH*) и хромосомному (*ial*) генам инвазивности, специфичным для *Shigella* spp. Энтеропатогенные *E. coli* (EPEC) – по генам *eaeA* (интимин) и *ehxA* (энтерогемолизин). Ген *astA/east1* энteroагрегатного термостабильного энтеротоксина 1 *Escherichia coli* (EAST1) часто присутствует в энteroагрегатной *E. coli* (EAEC), но может встречаться и у представителей других патотипов. Использовали праймеры и режимы амплификации, согласно рекомендациям авторов [31, 32]. Амплификацию проводили на термоциклире DNA Engine Dyad Thermal Cycler (Bio-Rad, США). Визуализацию полос и документирование данных осуществляли с помощью системы гель-документации Gel-DocXR (Bio-Rad, США).

Химический анализ на наличие металлов и органических загрязнителей. Экстракцию водорастворимых форм металлов проводили из 10 г образца органического отхода, суспендированного в 125 мл десорбированной воды. Суспензию пропускали через фильтр «синяя лента», фильтрат выпаривали до объема 50 мл при нагревании. После остывания до комнатной температуры фильтрат переносили в мерную пробирку, добавляли 2–3 капли концентри-

⁵ ГОСТ Р 57782-2017. Удобрения органические. Методы паразитологического анализа. Методы определения ооцист и цист простейших: Национальный стандарт РФ / утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 октября 2017 г. № 1383-ст [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200156990> (дата обращения: 28.04.2025).

⁶ Genomic fingerprinting of bacteria using repetitive sequence-based polymerase chain reaction / J. Versalovic, M. Schneider, F.J. De Bruijn, J.R. Lupskiet // Methods in Molecular and Cellular Biology. – 1994. – Vol. 5. – P. 25–40.

⁷ Antibiotic resistance indexing of *Escherichia coli* to identify sources of fecal contamination in water / C.W. Kaspar, J.L. Burgess, I.T. Knight, R.R. Colwell // Can. J. Microbiol. – 1990. – Vol. 36, № 12. – P. 891–894. DOI: 10.1139/m90-154

⁸ Krumperman P.H. Multiple antibiotic resistance indexing of *Escherichia coli* to identify high-risk sources of fecal contamination of foods // Appl. Environ. Microbiol. – 1983. – Vol. 46, № 1. – P. 165–170. DOI: 10.1128/aem.46.1.165-170.1983

рованной азотной кислоты и при необходимости доводили объем фильтрата до метки 50 мл деионизированной водой. В качестве стандартов для определения использовали ГСО 7330-96 (государственный стандартный образец раствора ионов металлов), содержащий алюминий, железо, кадмий, кобальт, магний, медь, молибден, никель, свинец, цинк. Анализ металлов осуществляли согласно РД 52.18.286-91⁹ «Методика выполнения измерений массовой доли водорастворимых форм металлов в пробах почвы атомно-адсорбционным анализом» на атомно-адсорбционном спектрометре AA-6300 (Shimadzu, Япония).

Анализ органических удобрений на наличие пестицидов и полихлорированных бифенилов проводили методом газовой хроматографии с масс-селективным детектированием на газовом хроматографе 7010B с масс-селективным детектором 7890B (Agilent, США) при программировании температуры согласно Т.И. Горбунова et al. [33]. Экстракцию органических загрязнителей осуществляли согласно Д.О. Егорова et al. [34]. Качественное содержание пестицидов в фильтрате оценивали по масс-спектрам выявленных соединений.

Расчет рисков здоровью населения. Для расчета канцерогенного и неканцерогенного рисков использовали модель, предложенную Агентством по охране окружающей среды США (US EPA, 2002¹⁰). Согласно данной модели был выбран сценарий поступления «не резидент», т.е. поступление происходит не в течение всей жизни, а только в рабочее время, пути поступления – дермальный и пероральный.

При расчетах неканцерогенного риска вычисляли коэффициент опасности (*HQ*) и индекс опасности (*HI*) согласно Руководству по оценке риска здоровью населения при воздействии химических

веществ, загрязняющих среду обитания¹¹, и US EPA (2002).

Коэффициент опасности (*HQ*) рассчитывали по формуле (3):

$$HQ_i = ADI_{ni} / RfD_i \quad (3)$$

где *ADI_{ni}* – суточное потребление отдельного металла при соответствующем пути поступления (мг/кг в день⁻¹), *RfD_i* – референтная доза для каждого металла (мг/кг в день⁻¹) (табл. 2). При проведенных расчетах использованы значения *RfD*, указанные в Руководстве Р 2.1.10.3968-23.

Суточное потребление при пероральном и контактном пути поступления металлов в организм рассчитывали по формулам (4) и (5) соответственно:

$$ADI_{po} = (C_i \cdot IR_{po} \cdot E \cdot ED) / (BW \cdot AT) \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

$$ADI_{der} = (C_i \cdot ESA \cdot SAF \cdot DAF \cdot E \cdot ED) / (BW \cdot AT) \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

где *C_i* – концентрация металла в исследуемом образце (мг/кг);

IR_{po} – коэффициент перорального поступления (100 мг/сут);

E – частота воздействия (225 сут/год);

ED – длительность воздействия (25 лет – взрослые);

BW – вес тела (70 кг);

AT – среднее время воздействия (5625 сут);

ESA – площадь поверхности кожи, подвергающаяся воздействию (3300 см²);

SAF – фактор кожной адгезии (0,2 мг/см²);

DAF – фактор кожной адсорбции (0,001) (USEPA, 2002).

Таблица 2

Сравнение значений *RfD* для тяжелых металлов

Металл	Руководство Р 2.1.10.3968-23	US EPA, 2006	Wei et al., 2025	More, Dhakate, 2025	Pan et al., 2019	
	перорально	перорально	перорально	перорально	перорально	дермально
Cu	0,04	0,04	0,04	0,371	0,02	$5,4 \cdot 10^{-3}$
Pb	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,004	0,0035	0,0035	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$5,25 \cdot 10^{-4}$
Mn	0,14	–	–	–	–	–
Zn	0,3	0,3	0,3	0,3	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Ni	0,02	0,02	0,02	0,02	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$
Cd	0,0005	0,001	0,001	0,001	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Fe	0,7	–	–	–	–	–

⁹ РД 52.18.286-91. Методика выполнения измерений массовой доли водорастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом: Руководящий документ. Методические указания / утв. Государственным комитетом СССР по гидрометеорологии, дата введения: 01.04.1991 [Электронный ресурс] // МЕГАНОРМ: система нормативных документов. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/14293783/4293783540.htm> (дата обращения: 28.04.2025).

¹⁰ US EPA. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites [Электронный ресурс]. – Washington, DC: US EPA, Office of Emergency and Remedial Response, 2002. – 106 p. – URL: <https://semspub.epa.gov/work/HQ/175878.pdf> (дата обращения: 28.04.2025).

¹¹ Р 2.1.10.3968-23. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания / утв. Федеральной службой по надзору в сфере здравоохранения от 5 сентября 2023 г. [Электронный ресурс] // ГАРАНТ: информационно-правовое обеспечение. – URL: <https://base.garant.ru/408644981/> (дата обращения: 28.07.2025).

Индекс опасности (HI_{ij}) согласно Руководству Р 2.1.10.3968-23 рассчитывается по формуле (6) с учетом пути поступления (i) и органа / системы органов (j), на которую оказывается влияние:

$$HI_{ij} = \Sigma HQ_{ij}, \quad (6)$$

где HI_{ij} – индекс опасности, HQ_{ij} – коэффициент опасности, вычисляемый для каждого металла в об разце по формуле (3).

Индекс опасности < 1 свидетельствует об отсутствии неканцерогенного риска, при значениях $HI > 1$ риск считается значимым.

Канцерогенный риск оценивали на основании расчетов, проведенных по формуле (7), установленной в Руководстве Р 2.1.10.3968-23:

$$CR = LADD \cdot SF \cdot g, \quad (7)$$

где $LADD$ – среднесуточное потребление отдельного металла при соответствующем пути поступления (мг/кг в день $^{-1}$);

SF – «слоп»-фактор (при пероральном поступлении: Pb – 0,0085 мг/кг в день $^{-1}$, Cd – 0,38 мг/кг в день $^{-1}$);

g – коэффициент тяжести злокачественных новообразований; согласно Руководству Р 2.1.10.3968-23, значения g принимали за 1.

Суммарный канцерогенный риск (TCR) рассчитывали по формуле (8) согласно Руководству Р 2.1.10.3968-23:

$$TCR = \Sigma CR_i, \quad (8)$$

где CR_i – канцерогенный риск для отдельного металла (8). Допустимыми приняты значения TCR в диапазоне $1 \cdot 10^{-6} – 1 \cdot 10^{-4}$.

Статистический анализ. Обработка данных проводилась с использованием компьютерных программ Microsoft Office XP Excel и GraphPad Prism Statistical Software. Показатели в таблицах представлены в виде среднего арифметического и его ошибки ($M \pm m$). Для выявления статистически значимых различий между количественными показателями выборок определяли t -тест Стьюдента.

Результаты и их обсуждение. Оценка общей микробной обсемененности. ОМЧ в образцах побочных продуктов крупного рогатого скота варьировалось от $2,35 \cdot 10^6$ до $1,69 \cdot 10^9$ КОЕ/г сух. веса (табл. 3). В свежих отходах количество бактерий в среднем составило $4,60 \cdot 10^8 \pm 1,50 \cdot 10^8$ КОЕ/г сух. веса. Для данных образцов выявлена сильная отрицательная достоверная связь между массой сухого вещества и ОМЧ ($rs = -0,915$). После месяца хранения значение этого показателя увеличивалось ($1,26 \cdot 10^9 \pm 4,09 \cdot 10^8$ КОЕ/г сух. веса), а после года хранения – снижалось ($2,51 \cdot 10^7 \pm 1,14 \cdot 10^7$ КОЕ/г сух. веса). Статистически значимые различия выявлены между группами I и III ($p = 0,039$). По данным В.Г. Тюрина и соавт. [35], ОМЧ в образцах органических удобрений на основе навоза крупного рогатого скота, полученных после компостирования ор-

ганического субстрата в термофильном режиме в течение 2 месяцев, составило $4,5 \cdot 10^5$ КОЕ/г, что отличается от полученных нами результатов.

Аналогичная тенденция отмечена для ампициллиноустойчивых бактерий на среде Pseudo-агар: по сравнению с I группой их среднее количество во II группе незначительно увеличивалось, а в III группе уменьшалось на два порядка. В пробах свежих побочных продуктов животноводства ампициллиноустойчивых представителей семейства *Pseudomonadaceae* не детектировали, однако после месяца и года хранения они были обнаружены в количестве $10^3 – 10^4$ КОЕ/г сух. веса. При этом их доля выросла с 47,42 до 71,97 % от общего количества псевдомонад. Среднее число энтеробактерий на среде Эндо составило $6,37 \cdot 10^7 \pm 4,40 \cdot 10^7$ КОЕ/г сух. веса (ампициллиноустойчивых – $3,06 \cdot 10^7 \pm 1,97 \cdot 10^7$; 32,38 %). Ожидаемо их количество снижалось с увеличением срока хранения удобрения.

Таким образом, показано, что побочные продукты животноводства содержат большое количество представителей семейств *Enterobacteriaceae* и *Pseudomonadaceae*, и, что особенно важно, во всех образцах отходов присутствуют ампициллиноустойчивые энтеробактерии.

Оценка встречаемости представителей патогенных и условно-патогенных микроорганизмов. Бактериологическое исследование образцов на наличие патогенных микроорганизмов (дизентерийная и тифо-паратифозная группы) и ПЦР-скрининг возбудителей острых кишечных инфекций (*Adenovirus* F, *Astrovirus*, *Norovirus* GII, *Rotavirus* A, *Campylobacter* spp., *Salmonella* spp., *Shigella* spp., *Escherichia coli* (Enteroinvasive *E. coli* – EIEC)) показало следующее:

- в исследованных пробах роста шигелл не обнаружено;
- в единичных образцах свежих удобрений выявлены бактерии рода *Salmonella* Enteritidis ($n = 3$), а также представители условно-патогенных бактерий *Empedobacter brevis* ($n = 2$), *Klebsiella pneumoniae* ($n = 2$), *Klebsiella oxytoca*, *Aeromonas hydrophila*, *Citrobacter freundii*, *Citrobacter amalonaticus* ($n = 2$), *Proteus mirabilis* ($n = 4$), *Proteus vulgaris*;

- в большинстве образцов зафиксирован рост *Aspergillus* spp.;

- результаты ПЦР-теста «Расширенный скрининг возбудителей острых кишечных инфекций» отрицательные. Следует отметить, что после года хранения органических отходов (оценено только для X2 и X3) санитарные показатели: индекс БГКП, индекс энтерококков, присутствие патогенных микроорганизмов, яиц и личинок гельминтов, цист простейших, регламентированные ФЗ № 248-ФЗ, соответствовали норме. **При хранении и компостировании побочных продуктов в хранилище температура внутри бурта поднимается до 60–70 °C, что приводит к гибели большинства патогенных микроорганизмов.**

Таблица 3

Содержание некоторых групп бактерий в пробах органических отходов

Группа: характеристика	Среднее количество микроорганизмов (клеток/г сух. веса), выросших на питательных средах:					
	LB	LB+amp	Pseudo-агар	Pseudo-агар+amp	Эндо	Эндо+amp
<i>X1</i>						
I группа: свежий, сутки	$6,51 \cdot 10^8 \pm 2,24 \cdot 10^8$	$3,84 \cdot 10^7 \pm 2,31 \cdot 10^7$ $5,57 \%$	0	0	$1,27 \cdot 10^8 \pm 7,99 \cdot 10^7$	$6,07 \cdot 10^7 \pm 3,47 \cdot 10^7$ $32,33 \%$
<i>X2</i>						
I группа: свежий, сутки	$2,29 \cdot 10^8 \pm 5,00 \cdot 10^6$	$5,81 \cdot 10^7 \pm 4,98 \cdot 10^5$ $18,14 \%$ ^a	0	0	$2,89 \cdot 10^5 \pm 9,09 \cdot 10^4$	$9,96 \cdot 10^3 \pm 4,75 \cdot 10^3$ $3,33 \%$
II группа: подстилочный, до одного месяца	$7,42 \cdot 10^8 \pm 4,09 \cdot 10^8$	$1,79 \cdot 10^8 \pm 1,26 \cdot 10^8$ $19,12 \%$	$9,74 \cdot 10^3 \pm 6,81 \cdot 10^3$	$8,78 \cdot 10^3 \pm 1,00 \cdot 10^2$ $47,41 \%$	$9,17 \cdot 10^7 \pm 5,20 \cdot 10^7$	$1,58 \cdot 10^6 \pm 8,34 \cdot 10^5$ $1,69 \%$
III группа: компостированный, один год	$2,35 \cdot 10^6 \pm 5,00 \cdot 10^4$	$5,21 \cdot 10^5 \pm 5,00 \cdot 10^3$ $18,15 \%$	$3,91 \cdot 10^3 \pm 1,30 \cdot 10^3$	$1,30 \cdot 10^4 \pm 5,00 \cdot 10^2$ $76,88 \%$	$7,36 \cdot 10^5 \pm 2,15 \cdot 10^5$	$1,06 \cdot 10^5 \pm 4,56 \cdot 10^3$ $12,59 \%$
<i>X3</i>						
I группа: свежий, сутки	$1,94 \cdot 10^8 \pm 2,92 \cdot 10^7$	$1,47 \cdot 10^6 \pm 6,97 \cdot 10^3$ $0,75 \%$	$2,80 \cdot 10^3 \pm 5,00 \cdot 10^2$	0	$4,54 \cdot 10^5 \pm 1,88 \cdot 10^5$	$5,61 \cdot 10^5 \pm 8,09 \cdot 10^4$ $55,27 \%$
II группа: подстилочный, один месяц	$1,69 \cdot 10^9 \pm 6,38 \cdot 10^8$	$8,92 \cdot 10^4 \pm 4,27 \cdot 10^4$ $0,005 \%$	0	0	$6,40 \cdot 10^5 \pm 5,37 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^5 \pm 1,94 \cdot 10^3$ $14,55 \%$
III группа: компостированный, один год	$3,65 \cdot 10^7 \pm 1,79 \cdot 10^6$	$4,12 \cdot 10^5 \pm 2,71 \cdot 10^4$ $1,11 \%$	$7,40 \cdot 10^3 \pm 1,30 \cdot 10^3$	0	$5,61 \cdot 10^5 \pm 3,08 \cdot 10^4$	$4,20 \cdot 10^5 \pm 3,21 \cdot 10^5$ $42,81 \%$
<i>Итого (среднее по всем хозяйствам)</i>						
I группа: свежий, сутки	$4,60 \cdot 10^8 \pm 1,50 \cdot 10^8$	$3,07 \cdot 10^7 \pm 1,47 \cdot 10^7$ $6,25 \%$	$2,79 \cdot 10^3 \pm 2,67 \cdot 10^2$	0	$6,37 \cdot 10^7 \pm 4,40 \cdot 10^7$	$3,06 \cdot 10^7 \pm 1,97 \cdot 10^7$ $32,38 \%$
II группа: подстилочный, один месяц	$1,26 \cdot 10^9 \pm 4,09 \cdot 10^8$	$9,95 \cdot 10^7 \pm 7,71 \cdot 10^7$ $7,29 \%$	$9,74 \cdot 10^3 \pm 6,81 \cdot 10^3$	$8,78 \cdot 10^3 \pm 7,07 \cdot 10^2$ $47,42 \%$	$6,13 \cdot 10^7 \pm 3,81 \cdot 10^7$	$1,09 \cdot 10^6 \pm 6,11 \cdot 10^5$ $1,74 \%$
III группа: компостированный, один год	$2,51 \cdot 10^7 \pm 1,14 \cdot 10^7**$	$4,48 \cdot 10^5 \pm 3,96 \cdot 10^4$ $1,76 \%$	$5,07 \cdot 10^3 \pm 1,39 \cdot 10^3$	$1,30 \cdot 10^4 \pm 5,00 \cdot 10^2$ $71,97 \%$	$6,49 \cdot 10^5 \pm 1,02 \cdot 10^5$	$2,63 \cdot 10^5 \pm 1,59 \cdot 10^5$ $28,84 \%$

Примечание: ^a – доля в соответствующей группе, %; * – достоверное отличие показателя от I группы; ** – достоверное отличие показателя от II группы (*t*-тест); amp – ампициллин. LB – среда Лурия – Бергани; X1, X2, X3 – хозяйства № 1, 2, 3 соответственно.

Характеристика выделенных штаммов *E. coli*. Высокая доля эшерихиозов в общей структуре инфекционной патологии крупного рогатого скота обусловила интерес к углубленному исследованию *E. coli*. Лактозопозитивные культуры ($n = 112$), изолированные на агаре Эндо, в дальнейшем верифицировали и типировали с помощью ПЦР. В результате из трех хозяйств получено 35 штаммов *E. coli* с индивидуальным генетическим профилем, у всех оценивали антибиотикоустойчивость и детектировали гены патогенности DEC.

Известно, что применение компоста сопряжено с риском распространения генов антибиотикорезистентности, содержащихся в бактериальном сообществе удобрения. Индекс множественной антибиотикорезистентности является важным параметром для оценки факторов риска для здоровья населения. Принято считать, что источником бактерий с индексом ARI $\geq 0,2$

являются хозяйства, где используется несколько классов антибиотиков. Общий индекс ARI для штаммов *E. coli*, выделенных из образцов побочных продуктов животноводства хозяйства «Труд» (X1), составил 0,14, а хозяйства «Хохловка» (X2) – 0,13. Индекс MARI двух культур из побочных продуктов третьего хозяйства («Русь») также не превышал 0,2. Интересно отметить, что в сравнении с исследованием T.P. Mthembu et al. [36], которые сообщили об индексе множественной антибиотикорезистентности в диапазоне значений от 0 до 0,875 (с преобладанием 0,31) у изолятов *E. coli*, выделенных от различных животных, включая овец, крупный рогатый скот, свиней, коз, кур и уток, ARI исследуемых нами *E. coli* оказался существенно ниже: 0,09–0,27. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о низком риске распространения антибиотикоустойчивых культур на данных предприятиях.

Данные о встречаемости в побочных продуктах животноводства диареогенных патотипов *E. coli* имеют решающее значение для оценки риска здоровью населения и необходимы для профилактических мер контроля их распространения [10]. Кроме того, показано, что эшерихии, в частности STEC, когда вносятся с загрязненными органическими удобрениями, могут выживать в почве в течение длительного времени. Принимая во внимание, что среди эшерихий встречаются как представители комменсальных сероваров, так и условно-патогенные и безусловные патогены [37, 38], в собранной коллекции определяли генетические маркеры DEC. Гены токсинов, а также энтеротоксинов – *ehxA*, *subAB*, *stx1*, *stx2*, *estI/estA*, *estII/estB*, *eltA*, *eaeA* – у всех исследованных штаммов *E. coli* обнаружены не были. Среди генов инвазии в большом проценте случаев (48,6 %) детектирован *ial*. Тем не менее ген инвазивного плазмидного антигена Н – *ipaH*, характеризующего EIEC, способных вызывать симптомы шигеллеза (бактериальной дизентерии) как у детей, так и у взрослых, не детектировали. Присутствие последнего необходимо для полного выражения патогенности, связанной с внедрением в эпителиальные клетки кишечника [38]. Только в двух культурах (5,7 %) выявлен ген энтероагрегативного термостабильного энтеротоксина EAST1, который связан с диарейными заболеваниями человека и различных видов животных, включая крупный рогатый скот и свиней. Предполагается, что механизм действия EAST1 идентичен механизму действия термостабильного энтеротоксина, вызывающего увеличение циклического гуанозинмонофосфата (цГМФ). Следует отметить, что ген *astA/eastI* присутствует не только в ДНК EAEC, но и других представителей диареогенных *E. coli*. Таким образом, в штаммах *E. coli*, выделенных из побочных продуктов животноводства трех хозяйств, **детерминант специфических факторов, определяющих патогенез острых кишечных инфекций** (за исключением генов *ial* и *eastI*), не обнаружено. Важно отметить, что все культуры были чувствительны к большинству протестированных антибиотиков – общий индекс ARI не превышал 0,2.

Оценка содержания металлов. Установлено, что в побочных продуктах животноводства присутствуют металлы трех групп: щелочные, щелочноземельные и тяжелые (табл. 4). Образцы из хозяйства «Труд» (Х1) характеризуются высоким содержанием металлов щелочноземельной группы, но при

этом в них выявлена самая низкая концентрация натрия. В остальных пробах концентрация щелочных металлов варьировалась в диапазоне 120–833 мг/кг, щелочноземельных – в диапазоне 52–376 мг/кг. Зависимости концентрации от периода хранения отходов не выявлено.

Существенный интерес представляет анализ тяжелых металлов как наиболее опасных загрязнителей окружающей среды. Установлено, что в образцах Х1 и Х3 присутствуют Mn, Zn, Ni, Cd и Fe (табл. 4). Однако их концентрации не превышали нормативные показатели, установленные как для побочных продуктов животноводства, так и для почв Федеральным законом № 248-ФЗ (2022), Постановлением Правительства РФ от 31 октября 2022 г. № 1940¹², СанПиНом 1.2.3685-21¹³, а также согласно Х. Hao et al. [14]. В образцах Х2, помимо вышеперечисленных металлов, выявлено также наличие Cu и Pb (см. табл. 4). Количество свинца не превышает норм, установленных в РФ и ряде других стран для побочных продуктов животноводства и почв. Концентрация меди в РФ нормируется только для почв, тогда как в Евросоюзе и Канаде введены нормативы допустимого содержания меди в побочных продуктах животноводства (см. табл. 4). Сравнение полученных данных с нормативами показало, что концентрация Cu в образцах Х2 превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) для почв, что может осложнить применение данных продуктов в качестве удобрений. Интересно отметить, что в результате хранения концентрации Pb, Cd в образцах Х2, Mn и Zn в образцах Х3 увеличиваются. Напротив, количество Mn и Zn в пробах Х2 и Ni в пробах Х3 снижается в течение годичного периода хранения. Изменения уровней Cu и Fe не коррелировали с периодом хранения. В работе Х. Hao et al. [14] показано, что в процессе компостирования навоза происходит концентрирование тяжелых металлов. Однако в настоящем исследовании мы наблюдаем разнонаправленный процесс изменения содержания металлов в процессе компостирования.

Оценка рисков здоровью населения, связанного с применением удобрений. Анализ коэффициентов опасности тяжелых металлов в зависимости от пути воздействия на организм человека показал, что применение органических удобрений приводит к некоторому повышению концентрации тяжелых металлов в почвах, однако это не сказывается на значениях неканцерогенного риска. Значения коэффициентов опасности (*HQ*) для разных металлов, идентифицированных в образцах побочных продуктов животноводства,

¹² Об утверждении требований к обращению побочных продуктов животноводства: Постановление Правительства РФ от 31 октября 2022 г. № 1940 [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/352185302> (дата обращения: 29.04.2025).

¹³ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания / утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2 [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=656010> (дата обращения: 29.04.2025).

Таблица 4

Концентрация металлов (ppm) в исследованных образцах побочных продуктов животноводства и нормы содержания тяжелых металлов* (ppm = мг/кг)

Образец	Тяжелые						Щелочные			Щелочноземельные	
	Cu	Pb	Mn	Zn	Ni	Cd	Fe	Na	K	Ca	Mg
X1.1	н.д.**	н.д.	2,97 ± 0,08	3,82 ± 0,04	0,51 ± 0,01	0,26 ± 0,01	12,57 ± 0,02	84,00 ± 0,03	527,49 ± 0,01	630,05 ± 0,01	216,54 ± 0,04
X2.1	6,91 ± 0,01	0,69 ± 0,01	2,59 ± 0,05	2,72 ± 0,02	0,87 ± 0,02	0,05 ± 0,03	н.д.	120,94 ± 0,04	416,94 ± 0,01	256,41 ± 0,01	110,57 ± 0,01
X2.2	8,25 ± 0,01	2,06 ± 0,08	2,20 ± 0,03	1,10 ± 0,01	1,18 ± 0,01	0,05 ± 0,03	3,51 ± 0,05	120,02 ± 0,02	710,70 ± 0,02	362,31 ± 0,01	101,76 ± 0,05
X2.3	7,95 ± 0,02	2,52 ± 0,05	0,60 ± 0,01	0,66 ± 0,06	0,67 ± 0,02	0,11 ± 0,01	н.д.	120,65 ± 0,01	176,88 ± 0,05	288,46 ± 0,02	52,15 ± 0,04
X3.1	н.д.	н.д.	0,94 ± 0,01	1,28 ± 0,06	0,96 ± 0,03	н.д.	4,74 ± 0,01	123,42 ± 0,04	502,22 ± 0,02	189,52 ± 0,01	100,19 ± 0,01
X3.2	н.д.	н.д.	2,07 ± 0,03	1,93 ± 0,02	0,79 ± 0,05	н.д.	3,48 ± 0,02	131,12 ± 0,06	494,33 ± 0,03	356,74 ± 0,04	152,45 ± 0,01
X3.3	н.д.	н.д.	3,29 ± 0,02	2,63 ± 0,03	0,59 ± 0,04	0,05 ± 0,03	6,44 ± 0,01	128,71 ± 0,06	833,89 ± 0,01	376,25 ± 0,04	116,93 ± 0,01
Допустимая концентрация (нормированное) побочные продукты животноводства											
РФ (почвы)	3	6–32	60–700	23	4		н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
РФ		130					2	н.д.***	н.д.	н.д.	н.д.
Китай		50					3	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Евросоюз	300	120		800		1,5	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Канада	100	150		500		3	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.

Примечание: * – по Федеральному закону № 248-ФЗ, 2022, Постановлению Правительства РФ от 31 октября 2022 г. № 1940, СанПиНу 1.2.3685-21, по X. Hao et al. [14]; ** н.д. – концентрация ниже минимальной детектируемой (< 0,125 ppm); *** н.д. – не нормируются.

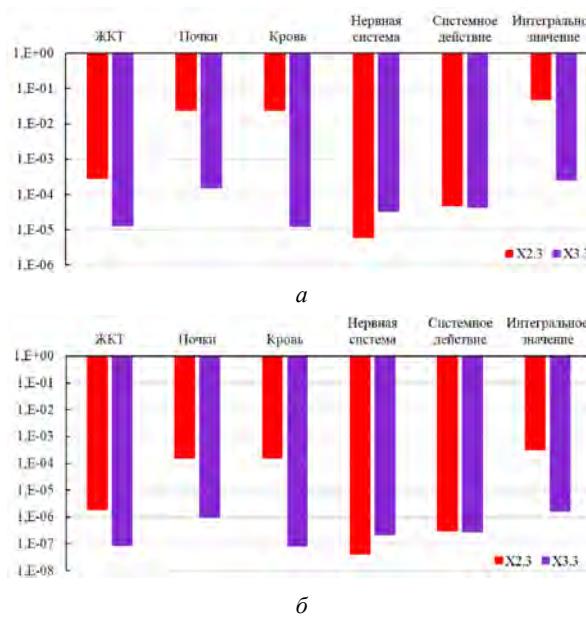


Рис. 1. Индекс опасности (HI) при использовании в качестве удобрения образцов X2.3 и X3.3: *а* – при пероральном пути поступления; *б* – при дермальном пути поступления

находились в диапазоне $0,004\text{--}0,0000008$, что характеризует риск как пренебрежимо малый. Таким образом, полученные результаты подтвердили, что внесение годичных удобрений в хозяйствах не приведет к неприемлемым уровням риска здоровью работников.

Сравнение индекса опасности при пероральном и дермальном путях поступления показало, что все рассчитанные риски находятся в приемлемом диапазоне (рис. 1). Канцерогенный риск был рассчитан с учетом содержания в образцах годичных удобрений Cd и Pb при пероральном пути поступления (рис. 2).

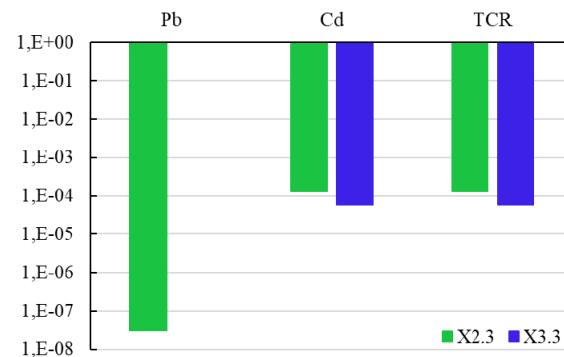


Рис. 2. Канцерогенный риск по отдельным металлам и суммарный канцерогенный риск (TCR) при использовании в качестве удобрения образцов X2.3 и X3.3

Значение показателя канцерогенного риска находилось в диапазоне $10^{-6}\text{--}10^{-4}$, т.е. риск характеризовался как приемлемый, низкий. При этом, в отличие от исследований S. More et al. [13], доля кадмия в показателе канцерогенного риска была выше, чем доля свинца.

В целом выполнение оценки рисков здоровью представляется целесообразной процедурой, обеспечивающей доказательность безопасности применения удобрений [39].

Оценка хлорорганического загрязнения. Во всех исследованных образцах побочных продуктов животноводства не выявлено присутствие хлорорганических пестицидов (ГХЦГ, ДДТ) и полихлорированных бифенилов (ПХБ). ГХ-МС-анализ показал, что образцы содержали только продукты липидного и белкового обмена, которые не представляют угрозу для здоровья человека.

Установлено, что побочные продукты крупных животноводческих хозяйств Пермского края через год хранения являются безопасными в микробном и химическом отношении и могут быть использованы

как удобрения. Это подтверждается тем, что санитарные показатели (индекс БГКП, индекс энтерококков, присутствие патогенных микроорганизмов, яиц и личинок гельминтов, цист простейших) не превышали нормативы, а также отсутствием в образцах удобрений диареегенных эшерихий патотипов EHEC/STEC и EIEC, низкими значениями индексов MARI и ARI как для отдельных штаммов *E. coli*, так и в популяции, характеризующими риск распространенности микробной антибиотикоустойчивости, и отсутствием хлорорганических пестицидов (ГХЦГ, ДДТ) и полихлорированных бифенилов (ПХБ). Кроме того, индекс опасности тяжелых металлов был в пределах допустимого.

Тем не менее следует отметить, что в свежих отходах содержание ампциллиноустойчивых колиформных бактерий выше допустимых пределов, и хотя их количество уменьшалось со сроком хранения, нельзя исключить их возможное влияние на структуру резистома в почве. Важно отметить, что в отходах в течение одного месяца могут сохраняться бактерии рода *Salmonella*, а также представители условно-патогенных энтеробактерий. Что касается содержания тяжелых металлов, то показано, что концентрации некоторых металлов в ряде свежих и месячных образцов превышают ПДК (для почв), что может осложнить применение данных продуктов в качестве удобрений.

Выводы:

1. На основе данных бактериологического анализа выявлено, что в побочных продуктах животноводства со сроком хранения не более месяца содержание колиформных бактерий выше допустимых пределов, встречаются также патогенные (*Salmonella enterica* non-Typhi) и условно-патогенные микроорганизмы родов *Klebsiella*, *Aeromonas*, *Citrobacter*, *Proteus* и др. В то же время все микробиологические показатели в годичных удобрениях соответствовали нормативам.

2. Субпопуляции *E. coli*, выделенные из побочных продуктов, не содержали гены диареегенных патотипов эшерихий (*cnf1*, *ehxA*, *subAB*, *stx1*, *stx2*, *estI/estA*, *estII/estB*, *eltA*, *ihA*), за исключением *ial* и *astA/eastI*. Общий индекс множественной антибиотикоустойчивости для штаммов *E. coli*, выделенных из образцов побочных продуктов животноводства, не превышал 0,2, что свидетельствует о низком уровне использования антибиотиков в данных хозяйствах и малом риске развития антибиотикоустойчивости и ее распространения в настоящее время.

3. Установлено, что в двух хозяйствах доминантным загрязнителем является Fe (12,5 мг/кг и 3,5–8,3 мг/кг соответственно в X1 и X3), а в одном – Cu (6,9–8,3 мг/кг). Абсолютные величины коэффициентов и индексов неканцерогенного и канцерогенного рисков свидетельствуют о приемлемом уровне рисков здоровью и безопасности применения данных удобрений.

4. Во всех исследованных образцах побочных продуктов животноводства присутствие хлорорганических пестицидов (ГХЦГ, ДДТ) и полихлорированных бифенилов (ПХБ) не выявлено. Установлено, что в отходах содержались только продукты липидного и белкового обмена, не представляющие риска для здоровья человека.

5. Компостированные побочные продукты со сроком хранения один год крупных животноводческих хозяйств Пермского края являются безопасными в микробном и химическом отношении и могут быть использованы в дальнейшем в качестве удобрения.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 24-24-20048¹⁴.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Interactions between nitrogen availability, bacterial communities, and nematode indicators of soil food web function in response to organic amendments / J. Milkereit, D. Geisseler, P. Lazicki, M.L. Settles, B.P. Durbin-Johnson, A. Hodson // Appl. Soil Ecol. – 2021. – Vol. 157, № 7. – P. 103767. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103767
2. Mineral vs. organic amendments: microbial community structure, activity and abundance of agriculturally relevant microbes are driven by long-term fertilization strategies / D. Francioli, E. Schulz, G. Lentendu, T. Wubet, F. Buscot, T. Reitz // Front. Microbiol. – 2016. – Vol. 7. – P. 1446. DOI: 10.3389/fmicb.2016.01446
3. Goss M.J., Tubeileh A., Goorahoo D. A review of the use of organic amendments and the risk to human health // Advances in Agronomy. – 2013. – Vol. 120. – P. 275–379. DOI: 10.1016/B978-0-12-407686-0.00005-1
4. Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития: в 2-х т. / Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцева, А.Ю. Попова, И.В. Май, О.Ю. Устинова, П.В. Трусов, Ле Тхи Хонг Хао, С.В. Клейн [и др.]; под общ. ред. Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцевой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.; Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2024.
5. Global Trends in Antimicrobial Resistance in Animals in Low- and Middle-Income Countries / T.P. Van Boeckel, J. Pires, R. Silvester, C. Zhao, J. Song, N.G. Criscuolo, M. Gilbert, S. Bonhoeffer, R. Laxminarayan // Science. – 2019. – Vol. 365, № 6459. – P. eaaw1944. DOI: 10.1126/science.aaw1944
6. Evaluating the contribution of antimicrobial use in farmed animals to global antimicrobial resistance in humans / Z. Ardashani, M. Canali, M. Aragrande, L. Tomassone, M. Simoes, A. Balzani, C.L. Beber // One Health. – 2023. – Vol. 17. – P. 100647. DOI: 10.1016/j.onehlt.2023.100647
7. Antimicrobial Resistance: A Growing Serious Threat for Global Public Health / A. Salam, Y. Al-Amin, M.T. Salam, J.S. Pawar, N. Akhter, A.A. Rabaan, M.A.A. Alqumber // Healthcare (Basel). – 2023. – Vol. 11, № 13. – P. 1946. DOI: 10.3390/healthcare11131946

¹⁴ Карточка проекта фундаментальных и поисковых научных исследований, поддержанного Российским научным фондом [Электронный ресурс] // РНФ. – URL: <https://rscf.ru/project/24-24-20048/> (дата обращения: 01.06.2025).

8. Heredia N., García S. Animals as sources of food-borne pathogens: A review // *Anim. Nutr.* – 2018. – Vol. 4, № 3. – P. 250–255. DOI: 10.1016/j.aninu.2018.04.006
9. Salmonellosis in Cattle: Sources and Risk of Infection, Control, and Prevention / K.E. Bentum, E. Kuufire, R. Nyarku, V. Osei, S. Price, D. Bourassa, S. Temesgen, C.R. Jackson, A. Woubit // *Zoonotic Dis.* – 2025. – Vol. 5, № 1. – P. 4. DOI: 10.3390/zoonoticdis5010004
10. Prevalence of Shiga-Toxigenic *Escherichia coli* in Bovine Manure in the Mid-Atlantic Region of the United States / P.K. Litt, A.N. Omar, S. Gartley, A. Kelly, T. Ramos, E. Nyarko, T.R. de Souza, M. Jay-Russell [et al.] // *Microorganisms.* – 2025. – Vol. 13, № 2. – P. 419. DOI: 10.3390/microorganisms13020419
11. Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health / A. Rashid, B.J. Schutte, A. Ulery, M.K. Deyholos, S. Sanogo, E.A. Lehnhoff, L. Beck // *Agronomy.* – 2023. – Vol. 13, № 6. – P. 1521. DOI: 10.3390/agronomy13061521
12. Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China / X. Ke, S. Gui, H. Huang, H. Zhang, C. Wang, W. Guo // *Chemosphere.* – 2017. – Vol. 175. – P. 473–481. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.02.029
13. More S., Dhakate R. Geogenic and anthropogenic sources of heavy metals in soil: An ecological and health risk assessment in the granitic terrain of South India // *Catena.* – 2025. – Vol. 254. – P. 108960. DOI: 10.1016/j.catena.2025.108960
14. Migration and risk assessment of heavy metals from swine manure in an organic fertilizer – soil – ryegrass – rex rabbit system: Based on field trials / X. Hao, K. Liu, L. Zhu, L. Rong, D. Jiang, L. Bai // *Sci. Total Environ.* – 2025. – Vol. 959. – P. 178332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.178332
15. Migration characteristics and human health risk assessment of selenium and heavy metals in rhizosphere soil-crop system in high geological background area of southern Qinling Mountains: A case study of Shiquan County, Shaanxi, China / M. Wei, A. Pan, R. Ma, H. Wang // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* – 2025. – Vol. 294. – P. 118013. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2025.118013
16. Integrative data-driven analytics for assessing ecological and human health risks of soil heavy metal contamination / U. Ejaz, S.M. Khan, S.F.A. Shah, N. Khalid, S. Jehangir, Z.F. Rizvi, J.-C. Svenning // *Journal of Hazardous Materials Advances.* – 2025. – Vol. 17. – P. 100596. DOI: 10.1016/j.hazadv.2025.100596
17. Environmental risks for application of iron and steel slags in soils in China: A review / X. Wang, X. Li, X. Yan, C. Tu, Z. Yu // *Pedosphere.* – 2021. – Vol. 31, № 1. – P. 28–42. DOI: 10.1016/S1002-0160(20)60058-3
18. Heavy metal (loid) s accumulation and human health risk assessment in wheat after long-term application of various urban and rural organic fertilizers / L. Zhang, W. Xue, H. Sun, Q. Sun, Y. Hu, R. Wu, Y. Du, S. Liu, G. Zou // *Sci. Total Environ.* – 2025. – Vol. 961. – P. 178389. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178389
19. Influence of continuous fertilization on heavy metals accumulation and microorganism communities in greenhouse soils under 22 years of long-term manure organic fertilizer experiment / S. Wu, K. Li, T. Diao, Y. Sun, T. Sun, C. Wang // *Sci. Total Environ.* – 2025. – Vol. 959. – P. 178294. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.178294
20. Review of hexachlorocyclohexane (HCH) and dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) contamination in Chinese soils / Y. Ma, X. Yun, Z. Ruan, C. Lu, Y. Shi, Q. Qin, Z. Men, D. Zou [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2020. – Vol. 749. – P. 141212. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141212
21. Polychlorinated naphthalenes (PCNs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in surface soils and street dusts in Detroit, Michigan / S.-H. Seo, T. Xia, M.K. Islam, S. Batterman // *Sci. Total Environ.* – 2025. – Vol. 964. – P. 178582. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178582
22. Fang S., Cui Q., Dai X. Understanding urbanization development process and the associated PCBs concentration in urban soils – A genetic algorithm-based urbanization index approach // *J. Hazard. Mater.* – 2025. – Vol. 489. – P. 137725. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.137725
23. Levels and risk assessment of dl-PCBs and dioxins in soils surrounded by cement plants from industrial areas of Colombia and Spain / I. Lacomba, J. Palomares-Bolaños, A. Juan-García, A. López, J. Olivero-Verbel, K. Caballero-Gallardo, C. Coscollà, C. Juan // *Emerging Contaminants.* – 2025. – Vol. 11, № 1. – P. 100427. DOI: 10.1016/j.emcon.2024.100427
24. The bioaccessibility of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans (PCDD/Fs) in cooked plant and animal origin foods / H. Shen, J. Starr, J. Han, L. Zhang, D. Lu, R. Guan, X. Xu, X. Wang [et al.] // *Environ. Int.* – 2016. – Vol. 94. – P. 33–42. DOI: 10.1016/j.envint.2016.05.003
25. Lallas P.L. The Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants // *American Journal of International Law.* – 2001. – Vol. 95, № 3. – P. 692–708. DOI: 10.2307/2668517
26. Warenik-Bany M., Strucinski P., Piskorska-Pliszczynska J. Dioxins and PCBs in game animals: Interspecies comparison and related consumer exposure // *Environ. Int.* – 2016. – Vol. 89–90. – P. 21–29. DOI: 10.1016/j.envint.2016.01.007
27. Pietron W.J., Warenik-Bany M. Terrestrial animal livers as a source of PCDD/Fs, PCBs and PBDEs in the diet // *Sci. Total Environ.* – 2023. – Vol. 867. – P. 161508. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161508
28. Trukhin A.M., Boyarova M.D. Organochlorine pesticides (HCH and DDT) in blubber of spotted seals (*Phoca largha*) from the western Sea of Japan // *Mar. Pollut. Bull.* – 2020. – Vol. 150. – P. 110738. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110738
29. Heijnen L., Medema G. Quantitative detection of *E. coli*, *E. coli* O157 and other Shiga toxin producing *E. coli* in water samples using a culture method combined with real-time PCR // *J. Water Health.* – 2006. – Vol. 4, № 4. – P. 487–498. DOI: 10.2166/wh.2006.0032
30. Christopher A.F., Hora S., Ali Z. Investigation of plasmid profile antibiotic susceptibility pattern multiple antibiotic resistance index calculation of *Escherichia coli* isolates obtained from different human clinical specimens at tertiary care hospital in Bareilly, India // *ATMPH.* – 2013. – Vol. 6. – P. 285–289. DOI: 10.4103/1755-6783.120985
31. Comparison of virulence gene profiles of *Escherichia coli* strains isolated from healthy and diarrheic swine / T.A. Chapman, X.-Y. Wu, I. Barchia, K.A. Bettelheim, S. Driesen, D. Trott, M. Wilson, J.J.-C. Chin // *Appl. Environ. Microbiol.* – 2006. – Vol. 72, № 7. – P. 4782–4795. DOI: 10.1128/AEM.02885-05
32. Occurrence of virulence genes associated with diarrheagenic *Escherichia coli* isolated from raw cow's milk from two commercial dairy farms in the Eastern Cape Province, South Africa / L.-A. Caine, U.U. Nwodo, A.I. Okoh, R.N. Ndip, E. Green // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* – 2014. – Vol. 11, № 11. – P. 11950–11963. DOI: 10.3390/ijerph11111950
33. Biodegradation of trichlorobiphenyls and their hydroxylated derivatives by *Rhodococcus*-strains / T.I. Gorbunova, D.O. Egorova, M.G. Pervova, T.D. Kyrianova, V.A. Demakov, V.I. Saloutin, O.N. Chupakhin // *J. Hazard. Mater.* – 2021. – Vol. 409. – P. 124471. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124471

34. Bioremediation of hexachlorocyclohexane-contaminated soil by the new *Rhodococcus wratislaviensis* strain Ch628 / D.O. Egorova, S.A. Buzmakov, E.A. Nazarova, D.N. Andreev, V.A. Demakov, E.G. Plotnikova // Water Air Soil Pollut. – 2017. – Vol. 228. – P. 183–199. DOI: 10.1007/s11270-017-3344-2
35. Сравнительная оценка органических удобрений на основе побочных продуктов животноводства при различных способах их переработки / В.Г. Тюрин, К.Н. Бирюков, Г.А. Мысова, Н.Н. Потемкина, О.И. Кошиш, А.Ю. Сахаров, П.С. Коваленко // Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. – 2025. – № 1 (53). – С. 117–124. DOI: 10.36871/vet.san.hyg.ecol.202501015
36. Mthembu T.P., Zishiri O.T., El Zowalaty M.E. Molecular detection of multidrug-resistant *Salmonella* isolated from livestock production systems in South Africa // Infect. Drug Resist. – 2019. – Vol. 12. – P. 3537–3548. DOI: 10.2147/IDR.S211618
37. Life on the outside: Role of biofilms in environmental persistence of Shiga-toxin producing *Escherichia coli* / P. Vogeleer, Y.D. Tremblay, A.A. Mafu, M. Jacques, J. Harel // Front. Microbiol. – 2014. – Vol. 5. – P. 317. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00317
38. Макарова М.А. Современное представление о диареогенных *Escherichia coli* – возбудителях острых кишечных инфекций // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. – 2023. – Т. 100, № 4. – С. 333–344. DOI: 10.36233/0372-9311-410
39. Развитие методологии анализа риска здоровью в задачах государственного управления санитарно-эпидемиологическим благополучием населения / Н.В. Зайцева, Г.Г. Онищенко, И.В. Май, П.З. Шур // Анализ риска здоровью. – 2022. – № 3. – С. 4–20. DOI: 10.21668/health.risk/2022.3.01

Микробные и химические риски использования органических удобрений на основе побочных продуктов животноводства / М.В. Кузнецова, Д.О. Егорова, Д.А. Кочергина, Т.Д. Кирьянова, И.Н. Жданова, Д.С. Фомин, Э.С. Горовиц // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 4. – С. 89–102. DOI: 10.21668/health.risk/2025.4.09

UDC 614.76; 631.86

DOI: 10.21668/health.risk/2025.4.09.eng

Read online 

Research article

MICROBIAL AND CHEMICAL RISKS OF ORGANIC FERTILIZERS BASED ON BY-PRODUCTS OF LIVESTOCK FARMING

**M.V. Kuznetsova^{1,2}, D.O. Egorova¹, D.A. Kochergina¹, T.D. Kiryanova¹,
I.N. Zhdanova³, D.S. Fomin³, E.S. Gorovitz²**

¹Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of Ural Branch of Russian Academy of Sciences – affiliation of Perm Federal Research Centre of Ural Branch of RAS, 13 Goleva Str., Perm, 614081, Russian Federation

²Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner, 26 Petropavlovskaya Str., Perm, 614990, Russian Federation

³Perm Research Institute of Agriculture – branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 12 Kul'tury Str., Lobanovo village, Perm Krai, Russian Federation

Agro-industrial complexes are a major source of environmental pollution. Organic fertilizers based on by-products of livestock farming may contain pathogenic microorganisms, residual concentrations of antibiotics, vaccines, heavy metals, pesticides and, getting into the soil, cause their microbial and chemical pollution.

© Kuznetsova M.V., Egorova D.O., Kochergina D.A., Kiryanova T.D., Zhdanova I.N., Fomin D.S., Gorovitz E.S., 2025

Marina V. Kuznetsova – Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Researcher of the Laboratory for Molecular Biotechnology; Professor of Microbiology and Virology Department (e-mail: mar@iegm.ru; tel.: +7 (342) 212-44-76; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2448-4823>).

Darya O. Egorova – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Scientific Affairs (e-mail: daryao@rambler.ru; tel.: +7 (342) 280-77-00; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8018-4687>).

Darja A. Kochergina – Laboratory Assistant of the Laboratory for Molecular Biotechnology (e-mail: kocdas@yandex.ru; tel.: +7 (342) 212-44-76; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8630-3197>).

Tatyana D. Kiryanova – Laboratory Assistant of the Laboratory for Molecular Immunology (e-mail: kitadi2101@gmail.com; tel.: +7 (342) 280-75-60; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3161-6444>).

Irina N. Zhdanova – Candidate of Veterinary Sciences, Senior Researcher of the Laboratory for Biologically Active Feeds (e-mail: saratov_perm@mail.ru; tel.: +7 (904) 848-16-44; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0260-6917>).

Denis S. Fomin – Candidate of Agricultural Sciences, Head of the Laboratory for Precision Technologies in Agriculture (e-mail: avkilonag@mail.ru; tel.: +7 (342) 297-62-40; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8261-7191>).

Eduard S. Gorovitz – Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of Microbiology and Virology Department (e-mail: eduard.gorovitz@mail.ru; tel.: +7 (342) 36-44-85; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4320-8672>).

The aim of this study was to assess health risks based on analyzing microbial and chemical pollution due to by-products of livestock farming with different storage duration and conditions.

*Our research objects were represented by samples of organic livestock wastes that differed per storage duration and conditions (non-composted and composted); they were taken at three large agro-industrial complexes in the Perm region. Strains of *Escherichia coli* were isolated from the wastes, in which the pathogenicity genes of diarrheagenic *E. coli* were detected. Concentrations of major pollutants posing health risks were determined in livestock farming by-products, including toxic substances (lead, cadmium, copper, manganese, magnesium, zinc, cobalt, iron), pesticides (gamma isomer of hexachlorocyclohexane – HCH, dichlorodiphenyltrichloroethane – DDT), and polychlorinated biphenyls (PCBs). Health risks were assessed.*

*Representatives of the *Salmonella* genus and opportunistic enterobacteria were shown to be able to survive in wastes for one month. In addition, levels of heavy metals in some samples were higher than the maximum allowable concentration (MAC) for soils. The sanitary indicators of fertilizers (by-products with a one-year storage period) did not exceed the safe standards; the samples did not contain diarrheagenic *E. coli* strains, organochlorine pesticides or polychlorinated biphenyls. The indicators characterizing the risk of prevalence of multiple antibiotic resistance and hazard indices of heavy metals were within permissible limits. By-products of livestock farming with a one-year storage period are safe in microbial and chemical terms and can be further used as a fertilizer.*

Keywords: *livestock farming by-products, environmental pollution, human health risks, microbial contamination, *Escherichia coli*, heavy metals, pesticides, polychlorinated biphenyls.*

References

1. Milkereit J., Geisseler D., Lazicki P., Settles M.L., Durbin-Johnson B.P., Hodson A. Interactions between nitrogen availability, bacterial communities, and nematode indicators of soil food web function in response to organic amendments. *Appl. Soil Ecol.*, 2021, vol. 157, no. 7, pp. 103767. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103767
2. Francioli D., Schulz E., Lentendu G., Wubet T., Buscot, F., Reitz T. Mineral vs. organic amendments: microbial community structure, activity and abundance of agriculturally relevant microbes are driven by long-term fertilization strategies. *Front. Microbiol.*, 2016, vol. 7, pp. 1446. DOI: 10.3389/fmicb.2016.01446
3. Goss M.J., Tubeileh A., Goorahoo D. A review of the use of organic amendments and the risk to human health. *Advances in Agronomy*, 2013, vol. 120, pp. 275–379. DOI: 10.1016/B978-0-12-407686-0.00005-1
4. Onishchenko G.G., Zaitseva N.V., Popova A.Yu., May I.V., Ustinova O.Yu., Trusov P.V., Hao L.T.H., Kleyn S.V. [et al.]. *Analiz risika zdorov'yu v strategii gosudarstvennogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya* [Health Risk Analysis in the Strategy of State Socio-Economic Development]: in 2 vol., 2nd ed., revised and enlarged. In: G.G. Onishchenko, N.V. Zaitseva eds. Moscow; Perm, PNRPU Publ., 2024 (in Russian).
5. Van Boeckel T.P., Pires J., Silvester R., Zhao C., Song J., Criscuolo N.G., Gilbert M., Bonhoeffer S., Laxminarayan R. Global Trends in Antimicrobial Resistance in Animals in Low- and Middle-Income Countries. *Science*, 2019, vol. 365, no. 6459, pp. eaaw1944. DOI: 10.1126/science.aaw1944
6. Ardakani Z., Canali M., Aragrande M., Tomassone L., Simoes M., Balzani A., Beber C.L. Evaluating the contribution of antimicrobial use in farmed animals to global antimicrobial resistance in humans. *One Health*, 2023, vol. 17, pp. 100647. DOI: 10.1016/j.onehlt.2023.100647
7. Salam A., Al-Amin Y., Salam M.T., Pawar J.S., Akhter N., Rabaan A.A., Alqumber M.A.A. Antimicrobial Resistance: A Growing Serious Threat for Global Public Health. *Healthcare (Basel)*, 2023, vol. 11, no. 13, pp. 1946. DOI: 10.3390/healthcare11131946
8. Heredia N., García S. Animals as sources of food-borne pathogens: A review. *Anim. Nutr.*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 250–255. DOI: 10.1016/j.aninu.2018.04.006
9. Bentum K.E., Kuufire E., Nyarku R., Osei V., Price S., Bourassa D., Temesgen S., Jackson C.R., Woubit A. Salmonellosis in Cattle: Sources and Risk of Infection, Control, and Prevention. *Zoonotic Dis.*, 2025, vol. 5, no. 1, pp. 4. DOI: 10.3390/zoonoticdis5010004
10. Litt P.K., Omar A.N., Gartley S., Kelly A., Ramos T., Nyarko E., de Souza T.R., Jay-Russell M. [et al.]. Prevalence of Shiga-Toxigenic *Escherichia coli* in Bovine Manure in the Mid-Atlantic Region of the United States. *Microorganisms*, 2025, vol. 13, no. 2, pp. 419. DOI: 10.3390/microorganisms13020419
11. Rashid A., Schutte B.J., Ulery A., Deyholos M.K., Sanogo S., Lehnhoff E.A., Beck L. Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy*, 2023, vol. 13, no. 6, pp. 1521. DOI: 10.3390/agronomy13061521
12. Ke X., Gui S., Huang H., Zhang H., Wang C., Guo W. Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China. *Chemosphere*, 2017, vol. 175, pp. 473–481. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.02.029
13. More S., Dhakate R. Geogenic and anthropogenic sources of heavy metals in soil: An ecological and health risk assessment in the granitic terrain of South India. *Catena*, 2025, vol. 254, pp. 108960. DOI: 10.1016/j.catena.2025.108960
14. Hao X., Liu K., Zhu L., Rong L., Jiang D., Bai L. Migration and risk assessment of heavy metals from swine manure in an organic fertilizer – soil – ryegrass – rex rabbit system: Based on field trials. *Sci. Total Environ.*, 2025, vol. 959, pp. 178332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.178332
15. Wei M., Pan A., Ma R., Wang H. Migration characteristics and human health risk assessment of selenium and heavy metals in rhizosphere soil-crop system in high geological background area of southern Qinling Mountains: A case study of Shiquan County, Shaanxi, China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2025, vol. 294, pp. 118013. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2025.118013
16. Ejaz U., Khan S.M., Shah S.F.A., Khalid N., Jehangir S., Rizvi Z.F., Svenning J.-C. Integrative data-driven analytics for assessing ecological and human health risks of soil heavy metal contamination. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2025, vol. 17, pp. 100596. DOI: 10.1016/j.hazadv.2025.100596

17. Wang X., Li X., Yan X., Tu C., Yu Z. Environmental risks for application of iron and steel slags in soils in China: A review. *Pedosphere*, 2021, vol. 31, no. 1, pp. 28–42. DOI: 10.1016/S1002-0160(20)60058-3
18. Zhang L., Xue W., Sun H., Sun Q., Hu Y., Wu R., Du Y., Liu S., Zou G. Heavy metal(loid)s accumulation and human health risk assessment in wheat after long-term application of various urban and rural organic fertilizers. *Sci. Total Environ.*, 2025, vol. 961, pp. 178389. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178389
19. Wu S., Li K., Diao T., Sun Y., Sun T., Wang C. Influence of continuous fertilization on heavy metals accumulation and microorganism communities in greenhouse soils under 22 years of long-term manure organic fertilizer experiment. *Sci. Total Environ.*, 2025, vol. 959, pp. 178294. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.178294
20. Ma Y., Yun X., Ruan Z., Lu C., Shi Y., Qin Q., Men Z., Zou D. [et al.]. Review of hexachlorocyclohexane (HCH) and dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) contamination in Chinese soils. *Sci. Total Environ.*, 2020, vol. 749, pp. 141212. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141212
21. Seo S.-H., Xia T., Islam M.K., Batterman S. Polychlorinated naphthalenes (PCNs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in surface soils and street dusts in Detroit, Michigan. *Sci. Total Environ.*, 2025, vol. 964, pp. 178582. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178582
22. Fang S., Cui Q., Dai X. Understanding urbanization development process and the associated PCBs concentration in urban soils – A genetic algorithm-based urbanization index approach. *J. Hazard. Mater.*, 2025, vol. 489, pp. 137725. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.137725
23. Lacomba I., Palomares-Bolaños J., Juan-García A., López A., Olivero-Verbel J., Caballero-Gallardo K., Coscollà C., Juan C. Levels and risk assessment of dl-PCBs and dioxins in soils surrounded by cement plants from industrial areas of Colombia and Spain. *Emerging Contaminants*, 2025, vol. 11, no. 1, pp. 100427. DOI: 10.1016/j.emcon.2024.100427
24. Shen H., Starr J., Han J., Zhang L., Lu D., Guan R., Xu X., Wang X. [et al.]. The bioaccessibility of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans (PCDD/Fs) in cooked plant and animal origin foods. *Environ. Int.*, 2016, vol. 94, pp. 33–42. DOI: 10.1016/j.envint.2016.05.003
25. Lallas P.L. The Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. *American Journal of International Law*, 2001, vol. 95, no. 3, pp. 692–708. DOI: 10.2307/2668517
26. Warenik-Bany M., Strucinski P., Piskorska-Pliszczynska J. Dioxins and PCBs in game animals: Interspecies comparison and related consumer exposure. *Environ. Int.*, 2016, vol. 89–90, pp. 21–29. DOI: 10.1016/j.envint.2016.01.007
27. Pietron W.J., Warenik-Bany M. Terrestrial animal livers as a source of PCDD/Fs, PCBs and PBDEs in the diet. *Sci. Total Environ.*, 2023, vol. 867, pp. 161508. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161508
28. Trukhin A.M., Boyarova M.D. Organochlorine pesticides (HCH and DDT) in blubber of spotted seals (*Phoca largha*) from the western Sea of Japan. *Mar. Pollut. Bull.*, 2020, vol. 150, pp. 110738. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110738
29. Heijnen L., Medema G. Quantitative detection of *E. coli*, *E. coli* O157 and other Shiga toxin producing *E. coli* in water samples using a culture method combined with real-time PCR. *J. Water Health*, 2006, vol. 4, no. 4, pp. 487–498. DOI: 10.2166/wh.2006.0032
30. Christopher A.F., Hora S., Ali Z. Investigation of plasmid profile antibiotic susceptibility pattern multiple antibiotic resistance index calculation of *Escherichia coli* isolates obtained from different human clinical specimens at tertiary care hospital in Bareilly-India. *ATMPH*, 2013, vol. 6, pp. 285–289. DOI: 10.4103/1755-6783.120985
31. Chapman T.A., Wu X.-Y., Barchia I., Bettelheim K.A., Driesen S., Trott D., Wilson M., Chin J.J.-C. Comparison of virulence gene profiles of *Escherichia coli* strains isolated from healthy and diarrheic swine. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2006, vol. 72, no. 7, pp. 4782–4795. DOI: 10.1128/AEM.02885-05
32. Caine L.-A., Nwodo U.U., Okoh A.I., Ndip R.N., Green E. Occurrence of virulence genes associated with diarrheagenic *Escherichia coli* isolated from raw cow's milk from two commercial dairy farms in the Eastern Cape Province, South Africa. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2014, vol. 11, no. 11, pp. 11950–11963. DOI: 10.3390/ijerph111111950
33. Gorbunova T.I., Egorova D.O., Pervova M.G., Kyrianova T.D., Demakov V.A., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. Biodegradation of trichlorobiphenyls and their hydroxylated derivatives by *Rhodococcus*-strains. *J. Hazard. Mater.*, 2021, vol. 409, pp. 124471. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124471
34. Egorova D.O., Buzmakov S.A., Nazarova E.A., Andreev D.N., Demakov V.A., Plotnikova E.G. Bioremediation of hexachlorocyclohexane-contaminated soil by the new *Rhodococcus wratislaviensis* strain Ch628. *Water Air Soil Pollut.*, 2017, vol. 228, pp. 183–199. DOI: 10.1007/s11270-017-3344-2
35. Tyurin V.G., Biryukov K.N., Mysova G.A., Potemkina N.N., Kochish O.I., Sakharov A.Yu., Kovalenko P.S. Comparative assessment of organic fertilizers based on animal by-products using various methods of their processing. *Problemy veterinarnoi sanitarii, gигиени и экологии*, 2025, no. 1 (53), pp. 117–124. DOI: 10.36871/vet.san.hyg.ecol.202501015 (in Russian).
36. Mthembu T.P., Zishiri O.T., El Zowalaty M.E. Molecular detection of multidrug-resistant *Salmonella* isolated from livestock production systems in South Africa. *Infect. Drug Resist.*, 2019, vol. 12, pp. 3537–3548. DOI: 10.2147/IDR.S211618
37. Vogeeler P., Tremblay Y.D., Mafu A.A., Jacques M., Harel J. Life on the outside: Role of biofilms in environmental persistence of Shiga-toxin producing *Escherichia coli*. *Front. Microbiol.*, 2014, vol. 5, pp. 317. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00317
38. Makarova M.A. A modern view of diarrheagenic *Escherichia coli* – a causative agent of acute intestinal infections. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*, 2023, vol. 100, no. 4, pp. 333–344. DOI: 10.36233/0372-9311-410
39. Zaitseva N.V., Onishchenko G.G., May I.V., Shur P.Z. Development of methodology for health risk assessment within the public administration of population sanitary and epidemiological welfare. *Health Risk Analysis*, 2022, no. 3, pp. 4–20. DOI: 10.21668/health.risk/2022.3.01.eng

Kuznetsova M.V., Egorova D.O., Kochergina D.A., Kiryanova T.D., Zhdanova I.N., Fomin D.S., Gorovitz E.S. Microbial and chemical risks of organic fertilizers based on by-products of livestock farming. *Health Risk Analysis*, 2025, no. 4, pp. 89–102. DOI: 10.21668/health.risk/2025.4.09.eng

Получена: 10.06.2025

Одобрена: 01.12.2025

Принята к публикации: 26.12.2025