

На правах рукописи



Шерстобитов Данил Николаевич

**МЕТОД ЛИКВИДАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ БИОТОПА,
СФОРМИРОВАННОГО НАКОПИТЕЛЯМИ ОТХОДОВ
СПИРТОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

1.5.15. Экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный консультант:

Ермаков Василий Васильевич

доктор технических наук, доцент кафедры
«Химическая технология и промышленная
экология» ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

Ашихмина Тамара Яковлевна

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Фундаментальная химия
и методика обучения химии» ФГБОУ ВО
«Вятский государственный университет»

Калмыкова Ольга Геннадьевна

кандидат биологических наук, старший научный
сотрудник ФГБУН «Оренбургский федеральный
исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет», г. Пермь

Защита состоится «13» октября 2026 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.05 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, Главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте: <https://24237705.samgtu.ru/spisok-dissertatsii>

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тупицына Ольга Владимировна

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Источниками эмиссии поллютантов в окружающую среду могут являться отходы пищевой промышленности. При объеме производства этилового спирта в России 850 тыс. м³ в год объем отхода послеспиртовой барды (ПСБ) составляет 11 млн м³ в год.

Значительная часть ПСБ до данного времени размещалась в неорганизованных накопителях. Это привело к загрязнению почвенного покрова и грунтов, оказывая негативное воздействие на биотопы.

Процессы, протекающие в массиве отходов, способствуют образованию токсичных веществ, патогенной микрофлоры и неприятного запаха. Требуется разработка специализированных методов утилизации, учитывающих состав отходов и состояние объекта размещения.

Степень разработанности темы исследования. Накопители неорганизованного размещения ПСБ, сформированные до 2010-х гг., не рекультивированы и негативно влияют на здоровье населения, биотопы и окружающую среду в целом.

Большой вклад в проблему изучения отходов спиртовой промышленности и разработку методов утилизации ПСБ внесли отечественные ученые: А.Ю. Винаров, А.Г. Гурин, С.Х. Дзанагов, Р.Я. Дыганова, А.Е. Кузнецов, А.А. Кухаренко, Л.В. Римарева, Е.М. Серба и др.

Для утилизации отходов ПСБ, имеющих в своем составе значительное количество органических соединений, рекомендовано компостирование как метод утилизации, основанный на минерализации органической составляющей и способный обезвредить отходы, содержащие патогенные микроорганизмы.

Объект исследования. Биотоп, загрязненный долговременным и неорганизованным размещением отходов ПСБ.

Предмет исследования. Процессы трансформации загрязнений биотопа, сформированного накопителями отходов спиртовой промышленности.

Цель исследования. Разработка метода ликвидации загрязнений биотопа, сформированных отходами ПСБ, с использованием биотермического компостирования.

Задачи исследования:

1. Комплексная оценка состояния биотопа, нарушенного размещением отходов спиртовой промышленности, и обоснование технологии его восстановления.
2. Изучение свойств отходов ПСБ в условиях несанкционированного хранения при контакте с окружающей средой.
3. Исследование температурно-временных и структурно-временных характеристик процесса компостирования для различных соотношений наполнителей и добавок при подборе наиболее эффективных вариантов утилизации отходов ПСБ в лабораторных условиях.
4. Разработка технологии и проведение промышленного эксперимента по утилизации отходов ПСБ с использованием полученных зависимостей изменения температурно-временных и структурно-временных характеристик.

5. Разработка критерия оценки степени восстановления нарушенных биотопов после выполнения рекультивационных работ на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Научная новизна:

1. Впервые проведена комплексная оценка воздействия отходов спиртовой промышленности на биотопы на основе особенностей флоры, микробиоты и химического состава грунтов и отходов в местах их локализации.

2. Выявлены неоднородности и фрагменты в массивах отхода, которые классифицированы с использованием метода анализа многомерных данных и дифференцированы на основе индекса потенциала нитрификации.

3. Изучена динамика химических превращений органических веществ при компостировании ПСБ с формированием набора структурно- и температурно-временных характеристик процесса.

4. Разработана технология ускоренной («интенсивной») биотермической утилизации отходов ПСБ и восстановления нарушенного биотопа с частичной рециклизацией продукта утилизации.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

1. Предложенная методика оценки состояния биотопа, нарушенного размещением отходов спиртовой промышленности, позволяет выделить неоднородные фрагменты, требующие применения различных способов обращения.

2. Выявленные факторы, влияющие на скорость разложения отходов ПСБ, позволяют обосновать решения по реализации технологии утилизации отхода.

3. Разработана и внедрена технология ускоренной («интенсивной») биотермической утилизации отходов ПСБ для восстановления нарушенного биотопа с использованием продукта утилизации отходов спиртовой промышленности длительного пребывания в окружающей среде.

4. Материалы и результаты диссертации используются в образовательном процессе ФГБОУ ВО «СамГТУ» при изучении дисциплин «Методы исследования и оценки экологической опасности объектов техносферы» и «Основы планирования и математической обработки результатов эксперимента».

5. Результаты исследования использованы Министерством лесного хозяйства, охраны окружающей среды и природопользования Самарской области в 2024 г. при выполнении работ по рекультивации территорий площадью 42,4421 га в районе сельского поселения Рождествено Самарской области, техногенно деградированных несанкционированным размещением спиртовой барды. Работы выполнены по заказу Министерства лесного хозяйства, охраны окружающей среды и природопользования Самарской области, что подтверждается актом внедрения результатов научно-исследовательских разработок.

Методология и методы исследования. Диссертационное исследование базируется на общепринятых методах теоретического и экспериментального физико-химического исследования, включающих аттестованные методики для определения состава отходов, газовой хроматографии для выявления динамики

разложения и методах многомерного анализа данных для обработки результатов химического анализа проб почв, грунтов и отходов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты комплексного исследования биотопа, нарушенного размещением отходов ПСБ в открытых накопителях при контакте с окружающей средой различной длительности, включающие результаты химического анализа органической и неорганической части отходов, для обоснования способа утилизации.

2. Статистическая обработка результатов химического анализа образцов отходов и загрязненных компонентов окружающей среды, а также использование индекса потенциала нитрификации для определения границ и объема загрязненного биотопа.

3. Обоснование применения метода аэробного компостирования для утилизации отходов ПСБ в смеси: послеспиртовая барда – древесные опилки – рециркуляционный компост – в лабораторных условиях.

4. Результаты химического анализа компостируемой массы и продукта утилизации, а также исследования микробиологического консорциума в процессе утилизации.

5. Метод утилизации застарелых отходов ПСБ с рекомендациями по использованию в зависимости от их компонентного состава и длительности размещения на основе проведенных лабораторных исследований, а также промышленного апробирования на площадке компостирования.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается результатами лабораторных испытаний, выполненных в трех независимых лабораториях, а также результатом промышленного внедрения технологии аэробного компостирования отходов застарелой ПСБ.

Апробация результатов работы. Материалы диссертации представлены на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (г. Москва, 2022–2025 гг.), XIX Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.), VI Всероссийском научно-общественном форуме «Экологический форсайт» (г. Саратов, 2024 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Ашировские чтения» (г. Самара, 2024 г.), Международной научно-практической конференции «Почва и отходы. Актуальные проблемы формирования природно-антропогенных ландшафтов» (г. Москва, 2025 г.).

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту результаты работы получены автором лично. Лабораторные и промышленные испытания выполнены при участии автора во время работы в Научно-аналитическом центре промышленной экологии ФГБОУ ВО «СамГТУ» в должности инженера. Основная часть диссертационных исследований проведена в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Рекультивация территорий в районе сельского поселения Рождествено Самарской области, техногенно деградированных несанкционированным размещением спиртовой

барды (в том числе проектирование)» (Государственный контракт от 23.07.2019 № 0142200001319008883_247182).

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности 1.5.15. Экология, пункту 5 «Разработка экологически безопасных технологий и материалов, процессов подготовки и повышения качества продукции, утилизации промышленных отходов» и пункту 7 «Эколого-методические основы системы сохранения природных экосистем, системы защиты биотопов от деградации и загрязнения поллютантами».

Публикации по результатам исследований. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 4 статьи напечатаны в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 159 страницах машинописного текста, включает 38 рисунков, 20 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 183 наименований, в том числе 116 – на иностранном языке, и 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, представлена степень разработанности темы исследования, определены объект, предмет, цель и задачи исследования. Представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость исследования.

В **первой главе** на основе литературного анализа определены источники образования и свойства отходов ПСБ. Приведено описание известных накопителей отходов ПСБ на территории Российской Федерации с оценкой их площади и времени хранения. Рассмотрены способы утилизации отходов свежей ПСБ на производстве.

В работах авторов А.Л. Андросова, И.Н. Кузнецова, S.L. Lodge и А.Е. Кузнецова описано использование свежей ПСБ в качестве кормовой добавки. Авторами К.А. Nelson, К.М. Шиловой, А.Н. Гуриным, С.Х. Дзанаговым предложено внесение данного отхода в качестве удобрения.

В работах M.S. Finstein, S.P. Wang, B.B. Миронова и К.Л. Чертеса изучены методы аэробного компостирования для различных органоминеральных отходов, включая осадки сточных вод и ТКО. Проведена оценка их эффективности в целях обезвреживания отходов застарелой ПСБ.

Рассмотрены аэробные и анаэробные процессы, протекающие при длительном хранении в контакте с окружающей средой в массивах отходов спиртового производства.

Во **второй главе** проведена комплексная оценка состояния биотопов в границах размещения отходов ПСБ в непосредственной близости к сельскому поселению Рождествено Самарской области.

По данным ДЗЗ (рис. 1) определен основной ареал загрязнения, а также районы с угнетенной растительностью.

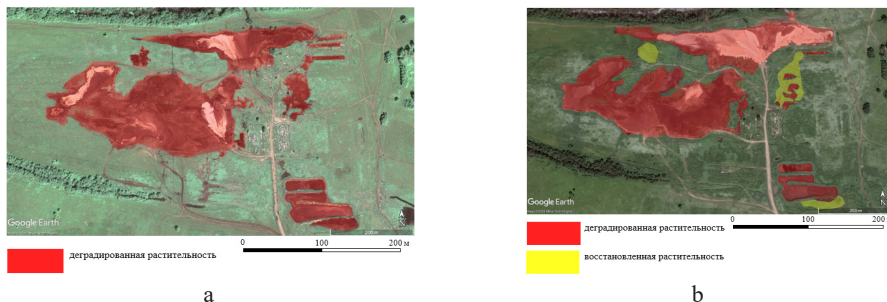


Рисунок 1. Космические снимки участка размещения ПСБ (источник – Google Earth Pro): а – 06.09.2009, б – 02.07.2011

Приведены результаты полевого обследования накопителей отходов ПСБ площадью 42,4421 га с выделением 3 наиболее загрязненных участков: 4-секционного бардохранилища, 2 периметрально обвалованных накопителей.

На изучаемой территории выделяется несколько очагов наиболее выраженной деградации растительности. Последствия размещения незначительного количества ПСБ могут быть устранены при протекании естественных процессов биоремедиации с восстановлением растительности. Между тем на объекте размещено значительное количество отходов, в которых не протекают процессы деструкции, что связано со значительной толщиной массива отходов и затрудненными диффузионными процессами.

В рамках полевых работ было выполнено геоботаническое обследование. В местах минерализованной части накопителей представлена только рудеральная растительность – полынь *Artemisia* sp., конопля *Cannabis ruderalis*, чертополохи *Carduus* sp., бодяк *Cirsium* sp., лопух паутинистый *Arctium tomentosum* и др.; на отвалах грунта – чертополох *Carduus* sp., бодяк *Cirsium* sp., одуванчик лекарственный *Taraxacum officinale*.

Проведен отбор проб почвы, грунтов, грунтов из скважин и отходов. Общее количество отобранных проб – 335 шт.

Выявлено почти полное отсутствие загрязнения биотопа тяжелыми металлами, нефтепродуктами, цианидами. Однако наблюдается значительное превышение фоновых концентраций соединений азота, органического вещества, а также высокая кислотность. Зафиксировано незначительное превышение над фоновыми концентрациями по никелю, фенолу и сухому остатку водной вытяжки, сере и сульфатам.

Для выявления образцов, которые относятся к грунтам или отходам применен анализ многомерных данных методом главных компонент (МГК). Исходные данные представлены матрицей (X) из 335 образцов и 24 химических показателей. Разложение матрицы X при использовании МГК представлено в виде суммы произведения матриц T (счетов) и P (нагрузок) и матрицы E:

$$X = TP^T + E. \quad (1)$$

При совместном рассмотрении графиков счетов (рис. 2) и нагрузок (рис. 3) по всем показателям и образцам обозначены почвы (-P), отходы (-O), грунты обвалования (-G) и скважинные грунты (1-5, 1 – номер скважины, 5 – глубина отбора 5 м) и соотнесены со свойствами материалов.

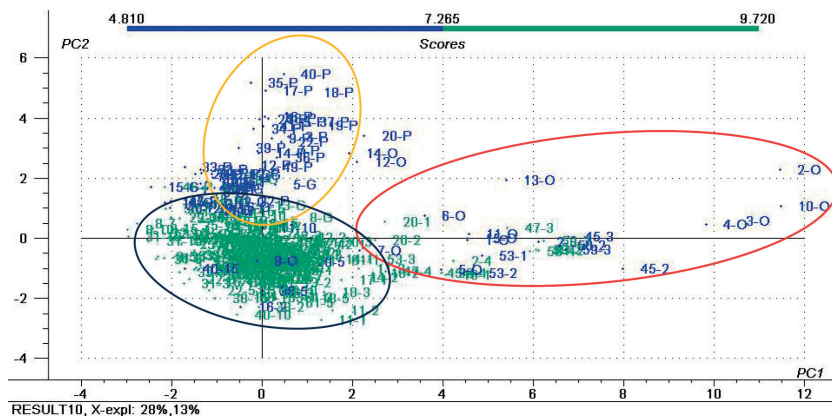


Рисунок 2. График счетов 1-й и 2-й главных компонент с распределением образцов

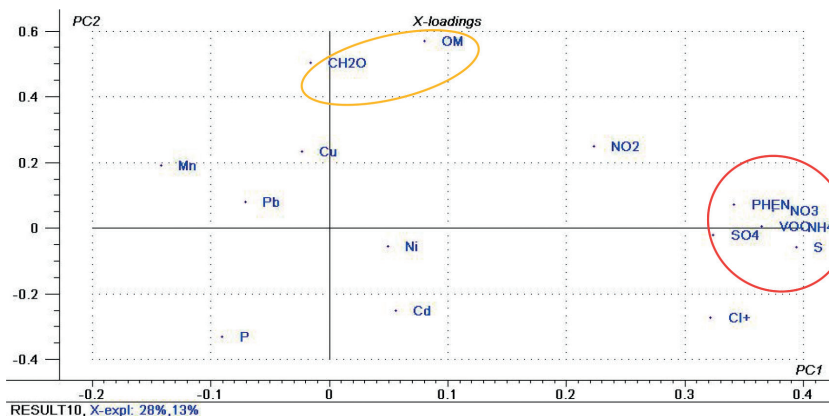


Рисунок 3. График нагрузок 1-й и 2-й главных компонент с определенными химическими показателями

Первая главная компонента определяется положительно весами концентраций фенолов (PHEN), сульфатов (SO₄), сухого остатка (VOC), серы (S), аммонийного (NH₄) и нитратного азота (NO₃). Такой состав характерен для отходов, отобранных непосредственно из накопителей с низкой степенью минерализации. Часть скважинных грунтов также можно отнести к отходам в связи с высокой концентрацией показателей загрязнения (область в правой части графика счетов).

К показателям, характеризующим почву, отнесены такие показатели, как формальдегид (CH_2O) и органическое вещество (ОМ).

Детально проведено моделирование состояния отходов ПСБ на основе показателей, определенных в грунтах из скважин. Количество проб – 255, показателей – 15. Графики счетов и нагрузок представлены на рис. 4 и 5.

Наиболее значимыми показателями скважинных грунтов являются нитратный азот (NO_3), аммонийный азот (NH_4), сухой остаток (VOC), фенолы (PHEN), сера (S), сульфаты (SO_4).

График счетов позволил выделить наиболее загрязненные грунты, схожие с характеристиками отходов. К таким пробам отнесены образцы в правой части графика счетов.

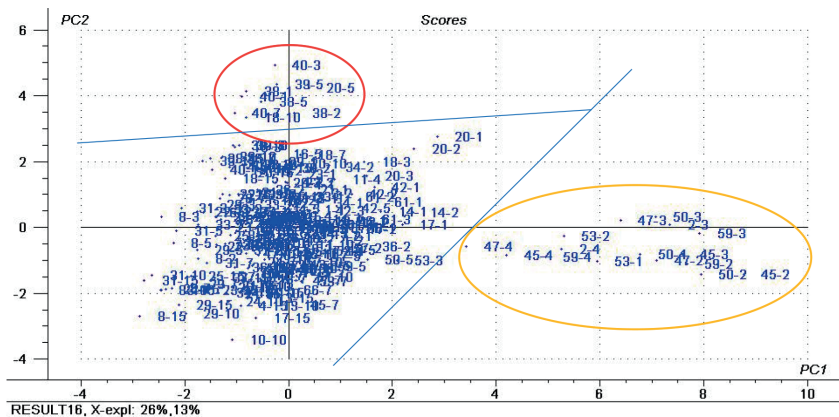


Рисунок 4. График счетов 1-й и 2-й главных компонент (скважинные грунты)

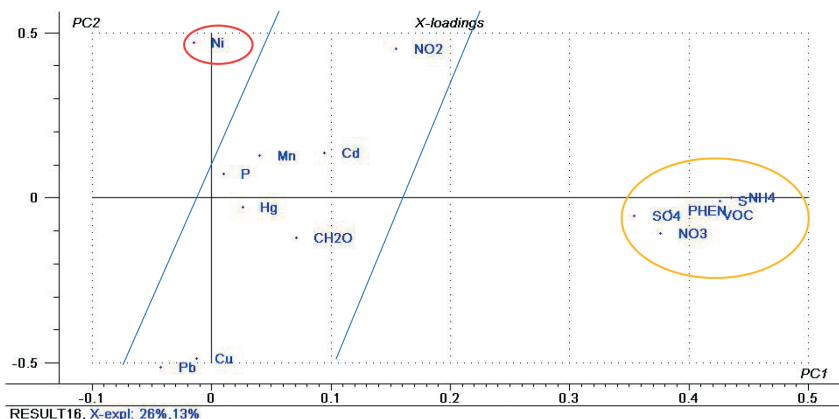


Рисунок 5. График нагрузок 1-й и 2-й главных компонент с определенными химическими показателями (скважинные грунты)

Применение МГК позволило определить степень нарушения биотопа, выделив участки минерализованной барды и застарелые отходы ПСБ, депонированные в анаэробных условиях.

Дополнительно отобраны пробы непосредственно из накопителей на глубину до 5 м, с шагом 1 м. Общее количество скважин – 50 шт. В пробах при выполнении КХА определены нитратный азот, нитритный азот, аммонийный азот и рН. Выбор указанных компонентов обусловлен химическими превращениями в процессе нитрификации.

Для оценки возможности протекания окислительных процессов при компостировании предложено использование косвенного показателя – индекса потенциала нитрификации, рассчитанного следующим образом:

$$N = \frac{(3 \times C_{NH_4 - N} + 1 \times C_{NO_2 - N})}{C_{NO_3 - N}}. \quad (2)$$

Согласно проведенным расчетам, определена классификация грунтов по загрязнению отходами ПСБ:

- сильнозагрязненные ($N > 25$);
- среднезагрязненные ($25 > N > 5$);
- слабозагрязненные ($N < 5$).

Применение индекса потенциала нитрификации позволило четко разграничить отходы и незагрязненные грунты в накопителях. Определена глубина проникновения отходов ПСБ на глубину до 5 м. Уточнен объем ПСБ на участках, который отражен в табл. 1.

Таблица 1

Расчет объема и массы отходов ПСБ

№ п/п	Участок	Площадь, м ²	Объем отходов ПСБ, м ³	Масса отходов ПСБ, т
1	МН (малый накопитель)	24 829	14 671	16 138,1
2	Южная секция БХ	3606	4609	5069,9
3	Средняя секция БХ	1723	1948	2142,8
4	Северная секция БХ	1861	1779	1956,9
5	Траншея восточнее БН	274,4	686	754,6
ИТОГО		32 293,4	23 693	26 062,3

В третьей главе представлены результаты лабораторного эксперимента по компостированию отходов ПСБ. Компостирование отходов осуществлялось внесением и без внесения биопрепарата на основе микроорганизмов родов *Ochrobactrum* sp. и *Acinetobacter* sp. в контейнерах объемом 50 л с предварительно установленными каналами аэрации. Схема лабораторной установки представлена на рис. 6.

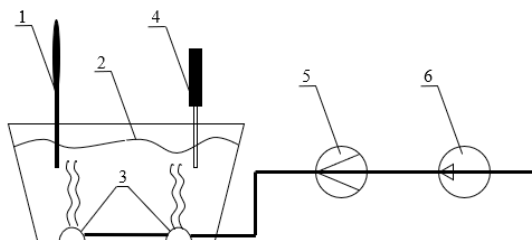


Рисунок 6. Внешний вид и принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – датчик влажности; 2 – компостируемая масса; 3 – каналы аэрации;
4 – термометр; 5 – расходомер; 6 – компрессор

Для эффективной аэрации в компостируемую массу был внесен порообразователь – древесные опилки. Для ускорения процесса компостирования также был внесен рециркуляционный компост на термофильной стадии, протекающей на 3–4-й неделе компостирования отходов ПСБ и древесных опилок, в соотношении 1:1.

Длительность эксперимента – 8 недель, общее количество образцов, содержащих различное количество отходов послеспиртовой барды (ПСБ), опилок (О) и рециркуляционного компоста (РК), – 8. Соотношение компонентов компостной массы представлено в табл. 2.

Таблица 2

Соотношение компонентов компостной массы

№ п/п	Отходы послеспиртовой барды, %	Опилки, %	Рециркуляционный компост, %
1. Без внесения биопрепарата			
1.1	75	25	0
1.2	50	50	–
1.3	50	25	25
1.4	33	33	33
2. С внесением биопрепарата			
2.1	75	25	0
2.2	50	50	–
2.3	50	25	25
2.4	33	33	33

Процесс компостирования контролировался при помощи проведения химического анализа проб компостируемой массы и измерения температуры еженедельно. В рамках эксперимента в отходах оценивалось содержание органического вещества, аммонийного, нитритного и нитратного азота.

В исходном отходе ПСБ были выделены микроорганизмы родов: *Acidothermus* sp., *Proteus* sp., *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Escherichia* sp., *Staphylococcus* sp. и *Enterobacter* sp. После применения биопрепарата были идентифицированы следующие рода микроорганизмов: *Ochrobactrum* sp., *Acinetobacter* sp., *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Escherichia* sp., *Staphylococcus* sp. и *Enterobacter* sp. Применение биопрепарата способствовало развитию существующих популяций микроорганизмов, а также интродукции новых видов, способствующих более эффективному разложению органических соединений и снижению концентрации неорганического азота при утилизации отходов застарелой ПСБ методом аэробного компостирования.

Температурно-временные характеристики, а также изменение концентрации органического вещества в процессе компостирования без внесения биопрепарата (1.1–1.4) и с внесением биопрепарата (2.1–2.4) представлены на рис. 7–10.

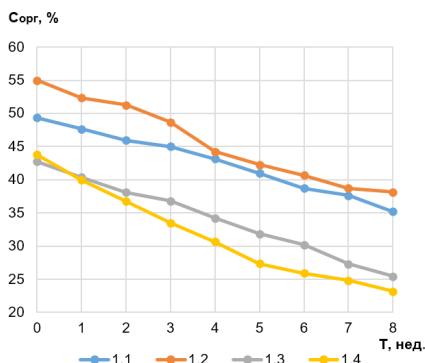


Рисунок 7. Изменение органического вещества при компостировании отходов ПСБ без внесения биопрепарата

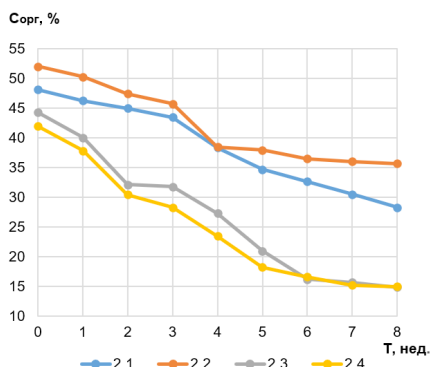


Рисунок 8. Изменение органического вещества при компостировании отходов ПСБ с внесением биопрепарата

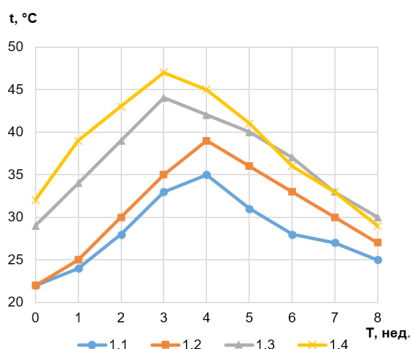


Рисунок 9. Температурно-временная характеристика компостирования отходов ПСБ без внесения биопрепарата

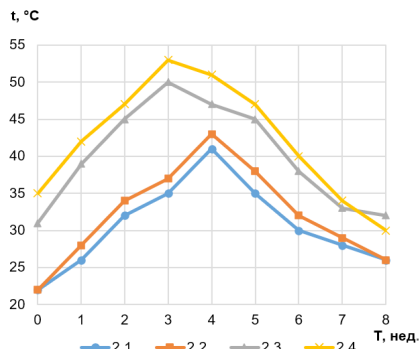


Рисунок 10. Температурно-временная характеристика компостирования отходов ПСБ с внесением биопрепарата

По результатам проведенного анализа был подобран режим с наибольшей интенсивностью процесса компостирования отходов ПСБ.

Соотношение компостируемой массы 33 % О, 33 % ПСБ, 33 % РК было выбрано для проведения эксперимента в промышленных условиях.

Четвертая глава. Для утилизации отходы ПСБ извлекались из накопителей экскаваторами. Компостирование проводилось в тентовых ангарах, возводимых на месте проведения рекультивационных работ. Согласно технологии, бурты компостируемой массы длиной 100 м формируются в виде пирамиды высотой 2 м и основанием 4,0 м.

Объемная доля застарелой ПСБ в первоначальной компостируемой массе составляет 30–35 %, «незрелого» (рециркуляционного) компоста – 30–35 %, древесных опилок – 30–35 %. Незрелый компост (1–1,5 недель компостирования) вносится в компостируемую массу для ускорения процесса. При термофильной стадии (55–80 °С) происходит изменение микробного сообщества, патогенные бактерии и грибы подавляются.

Длительность промышленного эксперимента – 3 недели. Для оценки эффективности обезвреживания предусматривался отбор проб. Было отобрано 5 образцов: 1-я проба – исходная барда; 2-я проба – компостная смесь; 3-я проба – смесь после 1 недели компостирования, 4-я проба – органоминеральный грунт после 2 недель компостирования, 5-я проба – органоминеральный грунт после 3 недель компостирования. Производился контроль температуры компостируемой массы и содержания органических и неорганических компонентов: влажность, органическое вещество, водородный показатель (рН), азот нитратный, нитритный и аммонийный. Кроме того, проводился анализ вытяжки из отходов ПСБ газохроматографическим методом (табл. 3).

Температурно-временные характеристики компостируемой массы представлены на рис. 11.

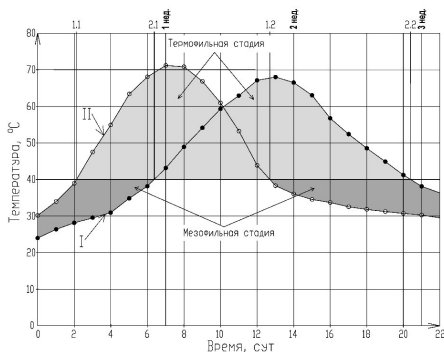


Рисунок 11. Температурно-временная характеристика компостируемой массы:

I – бурт 1 (без внесения рециркуляционного компоста); II – бурт 2 (с внесением рециркуляционного компоста); 1.1 – начало термофильной фазы бурта 2;

1.2 – окончание термофильной фазы бурта 2; 2.1 – начало термофильной фазы бурта 1; 2.2 – окончание термофильной фазы бурта 1

Внесение рециркуляционного компоста и древесных опилок способствовало более быстрому росту температуры компостируемой массы с сокращением продолжительности мезофильной стадии с 6 до 2 сут. Температура смеси выше 40 °С в буре № 2 сохранялась в течение 10 сут с максимумом в 71 °С на 7-е сут.

Хроматографически выявлены высокие концентрации токсичных органических веществ в исходном отходе ПСБ (проба № 1). С наибольшими концентрациями детектировались органические кислоты, сложные эфиры (этилдеcanoат) и высшие спирты (пропан-1-ол). Компостная смесь содержала более низкие концентрации изопропилового спирта и органических кислот. Наблюдалось отсутствие сложных эфиров в пробе. Такое снижение связано в первую очередь с разбавлением.

Таблица 3

**Результаты хроматографического анализа отходов ПСБ,
компостируемой массы и органоминерального грунта**

Компоненты	Концентрация анализируемых веществ в отобранных пробах, мг/кг				
	№ 1 Исходный отход	№ 2 Смешанный образец	№ 3 После 1 недели	№ 4 После 2 недель	№ 5 После 3 недель
Этаналь	29,20 ± 3,80	8,81 ± 1,32	6,00 ± 0,90	4,00 ± 0,60	4,99 ± 0,75
(2Е)-бут-2-эналь	20,07 ± 2,61	—*	—	—	—
Альдегиды	49,27	8,81	6,00	4,00	4,99
Пропан-2-он	5,47 ± 0,82	—	—	—	—
Кетоны	5,47	—	—	—	—
Этилформиат	—	—	—	—	—
Этилацетат	8,21 ± 1,23	—	—	—	—
Этиллактат	—	—	—	—	—
Изобутилацетат	—	—	—	—	—
Изоамилацетат	28,28 ± 3,68	—	—	—	—
Этилоктаноат	175,18 ± 22,77	—	—	—	—
Этилдеcanoат	2792,88 ± ± 363,07	—	—	—	—
Этиллаурат	1,82 ± 0,27	—	—	—	—
Сложные эфиры	3006,39	—	—	—	—
Пропан-1-ол	1688,87 ± ± 219,55	50,88 ± 6,61	—	—	—
Пропан-2-ол	9,12 ± 1,37	—	—	—	—

Компоненты	Концентрация анализируемых веществ в отобранных пробах, мг/кг				
	№ 1 Исходный отход	№ 2 Смешанный образец	№ 3 После 1 недели	№ 4 После 2 недель	№ 5 После 3 недель
Бутан-1-ол	16,42 ± 2,46	1,96 ± 0,29	—	—	—
2-Метилпропанол-1	—	—	—	—	—
Бутан-2-ол	23,72 ± 3,08	7,83 ± 1,17	—	—	—
3-метил-1-бутанол	—	—	—	—	—
Спирты	1738,14	60,66	—	—	—
Этановая кислота	13671,53 ± ± 1640,58	1808,13 ± ± 216,98	19,00 ± ± 2,28	18,01 ± ± 2,16	15,96 ± ± 1,92
Пропановая кислота	10352,19 ± ± 1242,26	2664,25 ± ± 319,71	25,00 ± ± 3,00	—	—
2-метилпропановая кислота	668,80 ± 80,26	299,40 ± 35,93	—	—	—
Бутановая кислота	16647,81 ± ± 1997,74	4647,52 ± ± 557,70	35,00 ± ± 4,20	11,00 ± 1,32	13,96 ± 1,68
3-метилбутановая кислота	1652,37 ± ± 198,28	713,27 ± 85,59	—	—	—
Пентановая кислота	4051,09 ± ± 486,13	1526,34 ± ± 183,16	15,00 ± ± 1,80	—	—
Кислоты	47043,80	11658,92	94,00	29,01	29,92
2-фенилэтанол	6,39 ± 0,96	—	—	—	—
Ароматические спирты	6,39	—	—	—	—

** Отсутствие детектируемых веществ.*

После одной недели компостирования в пробе полностью отсутствуют высшие и ароматические спирты, изобутановая и изовалериановая кислоты.

Через 2 недели в пробе обнаружено менее 0,1 % веществ по сравнению с содержанием в исходном отходе. За третью неделю содержание оставшихся этановой и бутановой кислот суммарно практически не изменилось.

Результаты химического анализа отходов ПСБ, компостируемой массы и органоминерального грунта представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты количественного химического анализа отходов ПСБ,
компостируемой массы и органоминерального грунта**

Показатели	Концентрация анализируемых веществ в отобранных пробах, мг/кг				
	№ 1 Исходный отход	№ 2 Смешанный образец	№ 3 После 1 недели	№ 4 После 2 недель	№ 5 После 3 недель
Влажность, %	76,58 ± 5,36	72,53 ± 5,08	47,23 ± 3,31	48,34 ± 3,38	42,86 ± 3,00
Органическое вещество, %	31,81 ± 0,80	26,32 ± 0,66	21,63 ± 0,54	11,09 ± 0,28	9,82 ± 0,25
Водородный показатель (рН), ед. рН	4,92 ± 0,10	5,37 ± 0,10	5,63 ± 0,10	6,01 ± 0,10	6,09 ± 0,10
Азот нитратный, мг/кг	2,56 ± 0,82	2,78 ± 0,89	24,92 ± 5,48	48,77 ± 10,73	51,21 ± 11,27
Азот нитритный, мг/кг	33,56 ± 13,42	29,63 ± 11,85	13,51 ± 5,40	1,95 ± 0,78	0,12 ± 0,05
Азот аммонийный, мг/кг	3865,2 ± ± 425,17	3240,4 ± ± 356,44	2984,2 ± ± 328,26	2812,8 ± ± 309,41	2731,4 ± ± 300,45

В процессе компостирования влажность со значения более 70 % в исходном отходе снизилась до 42,8–48,3 %. Отмечено снижение содержания органического вещества с 31,8 до 9,8 %. Наблюдалось повышение рН с 4,92 до 6,09. Отмечено протекание нитрификации со снижением концентраций аммонийного и нитритного азота и повышением содержания нитратного азота.

2-недельный цикл компостирования с применением ворошителя и непрерывной аэрации обусловлен снижением времени нахождения компостируемой массы в тентовых ангарах из-за значительного количества отходов, которые необходимо утилизировать в короткие сроки. После этого материал складировался для дозревания на открытую площадку. Дозревание позволило снизить содержание аммонийного азота на 25,8 % по сравнению с компостом после 2 недель компостирования.

Полученный органоминеральный грунт после завершения переработки размещен в выемках после извлечения отходов ПСБ.

Поверхность рекультивируемой территории после выполнения работ была покрыта биоматами, включающими семена многолетних трав. Окончание работ – 2024 г., в июне 2025 г. проведено повторное геоботаническое обследование.

В результате экспертирования выявлено 2 стадии сукцессии: группировки злаков(заявленных в вегетационных матах) и простые фитоценозы, представленные видами с высокой степенью толерантности: амброзия трехраздельная *Ambrosia trifida* L., бодяк полевой *Cirsium arvense* (L.) Scop., выюнок полевой *Convolvulus arvensis* L., спорыш птичий *Polygonum aviculare* L., конопля *Cannabis sativa* L., лебеда садовая *Atriplex nitens* Schkuhr, марь белая *Chenopodium album* L., марь сизая *Chenopodium glaucum* L.

Состав культур различен – от 30 % в районе злаковых группировок до 70 % в районе сорно-рудеральных фитоценозов.

Наличие простых сорно-рудеральных фитоценозов свидетельствует о пионерной стадии сукцессии. В дальнейшем происходит усложнение структуры и состава фитоценозов.

Для оценки изменения и восстановления растительного покрова выбраны космические снимки в наиболее активный вегетационный период – июнь 2022 г. и июль 2025 г. Методы ДЗЗ позволили оценить состояние растительного покрова до начала выполнения рекультивационных работ. Для выбранных снимков рассчитан NDVI (рис. 12).

Шкала измерения NDVI после обработки космических снимков в геоинформационной системе QGIS составила от $-0,1$ (вода) до $0,63$ (густая зеленая растительность). Средние значения NDVI на участке рекультивации в 2022 г. составили $0,34$ (15.06.2022) и $0,37$ (18.07.2022). После проведения рекультивационных работ – $0,47$ (08.06.2025) и $0,49$ (09.07.2025).

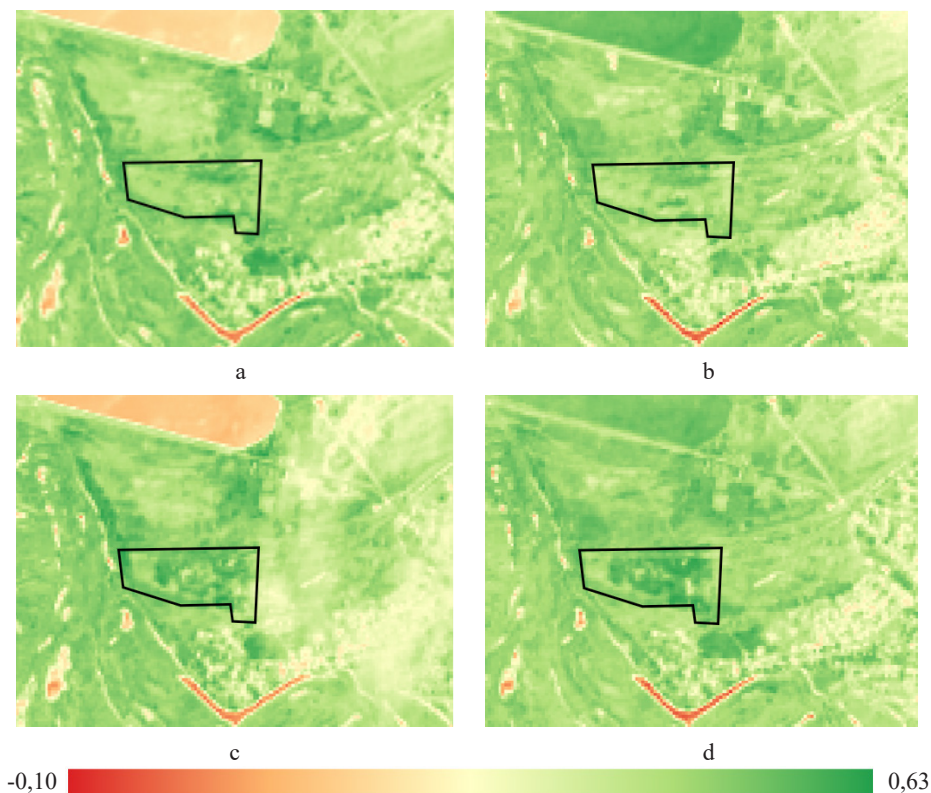


Рисунок 12. Космические снимки 2022 и 2025 гг., обработанные при помощи NDVI:
а – 15.06.2022; б – 18.07.2022, с – 08.06.2025, д – 09.07.2025

Увеличение значений NDVI с 2022 по 2025 г. составило 27,7 % в июне и 24,5 % в июле, что указывает на интенсивное развитие растительности. Для количественной оценки восстановления растительности после проведения рекультивационных работ был применен коэффициент восстановления растительности (K_v), который рассчитывается как отношение среднего значения NDVI на участке работ до и после выполнения работ по рекультивации к среднему значению NDVI на фоновом участке. Значения $K_v < 1$ свидетельствуют о неполном восстановлении, $K_v = 1$ – о полном восстановлении, $K_v > 1$ – о превышении фоновых показателей.

K_v увеличился с 0,83–0,86 в 2022 г. (снижение на 14–17 % относительно фона) до 1,11–1,12 в 2025 г. (превышение фона на 11–12 %), что свидетельствует об успешном восстановлении растительного покрова после проведения рекультивационных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Оценена площадь нарушенной территории (42,4421 га), проведен отбор проб почвы, грунтов и отходов в количестве 335 проб с изучением химического состава и объема депонированных отходов застарелой ПСБ с использованием анализа многомерных данных при помощи МГК. Изучены технологии утилизации органических отходов, включая применение компостирования для утилизации ТКО, осадков сточных вод. Обосновано его применение для утилизации отходов спиртовой промышленности.

2. Определен состав органических поллютантов. Выбран основной индикатор загрязнения – соотношение нитратного, нитритного и аммонийного азота на основе индекса потенциала нитрификации. Определена средняя глубина загрязнения – 5 м и объем отходов – 23 693 м³.

3. На основе изучения температурно-временных и структурно-временных характеристик процесса подобрано оптимальное содержание компонентов компостируемой массы застарелых отходов ПСБ: 33 % опилок, 33 % ПСБ, 33 % рециркуляционного компоста. Снижение доли органического вещества в компосте с выбранным соотношением составило с 41,96 до 15,01 %.

4. Разработана технология аэробного компостирования отходов застарелой ПСБ с оценкой эффективности утилизации при помощи изучения изменения химического состава компостируемой массы и органоминерального грунта. После 2 недель компостирования наблюдалось снижение концентрации токсичных веществ в отходах ПСБ до 0,1 % от исходного состояния. Максимальная температура компоста составила 71 °С. Содержание органического вещества снизилось с 31,81 до 9,82 %.

5. Выполнена оценка восстановления биотопа при помощи выполнения полевого геоботанического исследования, а также изучения спутниковых снимков. Увеличение значений вегетационного индекса с 2022 по 2025 г. составило 27,7 % в июне и 24,5 % в июле. Определен рост коэффициента восстановления растительности (K_v) на 11–12 % по отношению к фоновым значениям.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации из перечня рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК, а также журналов, индексируемых в международных реферативных базах

1. Изменение микробного консорциума в процессе утилизации застарелой послеспиртовой барды методом аэробного компостирования / Я.М. Русских, Д.Н. Шерстобитов, З.Е. Машенко [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2025. – Т. 33, № 3. – С. 342–351.
2. Обезвреживание застарелой послеспиртовой барды, размещенной в земляных накопителях / Д.Н. Шерстобитов, В.В. Ермаков, А.В. Васильев [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 135–140.
3. Утилизация отходов спиртовой барды длительного хранения методом аэробного компостирования / Д.Н. Шерстобитов, В.Н. Пыстин, В.В. Ермаков [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. – 2025. – № 3. – С. 162–170.
4. Экологический мониторинг восстановления флоры после рекультивации накопителей отходов спиртовой промышленности с применением NDVI / Д.Н. Шерстобитов, О.В. Козловская, В.Н. Ильина [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 4 (2). – С. 453–460.

Публикации в других журналах и в сборниках трудов конференций

5. The rationale for the recovery of the territories contaminated by organomineral waste / V. Pystin, D. Sherstobitov, E. Gubar [et al.] // E3S Web of Conferences. Actual Problems of Ecology and Environmental Management (APEEM 2023). EDP Sciences. – 2023. – 407, 03008.
6. Разработка метода ликвидации объектов размещения отходов спиртовой промышленности / Д.Н. Шерстобитов, В.Н. Пыстин, В.В. Ермаков [и др.] // Актуальные проблемы экологии и природопользования : сб. тр. XXV Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. – Москва, 2024. – Т. 2. – С. 86–90.
7. Разработка методов ликвидации загрязнений в экосистемах, сформированных накопителями отходов спиртовой промышленности / Д.Н. Шерстобитов, В.Н. Пыстин, В.В. Ермаков [и др.] // Актуальные проблемы экологии и природопользования : сб. науч. тр. XXIV Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. – Москва, 2023. – Т. 2. – С. 68–72.
8. Шерстобитов, Д.Н. Проблема рекультивации накопителей отходов производства этилового спирта в Российской Федерации / Д.Н. Шерстобитов, В.В. Ермаков // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения : сб. науч. тр. по материалам VI Всерос. науч.-практ. конф. в рамках VI Всерос. науч.-обществ. форума «Экологический форсайт». – Саратов, 2024. – С. 97–102.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 02.07.2026.
Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.
Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ 42973.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»
Отдел типографии и оперативной печати
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244