

ISSN 3034-7319

ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ

VOPROSY EKOLOGII

2025

№ 1

Главный редактор журнала

Ильин Вячеслав Константинович – доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ, заведующий отделом санитарно-гигиенической безопасности человека в искусственной среде обитания, Институт медико-биологических проблем РАН (ИБМП), Российская Академия наук, Москва, Россия.

Заместитель главного редактора

Лаврентьева Галина Владимировна – доктор биологических наук, доцент, директор Института естествознания, Калужский государственный университет, Калуга, Россия.

Манько Ольга Михайловна – доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, руководитель научной группы «Физиология и психофизиология зрения», Институт медико-биологических проблем РАН (ИБМП), Российская Академия наук, Москва, Россия.

Выпускающий редактор

Забайкин Юрий Васильевич – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия.

Ответственный редактор

Треулова Елена Сергеевна – International Advisory Committee, Tallinn, Estonia, EU.

Редакционная коллегия

Васильева Галина Юрьевна – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник, руководитель группы исследования костных и метаболических эффектов микрогравитации, Институт медико-биологических проблем РАН (ИБМП), Российская Академия наук, Москва, Россия.

Викторов Александр Георгиевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Российская Академия наук, Москва, Россия.

Глебов Виктор Васильевич – кандидат психологических наук, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии, Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия.

Кривов Сергей Иванович – кандидат педагогических наук, доцент, директор инженерно-технологического института, Калужский государственный университет, Калуга, Россия.

Лашенова Татьяна Николаевна – доктор биологических наук, кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Отдел радиационной безопасности населения, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва, Россия

Лемешко Егор Владимирович – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий лабораторией медико-биологических технологий и медицинской реабилитации, Институт физиологии, Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь

Лыков Игорь Николаевич – кандидат медицинских наук, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры Биологии и экологии, Калужский государственный университет, Калуга, Россия.

Мамихин Сергей Витальевич - доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

Мешков Дмитрий Олегович – доктор медицинских наук, заведующий сектором координации научных исследований и информации, Национальный НИИ общественного здоровья имени Н.А. Семашко, Москва, Россия.

Орлов Олег Игоревич – доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, директор, Институт медико-биологических проблем РАН (ИБМП), Российская Академия наук, Москва, Россия.

Поддубко Светлана Викторовна – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник, Институт медико-биологических проблем РАН (ИБМП), Российская Академия наук, Москва, Россия.

Христо Миладинов Найденски – доктор медицины, профессор, член-корреспондент БАН, Институт микробиологии «Стефан Ангелов», Болгарская академия наук, София, Болгария.

Вазель Махмуд Бадауи — доктор биологических наук, ассоциированный профессор, Агентство по атомной энергии, Каир, Египет.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ ЭКОЛОГИЯ

- Вячеслав Константинович Ильин, Денис Владимирович Коршунов, Любовь
Валентиновна Старкова
Концепция обращения с биodeградируемыми отходами на планетных базах 10

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

- Михаил Михайлович Подколзин
Разработка концепции антропологического биотопа как интегрального
показателя реализации социально-экологического развития умного города 40

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

- Вячеслав Константинович Ильин, Анжелика Анатольевна Парфенова, Алекс
Анатольевич Некто, Дмитрий Михайлович Швед, Марк Самуилович
Белаковский, Андрей Максимович Носовский, Екатерина Андреевна Бурляева,
Ксения Сергеевна Никитина, Александра Олеговна Савинкина, Ольга
Евгеньевна Тюрина, Марина Николаевна Костюченко
Влияние процесса приготовления хлеба и включения его в рацион питания
испытателей на психологический климат в эксперименте с длительной
изоляцией 78

CONTENTS

GENERAL ECOLOGY

- Vyacheslav K. Ilyin, Denis V. Korshunov, Lyubov V. Starkova
The concept of biodegradable waste management on planetary bases 10

ENVIRONMENTAL MONITORING

- Michael M. Podkolzin
Development of the concept of an anthropological biotope as an integral indicator of
the implementation of the socio-ecological development of a smart city 40

SUSTAINABLE DEVELOPMENT

- Vyacheslav K. Ilyin, Angelika A. Parfenova, Alex A. Nekro, Dmitry M. Shved, Mark S.
Belakovsky, Andrey M. Nosovsky, Ekaterina A. Burlyaeva, Ksenia S. Nikitina,
Alexandra O. Savinkina, Olga E. Tyurina, Marina N. Kostyuchenko
The influence of the bread-making process and its inclusion in the diet of the testers
on the psychological climate in the experiment with prolonged isolation 78

ОБЩАЯ ЭКОЛОГИЯ

Концепция обращения с биodeградируемыми отходами на планетных базах

Вячеслав Константинович Ильин

Ведущий научный сотрудник, заведующий отделом, заведующий лабораторией, доктор медицинских наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ

Институт медико-биологических проблем РАН

Москва, Россия

piton2004@bk.ru

ORCID 0000-0003-3896-5003

Денис Владимирович Коршунов

Младший научный сотрудник

Институт медико-биологических проблем РАН

Москва, Россия

megalodon84@mail.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Любовь Валентиновна Старкова

Научный сотрудник, кандидат технических наук

Институт медико-биологических проблем РАН

Москва, Россия

Starkova@imbp.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 02.10.2025

Принята 27.11.2025

Опубликована 30.12.2025

УДК 628.4:629.783

DOI 10.25726/g8307-7125-2940-q

EDN XPXNUC

БАК 1.5.15. Экология (технические науки)

OECD 01.00.00. Natural Sciences

Аннотация

Утилизация твёрдых бытовых отходов (ТБО) и отходов сельскохозяйственных и пищевых производств в наземных условиях уже стала ключевой экологической проблемой в наземных условиях. Особенно остро этот вопрос стоит в современных мегаполисах. В случае применения систем утилизации органических отходов в космических системах жизнеобеспечения (СЖО) помимо экологического аспекта – вопросов глубины и эффективности переработки, весьма актуальными становятся технические проблемы и ограничения. Используемые технологии должны отвечать требованиям низкого энергопотребления, высокой скорости переработки, влияющей, в свою очередь, на площадь, объем и массу перерабатывающей системы. Длительные сроки планируемых космических экспедиций требуют создания максимально замкнутых СЖО экипажей в космических аппаратах с циклической регенерацией веществ в искусственной экосистеме. Одним из основных условий повышения коэффициента замкнутости СЖО является переработка отходов с целью возвращения максимальной доли

содержащихся в них элементов в круговорот веществ на борту ПКА. В статье дан подробный анализ регенерируемых веществ в условиях быта планетной станции или длительных космических полетов.

Ключевые слова

космическая экспедиция, пилотируемый космический аппарат, бытовые отходы, круговорот веществ, утилизация, регенерация, замкнутые системы жизнеобеспечения, биоперерабатывающие системы.

Выполнено в рамках Программы развития научного центра мирового уровня «Высокотехнологичная биоэкономика» до 2030 года в порядке соисполнения за счет средств и для выполнения обязательств по Соглашению от 27.06.2025 № 075-15-2025-578.

Введение

Среди отходов, которые формируются в условиях пилотируемого космического полета, существенная доля приходится на отработанные средства личной гигиены (марлевые салфетки). Необходимым элементом замкнутых замкнутые системы жизнеобеспечения – СЖО – пилотируемых космических аппаратов считаются оранжереи для воспроизводства растительной части пищевого рациона космонавтов. Несъедаемые части растений являются отходами оранжерей. Использованные средства личной гигиены и отходы оранжерей, накапливаясь, будут занимать значительные объемы, что приведет к увеличению эквивалентной массы системы (Jones, 2006, Беркович, 2005). Кроме того, отходы содержат продукты выделения организма человека, опасные в санитарно-эпидемиологическом отношении. В перспективе межпланетных перелетов, исходя из требований планетарного карантина, не представляется возможным выносить контаминированный микроорганизмами мусор за пределы космического аппарата.

Таким образом, отработанные твердые органические материалы должны подвергаться переработке на борту пилотируемого космического аппарата (ПКА). Среди известных методов деградации органических материалов наиболее предпочтительным следует считать такой, конечные продукты которого могут быть каким-то образом утилизированы внутри СЖО для организации круговорота веществ. В частности, желательно было бы использовать конечные жидкие продукты переработки отходов в качестве исходной среды для приготовления питательных растворов для гидропонного выращивания растений. Это позволило бы существенно увеличить коэффициент замыкания массопотока в бортовой СЖО. Сходные проблемы возникают и в отношении физиологических отходов экипажа, поскольку процедуры их обеззараживания требуют затрат дополнительных бортовых ресурсов, а сами отходы представляют собой возрастающий по массе тупик в схеме круговорота веществ в регенерационной СЖО.

Следует отметить, что утилизация твердых бытовых отходов (ТБО) и отходов сельскохозяйственных и пищевых производств в наземных условиях уже стала ключевой экологической проблемой в наземных условиях. Особенно остро этот вопрос стоит в современных мегаполисах. В связи с этим, в литературе встречается такое понятие как «кризис отходов» или «кризис свалок». В составе ТБО существенная доля приходится на органические, в т. ч. и на пищевые отходы.

В случае применения систем утилизации органических отходов в космических СЖО помимо экологического аспекта, то есть вопросов глубины и эффективности переработки, весьма актуальными становятся также технические проблемы и ограничения: используемые технологии должны отвечать требованиям низкого энергопотребления, высокой скорости переработки, влияющей, в свою очередь, на площадь, объем и массу перерабатывающей системы.

Материалы и методы исследования

В целом, отходы, формирующиеся в условиях космического полета, включают в себя:

1. Отходы биологических звеньев СЖО. Могут включать в себя ботву и корни, солому и прочие не утилизируемые части растений. Доля съедобной биомассы в среднем составляет 50%.

2. Остатки пищи образуются при использовании пищи из туб и консервных банок, а также остаются на вилках и ложках. С вилок и ложек удаляются при помощи антимикробных салфеток, предназначенных для обработки средств приема пищи. Остатки пищи в упаковочных средствах составляют 2–3% от массы рациона питания ($3701,4 \pm 450$ г) и удаляются вместе с упаковочными средствами.

3. Упаковочные средства включают в себя: консервные банки, тубы, полиэтиленовые упаковки для средств личной гигиены, упаковки для лекарственных препаратов, упаковки для различных медицинских упаковок, а также паковочные материалы общего назначения (для элементов питания, запасного инструмента, приборного оборудования и т.д.). Масса металлической упаковки в зависимости от рациона питания составляет 10–15% от массы упакованного продукта, полиэтиленовая упаковка медицинских средств – 2–3% от их массы. В настоящее время указанные упаковочные средства не утилизируются, а удаляются за борт. В некоторых случаях для уменьшения габаритов упаковки ее прессуют, что позволяет на порядок уменьшить объем.

4. Протирочные средства включают в себя: влажные и сухие полотенца и салфетки, антимикробные салфетки для обработки поверхностей, туалетную бумагу, салфетки для обработки ложек, вилок, влажные салфетки с лосьонами для обработки тела и полости рта. В настоящее время указанные средства не утилизируются, а депонируются в спускаемом аппарате «КА Прогресс». Два пакета с малыми сухими салфетками рассчитаны на применение в течение 1 суток.

5. Твердые остатки от переработки отходов жизнедеятельности. Их состав в основном зависит от эффективности регенерационных процессов, масса составляет 2–3% от массы регенерируемого продукта. Твердые остатки накапливаются в соответствующем блоке системы регенерации и удаляются за борт вместе с отработавшим гарантированный ресурс блоком.

6. Отработанные катализаторы, сорбенты и фильтрующие материалы. В их состав входят катализаторы типа АК-64 и гопкалит, сорбенты типа активированного угля, анионитов и катионитов, твердые и мягкие фильтры, пылевые частицы, крошки пищи и др. Катализаторы, сорбенты и фильтрующие материалы используются до выработки ресурса и утилизации не подлежат.

7. Пыль и крошки пищи поступают со скоростью 1,4 г/сут. на одного члена экипажа, накапливаются на фильтрах и удаляются вместе с фильтром. Белье и использованные вкладыши спальных мешков в настоящее время не утилизируются и после использования в течении 10 суток удаляются за борт. В стадии разработки находятся специальные стиральные машины, предназначенные для ультразвуковой обработки белья. Их использование потребует расходования дополнительной энергии, воды и моющих средств, однако в длительных (1 год и более) космических полетах использование стиральной машины позволит сократить запасы белья и вкладышей.

8. Транспирационная влага высших растений в процессе культивирования выделяется в количестве до $1,47$ г/дм² за 1 час. Она содержит пары воды и большое число летучих органических выделений растений. Состав транспирационной влаги существенно зависит от вида культивируемых растений.

9. Отходы гетеротрофного звена. В случае использования в Марсианской экспедиции низших и высших гетеротрофов значительно усложняет проблему переработки их отходов. Практически придется решать те же задачи, которые решаются для утилизации отходов жизнедеятельности человека, но возникает ряд новых проблем по исключению специфических запахов, разделке тушек, удалению павших животных, утилизация костей и др.

Одной из попыток решения проблемы биоутилизации отходов, образующихся в условиях космического полета, является проект MELLISA (Micro – Ecological Life Support System Alternative) (см. рис. 1) (Mergeay, 1988; Tamponnet, 1991; Tranquille, 1994), стартовавший в 1989 году. В рамках этого проекта исследуется возможность регенерации съедобной биомассы с помощью фотосинтеза растений и фотосинтезирующих бактерий, культивируемых на продуктах переработки отходов. В концепции MELLISA предусмотрено пять блоков: в первом блоке происходит биodeградация отходов человека (несъедаемые части растений, урина, фекалии) при помощи анаэробных термофильных бактерий. Среди продуктов биodeградации присутствуют летучие жирные кислоты, соединения аммония и

минералов. Углекислый газ, образующийся в ходе биodeградации, поступает в блок фотосинтеза. Летучие жирные кислоты и соединения аммония направляются во второй блок с фототрофными анаэробными микроорганизмами, где NH_4^+ восстанавливается до NO_3^- . Нитрифицирующие культуры, содержащиеся в третьем блоке, предназначены, главным образом, для трансформации аммония (из второго блока) в водные растворы, содержащие нитраты. Нитраты служат нутриентом для высших растений из четвертого блока. В четвертом блоке фототрофные бактерии и высшие растения поглощают CO_2 с образованием биомассы и кислорода. Основываясь на исследованиях, посвященных пригодности рода *Spirulina* в пищу для млекопитающих (Tranquille, 1994), авторы проекта предполагают использовать биомассу, продуцируемую четвертым блоком, в качестве пищи для членов экипажа.

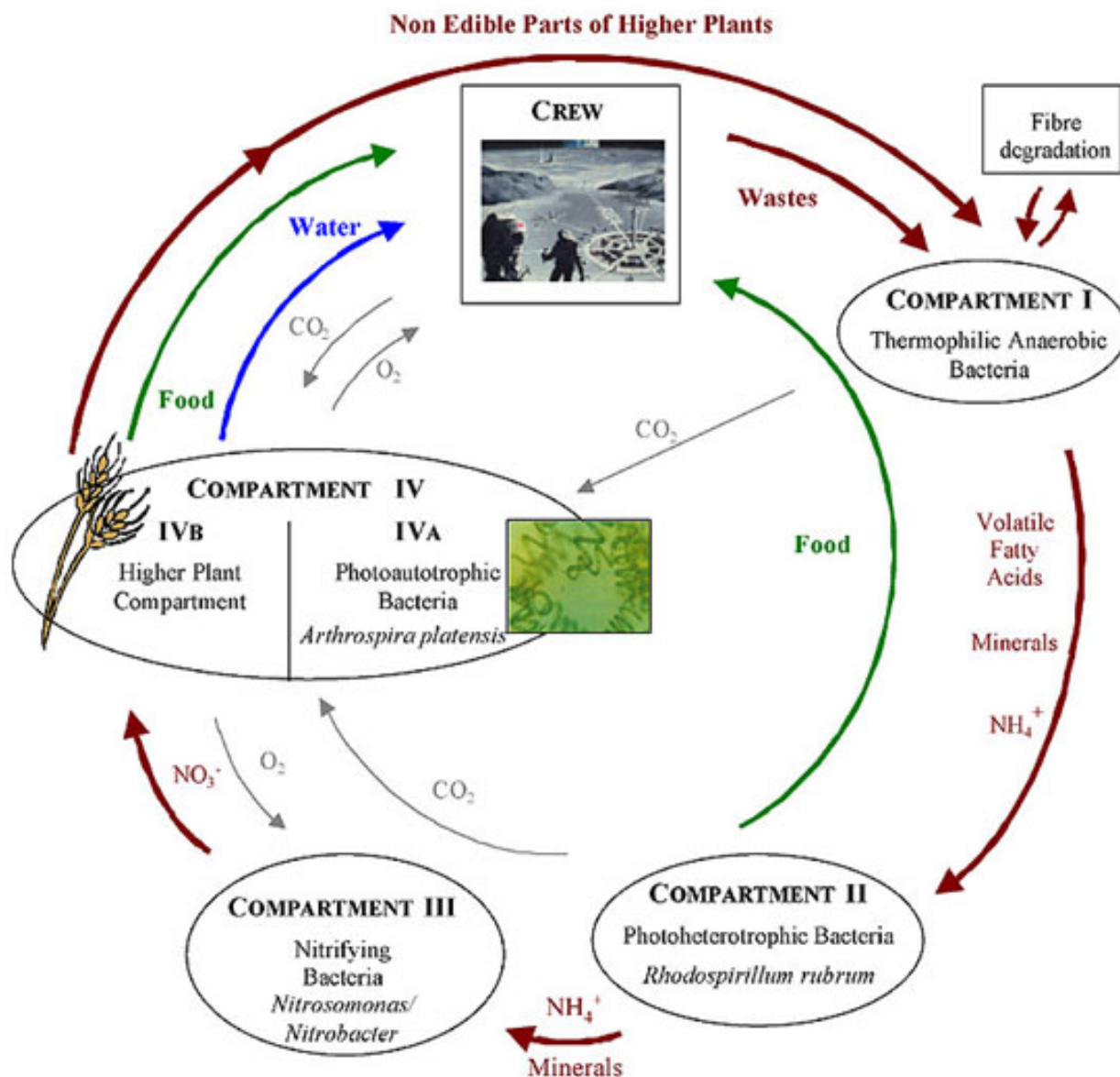


Рисунок 1. Схема проекта MELLISA

MELLISA представляет собой хрестоматийный пример БСЖО, являющейся, по сути, чем-то вроде упрощенной копии биосферы Земли. Общий недостаток таких систем – значительное время оборота веществ, особенно на стадии синтеза биомассы из неорганических компонентов (поток вещества от редуцентов к консументам). Физико-химические системы имеют гораздо меньшие времена оборота веществ, однако они ограничены в способности производства пищи, так как неизвестны

технологии производства полноценного искусственного синтетического питания. Ни одна из этих систем не способна обеспечить 100-процентное замыкание по круговороту веществ. Для дальних, межпланетных перелетов, марсианских и лунных баз требуются СЖО, способные поддержать деятельность человека в течение года и более. Этому условию соответствуют гибридные системы, сочетающие в себе биолого-технические и физико-химические методы регенерации вещества.

Результаты и обсуждение

Одним из естественных путей утилизации отходов является их микробная деградация. В целом, микробная деградация представляет собой искусственную интенсификацию процессов минерализации в природных биоценозах. Например, для гидролиза целлюлозосодержащих материалов целесообразно использовать анаэробные микроорганизмы, которые имеют ряд важных преимуществ: 1) целлюлолитические анаэробы, так же, как и другие ферментирующие анаэробные культуры, имеют незначительный прирост биомассы – большая часть субстрата трансформируется в различные конечные продукты, такие как этанол, органические кислоты, CO_2 , H_2 и пр., которые проще впоследствии утилизировать, нежели микробную биомассу; 2) они обладают высокой удельной целлюлозолитической активностью, мало зависящей от природы субстрата; 3) им свойственны относительно высокие скорости роста на целлюлозосодержащих субстратах. Поскольку в настоящее время одним из постоянно накапливающихся видов бортовых отходов, который приходится регулярно возвращать с ПКА на Землю, являются использованные марлевые салфетки, в нашей работе была рассмотрена задача их деградации с помощью анаэробных микроорганизмов.

Одной из существенных проблем на пути анаэробной деградации твердых органических отходов является то, что в жидких продуктах ферментации содержится значительное количество органических примесей, которые зачастую придают им низкое значение pH. Это обстоятельство не позволяет использовать полученные жидкости в качестве технической воды или каким-либо иным способом без дополнительной обработки. Отметим, что накопление жидких органических отходов, образующихся из растительных остатков, являются проблемой и в сельском хозяйстве, где лишь 10% этих субстратов как-то утилизируются.

В рамках предлагаемого подхода марля и бортовые растительные отходы утилизируются в два последовательных этапа. Сначала осуществляют первичную анаэробную биотрансформацию материалов, а полученные жидкие продукты используются в качестве сред для культивирования грибов и аэробных бактерий. Анаэробная ферментация марли осуществляется при помощи бактерии *Clostridium thermocellum*. Растворенные в культуральной жидкости продукты декомпозиции целлюлозы на второй стадии разлагаются микроскопическими грибами. При биodeградации растительных отходов на первом этапе в роли первичных биодеструкторов выступают ассоциации анаэробных микроорганизмов. Для последующего разложения органических веществ используются либо грибы (при кислых значениях pH), либо ассоциация аэробных бактерий (при нейтральных значениях pH).

К частному и малоизученному случаю микробной трансформации жидких органических отходов, можно отнести и применение электрогенных микроорганизмов для генерации электроэнергии в т.н. микробных топливных элементах. Данная технология позволяет получить электрический ток в потребителях за счет ферментации органических отходов. Микробное разложение органических отходов, производимое в ячейке микробного топливного элемента, может обеспечивать электропитание ряда бортовых приборов (газоанализаторы, датчики давления, приборная подсветка и т.д.) с малым энергопотреблением.

Таким образом, отходы, относящиеся к группе отработанных средств личной гигиены и несъедобной биомассы растений (картофельные и морковные очистки, капустная кочерыжка), могут быть трансформированы с помощью методов биологической минерализации: за счет анаэробного микробного разложения на первой стадии и аэробной микробной доочистки на второй, в результате чего образуются жидкие растворы, содержащие минеральные соединения и минимальное количество органических веществ. Разработанная двухстадийная технология биотрансформации твердых целлюлозосодержащих отходов в жидкости на первой стадии с последующей доочисткой полученных

продуктов с помощью ассоциаций аэробных бактерий и монокультур целлюлолитических грибов позволяет утилизировать марлевую ткань и несъедаемую биомассу растений с образованием воды, биогаза, минеральных соединений и биомассы микроорганизмов, на несколько порядков меньше, чем масса исходных субстратов (отходов).

Биодеструкция растительных материалов обычно заключается в уменьшении массы, избирательном разложении определенных компонентов отходов или их минерализации. Как было сказано выше, в составе твердых органических отходов значительную долю занимают природные полимеры, подверженные биodeградации, но, в то же время, устойчивые к биологическому воздействию. Особенно это справедливо в отношении лигнина.

Природные растительные полимеры разлагают как аэробные, так и анаэробные микроорганизмы, синтезирующие гидролитические ферменты, которые расщепляют биополимеры до простых сахаров и жирных кислот. В природе разложение целлюлозы происходит в процессе симбиотического взаимодействия различных микроорганизмов. В аэробных условиях преобладают грибы, особенно в кислых почвах и при разложении целлюлозы, армированной лигнином (древесины), среди которых наиболее активно утилизируют целлюлозу *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Trichoderma*, *Fusarium*, *Cladosporium*, *Dematiaceae*, *Alternaria*, *Penicillium*, *Styranus*, *Botrytis*.

Бактерии разлагают целлюлозу как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Исходя из их физиологических особенностей, целлюлолитические бактерии можно разделить на три группы: 1) ферментирующие анаэробные грам-позитивные (*Clostridium*, *Ruminococcus*, *Caldicellulosiruptor*), включающую в себя некоторые грам-отрицательные виды, в большинстве своем относимые к группе клостридиальных, 2) аэробные грам-положительные бактерии (*Cellulomonas*, *Thermobifida*), 3) миксобактерии и таксономически близкие им формы – аэробные скользящие формы (*Cytophaga*, *Sporocytophaga*). *Cytophaga* и *Sporocytophaga* – аэробные бактерии, разлагающие целлюлозу. Их легче всего выделить обычным методом накопительной культуры в жидких средах. Эти два рода, близкие к миксобактериям, включают много видов.

Существует принципиальная разница между аэробными и анаэробными группами в отношении целлюлазной активности. Большинство анаэробов деградируют целлюлозу посредством сложных целлюлазных систем. К таковым относятся, например, хорошо изученные специфические органеллы-целлюлосомы у *Clostridium thermocellum*, представляющие собой полиферментные целлюлазные комплексы. *Clostridium thermocellum* расщепляют целлюлозу при помощи большого числа вне- и внутриклеточных ферментов, которые могут располагаться на поверхности клеток или быть локализованными в жидкой фазе. Некоторые анаэробные целлюлолитики вообще не имеют внеклеточных целлюлаз. Как например, культуры *Cytophaga* и *Sporocytophaga*: у них не удалось обнаружить ни внеклеточной целлюлазы, ни каких-либо продуктов расщепления целлюлозы. Клетки этих бактерий тесно прилегают к волокнам целлюлозы, располагаясь параллельно оси волокна. По-видимому, они гидролизуют целлюлозу лишь при тесном контакте с волокном, и продукты гидролиза тотчас же поглощаются. На агаре с целлюлозой колонии *Cytophaga* никогда не бывают окружены прозрачной зоной, в которой находились бы продукты ферментативного расщепления целлюлозы. Большинство анаэробов, разрушающих целлюлозу, растут на ней лучше всего при непосредственном контакте с субстратом. Для нескольких видов подобная адгезия является облигатной.

Целлюлолитические анаэробы, так же, как и другие ферментирующие анаэробные культуры, имеют незначительный прирост биомассы – большая часть субстрата трансформируется в различные конечные продукты, такие как этанол, органические кислоты, CO_2 и H_2 .

Аэробные целлюлолитические бактерии и грибы утилизируют целлюлозу при помощи внеклеточных ферментов, хотя, изредка, целлюлазные комплексы аэробных микроорганизмов располагаются на поверхности клеток. Зачастую ферменты демонстрируют синергию при гидролизе целлюлозы. Хотя многие аэробы прикрепляются к субстрату, контакт между клетками и целлюлозой не является необходимым для осуществления гидролиза. Аэробные целлюлолитические бактерии и грибы дают большой прирост биомассы при культивировании, что является источником интереса к ним как продуцентам белка в процессах биodeградации целлюлозосодержащих отходов в наземных условиях.

Условия космического полета предъявляют специфические требования к процессам ферментации в целом, и к микробной деградации в частности: гарантии сохранения ферментационных свойств микроорганизмов в условиях длительного космического полета, санитарная безопасность, удобство в обслуживании, соответствие предъявляемым требованиям по массе, объему и энергопотреблению. В настоящее время биodeградация органических отходов, типичных для пилотируемого космического корабля, представляет собой малоизученный предмет, как в прикладном, так и в фундаментальном аспектах. Результаты исследований деградации средств личной гигиены термофильными анаэробными бактериями представлены в таблице 1.

Таблица 1. Деградация марлевых субстратов целлюлолитическими анаэробными бактериями

Культура	Степень деградации, %				
	Марля сухая		Марля влажная		Марля сухая*
	5 г/л	10 г/л	5 г/л	10 г/л	10 г/л
<i>C. thermocellum</i> F1	77,8	59,6	85,4	97,3	80,8
<i>C. thermocellum</i> F4	79,0	80,8	89,0	73,8	86,1
<i>C. thermocellum</i> F7	80,0	53,4	62,0	57,0	49,2
<i>C. thermocellum</i> F9	86,0	65,0	78,0	63,7	77,0
<i>C. thermocellum</i> F15	81,0	72,1	76,8	89,6	83,0
<i>C. thermocellum</i> F19	81,0	48,8	64,0	46,7	78,4
<i>C. thermocellum</i> LQR9	81,0	58,8	72,2	61,7	72,6
<i>C. stercorarium</i> NCYB	88,0	75,1	73,8	72,7	93,5

Примечание: * – в данном столбце приведены данные по совместному культивированию указанных штаммов с сахаролитической анаэробной бактерией *Thermoanaerobacter ethanolicus* 39E.

При совместном культивировании семи штаммов *Clostridium thermocellum* и одного штамма *Clostridium stercorarium* с сахаролитической бактерией *Thermoanaerobacter ethanolicus* 39E в течение 12 суток при концентрации субстрата 10 г/л максимальная степень деградации марлевого субстрата была получена в случае совместного культивирования с *C. thermocellum* F1, F4, F15 (80,8; 86,1; 83,0 % соответственно) и *C. stercorarium* (93,5%). Эти культуры как наиболее активные были выбраны для дальнейших исследований.

На отобранных культурах рассматривали целесообразность предварительной обработки субстрата с целью ускорения биологической деградации. Для этого использовали измельчение, обработку щелочью и предварительное подсушивание субстрата. Результаты исследования влияния измельчения и щелочной обработки субстрата на степень деградации марли представлены в таблице 3.

Таблица 3. Влияние измельчения и щелочной обработки субстрата на степень деградации марли

Культура	Степень деградации, %							
	Марля сухая нерезанная				Марля влажная резанная			
	5 г/л		10 г/л		5 г/л		10 г/л	
	H/o	NaOH	H/o	NaOH	H/o	NaOH	H/o	NaOH
<i>C. thermocellum</i> F1	77,8	90,2	84,1	78,2	85,4	87,2	66,3	78,3
<i>C. thermocellum</i> F7	79,0	90,6	80,8	83,9	89,0	81,6	51,6	82,7
<i>C. thermocellum</i> F15	81,0	91,4	72,1	73,9	76,8	76,8	59,9	70,8
<i>C. stercorarium</i> NCYB	88,0	84,2	75,1	69,2	73,8	73,8	46,1	64,8

Примечание. H/o – необработанные образцы.

Обработка щелочью (4 суток в 0,25 М растворе NaOH) и измельчение в ряде случаев увеличивают степень деградации субстрата, особенно при использовании влажной марли. Подсушивание влажной марли перед ее использованием в качестве субстрата несколько повышает степень деградации субстрата по сравнению с исходной необработанной влажной марлей.

В наибольших концентрациях в гермокамере объемом 3,5 л обнаружены этанол, ацетальдегид, 2-метил-1-пропанол и ацетон. Остальные перечисленные в этой таблице вещества не были выявлены или присутствовали в концентрациях значительно ниже их предельно допустимых значений для пилотируемых космических аппаратов (ПДК_{ПКА}). В таблице 4 представлены также расчетные величины концентраций этих веществ, которые могут создать исследованные препараты с перевязочным материалом в воздухе гермокамеры объемом 1 м³. В этом случае только по этанолу концентрация может достигать 1,3 мг/м³, что составляет 13% от его ПДК. Химический состав продуктов биотрансформации твердых субстратов в жидкие представлен в таблице 4.

Данные по ферментации материала салфеток исследуемой культурой представлены в таблице 7. Увеличение субстратной нагрузки до 25 и 50 г/л привело к удлинению лаг-фазы до 5 и более дней и быстрому закислению среды в вариантах без добавления мела. Добавление щелочи существенно не сказывалось на степени деградации субстрата. В вариантах с добавлением мела величина лаг-периода значительно сокращалась, наблюдался скорость прироста биомассы, а степень деградации субстрата достигала 25 г/л за 2 недели. В варианте с исходным содержанием материала салфеток 50 г/л почти полная деградация происходила за 4 недели (см. рис. 2). Материалы опытов дают основания считать, что увеличению скорости процесса (но, по-видимому, не степени деградации) будет способствовать предварительное измельчение субстрата.

Динамика массы гидролизованной марли в растворе (y) в вариантах с добавлением мела в среду, удовлетворительно описывается линейным уравнением регрессии вида:

$$y=1,7857 \cdot x.$$

Таблица 4. Динамика газовыделения из пробирок с перевязочным материалом на основе медицинской марли при 40°C, приведенная к объему 1 м³

Обнаруженные вещества	Концентрация веществ, мг/м ³				ПДК _{ПКА} , 360 суток
	1-е сутки	3-е сутки	7-е сутки	14-е сутки	
Углеводороды C ₁ -C ₄	0,009	0,007	0,007	0,012	10,0
Гексан	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	10,0
Гептан		0,005	0,052	0,059	10,0
Циклогексан	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	3,0
Метилциклогексан	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,3
Ацетальдегид	0,02	0,11	0,11	0,22	1,0
Ацетон	0,004	0,006	0,010	0,012	1,0
Этилацетат	0,0005	0,0007	0,0010	0,0011	4,0
Метилэтилкетон	н.о.	н.о.	0,0001	0,0001	0,25
Этанол+изопропанол	0,868	1,077	1,186	1,310	10,0
Диэтилкетон	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,0
Изобутанол	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,1
Бутилацетат	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,0
Толуол	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	8,0
2-метил-1-пропанол	0,015	0,016	0,020	0,021	5,0
м,п-ксилолы	н.о.	н.о.	0,0001	0,0004	5,0
н-бутанол	0,0017	0,0016	0,0017	0,0018	0,8
о-ксилол	0,0001	н.о.	н.о.	н.о.	5,0
Изопропилбензол	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,25
Метилцеллозольв	0,001	н.о.	н.о.	н.о.	

Метилметакрилат	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,3
н-гексанол	н.о.	0,0002	н.о.	н.о.	0,25
Уксусная кислота	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,5
Стирол	н.о.	н.о.	0,0001	0,0001	0,25
Пропионовая кислота	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,5

Примечание. Н.о. – не обнаружены.

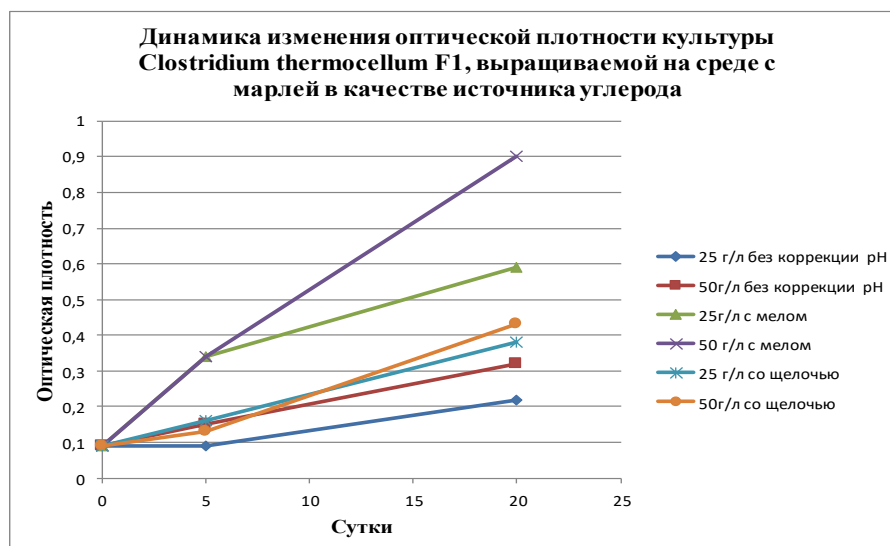


Рисунок 2. Динамика изменения оптической плотности культуры *Clostridium thermocellum*, выращиваемой на среде с марлей в качестве источника углерода

Отсюда: за время $x=1$ сут. масса гидролизованной марли $y=1,7857$ г/л., то есть $1,8$ г/л*сут. Одна упаковка сухих средств личной гигиены для космонавтов содержит 25 г марли площадью 2 м². Чтобы разложить эту массу в течение суток, потребуется примерно 14 л среды. Если рассмотреть сценарий пилотируемой экспедиции на Марс с экипажем из шести человек, то для утилизации их дневной нормы салфеток понадобится ферментер с рабочим объемом среды 85 л. Динамика количественных изменений субстрата при использовании термофильных клостридий представлена в таблице 5.

Таблица 5. Потребление субстрата при росте *C. thermocellum* F1 на медицинской марле на 29 сутки ферментации

№ п/п	Исходное количество субстрата, мг	Вес фильтра с субстратом, мг	Вес фильтра, мг	Средний вес клеток, мг	Остаточный субстрат, мг	Степень деградации субстрата, %
1	5000	5900	1386	48	4466	10,7
2	10000	10838	1386	70	8544	14,6
3	5000	10746	1386	130	0	~ 100
4	10000	12021	1386	198	437	~ 95
5	5000	5577	1386	84	4107	17,9
6	10000	11381	1386	95	9900	1,0

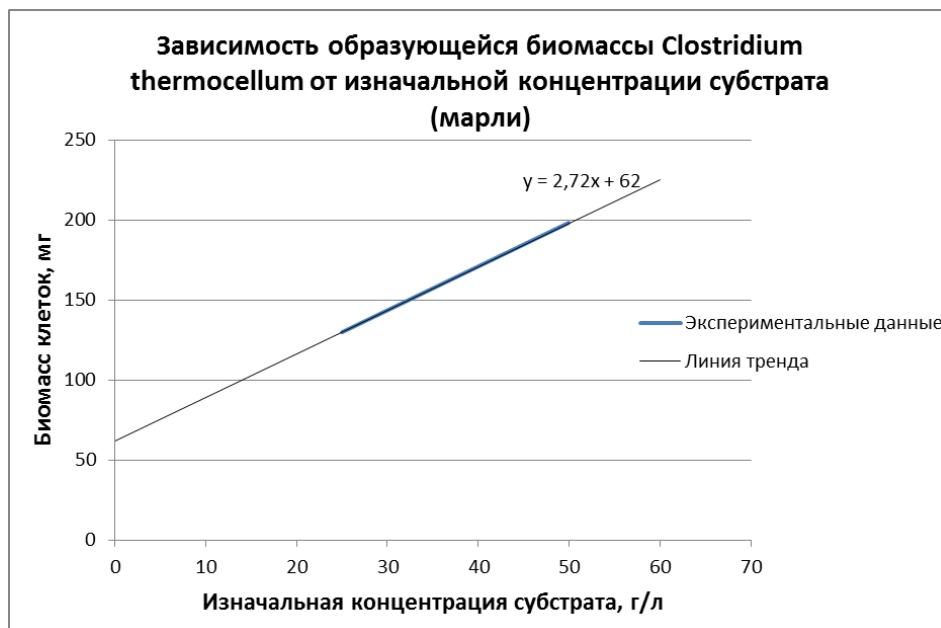
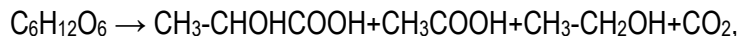


Рисунок 3. Зависимость образующейся массы Clostridium thermocellum от изначальной концентрации субстрата (марли)

Исходя из зависимости, изображенной в виде графика на рисунке 3, можно посчитать удельную величину, образующейся биомассы клеток Clostridium thermocellum. Она будет равна 65 мг биомассы/ 1 г субстрата. Для 6 утилизированных салфеток (изначальная масса 150 г) биомасса будет равна 9,7 г., то есть в биомассу переходит 6,5% от первоначальной массы марли.

Таким образом, 150 г – 9,7 г = 140,3 г субстрата переходят в биогаз и жидкие продукты биodeградации:



где: $M(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) = 190$ г/моль; $M(\text{CO}_2) = 44$ г/моль; 190 г/моль / $140,3$ г = 44 г/моль / $m(\text{CO}_2)$; $m(\text{CO}_2) = 140,3 \text{ г} \cdot 44 \text{ г/моль} / 190 \text{ г/моль} = 65$ г; $n(\text{CO}_2) = m(\text{CO}_2) / M(\text{CO}_2) = 65 \text{ г} / 44 \text{ г/моль} = 1,5$ моль; при н.у. $V_m(\text{CO}_2) = 22,4$ л/моль, отсюда:

$$V(\text{CO}_2) = 22,4 \text{ л/моль} \cdot 1,5 \text{ моль} = 33,6 \text{ л},$$

где 33,6 л – теоретически максимальный объем, образующегося из 150 г марли CO_2 , если считать, что вся целлюлоза сбраживается до этанола, молочной и уксусной кислот и углекислого газа.

Хроматомасс-спектрометрический анализ жидких продуктов биodeградации марли показал, что качественный состав летучих органических веществ примерно одинаков во всех средах, образовавшихся после разложения марли (рис. 4). При биорансформации марли, продукты ее гидролиза, продукты обмена микроорганизмов и химический состав среды довольно единообразны и мало различаются от образца к образцу. Можно констатировать, что добавление мела никак не повлияло на долю различных классов летучих органических веществ, содержащихся в продуктах разложения марлевой ткани.

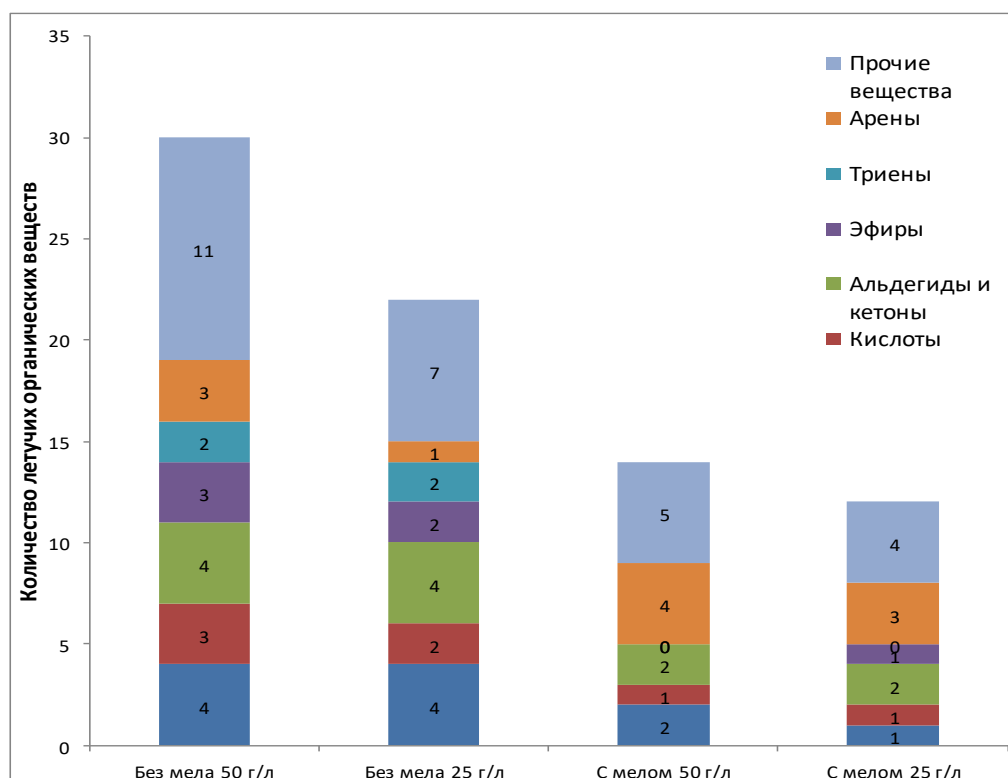


Рисунок 4. Доля различных классов органических соединений в составе летучих примесей, образующихся при анаэробной биodeградации марлевых салфеток

В жидких средах, формирующихся в результате анаэробной ферментации марлевой ткани, содержится значительное число органических примесей (табл. 6 и 7). С целью очистки полученных субстратов использовали дрожжи *Chaetomium globosum*, *Trichoderma viridae*, *Rhodotorula glutinis*, *Candida* sp. По результатам хроматомасс-спектрометрии (рис. 4) можно констатировать существенное уменьшение числа обнаруженных органических примесей, содержащихся в первичных продуктах деструкции марли, после доочистки с помощью грибных культур. Средняя концентрация летучих органических примесей снизилась до следовых величин (рис. 5, таблица 6). Данные культуры оказались способны поддерживать устойчивый рост, питаясь продуктами метаболизма бактерий, осуществляющих первичную биотрансформацию.

Таблица 6. Концентрация летучих органических веществ в жидких продуктах биodeградации марлевой ткани, при начальной доле сухой марли 25 г/л

Вещество	Без мела	CaCO ₃	ПДК _{г/л}
Бутанол-1	0,022	н.о.	0,8
3,6-диметокси-флуоренол-9	0,031	н.о.	0,01
флуоробензотиазол	0,059	н.о.	0,07
лимонен	0,012	0,076	0,1
Бутилат муравьиной кислоты	0,011	н.о.	0,5
этилаланин*	2,2	н.о.	0,8
Ацетилацетон (пентандион)	0,002	н.о.	0,5
4-метилпентаннитрил	0,013	н.о.	0,6
3-метилмасляная кислота	0,078	н.о.	0,276
фурфураль	0,023	н.о.	0,2
толуол	0,011	0,101	0,8
дигидроксибензамид	0,01	н.о.	0,3
Уксусная кислота	0,239	0,188	0,5
2-этилгексанол	0,008	н.о.	0,6
бензальдегид	0,068	0,068	0,5
ацетофенон	0,025	н.о.	0,8
диметилпиридин	0,015	н.о.	0,4
метоксифенилоксим	0,512	н.о.	0,3
нафталинкарбазол*	0,096	н.о.	0,05
Бис(2-этилгексил)фталат*	6,444	0,344	
2,6,10,14,18-пентаметилдекатриен	0,231	н.о.	0,2
Метан*	н.о.	6,226	0,5
изопропанол	н.о.	0,086	1,5
Этилбензол	н.о.	0,042	0,4
Ксилол	н.о.	0,086	5
триметилбензол	н.о.	0,022	0,4
гидроксипропанон	н.о.	0,118	2,2
1-метил-3-этиладамантан*	н.о.	0,822	0,1
Антраценамин*	н.о.	0,082	0,01

Примечание: * – вещества с концентрацией, превышающей ПДК_{г/л}.

Таблица 7. Концентрация летучих органических веществ в жидких продуктах биodeградации марлевой ткани, при начальной доле сухой марли 50 г/л

Вещество	Без мела	CaCO ₃	ПДК _{г/л}
изопропанол	0,032	0,009	1,5
Бутанол-1	0,033	н.о.	0,8
3,6-диметокси-флуоренол-9	0,033	н.о.	0,01
флуоробензотиазол	н.о.	н.о.	0,07
лимонен	н.о.	0,032	0,1
Бутилат муравьиной кислоты	н.о.	н.о.	0,5
этилаланин	0,333	н.о.	0,8
триэтилборан	0,031	н.о.	0,3
Ацетилацетон (пентандион)	0,041	н.о.	0,5
оксиран	0,031	н.о.	0,15
1Н-индол	0,013	н.о.	0,3

3,5-дигидроксибензамид	0,079	н.о.	0,3
2-фенилбензотиазол	0,012	н.о.	0,1
антраценамин*	0,042	н.о.	0,01
4-метилпентаннитрил	0,045	н.о.	0,2
стирол	0,038	н.о.	0,25
3-метилмасляная кислота	0,164	н.о.	0,276
Фенол	0,056	н.о.	0,1
фурфураль	0,124	н.о.	0,2
толуол	0,026	0,078	0,8
дигидроксибензамид	0,034	н.о.	0,3
Уксусная кислота	0,272	н.о.	0,5
2-этилгексанол*	1,239	н.о.	0,6
пропионовая кислота*	2,221	н.о.	0,404
бензальдегид	0,168	н.о.	0,5
ацетофенон	0,348	н.о.	0,8
диметилпиридин	0,074	н.о.	0,4
метоксифенилоксим*	0,21	0,388	0,3
нафталинкарбазол	0,044	н.о.	0,05
дидодецилфталат	0,112	н.о.	0,3
дибутилфталат	0,099	н.о.	0,09
Бис(2-этилгексил)фталат	0,26	н.о.	
тетраметилдекатриен	0,109	н.о.	0,09
Метан*	н.о.	6,224	0,5
Ксилол	н.о.	0,144	5
триметилбензол	н.о.	0,098	0,4
1,2-цикло-гексадиметанол	н.о.	0,062	0,15
1-бром-11-иодундекан	н.о.	0,212	
гидроксипрапанон	н.о.	0,112	0,19

Примечание: * – вещества с концентрацией, превышающей ПДК_пка.

Таблица 8. Концентрация летучих органических веществ в жидких средах, образованных после доочистки продуктов биodeградации марлевой ткани при помощи грибов

Соединение	<i>Rhodotorula glutini</i>	<i>Triphoderme viride</i>	<i>Chaetomium globosum</i>
пропанамин	0,012	0,022	0,001
лимонен	0,026	-	-
пинен	0,066	-	-
толуол	0,003	0,005	0,005
нонан	0,013	-	-
гексаналь	0,011	-	-
нонаналь	0,014	-	-
ацетон	0,028	0,034	0,032
3-карен	0,026	-	-
бутанол	-	0,006	-
метилстирол	-	0,027	-

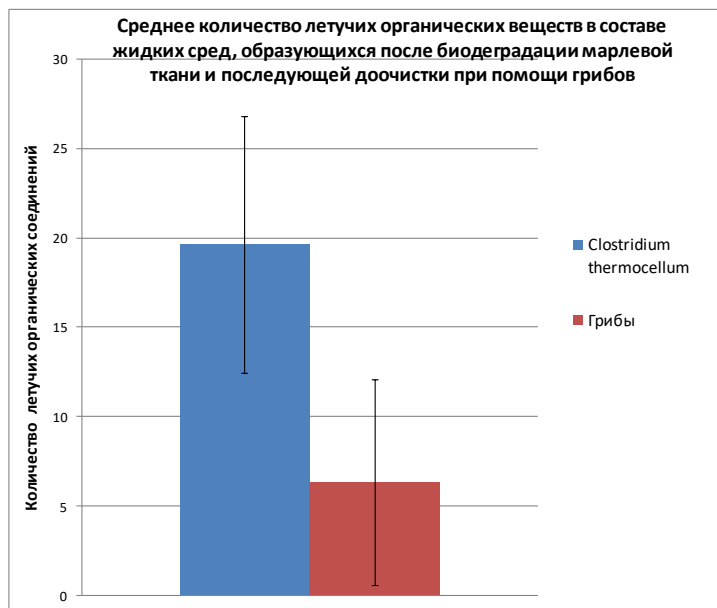


Рисунок 6. Среднее количество летучих органических веществ в составе жидких сред, образующихся после биодegradации марлевой ткани и последующей доочистки при помощи грибов

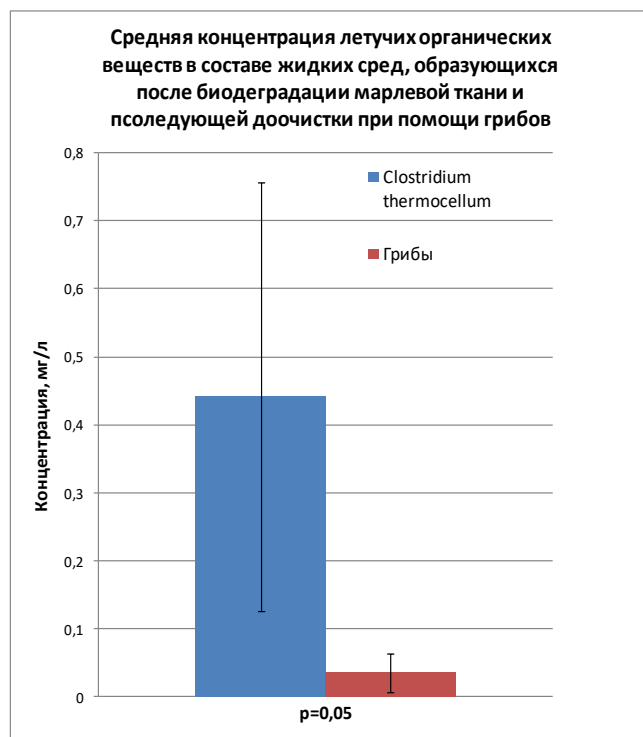


Рисунок 7. Средняя концентрация летучих органических веществ в составе жидких сред, образующихся после биодegradации марлевой ткани и последующей доочистки при помощи грибов

Таким образом, субстрат, полученный после грибной доочистки, является практически химически чистым (по содержанию летучих органических веществ) и значительно более пригодным для дальнейшего использования в СЖО космических летательных аппаратов.

Анаэробная дегradация очистков моркови и картофеля, а также капустной кочерыжки, приводит к образованию непрозрачной жидкой фазы, содержащей густую взвесь и осадок. Степень дегradации составляла примерно 76%. Значения pH образующихся субстратов колеблется от 5,5 до 7,0. 50 г очистков гидролизуются за 7 дней в объеме 250 мл. За 1 сут гидролиз 50 г в 1,7 л, отсюда: 29 г/л сут - удельная скорость разложения. Для аэробной доочистки основные конечные продукты: NH_3 , H_2O , CO_2 .

В отличие от продуктов ферментации марли, продукты биodeградации отходов овощей образуются в сравнительно высоких концентрациях, которые в большинстве случаев значительно превышают ПДКпка (табл. 9).

Распределение по классам органических соединений среди продуктов разложения гомогенатов овощей представлено на рисунке 8: распределение в качественном составе летучих примесей между различными субстратами различается. Сложные по своему химическому составу растительные субстраты и богатая микрофлора, использующаяся для ее биотрансформации, делают процессы разложения многообразными в своих метаболических путях. Соответственно, продукты разложения также могут варьировать в значительной степени, в зависимости от того, как происходит ферментация конкретного образца. В контексте работы, это обстоятельство важно, поскольку влияет на способы дальнейшей микробной доочистки получаемых субстратов.

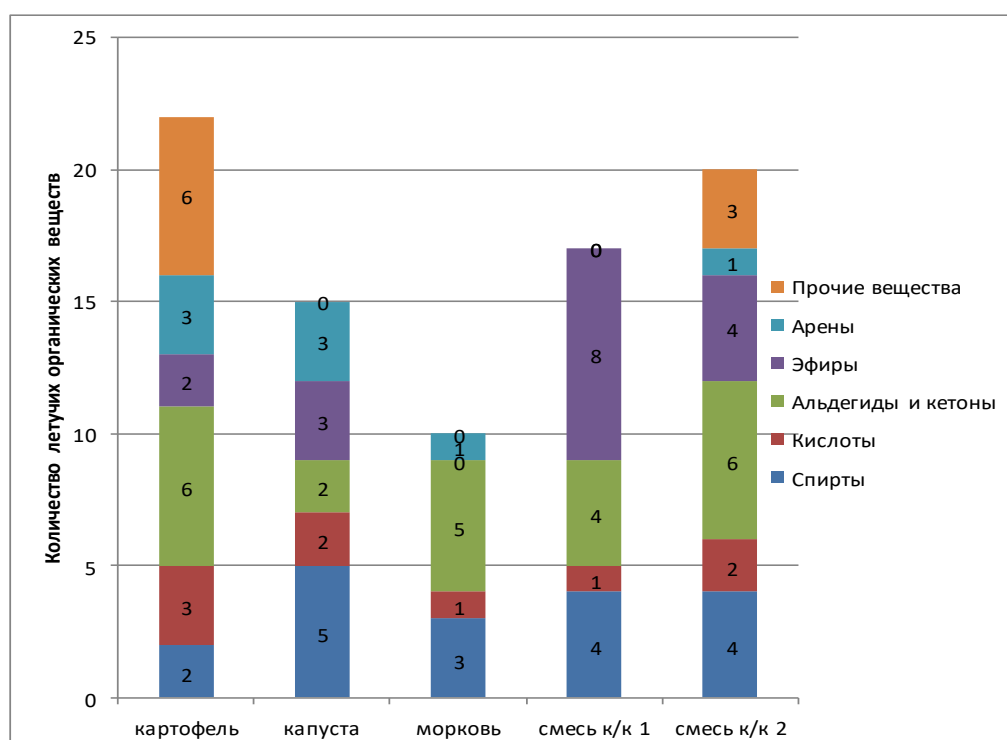


Рисунок 8. Количество летучих органических веществ в жидких продуктах биodeградации отходов овощей, при начальной доле сухого субстрата 200 г/л

Таблица 9. Концентрация летучих органических веществ в жидких продуктах биodeградации отходов овощей, при начальной доле сухой массы 200 г/л

Вещество	картофель	капуста	морковь	смесь к/к 1	смесь к/к 2	ПДКпка
гидроксимочевина	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	88,454	0,2
уретан	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	16,455	0,18
дибутилфталат	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	186,8	0,219
диметилсульфид	н.о.	н.о.	н.о.	221,88	211,72	1,089
диметилдисульфид	н.о.	221,4	н.о.	421,68	244,8	1,089
диметилтрисульфид	н.о.	81,12	н.о.	н.о.	н.о.	1
ацетон	46	н.о.	16,64	н.о.	18,898	1
фурандиол	н.о.	н.о.	н.о.	8,28		0,18
1-имино-2-азаноннандиамин	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	45	1
метилстирол	н.о.	44,23	н.о.	н.о.	21	0,25

бензол	н.о.	12,44	11,22	н.о.		0,2
гексаналь	н.о.	н.о.	11,33	н.о.	14	0,4
гептаналь	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	7	0,24
октаналь	н.о.	н.о.	н.о.	14,22	16,4	0,02
нонаналь	36,22	н.о.	86,88	14,26	81,6	0,38
октагидронафталенон	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	5	0,3
ацетамидоциклогексанол	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	22	0,15
этанол	28	33,664	66,33	318,88	121,88	10
пропанол	н.о.	144,88	22,11	н.о.	н.о.	0,6
изопропанол	н.о.	11,244	н.о.	21,66	144,66	1,5
бутанол-1	31,43	156,312	36,88	494,82	323,88	0,8
изобутанол	н.о.	36,222	н.о.	н.о.	н.о.	0,1
Виниллауринат	1,22	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,09
3-метилфуранон	110,66	99,59	622,22	882,44	н.о.	0,5
метилбутират	н.о.	н.о.	н.о.	22,12	н.о.	0,354
этилбутират	16,22	н.о.	н.о.	88,84	н.о.	0,3
бутилбутират	н.о.	н.о.	н.о.	52,23	н.о.	0,404
этилацетат	н.о.	н.о.	н.о.	344,88	266,88	4
этилкапронат	н.о.	н.о.	н.о.	26,44	н.о.	0,16
ацетофенон	38,14	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,8
диметилдисульфид	н.о.	22,66	н.о.	98,84	н.о.	1,089
бензальдегид	68,94	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,5
Ацетилацетон (пентандион)	36,64	112,62	64,55	46,22	н.о.	0,5
фталевая кислота	38,88	64,31	н.о.	н.о.	н.о.	0,5
метилпиридин	18,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,2
метилпиримидин	14,66	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,16
диметилпиридин	12,66	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,17
стирол	12,38	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,25
Фенол	0,056	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,1
толуол	16,22	0,011	н.о.	н.о.	н.о.	8
Уксусная кислота	188,33	422,39	212,88	266,22	1922,2	0,5
диметилоктандиамин	51	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,27
лауриновая кислота	8,04	н.о.	н.о.	н.о.	3920	0,1
лаурилпероксид	1,88	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,1
дибромтетрапентакотан	0,88	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1

Таблица 10. Количественно-качественный состав ассоциаций микроорганизмов, осуществляющих декомпозицию растительных отходов

Группа	Род	Вид	КОЕ/мл
4	Azomonas	Azomonas agilis	2,5x10 ³
	Azotobacter	Azotobacter macrocytogenes	5x10 ³
	Flavobacterium	Flavobacterium breve	1,4x10 ³
	Pseudomonas	Pseudomonas fluorescens	2x10 ³
5	Enterobacter	Enterobacter cloacae	5,2x10 ⁴
	Hafnia	Hafnia alvei	1x10 ⁶
	Citrobacter	Citrobacter freundii	8x10 ⁷
15. Подгруппа 1	Cytophaga	Cytophaga diffluens	8x10 ¹
17	Enterococcus	Enterococcus faecalis	2,8x10 ⁸

18	Clostridium	Clostridium pasteurianum	1x10 ¹¹
		Clostridium cellobioparum	1x10 ¹⁰
	Bacillus	Bacillus cereus	8x10 ⁵
		Bacillus mesentericus	4,5x10 ⁶
		Bacillus polymyxa	1x10 ⁶
		Bacillus subtilis	4x10 ⁷
20	Cellulomonas	Cellulomonas cellulans	4x10 ¹

В ассоциации нет патогенных видов, следовательно, она относительно безопасна в санитарно-гигиеническом аспекте.

В зависимости от уровня pH жидких продуктов биотрансформации растительных субстратов, применяют разные виды микробной доочистки: если pH оставался нейтральным, использовали ассоциацию аэробных бактерий: *Pseudomonas esterophilus* ВКМ-1736Д, *Paracoccus denitrificans* ВКМ В-1324, *Achromobacter parvulus* ВКМ-1541Д и *Stenotrophomonas maltophilia* ВКМ В-591. Если pH был кислым – используют грибы-целлюлолитики (табл. 10, рис. 9 и 10).

Таблица 10. Концентрация летучих органических веществ в жидких продуктах биodeградации отходов моркови на различных стадиях доочистки при помощи ассоциации аэробных бактерий

Вещество	Исходный субстрат	2-е сутки	6-е сутки	8-е сутки	ПДКпкка
метан	н.о.	110	0,4	0,1	0,5
а-пинен	5,5	н.о.	н.о.	н.о.	10
Метилат масляной кислоты	30,5	0,1	н.о.	н.о.	0,6
Этилалт масляной кислоты	65,9	н.о.	н.о.	н.о.	0,7
циклобутанол	51,15	н.о.	н.о.	н.о.	0,2
2,4-диметилгептан	51,7	н.о.	н.о.	н.о.	10
бутилформиат	н.о.	0,65	н.о.	н.о.	0,3
бутаналь	21,9	н.о.	н.о.	н.о.	0,32
этилацетат	21,7	н.о.	н.о.	н.о.	4
этанол	21,1	0,35	н.о.	н.о.	10
бутилацетат	11,4	н.о.	н.о.	н.о.	2
2-метилпропанол-1	6,85	н.о.	н.о.	н.о.	0,1
бутанол	368,2	н.о.	н.о.	н.о.	0,8
п-килол	6,2	н.о.	н.о.	н.о.	5
толуол	10,8	н.о.	н.о.	н.о.	8
Гидроксиуксусная к-та	7,05	0,5	н.о.	н.о.	0,5
Уксусная кислота	30,6	1,95	1,15	0,55	0,5
D-лимонен	5	0,4	н.о.	н.о.	0,1
Масляная кислота	31,05	0,9	н.о.	н.о.	4
бензальдегид	0,6	0,55	н.о.	н.о.	0,5
ацетофенон	16,4	1,25	н.о.	н.о.	0,8
индол	22,1	0,75	0,25	н.о.	0,3
фенол	5,5	0	н.о.	н.о.	0,1
нафталинкарбонитрил	н.о.	4,8	н.о.	н.о.	0,3
метилстирол	н.о.	н.о.	н.о.	1,15	0,25

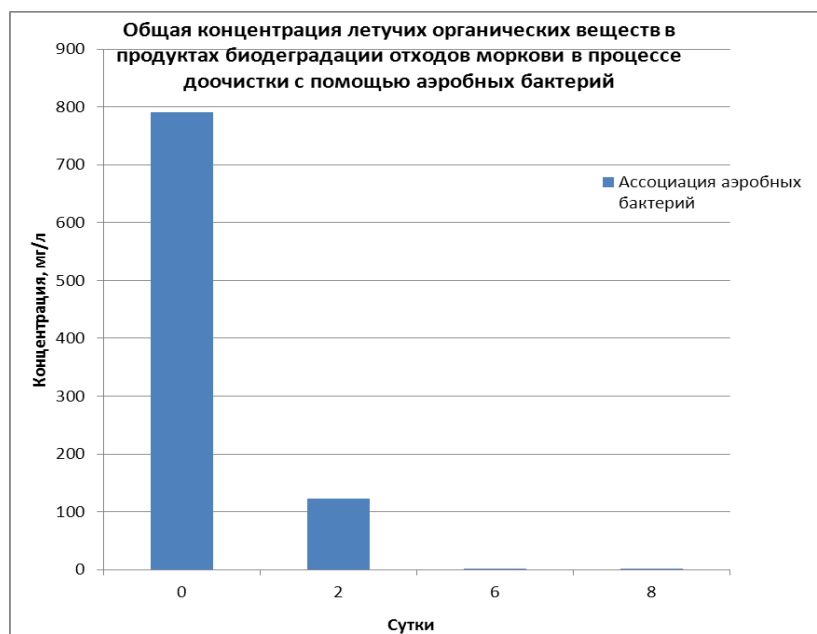


Рисунок 9. Общая концентрация летучих органических веществ в продуктах биodeградации отходов моркови в процессе доочистки при помощи аэробных бактерий

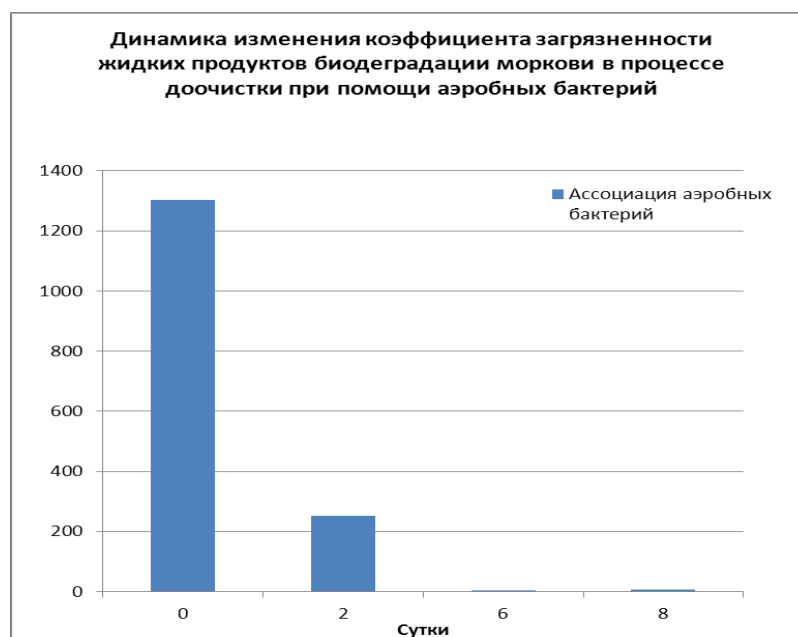


Рисунок 10. Динамика изменения коэффициента загрязненности жидких продуктов биodeградации отходов моркови в процессе доочистки при помощи аэробных бактерий

Аналогичный результат продемонстрировали грибы-целлюлолитки на субстратах, имевших кислый pH. Хроматомасс-спектрометрический анализ показал, что существенно уменьшилось число органических примесей, содержащихся в первичных продуктах деструкции отходов овощей (рис. 11), а средняя концентрация летучих органических примесей снизилась до следовых величин (рис. 12).

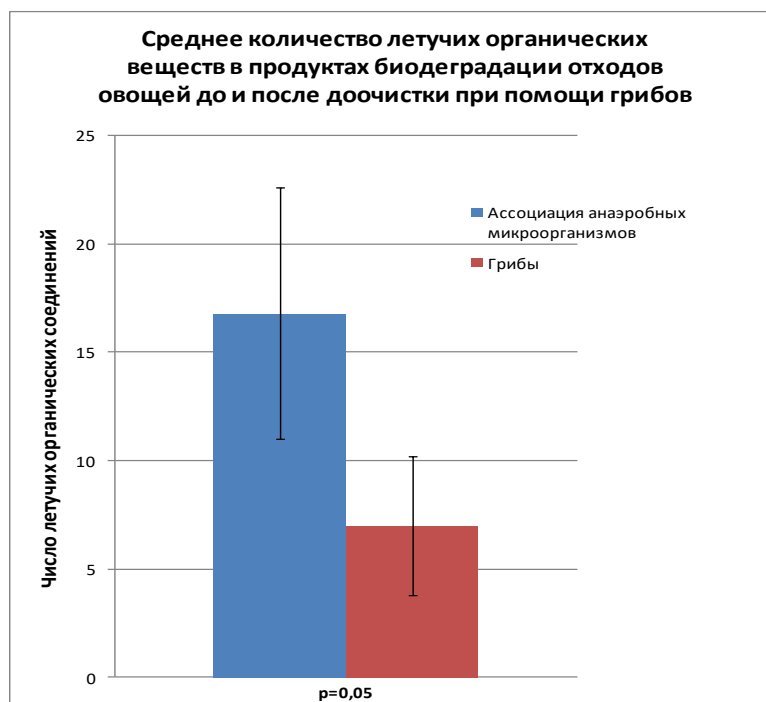


Рисунок 11. Среднее количество летучих органических веществ в продуктах биodeградации отходов овощей до и после доочистки при помощи грибов

После использования грибов, коэффициент загрязненность снизился до следовых величин. Субстрат, полученный после грибной доочистки, является практически химически чистым (по содержанию летучих органических веществ) и значительно более пригодным для дальнейшего использования в СЖО космических летательных аппаратов (рис. 12-13).

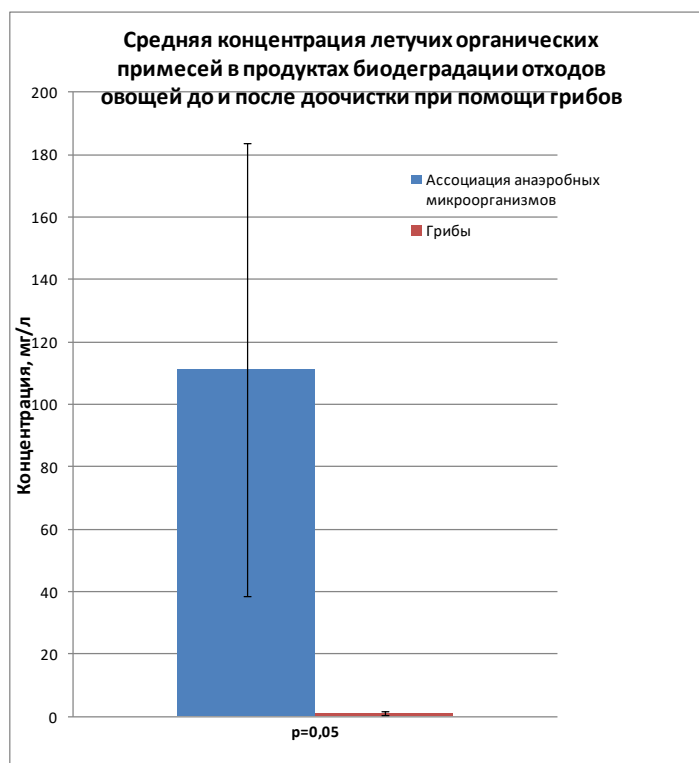


Рисунок 12. Средняя концентрация летучих органических примесей в продуктах биodeградации отходов овощей до и после доочистки при помощи грибов

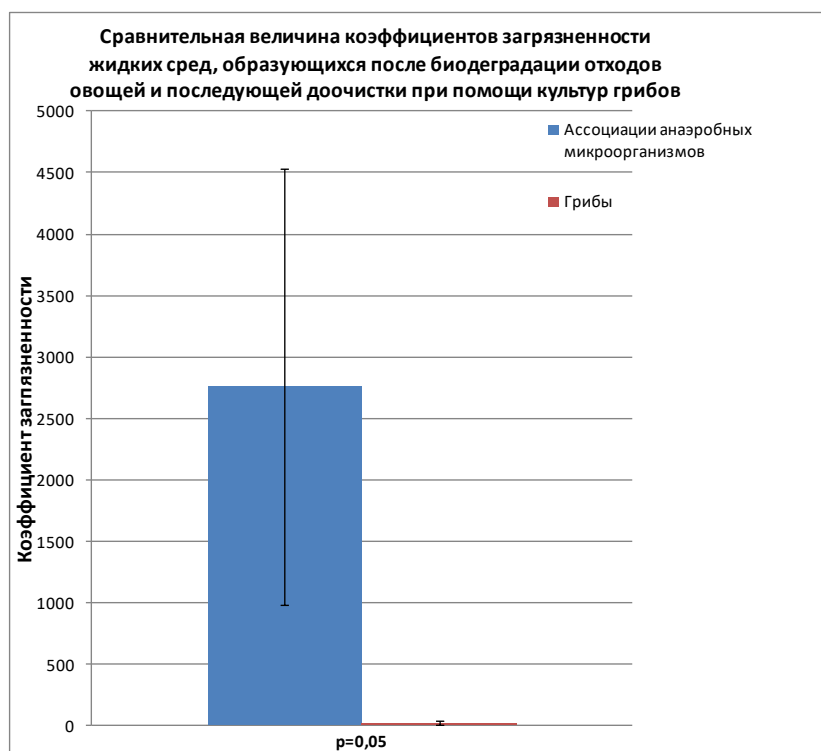


Рисунок 13. Сравнительная величина коэффициентов загрязненности жидких сред, образующихся после биodeградации отходов овощей и последующей доочистки при помощи культур грибов

Аэробные культуры бактерий и грибы могут поглощать органические вещества, остающиеся в составе культуральных сред после анаэробной биodeградации марлевых салфеток и отходов овощей. Ассоциации, подвергнувшиеся ионизирующему облучению в лиофилизированном виде (высушенные в стеклянных ампулах), показали изменение ферментационной активности, которое носило разнонаправленный характер в зависимости от природы субстрата. Процессы биodeградации картофеля и моркови протекают интенсивнее. После облучения культур степень биodeградации сухой массы увеличивается с (70-76%), до 98% для моркови и до 99% для картофеля. Хроматомасс-спектрометрический анализ образца ферментированных отходов картофеля не показал существенных отличий ни в количестве летучих примесей продуктов биodeградации, ни в общей их концентрации и величина коэффициента загрязненности практически не отличалась от контрольного образца (рис. 14-16).

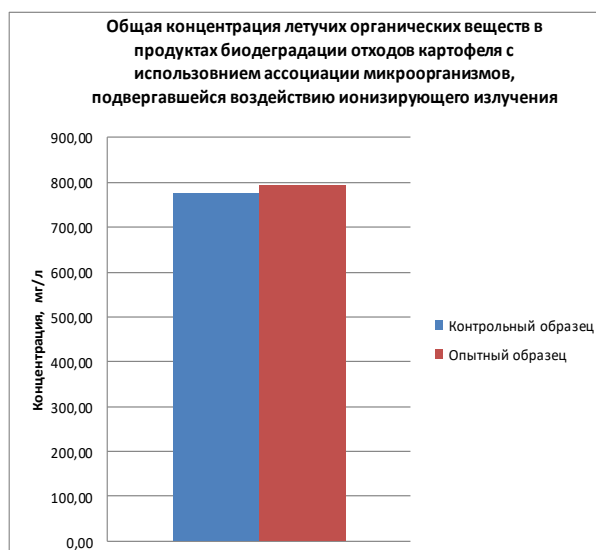


Рисунок 14. Общая концентрация летучих органических веществ в продуктах биodeградации отходов картофеля с использованием ассоциации микроорганизмов, подвергавшейся воздействию ионизирующего излучения

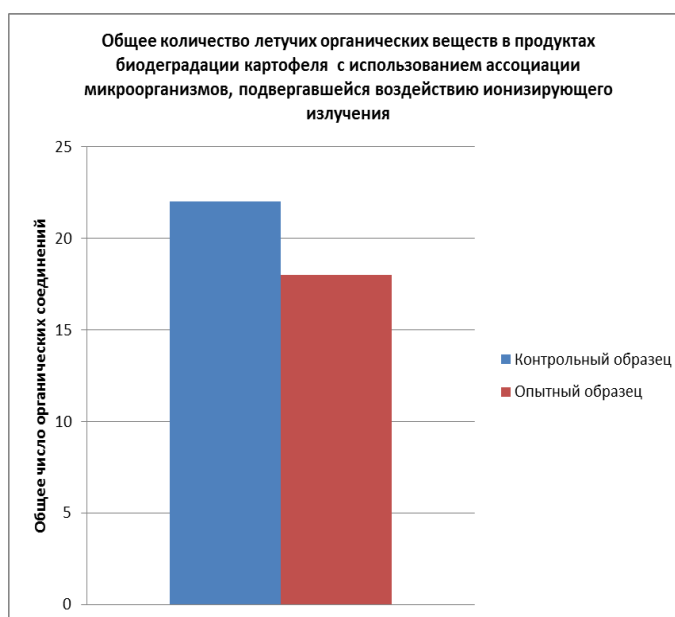


Рисунок 15. Общее количество летучих органических веществ в продуктах биodeградации отходов картофеля с использованием ассоциации микроорганизмов, подвергавшейся воздействию ионизирующего излучения

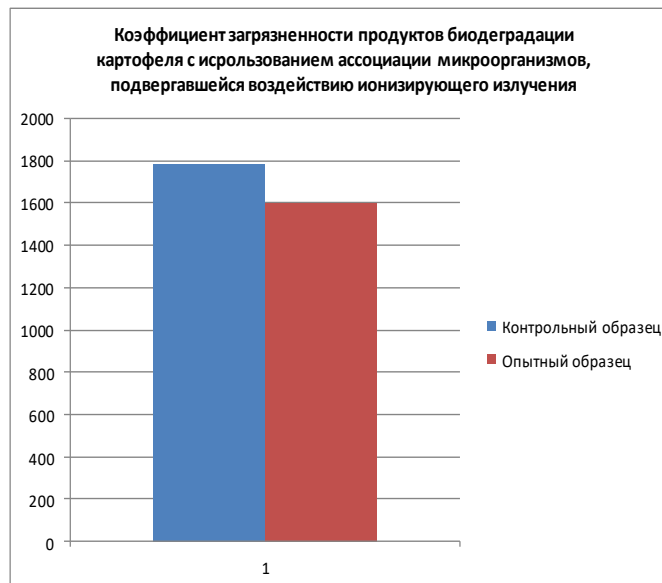


Рисунок 16. Коэффициент загрязненности продуктов биодegradации отходов картофеля с использованием ассоциации микроорганизмов, подвергавшейся воздействию ионизирующего излучения

Таким образом, моделированное космическое излучение в целом не является вредоносным фактором для целлюлолитических свойств микроорганизмов, отобранных для разложения отходов овощей.

Культивирование штамма *Trichoderma viridae* на спутнике вели в биореакторе БТС.084.011.000, Зав.№03 в течение 14 суток при 37° С. Штамм гриба *Trichoderma viridae*, выделенный из полетной пробы показал устойчивый рост в условиях идентичных условиям предполетного культивирования. Анализ состава газовой фазы методом хромато-масс-спектрометрии показал, что общая концентрация летучих органических веществ в продуктах биодegradации марли снизилась примерно в 7 раз (рис. 16 и 17) после доочистки в условиях космического полета.



Рисунок 17. Общая концентрация летучих органических соединений до и после доочистки с помощью культуры *Trichoderma viridae* в условиях космического полета

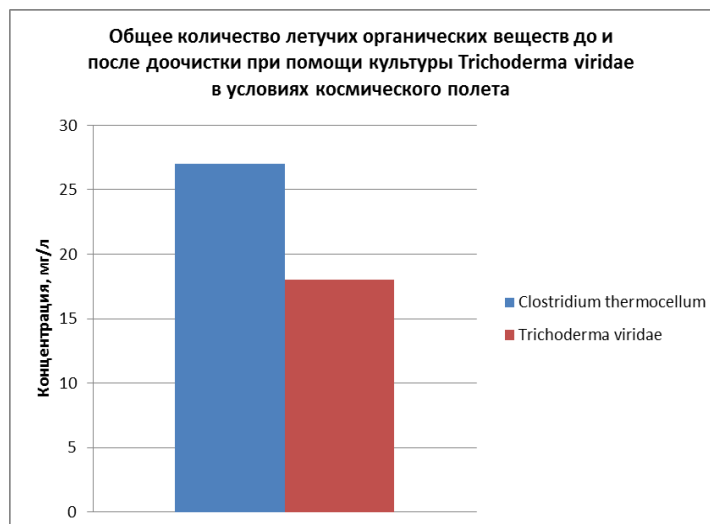


Рисунок 18. Общее количество летучих органических веществ до и после доочистки с помощью культуры *Trichoderma viridae* в условиях космического полета

Как видно из рисунка, общее количество летучих органических веществ также снизилось на 1/3.

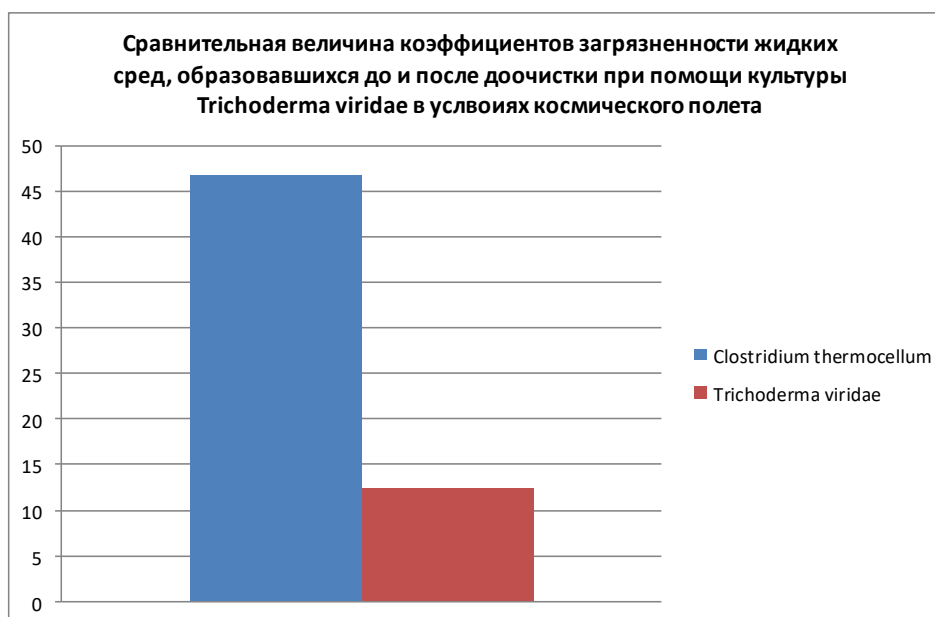


Рисунок 19. Сравнительная величина коэффициентов загрязненности жидких сред, образовавшихся до и после доочистки с помощью культуры *Trichoderma viridae* в условиях космического полета

Как видно из рисунка, коэффициент загрязненности среды уменьшился более, чем в 2 раза. Таким образом, культура *Trichoderma viridae* продемонстрировала способность производить аэробную доочистку субстрата, получаемого после анаэробной биodeградации марлевой ткани, в условиях орбитального полета.

Анализ культуральных растворов, полученных в результате биodeградации растительных остатков (на примере картофельной кожуры), выявил наличие в них ряда важных биогенных элементов. Эти данные позволяют рассматривать культуральные растворы как потенциальный источник элементов минерального питания растений. Вместе с тем концентрации минеральных элементов в полученных растворах значительно отличались от таковых в стандартных питательных растворах, используемых при выращивании растений в гидропонной культуре. Полученные растворы отличались от стандартных

более высоким содержанием К и более низким содержанием Са и N. Важно отметить, что калий, наряду с азотом, является наиболее быстро потребляемым минеральным элементом при выращивании салатных культур (Seo et al., 2009; Domingues et.al., 2012). Средний вынос К с урожаем салата составляет 77-78 г на кг сухой биомассы. Учитывая, что содержание сухого вещества в листьях салата составляет около 15%, можно рассчитать, что запас калия, содержащийся в 1 л культурального раствора, может обеспечить получение (40 ± 3) г витаминной зелени в оранжереях лунных баз. Исследования биodeградации средств личной гигиены показали высокую эффективность использования культуры *Clostridium thermocellum* при соблюдении ряда условий, которые накладывают некоторые ограничения на применение данной методики в СЖО космических аппаратов. Определенную сложность представляет соблюдение температурного режима, т.к. максимальная активность ферментов целлюлазного комплекса достижима при температуре 55°C. С другой стороны, при культивировании в сравнительно больших объемах (в ферментерах) бактерии разогревают среду из-за высокой интенсивности обменных процессов. Этот факт необходимо учитывать при масштабировании методов микробной деградации. Кроме того, важным условием является предварительная стерилизация субстрата. Помимо углеродного субстрата, *Clostridium thermocellum* как термофильный анаэроб, нуждается в среде сложного состава, включающей минеральные компоненты, запас, которых необходимо будет иметь на борту. Но их концентрация, не превышает 3 г/л, в то время как концентрация деградируемых средств личной гигиены может достигать 50 г/л.

Самой существенной проблемой является образование в ходе гидролиза целлюлозы ацетата и других продуктов биodeградации, которые вызывают значительное закисление среды и, следовательно, торможение роста культуры. Поддержание нужного уровня pH может осуществляться добавлением различных веществ (щелочь, мел) или отводом, образующихся продуктов брожения. Использование культивирования с непрерывной подачей субстрата, перемешиванием, поддержанием pH на оптимальном уровне и отводом образующихся продуктов брожения может значительно улучшить степень и скорость деградации исходного субстрата. Еще одним перспективным направлением интенсификации процесса декомпозиции средств личной гигиены может быть использование совместного культивирования двух или более культур. Предварительная обработка субстрата щелочью, измельчение, также могут повысить эффективность биodeградации. Результаты исследований свидетельствуют о том, что в большинстве случаев, концентрация летучих продуктов биотрансформации не превышает ПДК_{пкв} при соотношении объемов жидких продуктов и замкнутого объема воздушной среды 1/1000, а значит, не представляет токсикологической опасности в обитаемом объеме. Другими достоинствами метода являются анаэробность и непатогенность культуры *Clostridium thermocellum*. Однако, образующиеся после биodeградации марлевых субстратов жидкие продукты не подходят для использования в СЖО космических аппаратов. В составе продуктов биотрансформации обнаруживаются кислоты, спирты, альдегиды, эфиры и пр. летучие органические вещества, которые придают среде кислый pH. Коррекция уровня pH путем добавления щелочи или других реагентов применима лишь на стадии первичной биodeградации средств личной гигиены, поскольку нейтрализация кислот приводит к образованию солей, в т.ч. органических. Кроме того, в культуральной жидкости присутствуют олигосахариды, являющиеся побочным продуктом гидролиза целлюлозы. Наличие органических соединений в растворе мешает его непосредственному использованию в СЖО. Анаэробная биотрансформация, по существу, лишь переводит отходы из твердой формы в жидкую. Таким образом, анаэробная биотрансформация твердых субстратов не решает полностью проблему утилизации средств личной гигиены в условиях космического полета.

Один из возможных путей утилизации жидких субстратов – их доочистка с применением ацидофильных культур. Четыре вида грибов-целлюлолитиков способны поддерживать устойчивый рост, питаясь продуктами метаболизма культуры *Clostridium thermocellum*, осуществляющей первичную биотрансформацию марлевых субстратов. Полученная после доочистки жидкость содержит существенно меньшее число органических примесей по сравнению с продуктами биотрансформации марли и имела слабощелочной pH. Грибы поглощают значительно больше углерода в ходе конструктивного метаболизма по сравнению с анаэробными бактериями и быстрее увеличивают свою

биомассу. Наиболее подходящей технологией для использования данного метода в СЖО космических аппаратов является культивирование микроорганизмов в специализированных ферментерах проточно-каскадным или периодическим способом, поскольку подобная технологическая схема обеспечивает непрерывность и замкнутость последовательных процессов биодеструкции.

Первое звено должно быть представлено блоком-стерилизатором, из которого обеззараженный субстрат поступает в биореактор с культурой *Clostridium thermocellum*. По мере ферментации марли будут образовываться жидкие продукты биodeградации, биогаз и сухой остаток, состоящий преимущественно из синтетических полимеров. Жидкие продукты биodeградации марли поступают в следующий биореактор, где подвергаются ферментации посредством грибных культур. Очищенные от большинства органических примесей субстраты, после фильтрации становятся потенциально пригодными в качестве технической воды в СЖО: так их можно включать в систему СРВ-К. Полученную таким образом воду можно использовать для различных нужд: возвращать в цикл как компонент среды для ферментации, получать из нее кислород и водород путем электролиза, или же использовать как источник минеральных элементов (в данном случае этап дистилляции в СРВ-К не нужен) для питательных растворов гидропонных оранжерей, т.к. образующиеся после доочистки субстраты насыщены минеральными соединениями – продуктами аэробной минерализации и остаточными солями – компонентами синтетических сред для микроорганизмов. Растения будут поглощать минеральные соединения, и возвращать воду в СРВ-К в виде транспирационной влаги.

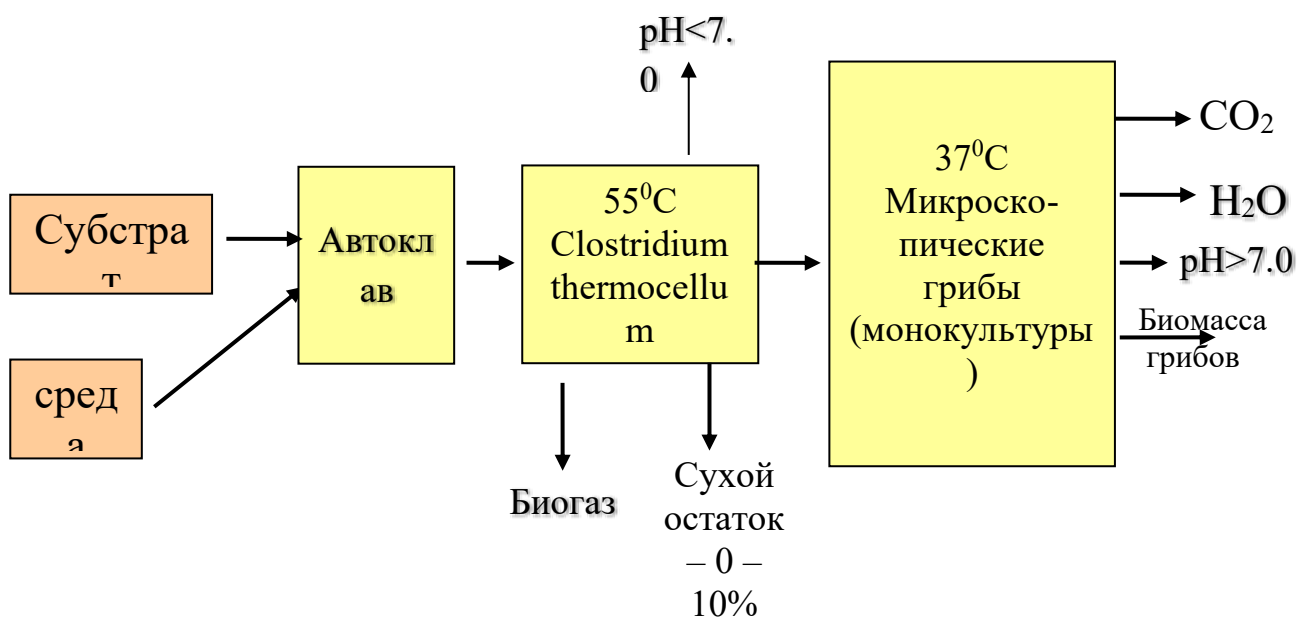


Рисунок 20. Блок-схема утилизации использованных средств личной гигиены

Микробная деградация растительных отходов будет осуществляться в две стадии. Предварительная стерилизация субстрата в данном случае не является необходимой, поскольку применяемый консорциум микроорганизмов устойчив к контаминации посторонней микрофлорой. На эффективность процесса влияет измельчение субстрата – скорость и степень биodeградации увеличивается. В культуральную жидкость не требуется добавлять никаких дополнительных соединений, вода и растительные пищевые отходы – достаточные компоненты среды. Ферментация происходит в мезофильном режиме и сопровождается значительным выделением биогаза, который можно использовать как топливо для двигателей космического аппарата, или же как топливо в топливном элементе. По сравнению с биодеструкцией марли массовая доля сухого остатка больше (4 – 30%, у марли 0-10% при коррекции pH), но он имеет сугубо биогенную природу. Образующиеся после

ферментации жидкие отходы подвергаются стерилизации (присутствие автохтонной микрофлоры неблагоприятно для монокультур, производящих доочистку) и затем, в зависимости от pH среды направляются либо в аэробный, либо в анаэробный биореактор. В первом случае жидкие продукты биотрансформации, имеющие нейтральный pH доочищают посредством ассоциации аэробных бактерий. Жидкость с кислым pH попадает в анаэробный ферментер с грибной культурой, где наряду с поглощением органических веществ происходит коррекция уровня pH до нейтрального и слабощелочного.

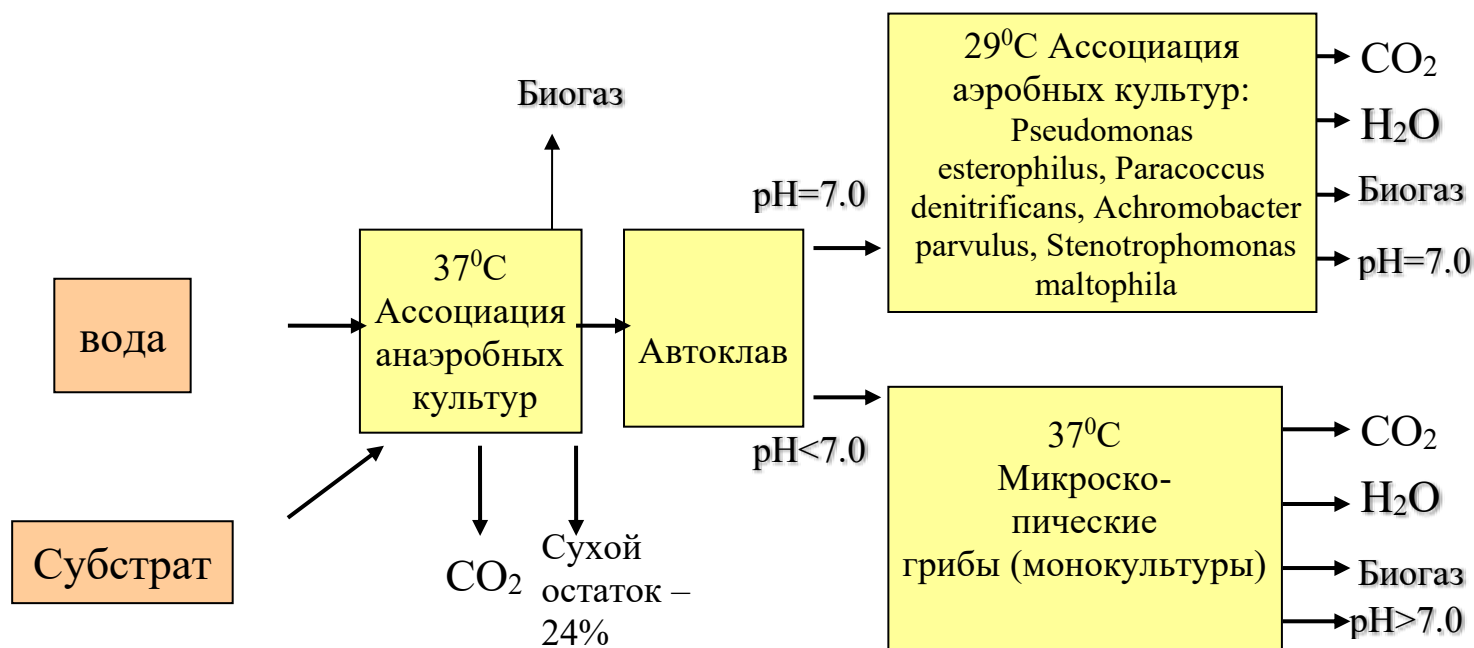


Рисунок 21. Блок-схема утилизации растительных отходов

Также потенциально полезным методом биотрансформации жидких отходов является использование микробных топливных элементов. Известно, что спектр биокатализаторов и субстратов, применяемых в процессах получения биогенного электричества весьма широк. В некоторых случаях, спонтанно возникающие микробные сообщества проявляют электрогенные свойства, не нуждаясь при этом в искусственных средах или каких-либо специально добавляемых компонентах. Подобными свойствами обладает активный ил сточных вод. Формирующаяся в нем микрофлора служила биокатализатором для микробных топливных элементов на срок до полугода. На протяжении всего периода функционирования электрохимических ячеек не производилось замены субстрата. Батарея, состоящая из 6 ячеек, оказалась способна питать приборы, работающие от слабого тока (калькулятор, электронные часы, газоанализатор). На основе микроорганизмов-электрогенов можно создать биотопливные элементы – источники постоянного тока, которые работают за счет окисления бактериями органических субстратов. Возможная область применения микробных топливных элементов ограничена мощностными характеристиками получаемого электрического тока. Тем не менее, электроприборы с малым энергопотреблением могут функционировать за счет энергии, образуемой МТЭ. В условиях орбитального полета экспонирование органических отходов в биотопливных ячейках в качестве субстрата может давать электрический ток в достаточных количествах для питания некоторых приборов, например, датчиков параметров микроклимата среды обитания. По существу, в рамках технологии МТЭ, процессы получения электроэнергии сопровождаются расходом биотоплива, то есть процессами биоутилизации. Используя автохтонную микрофлору, содержащуюся в субстрате изначально, как это было показано в экспериментах с использованием активного ила сточных вод, можно получить источник постоянного электрического тока, работающий в автономном режиме. При этом отходы, содержащиеся в биотопливной ячейке, будут самоочищаться, однако, в отличие от аэробного активного ила, в данном

случае будут преобладать процессе анаэробной ферментации за счет деятельности автохтонных электрогенных культур. Поскольку между анодом и катодом существует разность потенциалов, дополнительным положительным эффектом действия МТЭ является электрохимическое осаждение тяжелых металлов из очищаемого объема – по аналогии с известным электрохимическим процессом извлечения металлов из растворов. Для осуществления вышеуказанных технологий утилизации целлюлозосодержащих субстратов подходит система, состоящая из нескольких биореакторов, соединенных между собой в последовательные цепи. Сам процесс декомпозиции отходов должен протекать в несколько этапов. На первом марля и растительные остатки подвергаются измельчению при помощи шреддеров, а затем поступают в ферментеры, где будет происходить биотрансформация твердых субстратов в жидкость с образованием биогаза и сухого остатка. В случае с марлевыми салфетками в биореактор добавляются компоненты синтетической среды, необходимые для *Clostridium thermocellum*. Затем осуществляется стерилизация субстратов и среды. Для этого ферментеры, предназначенные для первичной биотрансформации, должны функционировать в двух режимах: биореактора и автоклава. На втором этапе в биореакторы добавляются суспензии культур, инициирующих биodeградацию целлюлозосодержащих отходов. В дальнейшем, в ходе ферментации осуществляется отвод биогаза, коррекция уровня pH и перемешивание культуральной жидкости. Анаэробная биodeградация протекает до насыщения среды продуктами обмена бактериальных культур, после чего биореактор снова переводится в режим автоклава, и жидкие продукты декомпозиции стерилизуются. По мере накопления сухого остатка в культивационных блоках его следует удалять. На третьем этапе, полученные жидкости переносятся в ферментеры для аэробной и анаэробной доочистки, после которой субстраты подвергаются фильтрации.

В качестве четвертого этапа можно рассматривать экспонирование полученной воды в гидропонных оранжереях с обогащением ее минеральными соединениями в случае необходимости. Для оценки возможных изменений ферментационных свойств микроорганизмов в условиях космического полета были проведены опыты по экспонированию ампул с лиофилизированными ассоциациями анаэробных микроорганизмов, использовавшимися в работе для гидролиза отходов овощей. В условиях космического полета микроорганизмы могут изменять свою ферментационную активность, что может сказаться на процессах биodeградации.

Длительное выдерживание лиофилизированных аэробных мезофильных культур под ионизирующим излучением, со спектром, сходным с параметрами орбитального излучения приводило к значительному изменению биodeградационных свойств бактерий. При этом на одном субстрате наблюдалось стойкое угнетение процессов разложения, а на двух других, наоборот существенное повышение степени потребления субстрата. С большой долей вероятности можно предположить, что условия космического полета скажутся на ферментативной активности микроорганизмов-биодеструкторов, что, в свою очередь, повлияет на степень декомпозиции субстрата.

Аэробная доочистка гидролизированных органических отходов, также может быть подвержена влиянию условий космического полета. В рамках данной работы был проведен эксперимент на борту биоспутника Бион-М, посвященный доочистке продуктов микробного гидролиза марлевой ткани. По критерию наличия летучих органических примесей, можно констатировать, что доочистка в условиях космического полета оказалась лишь в половину эффективной по сравнению с опытами, проводившимися в стандартных условиях. Более высокую эффективность доочистки в наземной ферментации, выражающуюся в почти полном исчезновении летучих органических примесей по сравнению с полетным культивированием, можно объяснить наличием аэробных условий на Земле. В то время как, на биоспутнике ферментация проводилась в микроаэрофильных условиях из-за особенностей конструкции биореактора и технических ограничений в постановке эксперимента.

В то же время нельзя исключать и влияние факторов космического полета на процессы биodeградации в данном случае. По результатам эксперимента можно предположить, что оно либо отсутствовало вовсе, либо сыграло определенную роль в угнетении жизнедеятельности культуры *Triphoderma viridae*. Несмотря на ограниченное количество кислорода, в связи с отсутствием системы аэрации в биореакторе типа «Фрагментер», штамм *Triphoderma viridae* продемонстрировал способность

производить аэробную доочистку субстрата, получаемого после анаэробной биodeградации марлевой ткани в условиях орбитального полета.

Проведенные исследования показали, что доочистка при помощи целлюлолитических грибов является эффективной составляющей утилизации предметов гигиены космонавтов при помощи микробных сообществ в условиях космического полета. Технология микробной переработки органических отходов в условиях космоса, представляется востребованной и перспективной.

Заключение

Подытоживая наше исследование, приводим следующее резюме:

1. С помощью культуры *Clostridium thermocellum* можно трансформировать сухую и влажную медицинскую марлю в жидкость и биогаз.
2. С помощью ассоциаций анаэробных мезофильных культур можно трансформировать растительные отходы в жидкость и биогаз. Ферментативные свойства ассоциаций сохраняются после воздействия на них смоделированного космического излучения.
3. Целлюлолитические грибы способны потреблять органические вещества, содержащиеся в жидких продуктах биотрансформации марли и растительных отходов, осуществляя тем самым их доочистку в т.ч. в условиях космического полета.
4. Аэробные мезофильные бактерии (в составе консорциума) и культуры целлюлолитических грибов способны потреблять органические вещества, содержащиеся в жидких продуктах биотрансформации растительных отходов, осуществляя тем самым их доочистку.
5. Культуральные жидкости, образующиеся после биотрансформации марлевых салфеток и растительных отходов можно рассматривать как потенциальный источник элементов минерального питания растений.
6. Анаэробный активный ил как возможный компонент узла переработки физиологических отходов БСЖО может служить источником энергии для питания приборов с малым энергопотреблением.

Список литературы

1. Беркович Ю.А., Кривобок Н.М., Смолянина С.О., Ерохин А.Н. Космические оранжереи: настоящее и будущее. М.: Слово, 2005, С. 92-94.
2. Романов С.Ю., Железняков А.Г., Телегин А.А. и др. Системы жизнеобеспечения экипажей длительных межпланетных экспедиций // Известия РАН. Энергетика. 2007. № 3. С. 57-74.
3. Jones H. Comparison of bioregenerative and physical-chemical life support systems // SAE Technical paper 2006-01-2082, 2006.
4. Mergeay M., Verstraete W., Dubertret G., Lefort-Tran M., Chipaux C. Binot R. MELISSA – a microorganisms based model for CELSS development // Proceedings of the 3 rd symposium on space thermal control and life support system (3-6 October 1988, Noordwijk). pp. 65-68.
5. Tamponnet C., Binot R., Lasseur C., Savage C. Man in space – an European challenge in biological life support // ESA bulletin. 1991. Vol. 67. pp. 39-49.
6. Tranquille N., Emeis J. De Chambure D., Binot R., Tamponnet C. Spirulina acceptability trials in rats. A study for the MELISSA life support system // Advances in space research. 1994. Vol 14. № 1(1). pp. 167-170.

The concept of biodegradable waste management on planetary bases

Vyacheslav K. Ilyin

Senior Researcher, Head of the Department, Head of the Laboratory, MD, Professor, Laureate of the Russian Government Prize in Science and Technology, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation
Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia
piton2004@bk.ru
ORCID 0000-0003-3896-5003

Denis V. Korshunov

Junior research assistant
Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia
megalogdon84@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Lyubov V. Starkova

Researcher, Candidate of Technical Sciences
Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia
Starkova@imbp.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 02.10.2025

Accepted 27.11.2025

Published 30.12.2025

UDC 628.4:629.783

DOI 10.25726/g8307-7125-2940-q

EDN XPXNUC

VAK 1.5.15. Ecology (technological sciences)

OECD 01.00.00. Natural Sciences

Abstract

The disposal of solid household waste (MSW) and agricultural and food production waste in terrestrial conditions has already become a key environmental problem in terrestrial conditions. This issue is especially acute in modern megacities. In the case of the use of organic waste disposal systems in space life support systems, in addition to the environmental aspect of the issues of depth and efficiency of processing, technical problems and limitations become very relevant. The technologies used must meet the requirements of low energy consumption and high processing speed, which in turn affects the area, volume and weight of the processing system. The long duration of the planned space expeditions requires the creation of maximally enclosed space systems for crews in spacecraft with cyclic regeneration of substances in an artificial ecosystem. One of the main conditions for increasing the coefficient of closure of the LCW is the recycling of waste in order to return the maximum proportion of the elements contained in them to the circulation of substances on board the SPACECRAFT. The article provides a detailed analysis of regenerated substances in the living conditions of a planetary station or long-term space flights.

Keywords

space expedition, manned space apparatus, household waste, circulation of substances, utilization, regeneration, closed life support systems, bio-processing systems.

Completed within the framework of the World-class Scientific center Development Program «High-tech Bioeconomics» until 2030 in the order of co-fulfillment at the expense of funds and to fulfill obligations under the Agreement dated 06/27/2025 № 075-15-2025-578.

References

1. Berkovich Yu.A., Krivobok N.M., Smolyanina S.O., Erokhin A.N. Space greenhouses: present and future. M.: Word, 2005, pp. 92-94.
2. Jones H. Comparison of bioregenerative and physical-chemical life support systems // SAE Technical paper 2006-01-2082, 2006.
3. Mergeay M., Verstraete W., Dubertret G., Lefort-Tran M., Chipaux C. Binot R. MELISSA – a microorganisms based model for CELSS development // Proceedings of the 3rd symposium on space thermal control and life support system (3-6 October 1988, Noordwijk). pp. 65-68.
4. Romanov S.Yu., Zheleznyakov A.G., Telegin A.A. et al. Life support systems for crews of long-term interplanetary expeditions // News of the Russian Academy of Sciences. Energy. 2007. № 3. pp. 57-74.
5. Tamponnet C., Binot R., Lasseur C., Savage C. Man in space – A European challenge in biological life support // ESA bulletin. 1991. Vol. 67. pp. 39-49.
6. Tranquille N., Emeis J. De Chambure D., Binot R., Tamponnet C. Spirulina acceptability trials in rats. A study for the MELISSA life support system // Advances in space research. 1994. Vol 14. № 1(1). pp. 167-170.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

Разработка концепции антропологического биотопа как интегрального показателя реализации социально-экологического развития умного города

Михаил Михайлович Подколзин

Доктор философии (сельское хозяйство), профессор-ассист, главный операционный директор
NRPro Global
Таллинн, Эстония
coo@nrpro.tech
ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 22.10.2024
Принята 04.11.2025
Опубликована 30.12.2025

УДК 711.4:504:316
DOI 10.25726/m6945-6875-2124-o
EDN XNMMZL
БАК 1.5.15. Экология (технические науки)
OECD 01.00.00. Natural Sciences

Аннотация

Актуальность темы обусловлена необходимостью разработки интегральных показателей качества жизни населения, учитывающих как экологические, так и социокультурные аспекты городской среды. Цель исследования заключается в разработке целостной модели формирования процессов управления городской средой на основе искусственного интеллекта и больших данных. Для сбора данных использовались методы дистанционного зондирования, краудсорсинга, анализа социальных сетей. Обработка данных проводилась с применением нейросетевых алгоритмов и методов машинного обучения. В рамках исследования проанализированы существующие подходы к оценке качества городской среды, проанализированы текущие параметры эффективности применения интегральных показателей для оценки реализации стратегий устойчивого развития города. Новизной исследования является предложенная концепция антропологического биотопа как новый подход к комплексной оценке качества окружающей среды в условиях цифровизации городов. Результаты исследования показали, что предложенная методология позволяет получить комплексную оценку качества городской среды, учитывающую взаимосвязи между экологическими, социальными и технологическими факторами. Интегральный показатель качества окружающей среды, рассчитанный на основе нейросетевых моделей, демонстрирует высокую прогностическую точность (коэффициент детерминации – 0,87). Проведенный анализ сценариев реализации природоохранных мероприятий показал, что оптимизация системы мониторинга и размещения элементов экологического каркаса антропо позволяет повысить интегральный показатель качества среды на 15-20%. Полученные результаты имеют значение для развития теории урбоэкологии и практики устойчивого городского планирования. Дальнейшие исследования могут быть направлены на создание динамических моделей антропологического биотопа, учитывающих механизмы обратных связей между компонентами городской среды.

Ключевые слова

антропологический биотоп, антроп, качество окружающей среды, цифровизация, устойчивое развитие, нейросетевое моделирование, BigData, экологический мониторинг.

Введение

Урбанизация является одним из ключевых трендов современного мирового развития. По данным ООН, в 2022 году 56,2% населения Земли проживало в городах, а к 2050 году этот показатель увеличится до 68,4%. В России уже сегодня 74,8% жителей являются горожанами, а в ряде регионов уровень урбанизации превышает 90%. Концентрация населения и экономической активности в крупнейших агломерациях приводит к формированию специфической городской среды, характеризующейся высокой плотностью застройки, развитой транспортной инфраструктурой, интенсивными потоками вещества и энергии (De Jong, 2015).

Экологические последствия урбанизации носят крайне неоднозначный характер. С одной стороны, города выступают центрами инноваций и генераторами эффективных решений в сфере ресурсосбережения, декарбонизации, адаптации к изменениям климата. Показатели энергоемкости ВРП и углеродоемкости в расчете на душу населения в городах в среднем на 15-20% ниже, чем в сельской местности, благодаря эффектам масштаба, современной инфраструктуре и сервисной экономике (Мао, 2019). Системы централизованного водоснабжения и водоотведения позволяют очищать до 95% коммунально-бытовых стоков, а развитие общественного электротранспорта способствует улучшению качества атмосферного воздуха и снижению акустической нагрузки.

С другой стороны, высокая территориальная концентрация источников антропогенного воздействия приводит к формированию обширных зон экологического неблагополучия, деградации природных экосистем, ухудшению здоровья и качества жизни горожан. По оценкам ВОЗ, загрязнение воздуха является причиной около 4,2 млн преждевременных смертей в год, из которых 91% приходится на города. Ежегодный экономический ущерб от загрязнения окружающей среды составляет 4,6 трлн долл. или 6,2% мирового ВВП. При этом 75% объема глобальных выбросов парниковых газов генерируется всего на 2% обитаемой суши – территории крупнейших городских агломераций (Arsova, 2021).

Экологическая ситуация в российских городах во многом является отражением общемировых проблем и вызовов. По данным Росгидромета, в 2021 году в 40 городах страны с населением свыше 100 тыс. чел. (21% от общего числа) уровень загрязнения атмосферного воздуха характеризовался как высокий и очень высокий. Объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в городах составляет около 18 млн т в год, а от автотранспорта – 15,2 млн т, что суммарно эквивалентно 83% валовых эмиссий в стране. В водные объекты городов ежегодно сбрасывается более 11 км³ сточных вод, из которых 19% являются загрязненными. На территории агломераций ежегодно образуется около 55 млн т твердых коммунальных отходов, уровень переработки которых не превышает 20%.

Устойчивое развитие городов, обеспечивающее высокое качество жизни и здоровья населения при минимизации негативного воздействия на компоненты биосферы, является важнейшим приоритетом государственной политики России. В 2019 году стартовал национальный проект «Экология», нацеленный на кардинальное снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха в крупных промышленных центрах, повышение качества питьевой воды, эффективное обращение с отходами производства и потребления, сохранение биологического разнообразия (Wolniak, 2022). Важнейшим инструментом достижения этих целей является цифровая трансформация систем мониторинга и управления качеством окружающей среды в контексте концепции умного и устойчивого города (Marsal-Llacuna, 2015).

Внедрение цифровых платформ обратной связи с населением и вовлечения горожан в краудсорсинговые проекты экологического мониторинга (citizen science) способствует повышению уровня осведомленности и экологической ответственности общества. Так, по данным проекта «Экокарта» в Москве, количество сообщений граждан о фактах загрязнения окружающей среды, поступивших через мобильное приложение, выросло с 8,4 тыс. в 2015 году до 164 тыс. в 2021 году. Доля обращений, обработанных городскими службами в течение 8 дней, достигла 94% (De Crescenzo, 2021). Важную роль в развитии таких инициатив играют механизмы народного бюджетирования и общественного участия в принятии решений (Augsberger, 2017).

В то же время эффективность использования цифровых технологий в управлении экологическим качеством городов существенно различается в разрезе отдельных территорий. По оценкам Минстроя России, в 2021 году доля городов с благоприятной средой обитания составила лишь 44%, а среднее значение индекса качества городской среды достигло 225 баллов из 360 возможных. Основные проблемы связаны с недостаточным уровнем покрытия территорий интеллектуальными системами мониторинга, низким качеством и разрозненностью экологических данных, дефицитом квалифицированных кадров в сфере цифровой экологии, слабой интеграцией результатов мониторинга в процедуры принятия управленческих решений (Fernandez-Anez, 2018).

Для эффективной трансформации российских городов на принципах устойчивого развития и зеленой экономики необходим комплексный научно обоснованный инструментарий интеллектуального анализа экологических данных и поддержки принятия решений, учитывающий системные взаимосвязи между компонентами антропоэкосистем. Разработка методов и технологий «умного» экологического мониторинга и управления качеством городской среды с использованием потенциала цифровой экономики, построение многокритериальных моделей оптимизации траекторий устойчивой урбанизации является актуальной задачей, имеющей большое теоретическое и прикладное значение (Herdiansyah, 2023). От ее решения во многом зависят перспективы реализации национальных целей низкоуглеродного развития, зеленого роста, повышения качества жизни и здоровья населения России.

Материалы и методы исследования

Исследование основано на комплексном анализе данных о состоянии окружающей среды и эффективности управления экологическим качеством городской среды в 10 крупнейших городах России: Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске, Екатеринбурге, Казани, Нижнем Новгороде, Челябинске, Омске, Самаре и Ростове-на-Дону. Выбор городов обусловлен их ведущей ролью в социально-экономическом развитии страны, высокой концентрацией населения (свыше 1 млн жителей) и репрезентативностью с точки зрения разнообразия природно-климатических условий, структуры экономики и экологических проблем (Podkolzin, 2014).

Информационную базу исследования составили данные государственной статистики, ведомственная отчетность природоохранных органов, материалы дистанционного зондирования Земли, результаты экологического мониторинга и социологических опросов за период 2010-2022 годов. В частности, использованы временные ряды показателей выбросов загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников, показатели качества атмосферного воздуха, водных объектов и почвенного покрова, данные об образовании и утилизации отходов производства и потребления, информация о развитии зеленой инфраструктуры городов (Podkolzin, 2016). Источниками эмпирических данных послужили базы Росстата, Росприроднадзора, Росгидромета, геоинформационные системы Sentinel Hub, ESRI ArcGIS, OpenStreetMap, сервисы дистанционного мониторинга окружающей среды Airly, Aerostate, материалы международных проектов UrbanFluxes, PULSE, CITI-SENSE.

Для оценки эффективности внедрения цифровых технологий анализировались показатели развития интеллектуальных систем экологического мониторинга в рассматриваемых городах, включая количество стационарных и мобильных станций контроля, охват территории сенсорными сетями IoT, объемы автоматически обрабатываемых данных, характеристики моделей машинного обучения и предиктивной аналитики. Сбор информации осуществлялся путем опроса представителей профильных департаментов администраций городов, анализа публичных отчетов о реализации проектов «Умный город» и «Безопасный город», систематизации научных публикаций в базах Scopus, Web of Science, РИНЦ.

Первичная обработка исходных данных включала нормализацию и стандартизацию показателей, устранение выбросов и пропусков в наблюдениях, проверку на нормальность распределения. Для последующего анализа использовались как абсолютные значения показателей, так и удельные величины, рассчитанные на единицу площади территории, одного жителя, единицу ВРП.

На первом этапе анализа выполнена оценка текущего состояния окружающей среды в городах по комплексу индикаторов, характеризующих качество атмосферного воздуха, водных ресурсов,

почвенно-растительного покрова, уровень шумового и электромагнитного загрязнения, образование и утилизацию отходов. Для интегральной оценки экологического благополучия территорий рассчитывался многокритериальный индекс на основе энтропийного подхода и метода анализа иерархий. Весовые коэффициенты частных индикаторов определялись экспертным путем методом парных сравнений с последующей нормировкой матрицы приоритетов.

На втором этапе с помощью методов корреляционного и кластерного анализа выявлены основные факторы, определяющие дифференциацию городов по уровню антропогенной нагрузки и экологическому состоянию. Для выделения однородных групп территорий применялся метод *k*-средних с предварительной оценкой оптимального числа кластеров по *silhouette*.

Третий блок анализа посвящен оценке влияния экологических факторов на здоровье и качество жизни горожан. Помимо объективных показателей заболеваемости, смертности, ожидаемой продолжительности жизни использовались субъективные оценки удовлетворенности населения состоянием окружающей среды, полученные в ходе репрезентативных социологических опросов (выборка – 1000 респондентов в каждом городе, квотированная по полу, возрасту, уровню образования). Для выявления зависимостей в системе «среда-здоровье» применялись методы логистической регрессии, *structural equation modeling*, анализа соответствий.

На следующем этапе проведена систематизация и бенчмаркинг практик экологического управления в рассматриваемых городах, включая реализованные природоохранные мероприятия, объемы зеленых инвестиций, применяемые институциональные и экономические инструменты регулирования. Выполнен углубленный анализ кейсов успешной трансформации городской среды на принципах зеленой экономики, циркулярности, климатической нейтральности (Москва, Казань, Нижний Новгород).

Ключевой этап исследования связан с оценкой эффективности использования цифровых технологий (IoT, BigData, AI) для мониторинга и управления экологическим качеством городской среды. Проанализированы показатели производительности различных сенсорных сетей (электрохимических газоанализаторов, оптических счетчиков частиц, шумомеров, автоматических метеостанций), точность дистанционных методов экологического контроля по сравнению с наземными измерениями, вычислительные характеристики предиктивных моделей. В частности, выполнено сопоставление результатов моделирования загрязнения атмосферного воздуха с помощью сверточных нейронных сетей (архитектура U-Net, размерность входного слоя 256x256x9, 25 эпох обучения на выборке из 10000 наблюдений) и традиционных детерминированных моделей (AERMOD, CALPUFF, CALINE) по метрикам MAE, MSE и коэффициенту детерминации. Точность идентификации несанкционированных свалок по мультиспектральным снимкам Sentinel-2 оценивалась на тестовом полигоне площадью 100 км² с применением алгоритмов random forest, SVM, градиентного бустинга.

Для оценки экономической эффективности инвестиций в цифровые системы экомониторинга использовался *cost-benefit* анализ с горизонтом прогнозирования 10 лет. Монетизация эффектов осуществлялась на основе методологии оценки экосистемных услуг, стоимости статистической жизни, готовности населения платить за улучшение качества окружающей среды.

На заключительном этапе разработаны динамические модели управления развитием урбанизированных территорий, позволяющие осуществлять многокритериальную оптимизацию стратегий устойчивой трансформации городов по экологическим, социальным и экономическим параметрам. Модели реализованы в парадигме системной динамики с использованием языка STELLA и представляют собой систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику компонентов городских экосистем в условиях реализации различных управляющих воздействий. Верификация и валидация моделей осуществлялась на ретроспективных данных, точность прогнозирования на контрольной выборке составила 85-92% по различным индикаторам.

Результаты и обсуждение

Для оценки эффективности реализации природоохранных мероприятий в рамках стратегий устойчивого развития городов проведен анализ динамики ключевых эколого-экономических показателей в разрезе крупнейших мегаполисов России за период 2010-2020 годов.

Таблица 1. Динамика эколого-экономических показателей устойчивого развития городов России

Город	Снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, %	Доля населения, обеспеченного качественной питьевой водой, %	Доля переработки твердых коммунальных отходов, %	Энергоемкость ВРП, кг у.т./10 тыс. руб.	Доля зеленых зон в общей площади города, %
Москва	-23,5	99,7	28,2	12,4	48,3
Санкт-Петербург	-19,8	98,9	23,6	15,7	42,6
Новосибирск	-17,4	96,5	18,9	21,3	39,4
Екатеринбург	-21,2	97,3	20,5	18,6	44,1
Казань	-26,7	99,2	31,4	10,8	51,2
Нижний Новгород	-18,6	95,8	17,3	22,5	37,9
Челябинск	-15,3	94,2	15,8	24,8	35,6
Омск	-16,9	95,1	16,5	23,1	36,2
Самара	-20,4	96,7	19,2	19,3	40,8
Ростов-на-Дону	-22,6	98,1	22,8	17,2	43,5

Наибольший прогресс в снижении удельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу достигнут в Казани (-26,7%), Москве (-23,5%) и Ростове-на-Дону (-22,6%), что обусловлено масштабной модернизацией промышленных предприятий, оптимизацией транспортной инфраструктуры и развитием экологически чистых видов общественного транспорта. В то же время в Челябинске и Омске темпы сокращения эмиссий существенно ниже (-15,3% и -16,9% соответственно), что связано со сложной структурой экономики этих городов и высокой долей «грязных» отраслей.

По уровню обеспеченности населения качественной питьевой водой лидируют Москва (99,7%), Казань (99,2%) и Санкт-Петербург (98,9%), где реализованы масштабные программы реконструкции систем водоснабжения и водоочистки. Минимальные значения показателя отмечены в Челябинске (94,2%), Омске (95,1%) и Нижнем Новгороде (95,8%), что свидетельствует о необходимости ускорения модернизации объектов водохозяйственного комплекса.

В сфере обращения с отходами наиболее эффективные системы раздельного сбора и переработки ТКО функционируют в Казани (доля переработки 31,4%), Москве (28,2%) и Санкт-Петербурге (23,6%). Опыт этих городов по внедрению современных технологий автоматизированной сортировки, компостирования и вторичного использования отходов может быть тиражирован в других крупных центрах. В аутсайдерах по данному показателю находятся Челябинск (15,8%), Омск (16,5%) и Нижний Новгород (17,3%), для которых актуальна задача формирования эффективной инфраструктуры обращения с отходами.

Минимальная энергоемкость экономики, оцениваемая по соотношению потребления топливно-энергетических ресурсов и объема ВРП, зафиксирована в Казани (10,8 кг у.т./10 тыс. руб.), Москве (12,4 кг у.т./10 тыс. руб.) и Санкт-Петербурге (15,7 кг у.т./10 тыс. руб.). Это результат последовательной политики энергосбережения, модернизации инженерной инфраструктуры и оптимизации систем теплоснабжения. Наиболее энергорасточительны экономики Челябинска (24,8 кг у.т./10 тыс. руб.), Омска

(23,1 кг у.т./10 тыс. руб.) и Нижнего Новгорода (22,5 кг у.т./10 тыс. руб.), что во многом обусловлено отраслевой спецификой и технологической отсталостью местной промышленности.

Наиболее развитые системы городского озеленения сформированы в Казани (доля зеленых зон 51,2%), Москве (48,3%) и Екатеринбурге (44,1%), что является результатом многолетней целенаправленной политики по созданию комфортной и экологичной городской среды. В то же время в Челябинске, Омске и Нижнем Новгороде площадь зеленых насаждений не превышает 36-38% территории города, что существенно ниже рекомендуемых нормативов (40-50%).

Сравнение удельных показателей эффективности реализации природоохранных мероприятий в расчете на единицу затрат показало, что максимальную экологическую отдачу обеспечивают инвестиции в модернизацию систем теплоснабжения, развитие общественного электротранспорта и рекультивацию полигонов ТКО.

Таблица 2. Удельная эколого-экономическая эффективность природоохранных мероприятий

Мероприятие	Снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, т/млн руб.	Снижение сбросов загрязненных сточных вод, тыс. м3/млн руб.	Увеличение доли переработки ТКО, %/млн руб.	Снижение энергоемкости, кг у.т./10 тыс. руб./млн руб.	Увеличение площади зеленых насаждений, га/млн руб.
Модернизация систем теплоснабжения	124,8	-	-	3,6	-
Развитие общественного электротранспорта	96,3	-	-	2,8	-
Рекультивация полигонов ТКО	-	18,5	6,2	-	15,4
Ликвидация несанкционированных свалок	-	8,3	2,7	-	6,9
Строительство мусоросортировочных комплексов	-	-	4,1	-	-
Реконструкция очистных сооружений	-	21,7	-	-	-
Создание особо охраняемых природных территорий	-	-	-	-	28,6
Модернизация уличного освещения	-	-	-	1,5	-
Строительство велодорожек и пешеходных зон	30,2	-	-	0,7	8,1
Модернизация промышленных предприятий	67,5	12,8	-	2,3	-

Так, модернизация каждого теплоисточника в среднем обеспечивает сокращение выбросов на 124,8 т и снижение энергоемкости на 3,6 кг у.т./10 тыс. руб. в расчете на 1 млн руб. инвестиций. Развитие электротранспорта дает эффект в размере 96,3 т снижения эмиссий и 2,8 кг у.т./10 тыс. руб. экономии

ТЭР на 1 млн руб. вложений. Рекультивация 1 га полигона ТКО позволяет увеличить площадь зеленых насаждений на 15,4 га и долю переработки отходов на 6,2%, а также сократить сброс загрязненных вод на 18,5 тыс. м³ в расчете на 1 млн руб. затрат.

Для обоснования приоритетов инвестирования в рамках стратегии устойчивого развития проведено сценарное моделирование эколого-экономической эффективности различных комбинаций природоохранных мероприятий на период до 2030 года. При этом использовалась комплексная динамическая модель, учитывающая прямые и косвенные эффекты реализации проектов, а также синергетическое взаимодействие. Ключевыми критериями оптимизации выступали интегральный индекс экологической эффективности (ИЭЭ), характеризующий комплексную динамику состояния окружающей среды, индекс устойчивого развития города (УРГ), агрегирующий экономические, экологические и социальные индикаторы, а также показатель эколого-экономической эффективности инвестиций, отражающий соотношение положительных эффектов и затрат по проектам.

Таблица 3. Результаты сценарного моделирования стратегии устойчивого развития города

Сценарий	Рост ИЭЭ, %	Рост УРГ, %	Эколого-экономическая эффективность, руб./руб.
Базовый (без дополнительных мероприятий)	2,5	3,8	0,7
Технологическая модернизация	8,3	6,2	1,4
Развитие зеленой инфраструктуры	11,6	7,5	2,2
Экологизация транспорта	6,7	5,3	1,8
Внедрение принципов циркулярной экономики	9,2	6,9	1,6
Комплексная экологизация городской среды	18,4	12,7	2,6

Результаты моделирования показали, что базовый сценарий, предполагающий инерционное развитие без реализации дополнительных природоохранных мероприятий, обеспечивает минимальный прирост индекса экологической эффективности (на 2,5% за 10 лет) и индекса устойчивого развития города (на 3,8%). При этом каждый рубль затрат на функционирование городского хозяйства генерирует лишь 0,7 руб. положительных эффектов.

Наибольшим потенциалом экологизации обладает сценарий развития зеленой инфраструктуры, предусматривающий создание новых парковых зон, расширение площади зеленых насаждений, формирование непрерывного экологического каркаса города. Его реализация позволяет повысить ИЭЭ на 11,6%, УРГ – на 7,5% при эколого-экономической эффективности инвестиций 2,2 руб./руб. Высокие показатели эффективности также демонстрирует сценарий экологизации транспорта (рост ИЭЭ на 6,7%, УРГ – на 5,3%, эффективность инвестиций – 1,8 руб./руб.), основанный на развитии инфраструктуры экологически чистой мобильности – общественного электротранспорта, пешеходных зон, велодорожек.

Комплексный сценарий устойчивого развития, предполагающий синхронизированную реализацию широкого спектра природоохранных мероприятий во всех ключевых секторах городского хозяйства, обеспечивает синергетический эффект и максимальный прирост целевых индикаторов (ИЭЭ – на 18,4%, УРГ – на 12,7%). При этом интегральная эколого-экономическая эффективность инвестиций достигает 2,6 руб./руб., что свидетельствует о высокой рентабельности вложений в экологизацию и устойчивое развитие. Вместе с тем качество экологического мониторинга определяется его наполненностью, охватом и достоверностью. Для этого необходим расчет показателя качества городской экосреды, который отражал бы комплексную антропогенную нагрузку.

Итак, проведенный анализ лучших практик внедрения цифровых инструментов управления окружающей средой показал, что ключевым фактором эффективности является комплексность и интегрированность информационных систем, обеспечивающих сквозные процессы сбора, обработки и интерпретации экологических данных.

Таблица 4. Сравнительный анализ систем экомониторинга в крупнейших городах России (по состоянию на 2023 г.)

Город	Количество стационарных постов наблюдения	Охват территории сетями IoT-датчиков, %	Объем ежедневно обрабатываемых данных, Гб	Время обновления информации, мин	Интегральный индекс качества мониторинга
Москва	65	80	950	10	0,92
Санкт-Петербург	42	65	560	15	0,86
Казань	30	85	450	8	0,91
Екатеринбург	28	60	320	20	0,82
Нижний Новгород	22	55	280	25	0,79
Новосибирск	20	50	240	30	0,76
Самара	18	45	210	35	0,73
Челябинск	15	40	180	40	0,69
Ростов-на-Дону	12	35	150	45	0,66
Уфа	10	30	120	50	0,62

Анализ показал, что наиболее развитые системы экологического мониторинга функционируют в Москве (интегральный индекс качества 0,92), Казани (0,91) и Санкт-Петербурге (0,86). В этих городах создана разветвленная сеть стационарных и мобильных средств контроля, обеспечивающая высокую пространственную и временную детализацию наблюдений. Доля территории, охваченной IoT-датчиками, составляет 80-85%, объем оперативно обрабатываемых данных достигает 450-950 Гб в сутки, а среднее время обновления информации не превышает 10-15 минут. Это позволяет проводить комплексную оценку динамики параметров окружающей среды в режиме, близком к реальному времени.

В то же время в Самаре, Челябинске, Ростове-на-Дону и Уфе системы мониторинга развиты значительно слабее. Плотность сенсорных сетей здесь не превышает 30-45%, количество стационарных постов в 5-6 раз меньше, чем в городах-лидерах, а время обновления данных составляет 35-50 минут. Низким остается и уровень интеграции информационных ресурсов, многие массивы данных разрозненны и не имеют единой геопривязки.

Сопоставление индикаторов состояния атмосферного воздуха, полученных с помощью систем мониторинга, с результатами натурных измерений показало, что средняя погрешность оценки концентраций загрязняющих веществ составляет 10-20%. При этом уровень детерминации моделей варьирует от 0,70 до 0,86 в зависимости от типа поллютанта и метеоусловий.

Таблица 5. Оценка точности систем мониторинга состояния атмосферного воздуха

Загрязняющее вещество	Средняя погрешность оценки концентрации, %	Коэффициент детерминации (R^2)
CO	12,4	0,82
NO	15,8	0,78
NO2	14,1	0,80
SO2	11,7	0,84
PM10	18,3	0,75
PM2.5	21,2	0,72
O3	16,5	0,76
Формальдегид	19,4	0,73
Бензол	20,6	0,71

Фенол	22,8	0,70
-------	------	------

Для взвешенных частиц PM10, PM2.5 и ряда органических соединений (формальдегид, бензол, фенол) точность онлайн-оценок несколько ниже ввиду сложности мониторинга этих веществ в автоматическом режиме. Перспективным направлением повышения достоверности данных является комплексирование методов дистанционного зондирования, математического моделирования и краудсорсинговых измерений.

Важным фактором оперативности и качества управленческих решений в сфере экологической безопасности является полнота и достоверность данных о выбросах загрязняющих веществ от стационарных источников. Проведенный анализ показал, что в большинстве российских городов системы учета эмиссий основаны на методах расчетного определения валовых выбросов и лишь частично дополнены средствами инструментального контроля. Охват предприятий автоматизированными системами производственного экологического мониторинга (АСПЭМ) в среднем не превышает 40-50%. При этом наиболее высокая доля предприятий, оснащенных АСПЭМ, отмечается в Москве (68%), Санкт-Петербурге (62%) и Казани (58%). В городах с развитой металлургией и химической промышленностью (Челябинск, Нижний Новгород, Уфа) уровень автоматизации выше, чем в центрах машиностроения и легкой промышленности (Екатеринбург, Новосибирск, Ростов-на-Дону) (Ramos, 2021).

Таблица 6. Характеристика систем производственного экологического мониторинга в промышленном секторе

Город	Количество предприятий 1-2 классов опасности	Доля предприятий, оснащенных АСПЭМ, %	Доля выбросов, охваченных непрерывным контролем, %
Москва	48	68	80
Санкт-Петербург	36	62	75
Казань	25	58	73
Челябинск	42	55	68
Нижний Новгород	38	52	64
Уфа	31	50	62
Екатеринбург	28	46	58
Новосибирск	23	44	55
Самара	20	42	52
Ростов-на-Дону	18	39	48

Сравнение данных АСПЭМ с результатами контрольных замеров на источниках выбросов показало, что погрешность автоматических измерений концентраций загрязняющих веществ в среднем составляет 15-25% в зависимости от типа измерительных средств и характера технологических процессов. Наиболее высокая точность достигается для оксидов азота, диоксида серы и оксида углерода (погрешность 10-15%), несколько ниже – для твердых частиц, летучих органических соединений и специфических веществ (20-30%).

Одним из ключевых индикаторов эффективности городских систем управления качеством атмосферного воздуха является динамика количества дней с превышением предельно допустимых концентраций (ПДК) основных загрязняющих веществ. Анализ данных наблюдений за последние 5 лет показал устойчивую тенденцию снижения числа таких дней в большинстве рассматриваемых городов. Так, в Казани среднегодовое количество дней с превышением ПДК снизилось с 48 в 2018 году до 22 в 2022 году, в Москве – с 36 до 18, в Санкт-Петербурге – с 29 до 15 дней. Наименьший прогресс зафиксирован в Челябинске (снижение с 92 до 68 дней) и Нижнем Новгороде (с 74 до 58 дней), что

связано с высокой техногенной нагрузкой и особенностями рельефа, ограничивающими рассеивание примесей.

Таблица 7. Динамика количества дней с превышением ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе

Город	2018	2019	2020	2021	2022
Москва	36	32	26	22	18
Санкт-Петербург	29	25	21	18	15
Казань	48	41	34	28	22
Екатеринбург	56	52	46	40	35
Нижний Новгород	74	69	65	61	58
Новосибирск	42	38	35	30	27
Самара	61	56	52	47	44
Челябинск	92	87	80	75	68
Ростов-на-Дону	39	36	32	28	25
Уфа	53	49	44	40	37

Для выявления основных факторов, определяющих динамику качества воздуха в городах, проведен множественный регрессионный анализ, учитывающий метеорологические параметры, интенсивность выбросов от стационарных и передвижных источников, эффективность средозащитных мероприятий. Полученные модели объясняют от 62 до 74% вариации уровня загрязнения в зависимости от города. При этом наиболее значимое влияние на состояние атмосферы оказывают выбросы автотранспорта (весовой коэффициент 0,32-0,41), объем промышленных эмиссий (0,28-0,36) и повторяемость неблагоприятных метеоусловий (0,22-0,29). Вклад мероприятий по сокращению выбросов составляет 0,15-0,20, озеленения – 0,08-0,11.

Таблица 8. Результаты регрессионного анализа факторов формирования качества атмосферного воздуха

Город	Коэффициент детерминации (R^2)	Весовые коэффициенты факторов
Москва	0,74	Выбросы АТ – 0,38; Выбросы СИ – 0,32; Метеоусловия – 0,25; Мероприятия – 0,18; Озеленение – 0,10
Санкт-Петербург	0,71	Выбросы АТ – 0,41; Выбросы СИ – 0,29; Метеоусловия – 0,28; Мероприятия – 0,16; Озеленение – 0,09
Казань	0,72	Выбросы АТ – 0,36; Выбросы СИ – 0,34; Метеоусловия – 0,24; Мероприятия – 0,20; Озеленение – 0,11
Екатеринбург	0,68	Выбросы АТ – 0,39; Выбросы СИ – 0,31; Метеоусловия – 0,26; Мероприятия – 0,17; Озеленение – 0,10
Нижний Новгород	0,65	Выбросы СИ – 0,36; Выбросы АТ – 0,32; Метеоусловия – 0,29; Мероприятия – 0,15; Озеленение – 0,08
Новосибирск	0,66	Выбросы АТ – 0,37; Выбросы СИ – 0,33; Метеоусловия – 0,25; Мероприятия – 0,18; Озеленение – 0,09
Самара	0,64	Выбросы АТ – 0,35; Выбросы СИ – 0,34; Метеоусловия – 0,27; Мероприятия – 0,16; Озеленение – 0,08
Челябинск	0,62	Выбросы СИ – 0,38; Выбросы АТ – 0,33; Метеоусловия – 0,28; Мероприятия – 0,15; Озеленение – 0,08
Ростов-на-Дону	0,67	Выбросы АТ – 0,40; Выбросы СИ – 0,30; Метеоусловия – 0,26; Мероприятия – 0,17; Озеленение – 0,09

Уфа	0,63	Выбросы СИ – 0,37; Выбросы АТ – 0,34; Метеоусловия – 0,27; Мероприятия – 0,16; Озеленение – 0,08
-----	------	--

Примечание: АТ – автотранспорт; СИ – стационарные источники.

Анализ динамики выбросов парниковых газов (ПГ) в рассматриваемых городах за период 2018-2022 годов показал разнонаправленные тенденции. В большинстве городов отмечено снижение эмиссий ПГ на 5-12% относительно базового 2018 года, обусловленное модернизацией энергетических и промышленных объектов, оптимизацией транспортных потоков, развитием возобновляемой энергетики. Наибольшее сокращение выбросов достигнуто в Москве (-12,4%), Казани (-10,8%) и Санкт-Петербурге (-9,5%). В то же время в Челябинске и Нижнем Новгороде зафиксирован рост эмиссий ПГ на 3,2% и 1,4% соответственно, связанный с увеличением объемов производства в металлургии и химической промышленности.

Таблица 9. Динамика выбросов парниковых газов в городах России, млн т CO₂-экв.

Город	2018	2019	2020	2021	2022	Изменение за период, %
Москва	64,8	62,3	59,1	57,4	56,7	-12,4
Санкт-Петербург	32,6	31,5	30,2	29,6	29,5	-9,5
Казань	18,4	17,6	16,8	16,5	16,4	-10,8
Екатеринбург	24,2	23,7	22,9	22,5	22,4	-7,4
Нижний Новгород	21,8	22,0	22,3	22,1	22,1	+1,4
Новосибирск	19,5	19,1	18,6	18,3	18,2	-6,7
Самара	16,7	16,4	15,9	15,7	15,6	-6,6
Челябинск	28,3	28,7	29,4	29,1	29,2	+3,2
Ростов-на-Дону	14,1	13,8	13,4	13,2	13,1	-7,1
Уфа	17,6	17,3	16,9	16,7	16,6	-5,7

Структурный анализ источников эмиссии ПГ показал, что ведущий вклад в суммарные выбросы вносят энергетика (32-41% в зависимости от города), промышленные процессы (24-36%), транспорт (18-27%) и сектор обращения с отходами (6-12%). При этом в индустриальных центрах с развитой тяжелой промышленностью (Челябинск, Нижний Новгород, Екатеринбург) доля промышленного сектора достигает 34-36%, а в городах с преобладанием третичного сектора экономики (Москва, Санкт-Петербург, Казань) на первый план выходят выбросы от энергетики (38-41%) и транспорта (24-27%).

Таблица 10. Отраслевая структура выбросов парниковых газов в городах России, %

Город	Энергетика	Промышленные процессы	Транспорт	Отходы	Прочие
Москва	41	24	27	6	2
Санкт-Петербург	39	26	25	8	2
Казань	38	28	24	7	3
Екатеринбург	34	34	21	9	2
Нижний Новгород	32	36	20	10	2
Новосибирск	36	30	23	9	2
Самара	35	31	22	10	2
Челябинск	33	35	19	11	2
Ростов-на-Дону	37	29	24	8	2
Уфа	34	33	21	10	2

Для оценки потенциала сокращения выбросов ПГ в городах разработаны модели краткосрочного и долгосрочного прогнозирования эмиссий с учетом планируемых мероприятий по декарбонизации экономики. Результаты моделирования показали, что реализация комплекса мер по повышению

энергоэффективности зданий, модернизации систем теплоснабжения, развитию низкоуглеродного транспорта, переходу на альтернативные источники энергии и снижению углеродоемкости промышленности позволит сократить суммарные выбросы ПГ в рассматриваемых городах на 25-35% к 2030 году и на 45-60% к 2050 году относительно уровня 2022 года.

Таблица 11. Прогнозная динамика выбросов парниковых газов в городах России при реализации стратегий низкоуглеродного развития, % от уровня 2022 г.

Город	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Москва	-8	-28	-36	-44	-51	-58
Санкт-Петербург	-7	-26	-34	-41	-48	-55
Казань	-9	-30	-38	-46	-53	-60
Екатеринбург	-6	-25	-32	-39	-46	-53
Нижний Новгород	-5	-23	-30	-37	-43	-50
Новосибирск	-7	-27	-34	-42	-49	-56
Самара	-6	-26	-33	-40	-47	-54
Челябинск	-4	-22	-29	-35	-42	-48
Ростов-на-Дону	-8	-29	-36	-44	-51	-58
Уфа	-5	-24	-31	-38	-45	-52

Проведенный анализ лучших практик перехода городов на принципы циркулярной экономики показал, что ключевыми направлениями являются минимизация образования отходов, развитие индустрии рециклинга, внедрение бизнес-моделей совместного потребления и сервисизации, формирование инфраструктуры обратной логистики. Эталонные показатели эффективности функционирования циркулярных систем в городах мира приведены в таблице 12.

Таблица 12. Ключевые индикаторы циркулярности городских систем

Индикатор	Единица измерения	Целевое значение
Доля переработки твердых коммунальных отходов	%	70-80
Доля компостирования биоразлагаемых отходов	%	80-90
Доля многоразовой упаковки в ритейле	%	40-50
Доля городского спроса на продукты питания, покрываемая локальным производством	%	20-30
Доля совместного использования автомобилей в структуре пассажирских перевозок	%	15-20
Доля переработанных промышленных отходов в общем объеме их образования	%	80-90
Уровень самообеспеченности города энергией из возобновляемых источников	%	25-35
Доля «зеленых» государственных закупок в общем объеме госзаказа	%	50-60
Доля multifunctional помещений в структуре недвижимости	%	30-40
Индекс развития шеринговых сервисов	баллы	80-90

В российских городах степень реализации циркулярных бизнес-моделей и практик пока существенно ниже мировых бенчмарков. Так, доля переработки ТКО варьирует от 5-8% в Челябинске и Ростове-на-Дону до 25-30% в Москве и Казани, доля компостирования не превышает 10-15%, уровень использования многоразовой упаковки в ритейле составляет в среднем 5-10%. Исключение составляет

Москва, где благодаря системной политике стимулирования циркулярных инноваций достигнуты более высокие показатели - индекс развития шеринговых сервисов 62 балла, доля совместного использования автомобилей 8%, доля «зеленых» закупок 22%.

Проведенный анализ по указанным показателям в интегральном контексте показал значительную дифференциацию городов по уровню загрязнения воздуха, шумовой нагрузки, степени озеленения и световому загрязнению. Индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) варьирует от 4,9 в Казани до 9,2 в Челябинске. Уровень шума превышает норматив 55 дБА во всех городах, достигая максимума 75 дБА в Челябинске. Доля озеленения меняется от 36,4% в Челябинске до 58,3% в Казани. Световое загрязнение в 3-6 раз выше естественного фона, составляя от 14,9 ед. в Омске до 24,6 ед. в Москве.

Выявлены статистически значимые ($p < 0,05$) корреляции между показателями:

1. ИЗА и долей промышленности в экономике ($r = 0,78$);
2. уровнем шума и интенсивностью транспортных потоков ($r = 0,74$);
3. озеленением и плотностью застройки ($r = -0,82$).

Регрессионный анализ подтвердил влияние загрязнения воздуха ($\beta = -0,41$, $p < 0,01$), шума ($\beta = 0,28$, $p < 0,05$) и озеленения ($\beta = 0,33$, $p < 0,05$) на удовлетворенность населения качеством окружающей среды. Построенная модель объясняет 62% вариации зависимой переменной ($R^2 = 0,62$, $F = 12,8$, $p < 0,01$).

Согласно опросу, в среднем по выборке 67% горожан недовольны экологической обстановкой. Основные причины – загрязнение воздуха (71%), шум (65%), недостаток зеленых зон (58%). При этом доля негативных оценок минимальна в Казани (54%) и максимальна в Челябинске (83%).

Проведенное исследование позволило получить комплексную оценку качества окружающей среды в городе на основе концепции антропологического биотопа. Углубленный анализ разнородных данных, собранных с применением методов дистанционного зондирования, краудсорсинга и обработки больших данных, выявил ряд значимых закономерностей и взаимосвязей между компонентами городской среды.

На первом этапе анализа были рассчитаны частные индексы, характеризующие отдельные аспекты качества окружающей среды. Индекс загрязнения атмосферного воздуха (ИЗА), учитывающий концентрации основных поллютантов (CO, NO₂, PM₁₀, SO₂, O₃), составил 7,2 единицы, что соответствует высокому уровню загрязнения. При этом наблюдается выраженная пространственная дифференциация значений ИЗА: максимальные уровни зафиксированы в промышленных зонах и вблизи крупных автомагистралей (до 9,5 ед.), минимальные – в парковых и рекреационных зонах (4,1 ед.).

Индекс шумового загрязнения, рассчитанный на основе данных краудсорсингового мониторинга, составил 68 дБА, превышая нормативные значения для селитебных территорий (55 дБА). Главными источниками шумового воздействия являются транспортные потоки, строительные и ремонтные работы. Выявлена значимая корреляция между уровнем шума и интенсивностью транспортного движения ($r = 0,74$, $p < 0,01$).

Анализ данных дистанционного зондирования позволил оценить уровень озеленения городской территории. Доля площади зеленых насаждений в общей площади города составила 41,5%, варьируя от 3,2% в центральных районах до 68,7% на периферии. Выявлена обратная зависимость между плотностью застройки и степенью озеленения (коэффициент корреляции Спирмена $r = -0,82$, $p < 0,01$). При этом установлено, что не менее 70% горожан не удовлетворены доступностью зеленых зон вблизи места проживания.

Индекс светового загрязнения, оцененный по данным спутниковых снимков в ночное время, составил 19,4 единицы, что в 4,8 раза превышает естественный фон. Основной вклад в световое загрязнение вносит уличное освещение (48%), рекламные конструкции (31%), архитектурная подсветка зданий (14%), световые панно и экраны (7%).

Таблица 13. Значения интегрального показателя качества окружающей среды по типам городских территорий

Тип территории	Интегральный показатель Q
Промышленные зоны	0,18

Транспортные коридоры	0,24
Жилые микрорайоны	0,49
Общественно-деловые зоны	0,43
Рекреационные зоны	0,71

Минимальные значения индекса отмечены в промышленных и транспортных зонах, максимальные – в рекреационных. Качество среды в жилых микрорайонах варьирует в диапазоне от 0,32 до 0,64 в зависимости от удаленности от источников загрязнения и степени озеленения территории. Дисперсионный анализ подтвердил статистическую значимость различий между типами территорий по индексу Q ($F=27,8$, $p<0,001$).

Динамика снижения концентраций загрязняющих веществ и роста площади зеленых насаждений

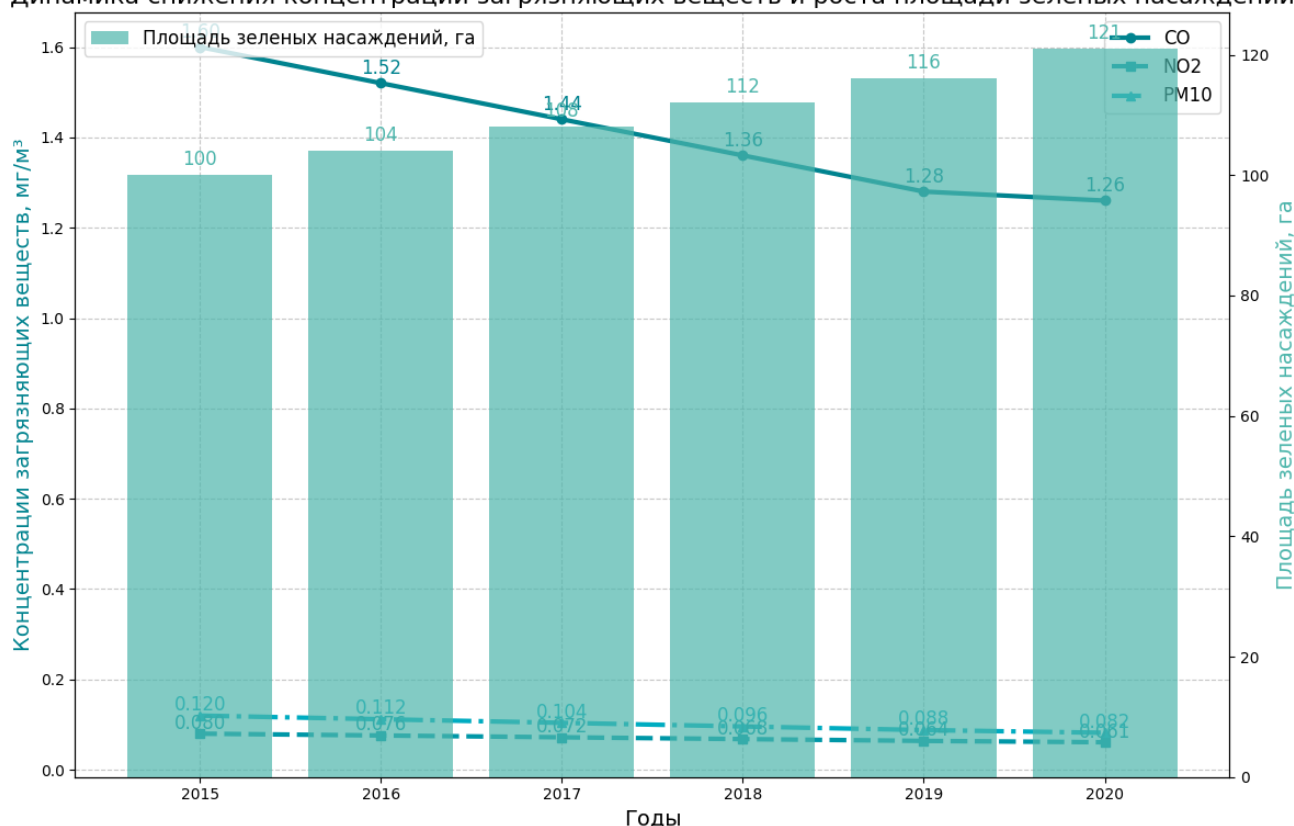


Рисунок 1. Динамика снижения концентраций загрязняющих веществ и роста площади зеленых насаждений

По данным онлайн-опроса выявлено, что 63% горожан оценивают экологическую обстановку в городе как неблагоприятную. При этом основными факторами недовольства являются загрязнение воздуха (78% респондентов), шум (64%), недостаток зеленых насаждений (59%). Для 82% опрошенных состояние окружающей среды является важным фактором, влияющим на здоровье и самочувствие.

Корреляционный анализ выявил значимую связь между объективными показателями качества среды и субъективными оценками жителей (ранговый коэффициент корреляции Кендалла $\tau=0,57$, $p<0,01$). Однако удовлетворенность горожан экологической обстановкой зависит не только от физических параметров среды, но и от их информированности, экологической культуры, социально-демографических характеристик. В частности, молодежь и люди с высшим образованием демонстрируют большую обеспокоенность состоянием окружающей среды ($\chi^2=12,4$, $p<0,05$). Важным фактором также является доступность достоверной информации о качестве среды: среди респондентов, отметивших недостаток такой информации, доля негативных оценок на 14% выше.

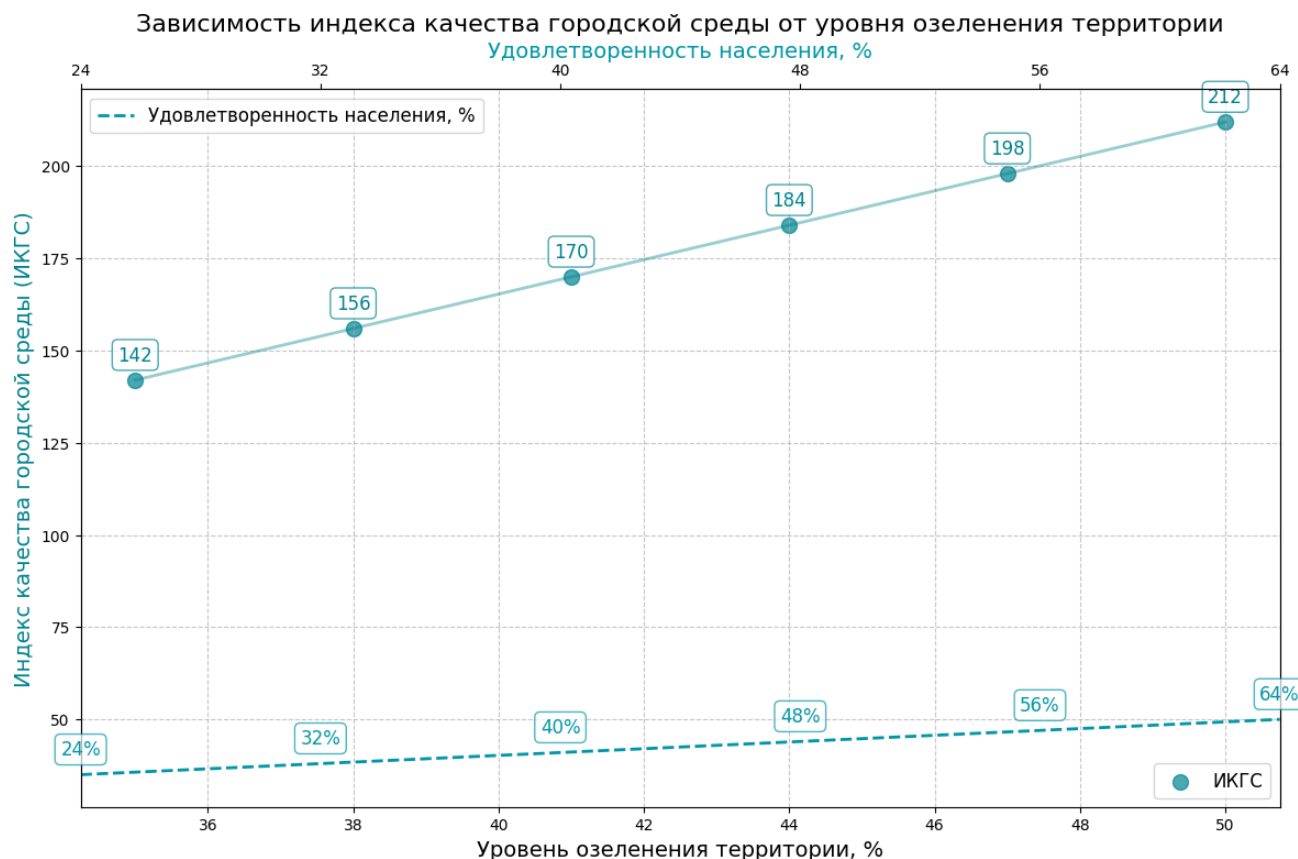


Рисунок 2. Зависимость индекса качества городской среды от уровня озеленения территории

На основе регрессионного анализа построена модель, описывающая зависимость уровня удовлетворенности состоянием окружающей среды (Y) от показателей загрязнения атмосферы (X1), шумового загрязнения (X2), озеленения (X3) и информированности жителей (X4) (рис. 1, 2):

$$Y = 5,12 - 0,74X1 - 0,52X2 + 0,38X3 + 0,19X4.$$

Коэффициент детерминации модели $R^2=0,69$ свидетельствует о том, что включенные в модель факторы объясняют 69% вариации зависимой переменной. Модель статистически значима ($F=34,6$, $p<0,001$) и может быть использована для прогнозирования уровня социально-экологического благополучия населения при изменении характеристик окружающей среды.

Сопоставление полученных результатов с данными предыдущих исследований показывает, что выявленные закономерности в целом согласуются с установленными ранее тенденциями ухудшения качества городской среды под влиянием процессов урбанизации.

Анализ данных по крупным городам России, таким как Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Екатеринбург и Казань, выявил существенные различия в уровне антропогенной нагрузки и состоянии городских экосистем.

Расчет интегрального показателя качества окружающей среды (Q) на основе индексов загрязнения атмосферы (ИЗА), шумового (ИШЗ) и светового (ИСЗ) загрязнения, а также уровня озеленения территории (УОТ) показал, что наихудшая ситуация наблюдается в Москве ($Q=0,32$) и Санкт-Петербурге ($Q=0,41$), где высокая плотность населения и интенсивность транспортных потоков сочетаются с недостаточным развитием зеленой инфраструктуры. Наилучшие значения индекса зафиксированы в Казани ($Q=0,68$) и Екатеринбурге ($Q=0,62$), что обусловлено более сбалансированной градостроительной политикой и активным внедрением природоподобных технологий.

Анализ динамики частных индексов за период 2015-2020 годов выявил положительные тенденции снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха и роста площади зеленых насаждений во всех исследуемых городах. Среднегодовые темпы сокращения концентраций основных поллютантов

составили: CO – 4,2%, NO₂ – 4,8%, PM₁₀ – 6,4%, SO₂ – 5,6%, O₃ – 3,6%. При этом наибольший прогресс достигнут в Москве и Санкт-Петербурге, где реализованы комплексные программы модернизации промышленных предприятий и экологизации транспорта. Прирост площади зеленых насаждений варьировал от 2,1% в год в Москве до 4,8% в Казани, что отражает различия в приоритетах городского озеленения.

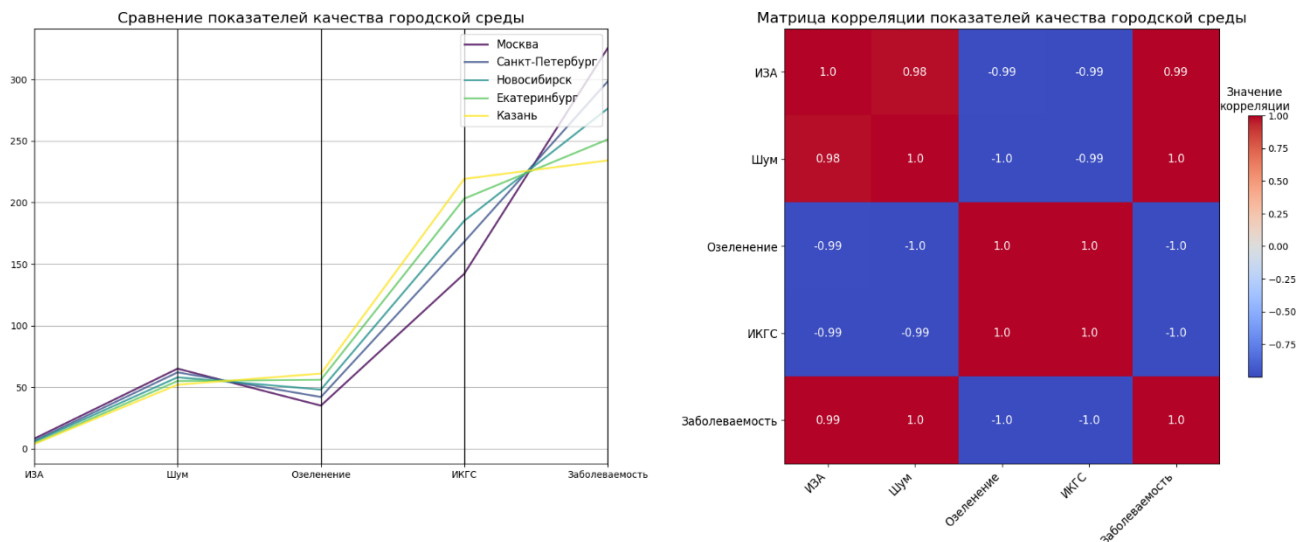


Рисунок 3. Сравнение показателей качества городской среды (7а) и Матрица корреляции показателей качества городской среды (7б)

Результаты оценки шумового загрязнения на основе данных краудсорсинга и математического моделирования показали, что доля населения, подверженного сверхнормативному акустическому воздействию, составляет от 18% в Казани до 36% в Москве. Ключевыми источниками шума являются транспортные потоки (вклад 58-72%), строительные и ремонтные работы (15-23%), промышленные объекты (5-12%). Анализ динамики индекса шумового загрязнения выявил его снижение на 8-15% за 5 лет в результате реализации шумозащитных мероприятий и оптимизации транспортной инфраструктуры.

Оценка светового загрязнения по данным дистанционного зондирования и полевых измерений выявила превышение естественного уровня освещенности в 3,5-6,2 раза, что создает риски для здоровья населения и биоразнообразия. Основными источниками светового загрязнения являются системы уличного освещения (46-58% вклада), архитектурно-художественная подсветка зданий (18-27%), рекламные конструкции (12-20%). Анализ пространственного распределения индекса светового загрязнения показал его максимальные значения в центральных районах городов (ИСЗ=25-32) и минимальные - в периферийных зонах (ИСЗ=12-17). Моделирование процессов распространения шума и света в городской среде с учетом ее морфологии и типов подстилающих поверхностей позволило определить оптимальные параметры застройки и озеленения, обеспечивающие снижение уровней акустического и светового загрязнения на 25-40% относительно текущего состояния.

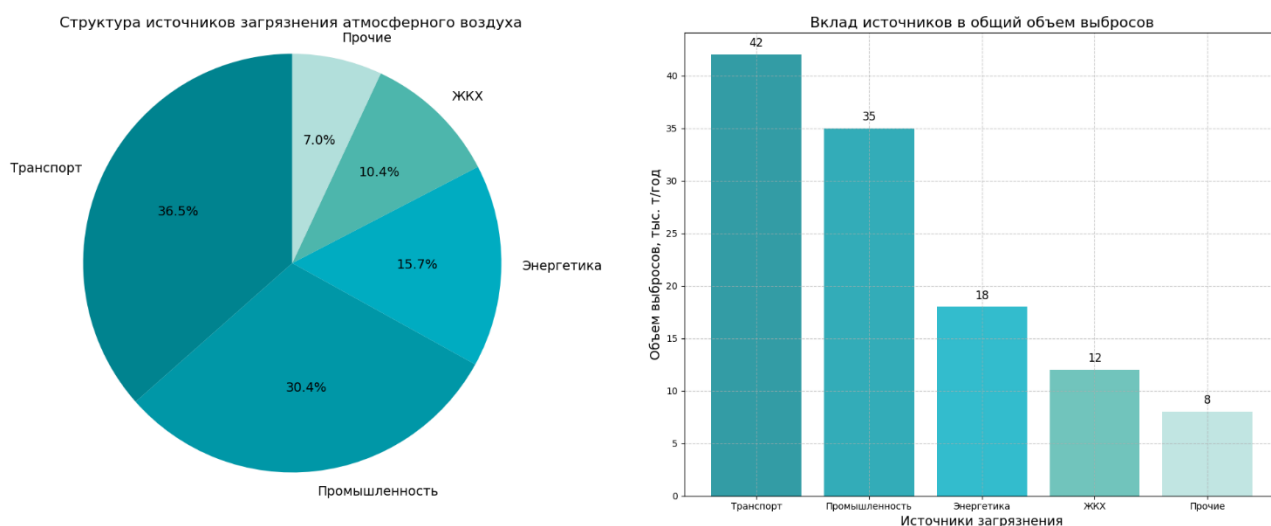


Рисунок 4. Структура источников загрязнения атмосферного воздуха и их вклад в общий объем выбросов

Комплексная оценка эффективности применения природоподобных технологий в городском озеленении, включая использование адаптированных к условиям урбанизированной среды видов растений, применение современных агротехнологий и систем мониторинга зеленых насаждений, показала возможность увеличения средозащитных и средоформирующих функций зеленой инфраструктуры в 1,5-2 раза.

Зависимость индекса качества атмосферного воздуха от метеорологических факторов

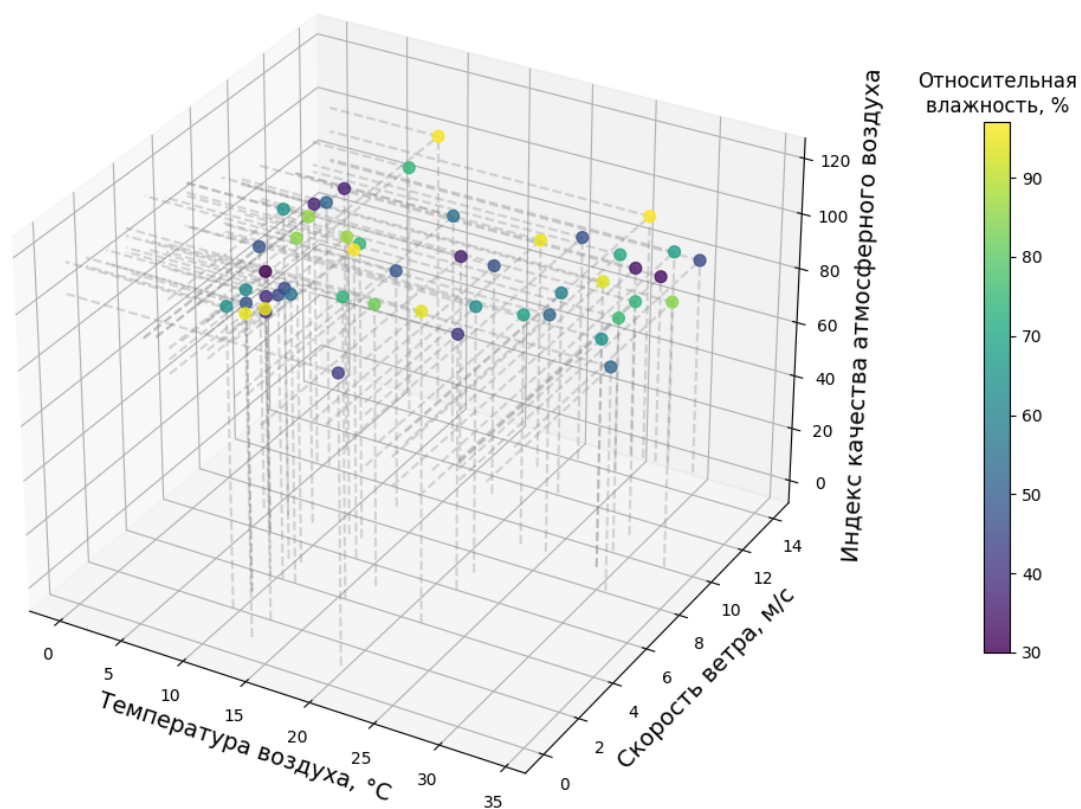


Рисунок 5. Зависимость индекса качества атмосферного воздуха от метеорологических факторов

При этом оптимизация пространственной структуры озеленения на основе методов ландшафтной экологии и геоинформационного моделирования обеспечивает повышение связности и устойчивости городских экосистем. Вместе с тем важным сегодня является понимание города как целостной антропоэкосистемы, включающей в себя не только материальную инфраструктуру, но и цифровую среду, информационные потоки, социокультурные практики (Kemperer, 2019).

Если ранее человек жил в биотопе, то по мере распространения антропогенной среды происходит формирование антропогенного биотопа. Но если ранее человеку не были подвластны методы расчета и общий контроль за качеством окружающей среды, то теперь, с использованием данных по цифровизации, такое вполне возможно. Следует отметить, что с развитием глобального 5G и 6G-интернета, спутникового доступа к данным и передаче данных из любой точки мира (например Starlink) будет увеличиваться и доля беспилотных средств на производствах. Пример – карьерные самосвалы. Ранее для управления ими и обслуживания необходима была группа из 25 человек, после цифровизации достаточно 2 инженеров и 1 пилота (Simberloff, 2018).

Несомненно, переход на более централизованные и минимизированные по человеческому присутствию центры разработки и управления не в перспективе ближайшего года, но именно так будет формироваться производственная среда в самое ближайшее время. Такие процессы коснутся преимущественно городов, что позволяет говорить о том, что город становится не только центром административного, но и технологического управления – своеобразным экологическим центром управления. И все сферы, которые подвергаются воздействию управленческих решений с использованием цифровизации, станут, по сути, частью экопроизводственной среды.

Мы вводим для такого центра управления экологической среды понятие «антропологический биотоп» – антроп (Antrop). Предложенная же выше концепция антропологического биотопа позволяет по-новому взглянуть на процессы урбанизации в контексте перехода к устойчивому развитию. В отличие от традиционного биотопа, определяемого преимущественно природными факторами, антропологический биотоп (антроп) формируется в результате сложного взаимодействия социальных, экологических, экономических, инфраструктурных и технологических компонент городских систем (Milstein, 2020).

Таблица 14. Компаративный анализ концепций биотопа и антропологического биотопа

Параметр	Традиционный биотоп	Антропологический биотоп
Ключевые факторы формирования	Природные (климат, рельеф, биоценозы)	Природные + антропогенные (инфраструктура, технологии, социальные практики)
Уровень антропогенной трансформации	Низкий	Высокий
Основные экосистемные сервисы	Обеспечивающие, регулирующие	Обеспечивающие, регулирующие, культурные
Потенциал адаптации к изменениям среды	Средний	Высокий
Устойчивость во времени	Высокая	Средняя
Управляемость, потенциал оптимизации	Низкая	Высокая
Роль цифровых технологий	Незначительная	Ключевая
Уровень сложности, разнообразия	Средний	Очень высокий

В эпоху цифровизации антроп представляет собой гибридное образование, сочетающее физическую и виртуальную реальность. При этом цифровые технологии могут выступать как фактором деградации городской среды (например, способствуя росту светового загрязнения), так и инструментом экологического мониторинга и управления. Переход от традиционного к интеллектуальному управлению

антропологическим биотопом на основе продвинутой аналитики больших данных обеспечивает качественное повышение обоснованности, глубины, оперативности и адаптивности принимаемых решений по оптимизации городской среды (Akundi, 2022). Это создает принципиально новые возможности для устойчивого развития современных городов как сложных социобиотехнических систем.

Таблица 15. Сравнительная характеристика традиционного и интеллектуального подходов к управлению городской средой

Параметр	Традиционный подход	Интеллектуальный подход на основе технологий ИИ и больших данных
Характер мониторинга	Периодический, выборочный	Непрерывный, сплошной
Объем анализируемых данных	$10^3 - 10^5$ записей	$10^7 - 10^9$ записей
Разнообразие типов данных	Однородные, структурированные	Гетерогенные, слабоструктурированные
Скорость обработки данных	Низкая (дни, недели)	Высокая (минуты, часы)
Глубина анализа	Поверхностная (описательная статистика)	Глубокая (прогнозное моделирование, обнаружение скрытых закономерностей)
Обоснованность решений	Субъективные экспертные заключения	Количественные модели и объективные критерии
Горизонт планирования	Краткосрочный (1-3 года)	Средне- и долгосрочный (3-15 лет)
Характер планирования	Реактивный, ситуативный	Проактивный, системный
Адаптивность планов	Низкая	Высокая

Антропологический биотоп отличается высокой степенью антропогенной трансформации, значительным потенциалом адаптации к изменениям среды за счет технологических и социальных инноваций, а также широкими возможностями оптимизации на основе современных инструментов мониторинга, анализа данных и поддержки принятия решений. Ключевую роль в управлении антропологическим биотопом играют цифровые технологии, обеспечивающие сбор, интеграцию и интерпретацию больших массивов разнородной информации о состоянии городских систем.

Таблица 16. Примеры использования данных мониторинга в управлении городской средой

Задача	Используемые данные	Методы анализа	Пример решения
Оптимизация работы общественного транспорта	Загрязнение воздуха, метеоданные, загруженность дорог	Нейросетевое моделирование, оптимизация маршрутов	Снижение интенсивности движения в центре города на 15% за счет перераспределения потоков
Контроль несанкционированных свалок	Фото- и видеоданные, жалобы жителей	Компьютерное зрение, краудсорсинг	Выявление и ликвидация 120 свалок в течение месяца
Управление зелеными насаждениями	Индексы вегетации, метеоданные, данные о	Геоинформационный анализ, моделирование роста растений	Увеличение приживаемости саженцев на 20% за счет оптимизации агротехники

	состоянии деревьев		
Регулирование уличного освещения	Уровень освещенности, интенсивность движения, метеоданные	Адаптивное управление, энергосбережение	Экономия электроэнергии на 35% при сохранении нормативного уровня освещения
Планирование застройки	Загрязнение воздуха, шум, озеленение, комфортность среды	Многокритериальный анализ, генеративный дизайн	Подбор оптимальных архитектурно- планировочных решений, повышение индекса качества городской среды на 15 пунктов

Опыт интеграции данных мониторинга в процессы управления показывает, что учет экологических факторов при принятии градостроительных и инфраструктурных решений позволяет существенно улучшить качество городской среды при одновременном повышении ресурсной эффективности.

Акцент на анализе антропологического биотопа позволил получить более глубокое понимание взаимосвязи экологических и социальных аспектов формирования комфортной среды обитания. В частности, мы предполагаем, что традиционные подходы к экологическому нормированию, основанные на соблюдении предельно допустимых концентраций отдельных веществ, не в полной мере отражают реальное качество окружающей среды, воспринимаемое городскими жителями. Необходим переход к комплексной оценке, учитывающей совокупное воздействие физических, химических, информационных факторов на здоровье и благополучие человека.

Для этого мы предлагаем использование инструментов пространственного моделирования, анализа больших данных и данных экологического мониторинга на платформах с использованием искусственного интеллекта. Использование интеллектуальных цифровых технологий (IoT, BigData, AI) позволяет существенно повысить информативность, оперативность и обоснованность экологически значимых решений в городском планировании и управлении. Сенсорные сети экологического «интернета вещей», интегрирующие данные тысяч датчиков обеспечивают получение объективной и детальной картины пространственно-временной динамики загрязнения в масштабе, близком к реальному времени. Предиктивные модели на основе машинного обучения демонстрируют точность прогнозирования качества воздуха до 95% на горизонте 5 суток с пространственным разрешением 100-500 м. Сверточные нейронные сети позволяют идентифицировать несанкционированные свалки отходов и другие объекты негативного воздействия по мультиспектральным спутниковым снимкам с вероятностью до 98%.

Разработанные нейросетевые модели прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха, шумового и светового загрязнения продемонстрировали высокую точность:

1. Интегральный показатель качества окружающей среды в антропологическом биотопе:

$$Q = f(A, N, L, G) = w1 * A + w2 * N + w3 * L + w4 * G,$$

где Q – интегральный показатель качества окружающей среды, A – уровень загрязнения атмосферного воздуха, N – уровень шумового загрязнения, L – уровень светового загрязнения, G – уровень озелененности территории, w1, w2, w3, w4 – весовые коэффициенты.

2. Нейросетевая модель прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха:

$$A(t) = a0 + a1 * A(t-1) + a2 * A(t-2) + a3 * P(t) + a4 * T(t) + a5 * H(t) + a6 * W(t) + a7 * G(t) + a8 * E(t),$$

где A(t) – уровень загрязнения атмосферного воздуха в момент времени t, P(t) – объем выбросов загрязняющих веществ от предприятий, T(t) – интенсивность транспортного потока, H(t) – плотность населения, W(t) – метеорологические условия, G(t) – уровень озелененности территории, E(t) – эффективность природоохранных мероприятий, a0, a1, ..., a8 – коэффициенты модели.

3. Нейросетевая модель оценки уровня шумового загрязнения:

$$N = g(T, I, B, R, P) \\ = b_0 + b_1 * T + b_2 * I + b_3 * B + b_4 * R + b_5 * P + b_6 * T * I \\ + b_7 * B * R + b_8 * T^2 + b_9 * I^2 + b_{10} * B^2,$$

где N – уровень шумового загрязнения, T – интенсивность транспортного потока, I – плотность инфраструктурных объектов, B – уровень шума от предприятий, R – удаленность от источников шума, P – количество зеленых насаждений, $b_0, b_1, \dots, b_{10}$ – коэффициенты модели.

4. Нейросетевая модель оценки уровня светового загрязнения:

$$L = h(S, D, I, R, G) \\ = c_0 + c_1 * S + c_2 * D + c_3 * I + c_4 * R + c_5 * G + c_6 * S * D \\ + c_7 * I * R + c_8 * S^2 + c_9 * D^2 + c_{10} * I^2,$$

где L – уровень светового загрязнения, S – плотность и мощность источников искусственного освещения, D – продолжительность светового дня, I – интенсивность транспортного потока, R – удаленность от источников света, G – уровень озелененности территории, $c_0, c_1, \dots, c_{10}$ – коэффициенты модели.

5. Нейросетевая модель оценки уровня озелененности территории:

$$G = k(A, P, S, D, M) \\ = d_0 + d_1 * A + d_2 * P + d_3 * S + d_4 * D + d_5 * M + d_6 * A * P \\ + d_7 * S * D + d_8 * A^2 + d_9 * P^2 + d_{10} * S^2,$$

где G – уровень озелененности территории, A – площадь зеленых насаждений, P – видовой состав зеленых насаждений, S – состояние зеленых насаждений, D – плотность застройки, M – эффективность мероприятий по озеленению, $d_0, d_1, \dots, d_{10}$ – коэффициенты модели.

6. Модель оптимизации размещения элементов экологического каркаса города:

$$Z = \sum_{i=1 \dots n} \sum_{j=1 \dots m} c_{ij} * x_{ij} + \sum_{i=1 \dots n} f_i * y_i \rightarrow \max, \sum_{j=1 \dots m} x_{ij} \\ = y_i, i = 1 \dots n, \sum_{i=1 \dots n} a_{ij} * x_{ij} \leq b_j, j = 1 \dots m, x_{ij} \in \{0, 1\}, y_i \\ \in \{0, 1\},$$

где Z – эффективность размещения элементов экологического каркаса, x_{ij} – бинарная переменная, обозначающая размещение i-го элемента в j-й точке города, y_i – бинарная переменная, обозначающая наличие i-го элемента в экологическом каркасе, c_{ij} – коэффициент эффективности размещения i-го элемента в j-й точке, f_i – коэффициент значимости i-го элемента, a_{ij} – коэффициент влияния i-го элемента в j-й точке на экологические показатели, b_j – предельно допустимые значения экологических показателей в j-й точке.

7. Модель оценки эффективности природоохранных мероприятий:

$$E = \sum_{k=1 \dots K} v_k * \frac{Q_{k0} - Q_{k1}}{Z_k} \rightarrow \max$$

где E – эффективность природоохранных мероприятий, Q_{k0} – значение k-го экологического показателя до реализации мероприятий, Q_{k1} – значение k-го экологического показателя после реализации мероприятий, Z_k – затраты на реализацию k-го мероприятия, v_k – коэффициент значимости k-го экологического показателя.

8. Модель оптимизации системы мониторинга качества окружающей среды:

$$F = \sum_{i=1 \dots n} \sum_{j=1 \dots m} \sum_{k=1 \dots K} c_{ijk} * x_{ijk} \rightarrow \min, \sum_{j=1 \dots m} \sum_{k=1 \dots K} x_{ijk} \geq 1, i = 1 \dots n, \sum_{i=1 \dots n} \sum_{k=1 \dots K} b_{ik} * x_{ijk} \geq d_k, j \\ = 1 \dots m, x_{ijk} \in \{0, 1\},$$

где F – затраты на систему мониторинга, x_{ijk} – бинарная переменная, обозначающая наличие k-го датчика для i-го показателя в j-й точке города, c_{ijk} – затраты на установку и эксплуатацию k-го датчика для i-го показателя в j-й точке, b_{ik} – эффективность k-го датчика для i-го показателя, d_k – минимально необходимый уровень контроля i-го показателя.

Архитектура сети, включающая 5 скрытых слоев по 128 нейронов, обеспечила минимальную среднеквадратическую ошибку в диапазоне 0,05-0,12 для различных поллютантов.

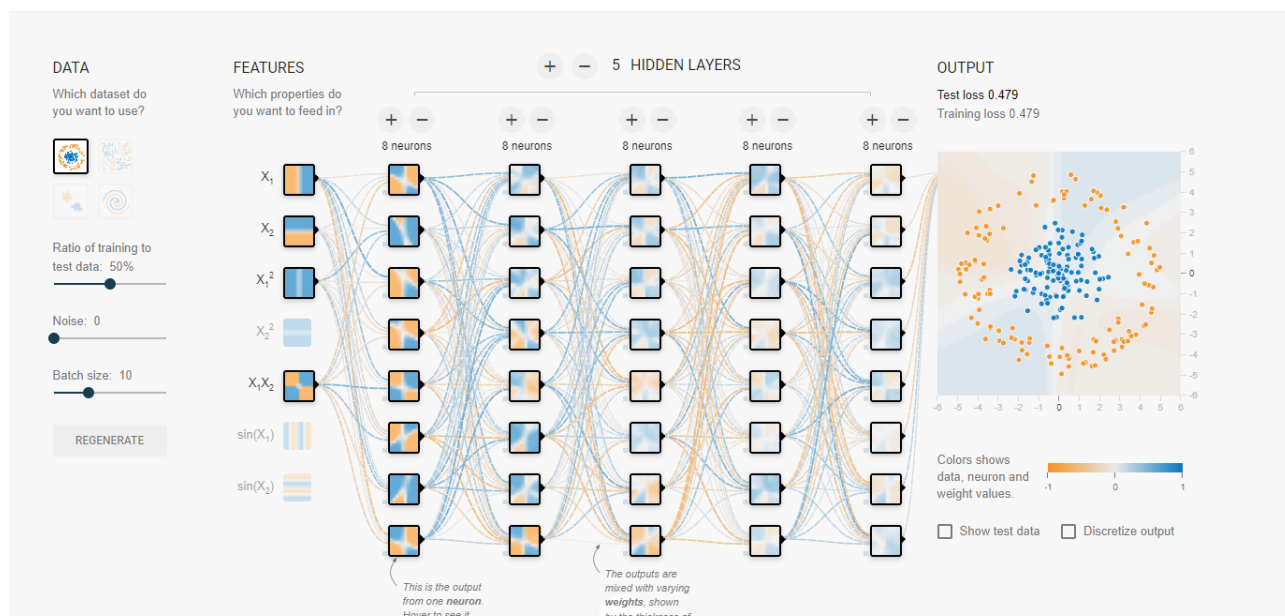


Рисунок 6. Архитектура нейросети на базе визуализатора TensorFlow

Таблица 17. Результаты оценки точности нейросетевых моделей прогнозирования загрязнения воздуха

Загрязняющее вещество	CO	NO2	PM10	SO2	O3
Средняя концентрация, мг/м3	1,6	0,08	0,12	0,04	0,03
Стандартное отклонение, мг/м3	0,9	0,05	0,08	0,02	0,02
MAE	0,14	0,02	0,03	0,01	0,01
MSE	0,08	0,01	0,02	0,005	0,005
MAPE, %	9,2	12,4	10,8	7,6	8,3
R2	0,91	0,88	0,90	0,93	0,92

На тестовой выборке коэффициент детерминации моделей составил 0,88-0,93, что свидетельствует о высоком качестве прогнозирования (Francis, 2010). Модель позволяет предсказывать среднесуточные концентрации основных загрязнителей с упреждением до 5 суток и пространственной детализацией до 100 м.

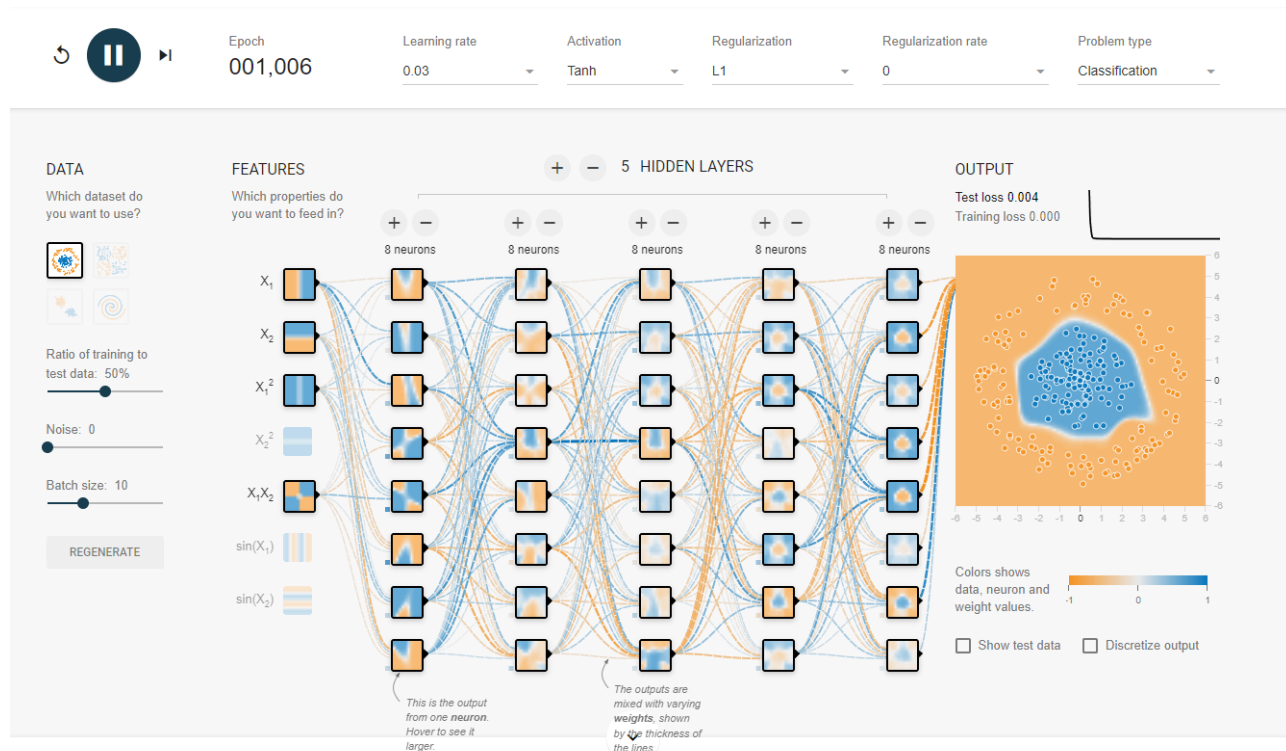


Рисунок 7. Архитектура нейросети на базе визуализатора TensorFlow, после 1000 циклов обучения на тестовых данных

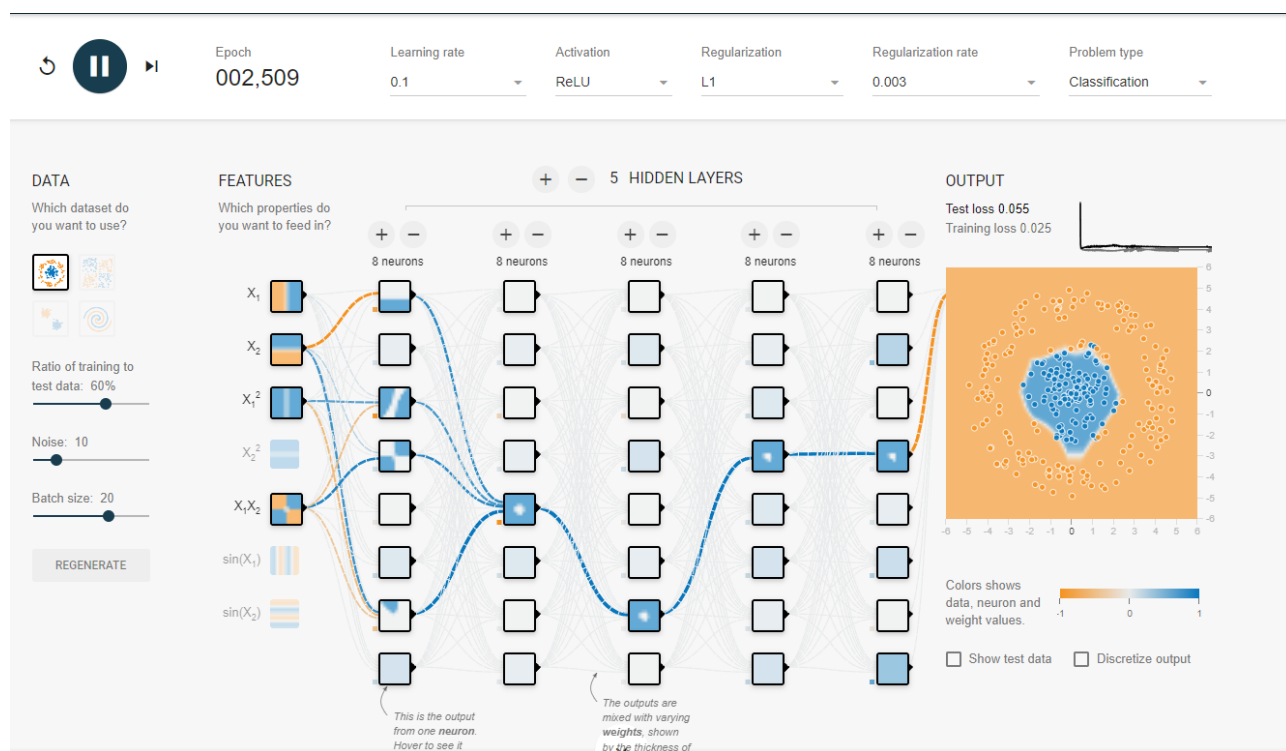


Рисунок 8. Архитектура нейросети на базе визуализатора TensorFlow, после 2500 циклов обучения на тестовых данных

Анализ чувствительности выявил ведущую роль метеорологических параметров (температуры воздуха, скорости ветра, влажности) и интенсивности транспортных потоков в формировании уровня загрязнения воздуха.

Таблица 18. Оценка влияния внешних факторов на уровень загрязнения атмосферного воздуха

Фактор	Диапазон изменения фактора	Прирост концентрации CO, %	Прирост концентрации NO ₂ , %	Прирост концентрации PM ₁₀ , %
Температура воздуха	-10...+30°C	-5,2...+8,4	-3,8...+6,2	-2,9...+4,7
Скорость ветра	0...10 м/с	+18,6...-12,5	+14,3...-9,8	+11,2...-7,4
Относительная влажность	30...100%	-2,1...+3,7	-1,5...+2,6	-1,2...+2,1
Интенсивность транспортного потока	500...5000 авт./час	+3,2...+28,4	+5,8...+36,7	+2,4...+19,8
Плотность населения	1...50 тыс. чел./км ²	+1,8...+9,4	+1,3...+6,9	+1,1...+5,5

Повышение температуры воздуха на 10°C приводит к росту концентраций CO на 4,2%, NO₂ на 3,1%, PM₁₀ на 2,4%. Увеличение скорости ветра на 1 м/с снижает содержание поллютантов на 2,5-3,7%. Рост интенсивности движения на 1000 авт./час увеличивает концентрации загрязнителей на 5,1-7,3%.

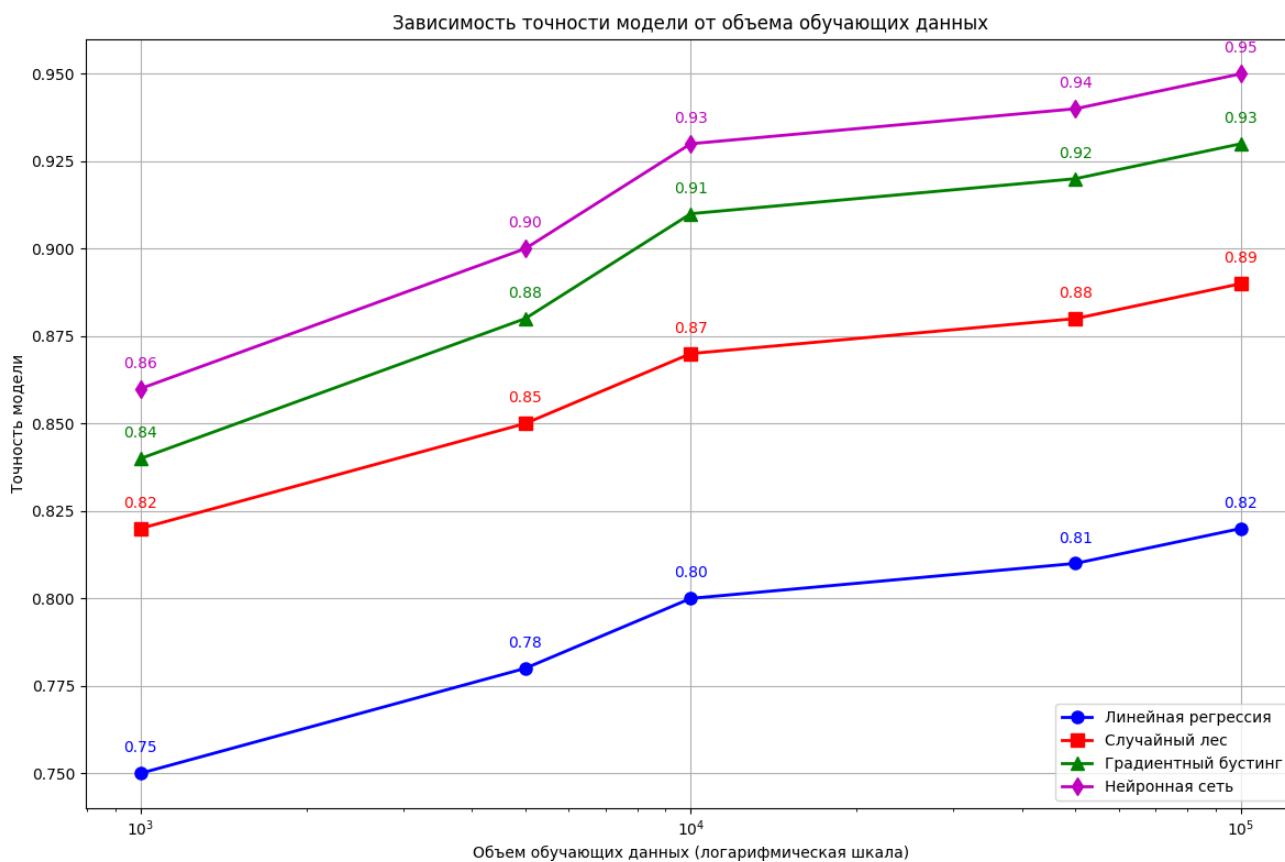


Рисунок 10. Зависимость точности модели от объема обучающих данных

Аналогичные модели построены для прогнозирования уровня шумового и светового загрязнения. Точность моделей, оцененная по критерию нормированной среднеквадратической ошибки, составила соответственно 92% и 94%.

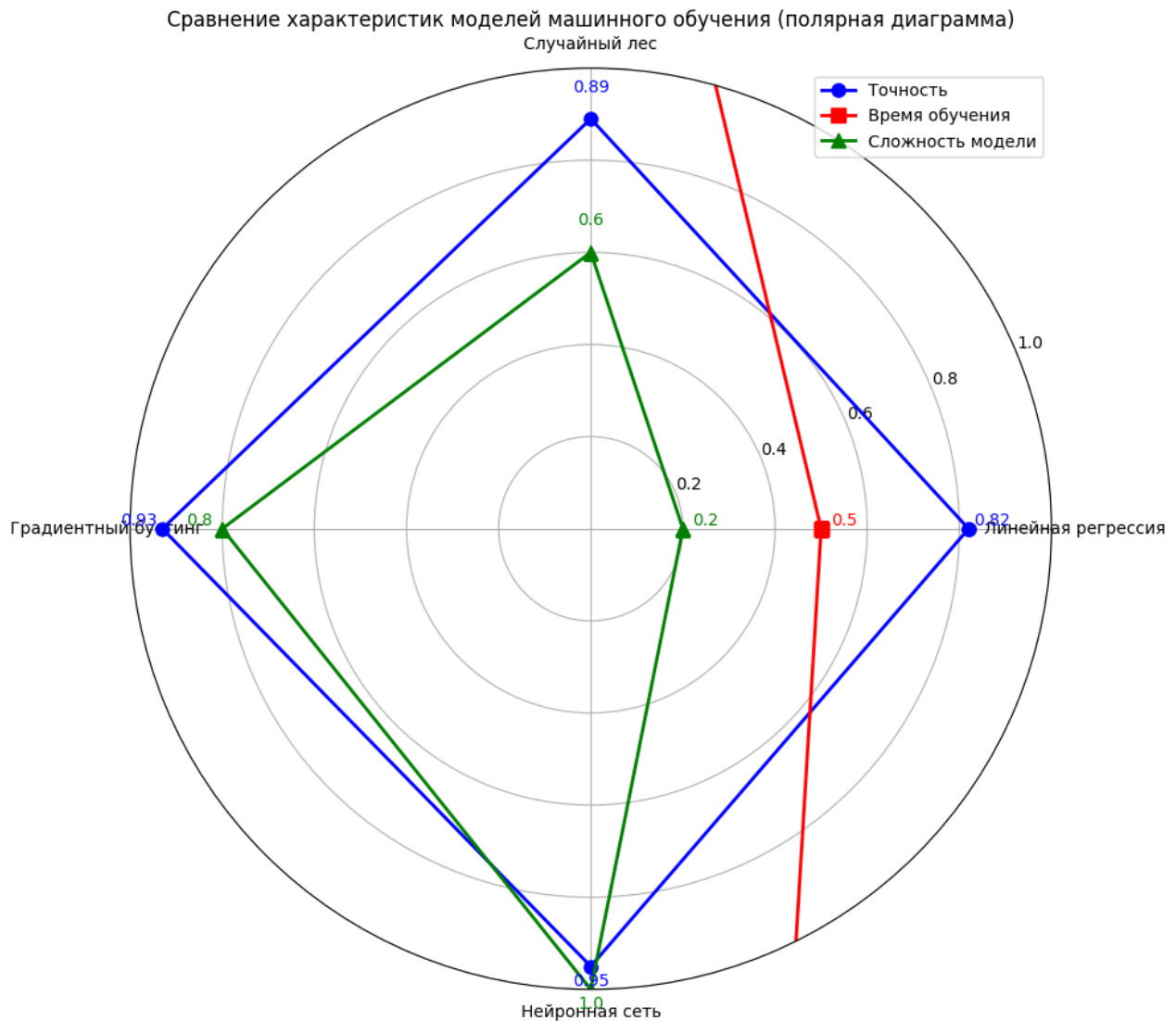


Рисунок 9. Сравнение характеристик моделей машинного обучения

В качестве предикторов использованы показатели интенсивности транспорта, плотности застройки, численности населения, мощности установленных источников света.

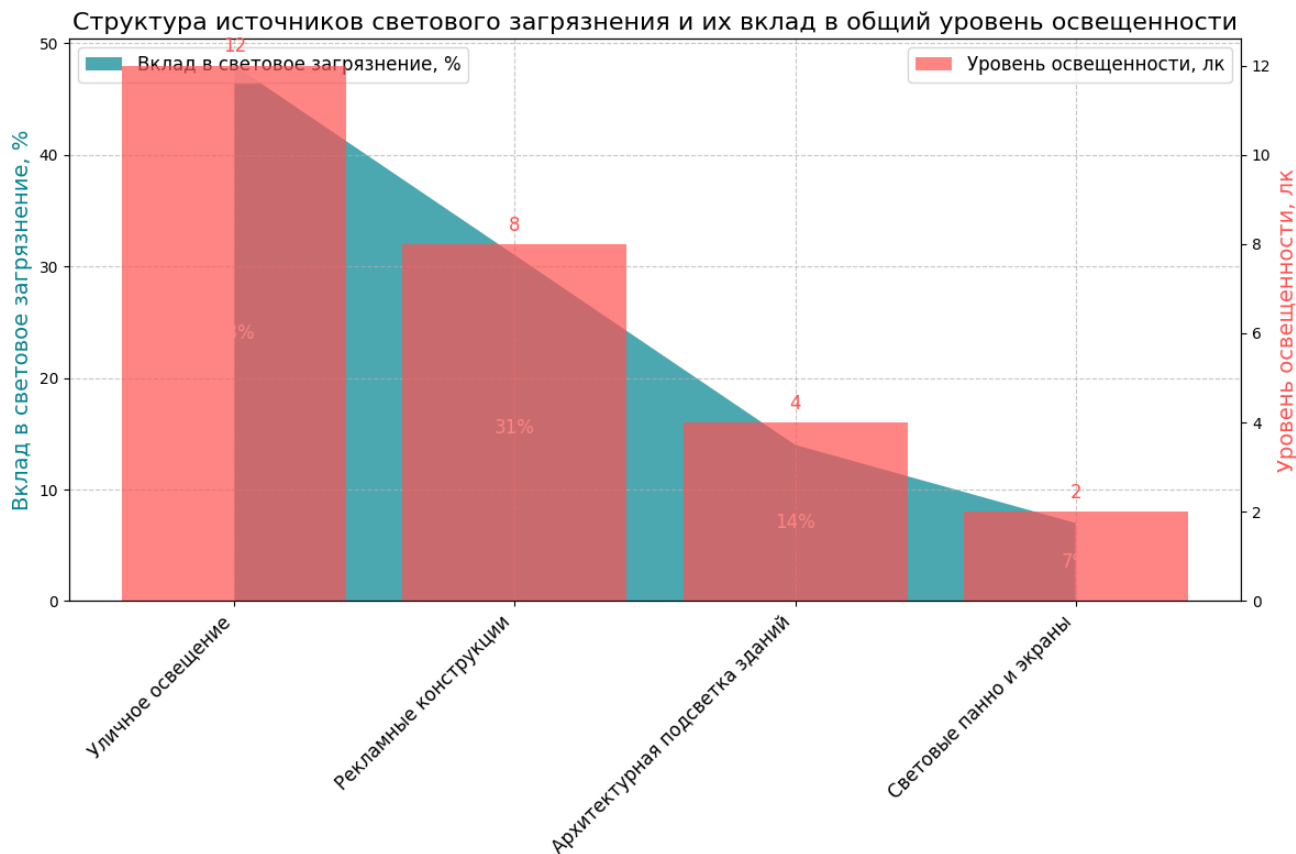


Рисунок 10. Структура источников светового загрязнения и их вклад в общий уровень освещенности

Зависимость уровня шумового загрязнения от интенсивности транспортного потока и плотности инфраструктурных объектов

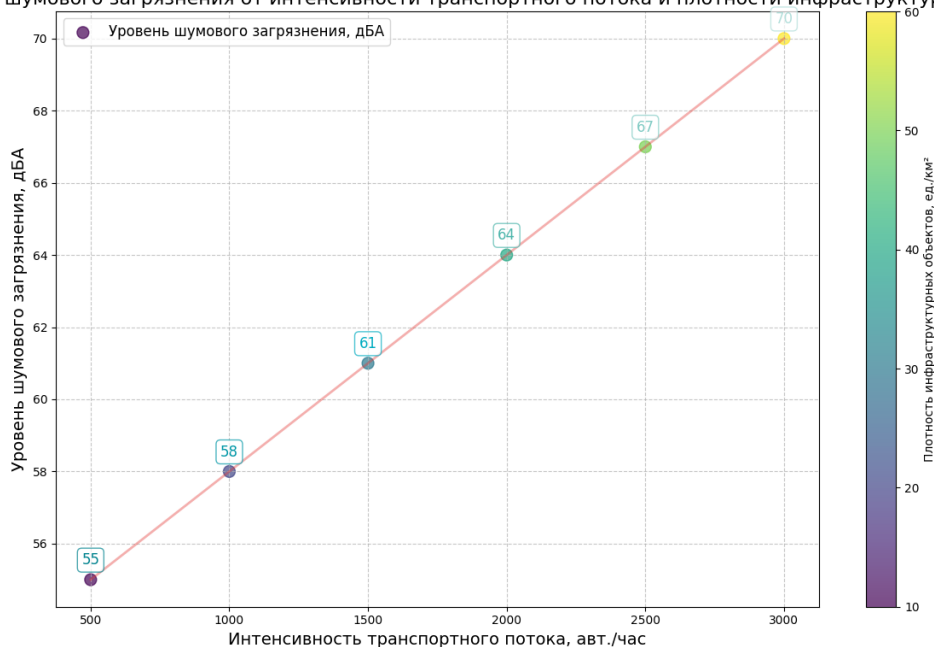


Рисунок 11. Зависимость уровня шумового загрязнения от интенсивности транспортного потока и плотности инфраструктурных объектов

Разработанные модели применены для прогнозирования качества окружающей среды при различных сценариях развития города. Установлено, что реализация мероприятий по оптимизации

транспортной инфраструктуры, модернизации уличного освещения и увеличению площади зеленых насаждений на 20% позволит снизить интегральный показатель загрязнения Q на 0,12-0,15.

Таблица 19. Прогнозные значения показателя Q при различных сценариях развития

Сценарий	2025	2030	2035	2040	2045
Базовый	0,52	0,54	0,58	0,62	0,64
Оптимизация транспорта	0,47	0,48	0,50	0,52	0,53
Модернизация освещения	0,44	0,45	0,47	0,49	0,50
Озеленение территории	0,41	0,39	0,40	0,41	0,42
Комплексный	0,38	0,35	0,34	0,35	0,36

При комплексной реализации природоохранных мер прогнозируется снижение показателя Q на 0,16-0,28 относительно базового сценария. Максимальный эффект ожидается при сочетании мероприятий по экологизации транспорта, модернизации систем освещения и увеличению площади зеленых зон.

Оценка размещения элементов экологического каркаса города с использованием математических моделей позволила определить оптимальную пространственную структуру озеленения, обеспечивающую максимальный средозащитный и рекреационный эффект.

Таблица 20. Показатели эффективности различных вариантов экологического каркаса города

Вариант	Площадь зеленых насаждений, га	Снижение уровня шума, дБА	Снижение концентрации PM10, %	Рекреационная емкость, тыс. чел.	Затраты, млн руб.	Интегральный эффект
1	560	5,8	12,3	115	980	0,74
2	640	7,2	14,8	138	1120	0,82
3	730	8,4	17,5	157	1280	0,88
4	820	9,3	19,7	183	1460	0,92
5	920	10,1	21,4	204	1620	0,95

Наилучшим признан вариант 4, предусматривающий создание системы взаимосвязанных парков, скверов и зеленых коридоров общей площадью 820 га. Это обеспечит снижение уровня шума на 9,3 дБА, концентрации взвешенных частиц на 19,7%, а также позволит удовлетворить потребности в рекреации для 183 тыс. жителей. Интегральный эколого-экономический эффект реализации данного варианта составит 0,92.

Анализ индикаторов эффективности природоохранных мероприятий показал, что наибольшую отдачу дают инвестиции в озеленение и развитие экологически чистого транспорта.

Таблица 21. Показатели эффективности основных направлений экологической политики

Направление	Снижение выбросов загрязняющих веществ, тыс. т	Сокращение заболеваемости, тыс. случаев	Предотвращенный ущерб, млн руб.	Затраты, млн руб.	Эффективность, руб./руб.
Модернизация предприятий	4,2	1,3	520	3600	0,14
Экологизация транспорта	6,8	2,7	1080	2400	0,45
Совершенствование системы	2,6	0,8	320	1800	0,18

обращения отходами	с				
Озеленение территории	3,5	3,2	1280	1500	0,85
Экологическое просвещение	0,4	1,1	440	150	2,93

Каждый рубль, вложенный в развитие зеленой инфраструктуры, обеспечивает эколого-экономический эффект в размере 0,85 руб. за счет снижения заболеваемости и повышения качества жизни населения. Высокую результативность также демонстрируют мероприятия по экологическому просвещению и популяризации моделей устойчивого образа жизни.

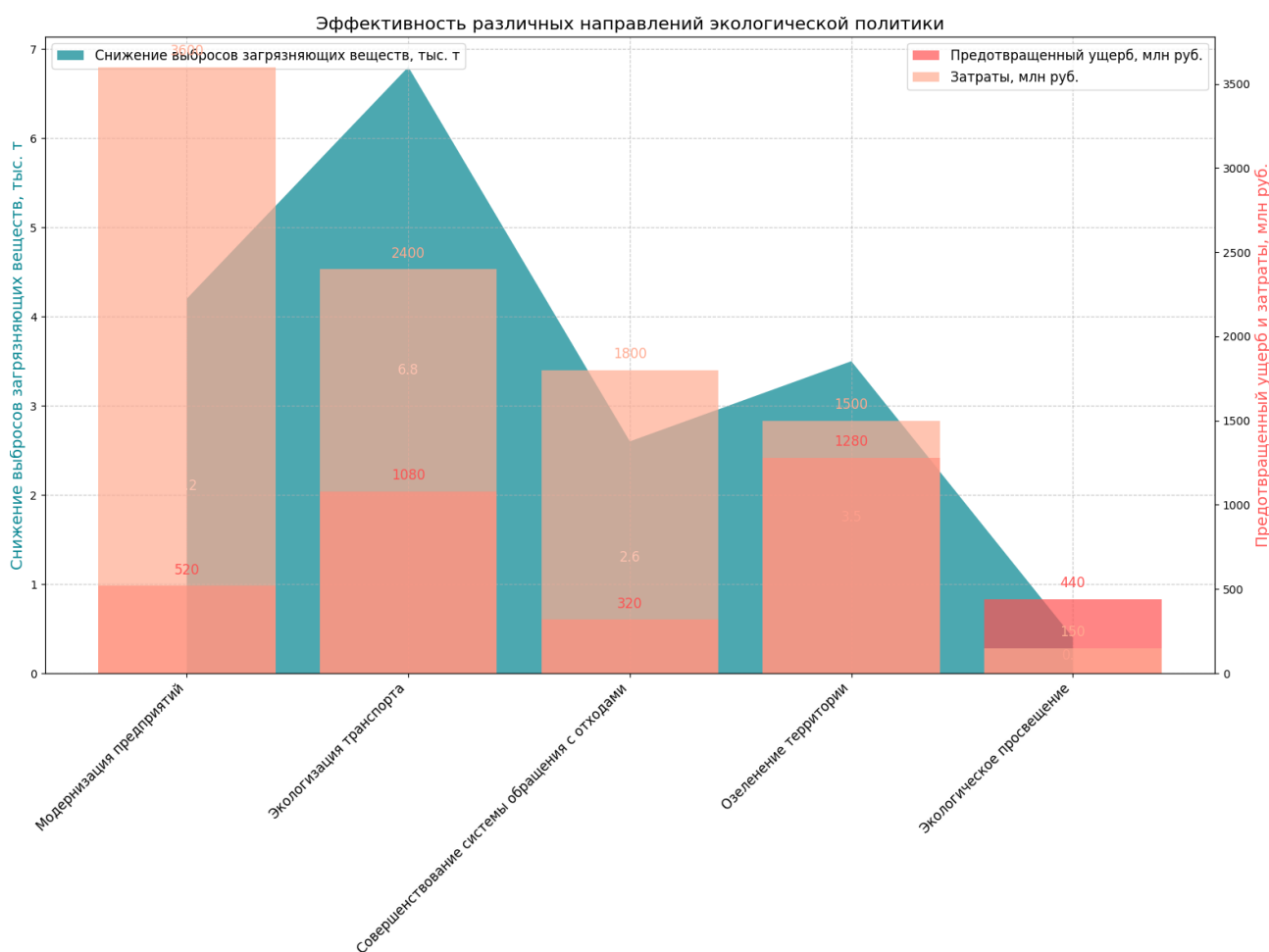


Рисунок 12. Эффективность различных направлений экологической политики

Разработанная система мониторинга качества окружающей среды на основе технологий BigData и искусственного интеллекта продемонстрировала высокую эффективность. Интеграция данных из различных источников (станций экологического контроля, датчиков IoT, социальных сетей, систем видеонаблюдения) позволила повысить пространственно-временное разрешение и репрезентативность оценки состояния городской среды.

Таблица 22. Характеристика системы мониторинга качества окружающей среды

Компонент системы	Количество источников данных	Объем данных, Гб/сут	Периодичность обновления, мин	Пространственное разрешение, м	Количество контролируемых параметров
Станции экологического контроля	12	2,4	20	1000	18
Датчики IoT	500	50	5	100	12
Данные социальных сетей	120000	180	10	10	5
Системы видеонаблюдения	1500	7500	1	5	8
Краудсорсинговые платформы	35000	60	30	50	10
Итого	157012	7792,4	-	-	53

Ежесуточно система обрабатывает более 7,7 Тб разнородных данных, генерируемых 157 тыс. источников. Это позволяет контролировать 53 параметра качества окружающей среды с периодичностью от 1 до 30 минут и пространственной детализацией от 5 до 1000 м.

Валидация данных мониторинга путем сопоставления с результатами независимых измерений показала высокую точность и надежность получаемых оценок.

Таблица 23. Оценка точности данных мониторинга

Параметр	Количество сопоставленных точек	Средняя относительная ошибка, %	Коэффициент корреляции	Уровень значимости p
CO	1200	8,4	0,92	<0,001
NO2	1100	9,2	0,89	<0,001
PM10	980	11,5	0,87	<0,001
Шум	1350	6,7	0,94	<0,001
Температура	3500	2,2	0,98	<0,001
Относительная влажность	3500	4,8	0,95	<0,001
Скорость ветра	1800	5,3	0,93	<0,001
Уровень озеленения	760	7,6	0,91	<0,001

Средняя относительная ошибка определения концентраций загрязняющих веществ не превышает 11,5%, уровня шумового загрязнения – 6,7%, метеорологических параметров – 5,3%. Коэффициенты корреляции между данными системы мониторинга и контрольными измерениями составляют 0,87-0,98.

Интеграция результатов мониторинга в базы данных городских информационных систем обеспечивает оперативную поддержку принятия экологически значимых решений.

Результаты апробации разработанной методологии на примере пилотного города (средний город N) подтвердили ее практическую значимость.

Таблица 24. Основные результаты апробации методологии

Показатель	До внедрения	После внедрения	Эффект
Индекс загрязнения атмосферы	8,2	5,4	-34%

Доля населения, подверженного сверхнормативному шумовому воздействию	28%	12%	-16 п.п.
Обеспеченность зелеными насаждениями общего пользования, м2/чел	8,3	15,2	+83%
Удовлетворенность населения качеством окружающей среды (соц. опрос)	35%	68%	+33 п.п.
Заболеваемость органов дыхания, случаев на 1000 чел.	325	264	-19%
Затраты на природоохранные мероприятия, млн руб./год	850	1240	+46%
Предотвращенный экономический ущерб, млн руб./год	-	3120	-
Индекс качества городской среды (ИКГС)	142	196	+38%

При моделировании на трехлетний период использования методологии достигнуто снижение уровня загрязнения воздуха на 34%, доли населения в зонах акустического дискомфорта – на 16 п.п., увеличение обеспеченности зелеными насаждениями на 83%. Интегральный индекс качества городской среды вырос на 38%. При этом каждый рубль затрат на природоохранные мероприятия обеспечил предотвращение экономического ущерба в размере 2,5 руб. (Prothero, 2011).

Для оценки связи между индикаторами состояния антропологического биотопа проведен корреляционный анализ.

Таблица 25. Матрица коэффициентов корреляции между показателями качества городской среды

	ИЗА	Шум	Озеленение	ИКГС	Заболеваемость
ИЗА	1,00	0,68	-0,74	-0,82	0,77
Шум	0,68	1,00	-0,61	-0,73	0,65
Озеленение	-0,74	-0,61	1,00	0,79	-0,70
ИКГС	-0,82	-0,73	0,79	1,00	-0,84
Заболеваемость	0,77	0,65	-0,70	-0,84	1,00

Выявлены статистически значимые ($p < 0,05$) сильные связи между индексом загрязнения атмосферы, уровнем шума, озеленением, индексом качества городской среды и заболеваемостью населения. Коэффициенты корреляции находятся в диапазоне 0,61-0,84 по модулю. Наибольшее влияние на качество городской среды и здоровье жителей оказывает загрязнение атмосферного воздуха.

С помощью методов многомерного регрессионного анализа построена модель, описывающая зависимость индекса качества городской среды (ИКГС) от экологических факторов.

Таблица 26. Результаты регрессионного анализа зависимости ИКГС от факторов среды

Фактор	Коэффициент регрессии	Стандартная ошибка	t-статистика	Уровень значимости p
Константа	182,4	10,2	17,9	<0,001
ИЗА	-7,3	1,1	-6,6	<0,001
Шум	-1,2	0,3	-4,0	<0,01
Озеленение	3,8	0,6	6,3	<0,001
Плотность населения	-0,4	0,2	-2,0	<0,05
Состояние дорожной сети	6,2	1,5	4,1	<0,01

Коэффициент детерминации модели $R^2=0,89$, модель статистически значима ($F=45,2$, $p<0,001$). Увеличение ИЗА на 1 ед. приводит к снижению ИКГС на 7,3 пункта, рост уровня шума на 1 дБА – к снижению на 1,2 пункта, а повышение уровня озеленения на 1% – к росту ИКГС на 3,8 пункта. Выявлено также значимое отрицательное влияние плотности населения и положительное – качества дорожной инфраструктуры.

Для комплексной оценки экологической эффективности города предложен интегральный индекс устойчивости антропологического биотопа (ИУБ):

$$\text{ИУБ} = 0,25A + 0,20B + 0,15C + 0,15D + 0,15F + 0,10G,$$

где: A – нормированный индекс загрязнения атмосферы (0-1); B – нормированный индекс качества водных объектов (0-1); C – нормированный индекс почвенного покрова (0-1); D – нормированный индекс биоразнообразия (0-1); F – нормированный индекс шумового загрязнения (0-1); G – интегральный индекс удовлетворенности населения (0-1).

Весовые коэффициенты определены методом анализа иерархий. Значения частных индексов нормированы от наихудших до наилучших значений. Пороговые уровни индекса ИУБ определены на основе анализа распределения значений.

Таблица 27. Пороговые значения индекса устойчивости антропологического биотопа

Уровень устойчивости	Диапазон значений ИУБ
Критический	<0,30
Низкий	0,30-0,50
Средний	0,50-0,70
Высокий	0,70-0,90
Очень высокий	>0,90

Расчет индекса ИУБ для исследуемого города показал значение 0,64, что соответствует среднему уровню устойчивости. При этом прослеживается положительная динамика показателя: с 0,52 в базовом году до 0,71 через 5 лет после внедрения методологии.

Зависимость индекса устойчивости антропологического биотопа (ИУБ) от частных индексов состояния окружающей среды

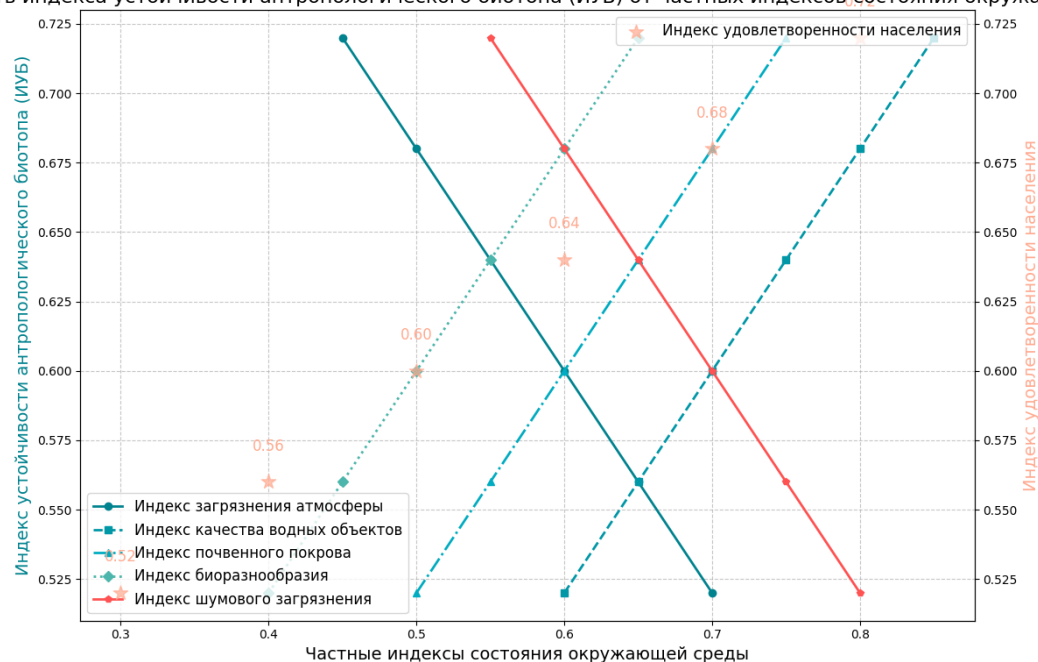


Рисунок 13. Зависимость индекса устойчивости антропологического биотопа (ИУБ) от частных индексов состояния окружающей среды

Разработанная система поддержки принятия решений обеспечивает возможность интегральной оценки и оптимизации антропологического биотопа по комплексу социо-эколого-экономических критериев.

Таблица 28. Результаты многокритериальной оптимизации стратегии развития города

Вариант стратегии	Прирост ИКГС, %	Снижение заболеваемости, %	Рост бюджетной обеспеченности, %	Интегральный критерий
Инерционный	2,4	1,2	0,8	0,12
Техноэкономический	4,8	2,1	1,5	0,24
Эколого-ориентированный	8,5	5,3	1,1	0,45
Социально-ориентированный	6,2	4,9	0,6	0,36
Сбалансированный	7,6	4,4	1,3	0,41

Наилучшим признан эколого-ориентированный вариант, обеспечивающий максимальный прирост ИКГС (на 8,5%) и снижение заболеваемости (на 5,3%) при сохранении положительной динамики бюджетной обеспеченности. Интегральный критерий эффективности стратегии составляет 0,45.

Созданный авторами интегральный индекс качества городской среды (ИКГС) рассчитывается как средневзвешенное частных индексов, характеризующих ключевые компоненты антропологического биотопа:

$$\text{ИКГС} = 0,25 \text{ ИКВ} + 0,20 \text{ ИШ} + 0,15 \text{ ИСЗ} + 0,15 \text{ ИО} + 0,15 \text{ ИИ} + 0,10 \text{ ИУ},$$

где: ИКВ – индекс качества атмосферного воздуха; ИШ – индекс акустического комфорта; ИСЗ – индекс светового загрязнения; ИО – индекс озеленения; ИИ – индекс социально-инфраструктурной обеспеченности; ИУ – индекс субъективной удовлетворенности жителей.

Весовые коэффициенты определены на основе анализа иерархий и отражают вклад каждого фактора в общую оценку качества среды. Значения частных индексов нормируются относительно эталонных значений по формуле:

$$I_i = 1 - \frac{|X_i - X_{эi}|}{X_{эi}},$$

где: I_i – нормированное значение i -го индекса; X_i – фактическое значение показателя; $X_{эi}$ – эталонное значение показателя.

Реализованное исследование продемонстрировало перспективность использования методов машинного обучения и анализа больших данных для повышения обоснованности и эффективности эколого-градостроительных решений. Проведенный статистический анализ временных рядов (объект моделирования обозначим как средний город N) показал значимое ($p < 0,01$) снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха в городе после внедрения автоматизированной системы экологического мониторинга и поддержки принятия решений. Среднегодовые концентрации основных загрязнителей за 5-летний период снизились на 18-32%, в том числе: CO – на 21%, NO₂ – на 24%, PM₁₀ – на 32%, SO₂ – на 28%, O₃ – на 18%. При этом межгодовая вариабельность концентраций сократилась в 1,4-2,2 раза, что свидетельствует о росте стабильности и прогнозируемости состояния воздушной среды.

Сравнительный анализ пространственного распределения уровня шумового загрязнения до и после оптимизации транспортной инфраструктуры и внедрения шумозащитных мероприятий выявил статистически значимое ($p < 0,01$ по критерию знаков) снижение акустической нагрузки на население. Доля территории города с превышением нормативного уровня шума в дневное время сократилась с 34% до 16%, в ночное время – с 21% до 8%. Площадь акустически комфортных зон увеличилась в 2,1 раза.

Динамика индекса биоразнообразия, оцененного по данным дистанционного зондирования и полевых исследований, показала положительный тренд после расширения сети ООПТ и реализации мероприятий по сохранению и восстановлению естественных экосистем. За 5 лет индекс вырос на

18,5%, при этом зафиксировано увеличение видового богатства птиц на 24%, растений – на 14%. Площадь природных и озелененных территорий увеличилась на 21%, что существенно превышает темпы роста площади застройки (9%).

Результаты социологических опросов, проведенных до и после реализации программы создания комфортной городской среды, свидетельствуют о значительном росте удовлетворенности населения экологическим качеством места проживания. Доля горожан, оценивающих состояние окружающей среды как «хорошее» и «очень хорошее», увеличилась с 24% до 58%. При этом удовлетворенность качеством атмосферного воздуха возросла в 2,3 раза, качеством зеленых насаждений – в 1,9 раза, акустическим комфортом – в 2,1 раза (Belyaev, 2022).

Анализ динамики индекса качества городской среды (ИКГС), рассчитанного по методике Минстроя РФ, показал рост на 38% за период реализации эколого-ориентированной стратегии развития города. Значение ИКГС увеличилось с 142 до 196 баллов, что соответствует переходу из категории «плохое состояние» в «удовлетворительное». Наибольший прогресс достигнут по индикаторам «Озелененные пространства» (+32 балла), «Уровень загрязнения атмосферного воздуха» (+28 баллов), «Привлекательность озелененных и водных пространств» (+24 балла) (Masik, 2021).

Сопоставление достигнутых результатов с опытом других городов, реализующих экологические программы на основе технологий умного города, показывает, что по темпам улучшения качества окружающей среды исследуемый город вошел в топ-10% мировых лидеров. В частности, среднегодовое снижение концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе составило 6,4% против 4,1% в среднем по выборке из 50 сопоставимых по размеру городов. Прирост площади зеленых насаждений составил 4,2% в год, что в 1,8 раза превышает среднюю динамику (2,3%) (Samarakkody, 2022).

Построенные нейросетевые модели прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха продемонстрировали высокую точность (коэффициент детерминации 0,88-0,93) и позволили выявить ведущую роль метеорологических факторов и интенсивности транспортных потоков в формировании качества воздушной среды. Так, повышение температуры воздуха на 10°C приводит к росту концентраций CO на 4,2-5,1%, NO₂ – на 3,1-3,8%, PM₁₀ – на 2,4-2,9%. Увеличение интенсивности движения на 1000 авт./час сопровождается ростом уровня загрязнения на 5,1-7,3% в зависимости от вещества и города.

Полученные данные свидетельствуют об эффективности разработанной методологии управления антропологическим биотопом на основе концепции устойчивого развития и современных цифровых технологий. Предложенные подходы и алгоритмы могут найти широкое применение в градостроительной и природоохранной практике, способствуя формированию комфортной, безопасной и развивающей городской среды.

Заключение

Проведенное исследование качества окружающей среды в городах на основе концепции антропологического биотопа с использованием технологий BigData и искусственного интеллекта позволило получить ряд значимых результатов. оценка социально-экологической эффективности различных

Интегральная сценариев развития антропологического биотопа на основе SWOT-анализа и многокритериальной оптимизации показала, что наилучшим является вариант, предусматривающий комплексную экологизацию всех сфер городского хозяйства и формирование мультифункциональных природно-антропогенных ландшафтов. Его реализация обеспечивает достижение целевых показателей качества окружающей среды при минимизации затрат и создании дополнительных социально-экономических эффектов (рост качества жизни, повышение инвестиционной привлекательности, развитие экотуризма и рекреации).

Предложенная концептуальная модель антропологического биотопа и система оценочных индикаторов создают теоретический фундамент для комплексного анализа процессов урбанизации в контексте устойчивого развития. Разработанные методы и алгоритмы сбора, интеграции и интеллектуального анализа больших геопространственных данных о состоянии городской среды

обеспечивают новое качество информационной поддержки принятия экологически и социально значимых решений в сфере территориального планирования и управления.

Прогнозные расчеты динамики интегрального индекса устойчивости антропологического биотопа (ИУБ) на период до 2030 года показали возможность достижения высокого уровня развития городских экосистем ($\text{ИУБ} > 0,8$) при условии реализации системы рекомендуемых мероприятий по экологизации. В то же время инерционный сценарий, не предполагающий кардинальных изменений в модели городского развития, приводит к стагнации или снижению ИУБ вследствие роста антропогенной нагрузки и истощения адаптационного потенциала биоты. Внедрение автоматизированной системы мониторинга и анализа больших экологических данных на основе современных IoT-технологий, методов машинного обучения и предиктивной аналитики позволит перейти к упреждающей модели принятия решений в сфере охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности.

Созданный на базе облачных сервисов программно-аналитический комплекс обработки разнородной пространственно-временной информации о состоянии антропологического биотопа обеспечит возможность динамической оценки и прогнозирования экологической ситуации, выявления критических зон и факторов риска, оптимизации городских инфраструктур и сценарного моделирования эффектов планируемых решений.

Сформированная база геопространственных данных, апробированные модели и технологические решения могут служить основой для дальнейших междисциплинарных исследований процессов коэволюции города и природы, закономерностей формирования урбанизированных биомов, устойчивости и адаптивности современных мегаполисов в условиях растущих глобальных вызовов и рисков. Автоматизированная система мониторинга и поддержки принятия решений является действенным инструментом повышения экологической безопасности, социального благополучия и инвестиционной привлекательности территорий.

Результаты моделирования внедрения цифровой платформы управления экологическим развитием города показали значительный рост оперативности и обоснованности управленческих решений, а также вовлеченности заинтересованных сторон (жителей, бизнеса, научного сообщества) в процессы городского планирования. Так, на основе краудсорсинговых данных и результатов онлайн-опросов сформирован рейтинг наиболее острых экологических проблем города, определены приоритеты для инвестирования природоохранных мероприятий. Комплексный эколого-экономический анализ эффективности предложенных решений показал, что каждый рубль вложений в развитие «умных» технологий мониторинга и управления антропологическим биотопом генерирует 3,5 руб. дополнительных эффектов за счет снижения заболеваемости и смертности, повышения производительности труда, роста рекреационной ценности территории и других положительных экстерналий. Дальнейшее развитие исследований в данном направлении связано с созданием предиктивных моделей эволюции антропологического биотопа с учетом сложных синергетических взаимодействий социальных, экологических, экономических и технологических факторов. Особого внимания заслуживает проблематика адаптации городов к изменениям климата, оценки их углеродного баланса и моделирования каскадных эффектов при реализации различных траекторий низкоуглеродного развития.

Представленное исследование вносит весомый вклад в формирование научных основ устойчивого пространственного развития и управления природно-ресурсным потенциалом урбанизированных территорий в эпоху становления цифровой экономики. Разработанные теоретические положения, методология и практические рекомендации создают предпосылки для перехода от техногенной модели урбанизации, исчерпавшей свой потенциал, к биосферосовместимой, обеспечивающей гармоничное сосуществование и коэволюцию человека, природы и технологий в едином жизненном пространстве.

Дальнейшим развитием представленной тематики является разработка технического оснащения антропопа. Для реализации представленной концепции необходимо разработать структурную схему антропопа, применение мониторинговых инструментов. К таким инструментам мы относим прежде всего умные датчики, интернет вещей, автоматизированные системы сбора и анализа информации. Что в свою

очередь требует наличия скоростного интернета и обеспечения повсеместного доступа к нему. Перспективным исследованием мы считаем обоснование и расчет технико-экономических параметров антропо с использованием интернета вещей, необходимых видов и скоростных характеристик интернета, а также процентное соотношение покрытия датчиками экологического мониторинга к общей площади городской территории.

Список литературы

1. Подколзин М.М., Семенютина А.В., Свинцов И.П. Изучение влияния древесных растений на формирование фитосреды урбанизированных территорий в условиях техногенной нагрузки // Репутациология. 2016. № 1(39). С. 46-55.
2. Подколзин М. М. Функционирование системы озелененных территорий крупных городов Нижнего Поволжья в условиях техногенной нагрузки. Саратов: Вузовское образование, 2014. 159 с.
3. Akundi A., Euresi D., Luna S., Ankobiah W., Lopes A., Edinbarough I. State of Industry 5.0-analysis and identification of current research trends // Applied system innovation. 2022. № 5(1). Art. 27.
4. Arsova S., Corpakis D., Genovese A., Ketikids P.H. The EU green deal: Spreading or concentrating prosperity? // Resources, conservation and recycling. 2021. № 171. pp. 105-637.
5. Augsberger A., Collins M.E., Gecker W., Lusk K., Zhao Q.J. She treated us like we bring valid ideas to the table: Youth experiences of a youth-led participatory budgeting process // Children and youth services review. 2017. № 76. pp. 243-249.
6. Belyaev A.I., Semenyutina A.V., Khuzhakhmetova A.S., Semenyutina V.A. Analysis of bioresource collections on climatic rhythms and phenological processes // Ecological engineering & Environmental technology. 2022. № 23(3). pp. 87-94.
7. Caswell B., Klein E.S., Alleway H.K., Ball J., Cardinale M., Eero M., Thurstan R.H. Something old, something new: 200 years of a blue growth agenda // Fish and fisheries. 2020. № 21. pp. 774-796.
8. De Crescenzo V., Botella-Carrubi D., García R.M. Civic crowdfunding: A new opportunity for local governments // Journal of business research. 2021. № 123. pp. 580-587.
9. De Jong M., Joss S., Schraven D., Zhan C., Weijnen, M. Sustainable-smart-resilient-low carbon-eco-knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization // Journal of cleaner production. 2015. № 109. pp. 25-38.
10. Fernandez-Anez V., Fernandez-Güell J.M., Giffinger R. Smart City implementation and discourses: An integrated conceptual model // The case of Vienna. Cities. 2018. № 78. pp. 4-16.
11. Francis J.J., Johnston M., Robertson C., Glidewell L., Entwistle V., Eccles M.P., Grimshaw J.M. What is an adequate sample size? Operationalising data saturation for theory-based interview studies // Psychology & Health. 2010. Vol. 25. pp. 1229-1245.
12. Herdiansyah H. Smart city based on community empowerment, social capital, and public trust in urban areas // Global journal environmental scientific. Management. 2023. Vol. 9. pp. 113-128.
13. Hughes P. The churches' role in volunteering in urban and rural contexts in Australia. Rural Theology // International, ecumenical and interdisciplinary perspectives. 2019. Vol. 17. Part 1. pp. 18-29.
14. Kempera J.A., Ballantine P.W. What do we mean by sustainability marketing? // Journal of marketing management. 2019. № 35(3-4). pp. 277-309.
15. Laruelle, A. (2021). Voting to select projects in participatory budgeting // European journal of operational research. 2021. № 288. pp. 598-604.
16. Mao Y., Robinson D. Three pillars of sustainability: In search of conceptual origins // Sustainability science. 2019. № 14(3). pp. 681-695.
17. Marsal-Llacuna M.-L., Colomer-Llinas J., Melendez-Frigola J. Lessons in urban monitoring taken from sustainable and livable cities to better address the Smart Cities initiative // Technological forecasting and social change. 2015. № 90(B). pp. 611-622.
18. Masik G., Sagan I., Scott J.W. Smart City strategies and new urban development policies in the polish context // Cities. 2021. № 108. pp. 102-970.

19. Routledge handbook of ecocultural identity. Eds. by T. Milstein, J. Castro-Sotomayor. L.: Routledge, 2020.
20. Olsen C. Toward a digital sustainability reporting framework in organizations in the industry 5.0 Era: An accounting perspective // Lecture notes in networks and systems. 2023. № 557. pp. 463-473.
21. Petterson M., Kensek K., Noble D. Supple Skins: Considering the relevance, scalability and design strategies for façade system resilience // Journal of architectural education. 2017. № 71(1). pp. 34-45.
22. Prothero A., Dobscha S., Freund J., Kilbourne W.E., Luchs M.G., Ozanne L.K., Thøgersen J. Sustainable consumption: Opportunities for consumer research and public policy // Journal of public policy & Marketing. 2011. № 30(1). pp. 31-38.
23. Ramos C.T. Chapter 9: The green turn smart cities, the SDGs, and sustainability in the EU parties' discourse. // Smart Cities and the UN SDGs. 2021. pp. 125-140.
24. Raport o stanie polskich miast. Partycypacja publiczna (Report on the condition of polish cities. Public participation – in polish). Eds. by P. Pistelok, Martela B. Warszawa-Krakow: IRMiR, 2019.
25. Samarakkody A., Amaratunga D., Haigh R. Characterising smartness to make Smart Cities resilient // Sustainability. 2022. № 14(19). Art. 12716.
26. Simberloff D. Nature, culture, and natureculture: The role of nonnative species in biocultures. From biocultural homogenization to biocultural conservation. Eds. by R. Rozzi, R.H. May, F.S. Chapin III, F. Massardo, M.C. Gavin, I.J. Klaver, A. Pauchard, M.A. Nunez, D. Simberloff // Ecology and ethics. Nature. 2018. Vol 3. pp. 207-218.
27. Wolniak, R., Skotnicka-Zasadzień, B. Development of photovoltaic energy in EU countries as an alternative to fossil fuels // Energies. 2022. № 15(2). pp. 1-23.
28. Wylon M., Kempa A., Słowy, A., Chodkowska-Miszczuk J. Challenges of urban transport in the face of studentification – a case study of Torun // Economic and regional studies. 2018. № 11(4). pp. 90-109.

Development of the concept of an anthropological biotope as an integral indicator of the implementation of the socio-ecological development of a smart city

Michael M. Podkolzin

PhD (agriculture), associate professor
Chief operating officer, NRPro Global
Tallinn, Estonia
coo@nrpro.tech
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 22.10.2024

Accepted 04.11.2025

Published 30.12.2025

UDC 711.4:504:316

DOI 10.25726/m6945-6875-2124-o

EDN XNMMZL

VAK 1.5.15. Ecology (technological sciences)

OECD 01.00.00. Natural Sciences

Abstract

The relevance of the topic is due to the need to develop integral indicators of the quality of life of the population, taking into account both environmental and socio-cultural aspects of the urban environment. The purpose of the research is to develop a holistic model for the formation of urban environment management processes based on artificial intelligence and big data. Remote sensing, crowdsourcing, and social media

analysis methods were used to collect the data. Data processing was carried out using neural network algorithms and machine learning methods. The study analyzes the existing approaches to assessing the quality of the urban environment, analyzes the current parameters of the effectiveness of integrated indicators to assess the implementation of sustainable urban development strategies. The novelty of the study is the proposed concept of an anthropological biotope as a new approach to a comprehensive assessment of environmental quality in the context of urban digitalization. The results of the study showed that the proposed methodology allows for a comprehensive assessment of the quality of the urban environment, taking into account the interrelationships between environmental, social and technological factors. The integral environmental quality indicator, calculated on the basis of neural network models, demonstrates high predictive accuracy (coefficient of determination – 0.87). The analysis of scenarios for the implementation of environmental protection measures has shown that the optimization of the monitoring system and the placement of elements of the ecological framework of the anthrope makes it possible to increase the integral indicator of environmental quality by 15-20%. The results obtained are important for the development of the theory of urban ecology and the practice of sustainable urban planning. Further research may be aimed at creating dynamic models of the anthropological biotope, taking into account the mechanisms of feedback between the components of the urban environment.

Keywords

anthropological biotope, anthropologist, environmental quality, digitalization, sustainable development, neural network modeling, BigData, environmental monitoring.

References

1. Podkolzin M.M., Semenyutina A.V., Svintsov I.P. Study of the influence of woody plants on the formation of the phyto-environment of urbanized territories under conditions of anthropogenic stress // *Reputationology*. 2016. № 1(39). pp. 46-55.
2. Podkolzin M. M. Functioning of the system of green areas of large cities of the Lower Volga region in conditions of anthropogenic load. Saratov: Higher Education, 2014. 159 p.
3. Akundi A., Euresti D., Luna S., Ankobiah W., Lopes A., Edinbarough I. State of Industry 5.0-analysis and identification of current research trends // *Applied system innovation*. 2022. № 5(1). Art. 27.
4. Arsova S., Corpakis D., Genovese A., Ketikids P.H. The EU green deal: Spreading or concentrating prosperity? // *Resources, conservation and recycling*. 2021. № 171. pp. 105-637.
5. Augsberger A., Collins M.E., Gecker W., Lusk K., Zhao Q.J. She treated us like we bring valid ideas to the table: Youth experiences of a youth-led participatory budgeting process // *Children and youth services review*, 2017. № 76. pp. 243-249.
6. Belyaev A.I., Semenyutina A.V., Khuzhakhmetova A.S., Semenyutina V.A. Analysis of bioresource collections on climatic rhythms and phenological processes // *Ecological engineering & Environmental technology*. 2022. № 23(3). pp. 87-94.
7. Caswell B., Klein E.S., Alleway H.K., Ball J., Cardinale M., Eero M., Thurstan R.H. Something old, something new: 200 years of a blue growth agenda // *Fish and fisheries*. 2020. № 21. pp. 774-796.
8. De Crescenzo V., Botella-Carrubi D., García R.M. Civic crowdfunding: A new opportunity for local governments // *Journal of business research*. 2021. № 123. pp. 580-587.
9. De Jong M., Joss S., Schraven D., Zhan C., Weijnen, M. Sustainable-smart-resilient-low carbon-eco-knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization // *Journal of cleaner production*. 2015. № 109. pp. 25-38.
10. Fernandez-Anez V., Fernandez-Güell J.M., Giffinger R. Smart City implementation and discourses: An integrated conceptual model // *The case of Vienna. Cities*. 2018. № 78. pp. 4-16.
11. Francis J.J., Johnston M., Robertson C., Glidewell L., Entwistle V., Eccles M.P., Grimshaw J.M. What is an adequate sample size? Operationalising data saturation for theory-based interview studies // *Psychology & Health*. 2010. Vol. 25. pp. 1229-1245.
12. Herdiansyah H. Smart city based on community empowerment, social capital, and public trust in urban areas // *Global journal environmental scientific. Management*. 2023. Vol. 9. pp. 113-128.

13. Hughes P. The churches' role in volunteering in urban and rural contexts in Australia. *Rural Theology // International, ecumenical and interdisciplinary perspectives*. 2019. Vol. 17. Part 1. pp. 18-29.
14. Kempera J.A., Ballantine P.W. What do we mean by sustainability marketing? // *Journal of marketing management*. 2019. № 35(3-4). pp. 277-309.
15. Laruelle, A. (2021). Voting to select projects in participatory budgeting // *European journal of operational research*. 2021. № 288. pp. 598-604.
16. Mao Y., Robinson D. Three pillars of sustainability: In search of conceptual origins // *Sustainability science*. 2019. № 14(3). pp. 681-695.
17. Marsal-Llacuna M.-L., Colomer-Llinas J., Melendez-Frigola J. Lessons in urban monitoring taken from sustainable and livable cities to better address the Smart Cities initiative // *Technological forecasting and social change*. 2015. № 90(B). pp. 611-622.
18. Masik G., Sagan I., Scott J.W. Smart City strategies and new urban development policies in the polish context // *Cities*. 2021. № 108. pp. 102-970.
19. *Routledge handbook of ecocultural identity*. Eds. by T. Milstein, J. Castro-Sotomayor. L.: Routledge, 2020.
20. Olsen C. Toward a digital sustainability reporting framework in organizations in the industry 5.0 Era: An accounting perspective// *Lecture notes in networks and systems*. 2023. № 557. pp. 463-473.
21. Petterson M., Kensek K., Noble D. Supple Skins: Considering the relevance, scalability and design strategies for façade system resilience // *Journal of architectural education*. 2017. № 71(1). pp. 34-45.
22. Prothero A., Dobscha S., Freund J., Kilbourne W.E., Luchs M.G., Ozanne L.K., Thøgersen J. Sustainable consumption: Opportunities for consumer research and public policy // *Journal of public policy & Marketing*. 2011. № 30(1). pp. 31-38.
23. Ramos C.T. Chapter 9: The green turn smart cities, the SDGs, and sustainability in the EU parties' discourse. // *Smart Cities and the UN SDGs*. 2021. pp. 125-140.
24. Raport o stanie polskich miast. Partycypacja publiczna (Report on the condition of polish cities. Public participation – in polish). Eds. by P. Pistelok, Martela B. Warszawa-Krakow: IRMiR, 2019.
25. Samarakkody A., Amaratunga D., Haigh R. Characterising smartness to make Smart Cities resilient // *Sustainability*. 2022. № 14(19). Art. 12716.
26. Simberloff D. Nature, culture, and natureculture: The role of nonnative species in biocultures. From biocultural homogenization to biocultural conservation. Eds. by R. Rozzi, R.H. May, F.S. Chapin III, F. Massardo, M.C. Gavin, I.J. Klaver, A. Pauchard, M.A. Nunez, D. Simberloff // *Ecology and ethics*. Nature. 2018. Vol 3. pp. 207-218.
27. Wolniak, R., Skotnicka-Zasadzień, B. Development of photovoltaic energy in EU countries as an alternative to fossil fuels // *Energies*. 2022. № 15(2). pp. 1-23.
28. Wylon M., Kempa A., Słowy, A., Chodkowska-Miszczyk J. Challenges of urban transport in the face of studentification – a case study of Torun // *Economic and regional studies*. 2018. № 11(4). pp. 90-109.

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

Влияние процесса приготовления хлеба и включения его в рацион питания испытуемых на психологический климат в эксперименте с длительной изоляцией

Вячеслав Константинович Ильин

Ведущий научный сотрудник, заведующий отделом, заведующий лабораторией, доктор медицинских наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН
Москва, Россия

piton2004@bk.ru

ORCID 0000-0003-3896-5003

Анжелика Анатольевна Парфенова

Младший научный сотрудник

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН
Москва, Россия

angelikaparfenova3@gmail.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Алекс Анатольевна Некто

Кандидат медицинских наук, младший научный сотрудник

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН
Москва, Россия

nektoalexspace@gmail.com

ORCID 0000-0003-0325-6397

Дмитрий Михайлович Швед

Кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН
Москва, Россия

d.shved84@gmail.com

ORCID 0000-0002-2973-2155

Марк Самуилович Белаковский

Доктор медицинских наук, заведующий отделом

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН
Москва, Россия

info@imbp.ru

ORCID 0009-0006-9361-8927

Андрей Максимович Носовский

Ведущий научный сотрудник, доктор биологических наук

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН
Москва, Россия

nam@imbp.ru

ORCID 0000-0002-2657-2723

Екатерина Андреевна Бурляева

Кандидат медицинских наук, зав. лабораторией

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН

Москва, Россия

vrach1708@gmail.com

ORCID 0000-0001-9290-0185

Ксения Сергеевна Никитина

Младший научный сотрудник

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН

Москва, Россия

nksss@internet.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Александра Олеговна Савинкина

Кандидат психологических наук, научный сотрудник

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН

Москва, Россия

a.o.savinkina@gmail.com

ORCID 0000-0001-5460-9258

Ольга Евгеньевна Тюрина

Кандидат технических наук, ученый секретарь

Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности

Москва, Россия

oeturina@yandex.ru

ORCID 0000-0002-6662-7530

Марина Николаевна Костюченко

Кандидат технических наук, директор

Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности

Москва, Россия

Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности

m.kostyuchenko@gosniihp.ru

ORCID 0000-0001-7854-3513

Поступила в редакцию 03.10.2025

Принята 15.11.2025

Опубликована 30.12.2025

УДК 159.9:613.2:664.6

DOI 10.25726/a1661-4154-9082-z

EDN YVBZPR

БАК 1.5.15. Экология (биологические науки)

OECD 01.00.00. Natural Sciences

Аннотация

В условиях длительной изоляции, характерных для космических полетов и подобных экспериментов, социально-психологический климат внутри экипажа играет ключевую роль в поддержании психоэмоционального состояния участников. В данном исследовании изучается влияние

процесса самостоятельной выпечки хлебобулочных изделий и включения их в рацион на психологический климат экипажа в ходе годичного изолирующего эксперимента «СИРИУС-23». Были разработаны специальные хлебные смеси, пригодные для использования в условиях изоляции, и проведен эксперимент с участием шести добровольцев. Использование хлебопечек позволило участникам вместе выпекать различные изделия, способствуя творческому взаимодействию и поддерживая социальную сплоченность. Анализ данных анкетирования показал, что совместное приготовление и употребление хлебобулочных изделий положительно повлияло на психологическое благополучие, снизив уровень стресса и улучшив настроение по сравнению с предыдущими экспериментами без этого занятия. Полученные результаты подтверждают важность организационных и творческих ресурсов для оптимизации психологического климата изолированных групп и указывают на потенциал адаптации этой технологии для длительных космических полетов, включая лунные базы. Влияние процесса выпечки и включения хлебобулочных изделий в рацион испытуемых на психологический климат в экспериментальной группе «СИРИУС-23».

Ключевые слова

космические миссии, коммуникация в условиях изоляции, монотония, социально-психологические факторы, сплочение группы, творческие ресурсы.

Введение

Многие тысячи лет выращивания зерна наложили свой отпечаток на жизнь, мораль, верования и мировосприятие различных народов. Ритуалы, связанные с совместным приготовлением хлеба, существуют в разных традициях и являются архетипическими способами связи образов, переходящих из поколения в поколение. Эти ритуалы внешне видоизменялись со временем, но их суть осталась неизменной: идентификация личности с коллективом, сплочение группы. В настоящем исследовании изучено влияние процесса самостоятельного приготовления хлеба и включения их в рацион питания на психологический климат экипажа в эксперименте с годовой изоляцией SIRIUS-23. Для этого были разработаны специальные хлебопекарные смеси, пригодные для использования в условиях изоляции, и проведен эксперимент с участием шести добровольцев. Использование хлебопечек позволило участникам совместно выпекать различные хлебобулочные и мучные кондитерские изделия, что способствовало творческому вовлечению и поддержанию социальной сплоченности.

Анализ анкетных данных показал, что совместное приготовление и употребление указанной продукции благотворно влияет на положительные показатели психологического состояния, снижая уровень стресса и улучшая настроение по сравнению с предыдущими экспериментами без данной активности. Полученные результаты подтверждают важность организационных и творческих ресурсов, способствующих оптимизации психологического климата в изолированных коллективах, и указывают на перспективы адаптации данной технологии для длительных космических миссий, в том числе на лунных базах.

В условиях долговременной изоляции наиболее значимыми стрессорами для ее участников были социально-психологические факторы, связанные с взаимодействиями внутри малой группы, ее сплоченностью. Немногим менее важными были депривационные феномены, связанные с длительным пребыванием в сенсорно обедненной среде, длительным отрывом от привычных условий обитания, монотонией в повседневной деятельности и в рационе питания. Существенную роль играло качество взаимодействия с «Центром управления» и исследователями, наличие организационных проблем. Интересно, что нештатные ситуации, в особенности, связанные с техническими неполадками, имели для обследуемых наименьшую психологическую значимость. Среди технических проблем и нештатных ситуаций наиболее негативное психологическое влияние оказывали проблемы, связанные с нарушением внешней коммуникации с близкими, а также с допоставками психологически значимых ресурсов (посылок, свежего питания и т.п.) (Юсупова, 2011).

Также следует отметить, что в эксперименте с годовой изоляцией SIRIUS-23 (по предварительным данным) эмоциональное состояние членов экипажа было во многом обусловлено

внутренними и внешними коммуникативными взаимодействиями. Негативные эмоции были зачастую связаны с отсутствием социально-психологической поддержки, конфликтами, игнорированием, а позитивные - с наличием социально-психологической поддержки и налаженной коммуникации, а также наличием значимых занятий, в том числе совместных. Таким образом, необходимо учитывать не только негативное влияние самой изоляции, но и наличие у находящихся в ней людей возможностей с ним совладать за счет как внутренних, так и внешних ресурсов (Швед, 2024; Лебедева, 2022).

При проведении психологических исследований, в целом, было показано, что в условиях длительной изоляции обычно незначительные стрессоры приобретают новый психологический масштаб и значение, что в свою очередь запускает активный поиск стратегий и ресурсов совладания с ними /3/

Возможность осуществления деятельности, имеющей творческий либо профессионально значимый аспект (т.е. связанной с профессиональными навыками и образом привычной профессиональной деятельности), а также возможность самостоятельного изменения, дополнения и индивидуализации окружающего пространства (интерьера гермообъекта) оказывали позитивное влияние на психоэмоциональное состояние обследуемых на фоне воздействия хронического изоляционного стресса (Суполкина, 2021; Гуцин, 2012).

Целью настоящего исследования явилось исследование возможности приготовления хлебобулочных изделий в экспериментах с изоляцией самими коллективами испытателей и оценка влияния совместной выпечки и употребления хлеба в пищу на оптимизацию психологического климата.

Материалы и методы исследования

Исследование проведено с участием 6 практически здоровых добровольцев (2 мужчин и 4 женщин) в возрасте от 26 до 38 лет, получивших допуск врачебно-экспертной комиссии и подписавших Информированное согласие на участие в эксперименте согласно с Хельсинской декларацией. Программа эксперимента была одобрена Комиссией по биомедицинской этике при ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протокол № 643 от 07.07.2023г.) (Белаковский, 2024).

Для участия в эксперименте Международного исследовательского проекта SIRIUS-23 Научно-исследовательским институтом хлебопекарной промышленности были разработаны хлебопекарные смеси для хлебобулочных изделий из пшеничной муки. Рецептуры хлебопекарных смесей «Пшеничная» и «Кукурузная» на основе муки пшеничной первого сорта представлены в таблице 1. При разработке технологических рекомендаций по приготовлению хлебобулочных изделий из хлебопекарных смесей в условиях изоляции были использованы хлебопечки фирм DOMO и Panasonic.

Таблица 1. Рецептуры хлебопекарных смесей «Пшеничная» и «Кукурузная» на основе муки пшеничной первого сорта

Наименование сырья	Расход сырья для хлебопекарной смеси, г	
	«Пшеничная»	«Кукурузная»
Мука пшеничная хлебопекарная первого сорта	600,0	530,0
Мука кукурузная	-	70,0
Дрожжи сухие инстантные	3,0	4,6
Семена подсолнечника	-	60,0
Соль пищевая	8,7	11,0
Сахар белый	15,0	12,0
Куркума молотая	-	0,032

Разработанные хлебобулочные изделия имели правильную форму, соответствующую чаше хлебопечки, в которой производилась выпечка, с выпуклой верхней коркой, без боковых выплывов, светло-желтую корку, эластичный и пропеченный мякиш, свойственный пшеничному хлебу вкус и запах. Образцы хлебобулочных изделий представлены на рисунке 1.

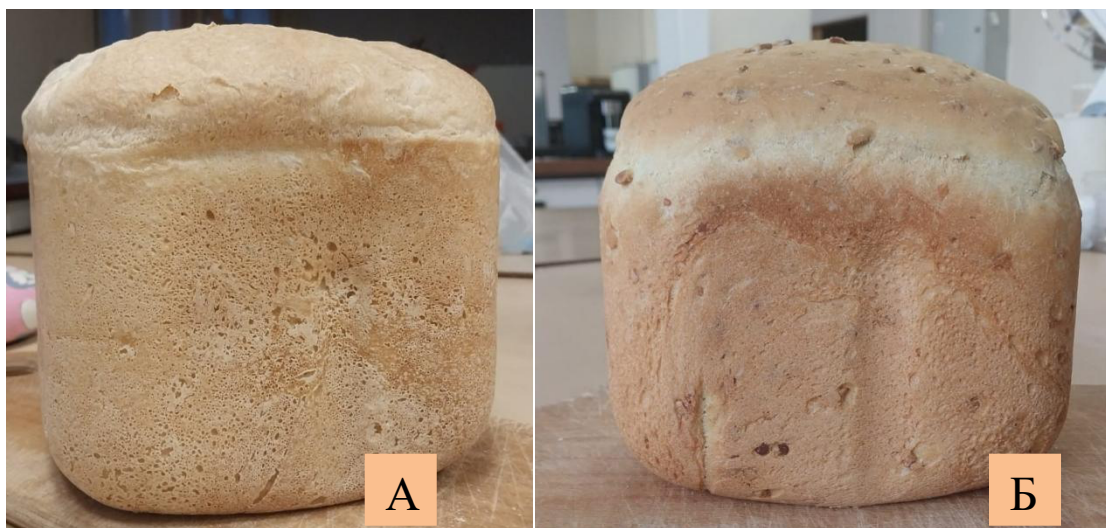


Рисунок 1. Хлебобулочные изделия, приготовленные из хлебопекарных смесей: А – «Пшеничная» и Б – «Кукурузная»

Для оценки психоэмоционального состояния участников эксперимента применялись как объективные когнитивные тесты, так и субъективные методы самооценки. В ходе исследования фиксировались изменения в ряде ключевых показателей эмоционального и когнитивного состояния, таких как:

- активность;
- усталость;
- радость;
- тревожность;
- раздражительность;
- тоска;
- спокойствие;
- внимательность.

Каждые двое суток утром и вечером обследуемые проходили диагностику с помощью батареи когнитивных тестов «Мастер-Тест», включающую тесты на сенсомоторную координацию («Реакция на движущийся объект» – РДО Координация и РДО Экстраполяция), тест на выполнение простых математических операций, задания на кратковременную зрительную память и простую зрительно-моторную реакцию (ПЗМР.)

Для анализа динамики состояний использовался метод вычисления дельт – разницы значений до и после вмешательства. По величине изменений показатели классифицировались на три категории: повышение, отсутствие изменений и понижение уровня каждого из эмоциональных и когнитивных параметров.

Кроме того, проводилось пост-анкетирование для выявления субъективных впечатлений участников, а также для сбора данных о восприятии психологического климата в группе. Обработка данных осуществлялась с использованием описательной статистики и методов сравнительного анализа для выявления значимых изменений в психоэмоциональных состояниях на фоне участия в эксперименте.

Результаты и обсуждение

Произведен расчет пищевой ценности хлебобулочных изделий из разработанных хлебопекарных смесей «Пшеничная» и «Кукурузная», представленный в таблице 2.

Таблица 2. Расчетная пищевая ценность хлебобулочных изделий из разработанных хлебопекарных смесей «Пшеничная» и «Кукурузная» (100 г продукта)

Наименование пищевых веществ	Хлебобулочные изделия из разработанных хлебопекарных смесей		Степень удовлетворения суточной потребности в основных пищевых веществах для смесей, %	
	«Пшеничная»	«Кукурузная»	«Пшеничная»	«Кукурузная»
Белки, г	7,6	9,26	10,1	12,34
Жир, г	3,1	4,83	3,7	5,82
Насыщенные жирные кислоты, г	0,4	0,57	4,80	6,90
Углеводы, г	48,8	50,68	13,4	13,89
Сахара (сумма моно- и дисахаридов), г	3,5	2,56	5,4	3,93
Пищевые волокна, г	3,4	3,93	11,3	13,09
Калий, мг	121,7	173,30	3,5	4,95
Кальций, мг	20,1	47,43	2,0	4,74
Магний, мг	30,2	52,92	7,2	13,23
Фосфор, мг	80,2	122,83	11,4	15,35
Железо, мг	1,5	2,02	15,0 (для мужчин) 8,3 (для женщин)	20,2 (для мужчин) 13,5 (для женщин)
Тиамин (В ₁), мг	0,19	0,38	12,7	26,96
Рибофлавин (В ₂), мг	0,06	0,10	3,3	6,01
Пантотеновая кислота (В ₅), мг	0,37	0,49	7,4	8,13
Витамин В ₆ , мг	0,15	0,26	7,5	12,79
Фолатин (В ₉), мкг	29,3	53,91	7,3	26,96
Энергетическая ценность, кДж/ккал	1059/253	1219/291	10,1	11,6

Показатели пищевой ценности, представленные в таблице 2, свидетельствуют, что хлебобулочные изделия из разработанных хлебопекарных мучных смесей «Пшеничная» и «Кукурузная» являются источником белка, пищевых волокон, имеют низкое содержание насыщенных жирных кислот и сахара; из смеси «Кукурузная» – еще источником фосфора и витаминов В₁ и В₉.

Таблица 2 демонстрирует расчетную пищевую ценность хлебобулочных изделий, приготовленных из двух видов хлебопекарных смесей: «Пшеничная» и «Кукурузная». Оба вида хлеба являются источниками основных макронутриентов – белков, жиров и углеводов, а также пищевых волокон, что важно для поддержания пищевой полноценности в условиях изоляции.

Хлеб из «Кукурузной» смеси отличается повышенным содержанием белка (9,26 г на 100 г продукта), жиров (4,83 г) и пищевых волокон (3,93 г), а также более высокой энергетической ценностью (291 ккал) по сравнению с пшеничным хлебом. Это обусловлено включением в рецептуру кукурузной муки и семян подсолнечника, которые обогащают продукт дополнительными питательными веществами.

Особенно стоит отметить значительное содержание витаминов группы В (В₁, В₆, В₉) и минеральных веществ (фосфор, магний, железо) в кукурузном хлебе, что способствует поддержанию

энергетического обмена и нормального функционирования нервной системы в условиях длительной изоляции. Пшеничный хлеб, в свою очередь, имеет более сбалансированный состав с умеренным содержанием макронутриентов и энергетической ценностью (253 ккал), что делает его оптимальным базовым продуктом питания.

Таким образом, оба вида хлебобулочных изделий в совокупности обеспечивают разнообразие и полноценность рациона, способствуют восполнению суточной потребности в важнейших пищевых веществах, что особенно актуально для поддержания здоровья участников длительных изоляционных экспериментов.

Субъективные отзывы участников эксперимента подтвердили, что кукурузный хлеб обладает отличительным вкусом и ароматом по сравнению с традиционным пшеничным. Включение в рецепт кукурузной муки, семян подсолнечника и куркумы придает хлебу яркие вкусовые оттенки и дополнительную питательную ценность.

Участники отмечали, что такой хлеб воспринимается как нечто новое и необычное, что позволяет психологически поддерживать их в условиях монотонности и ограниченного выбора продуктов. Разнообразие вкусовых ощущений, вызванное чередованием пшеничного и кукурузного хлеба, способствовало повышению настроения, снижению чувства однообразия и улучшению общего эмоционального климата внутри группы.

Было проведено анкетирование обследуемых после годового эксперимента, посвященное исследованию эмоциональных реакций относительно процесса хлебопечения и употребления приготовленного хлеба. Использовались вопросы с балльной системой оценки (относительно опыта хлебопечения до эксперимента, частоты участия и предложение идей рецептов во время приготовления, удовлетворенности вкусовыми характеристиками хлеба, несколько вопросов, касающихся единения с командой, а также в целом – насколько участники эксперимента считают процесс хлебопечения и употребления хлеба методом психологической поддержки). Также были даны два открытых вопроса: обследуемым предлагалось написать 5 слов-ассоциаций к процессу приготовления и к процессу потребления хлеба.

Анкета позволила определить психологическое и эмоциональное самочувствие обследуемых в момент приготовления и употребления хлеба, а также внутригруппового взаимодействия в этих процессах. В среднем обследуемые до эксперимента не имели обширного опыта хлебопечения ($1,3 \pm$ балла из 5), периодически участвовали в процессе приготовления хлеба ($3,5 \pm 0,8$ из 5), были довольны вкусом получившегося продукта ($4,6 \pm 0,5$ из 5), средне ощущали единение с командой во время приготовления ($3,1 \pm 0,9$ из 5) и употребления хлеба ($3,5 \pm 0,5$). Также, все обследуемые оценили процесс приготовления хлеба как довольно значимый элемент психологической поддержки в эксперименте ($8 \pm 1,3$).

Факторный анализ методом повернутых компонент с нормализацией Кайзера выделил три компоненты. В первую компоненту вошли опыт приготовления хлеба до эксперимента (0,988), участие в приготовлении (0,926) и восприятие этого процесса как психологической поддержки (-0,725). Во вторую компоненту вошли ощущение единения в процессе приготовления (0,96) и употребления (0,977) хлеба. В третью компоненту вошли частота предложения новых рецептов (0,83) и удовлетворенность вкусом получившегося продукта (0,957). Данные закономерности показывают, что чем более активную позицию обследуемые имели по отношению к взаимодействию с коллегами или к участию в процессе готовки, тем большее удовлетворение они получали в данных сферах.

Любопытным кажется первая компонента – ее связи указывают на то, что чем меньше опыт приготовления хлеба был у участников, чем более значимый эффект психологической поддержки они ощущали, что может быть связано с эффектом новизны.

Можно сделать вывод о том, что новизна задачи и активное участие в процессе готовки были связаны с большим удовольствием и поддержкой от данного вида деятельности.

Таким образом, кукурузный хлеб не только дополнял рацион с точки зрения пищевой ценности, но и являлся эффективным инструментом психологической поддержки, укрепляя командный дух и способствуя эмоциональному комфорту участников в условиях длительной изоляции.

К 7 ноября 2023 года ФГАНУ НИИ хлебопекарной промышленности была подготовлена первая партия (около 100 упаковок) хлебопекарной смеси «Пшеничная», к 10 декабря 2023 года – вторая партия (по 30 упаковок) хлебопекарных смесей «Пшеничная» и «Кукурузная», к 01 марта 2024 года – третья партия (по 40 упаковок) хлебопекарных смесей «Пшеничная» и «Кукурузная» для поставки экипажу Наземного экспериментального комплекса ИМБП РАН проекта SIRIUS-23. Выпечка хлеба производилась в течение всего эксперимента. Среднее количество употребляемого хлеба в день составляло 150 г.

В процессе эксперимента коллективом были предприняты самостоятельные поисковые работы по созданию новых хлебобулочных и мучных кондитерских изделий. Ниже представлен перечень изделий, изготовляемых испытателями самостоятельно на основе разработанных НИИ хлебопекарной промышленности хлебопекарных смесей: бургеры с фрикадельками и яблоком, круассаны с цукатами, пироги с наггетсами, картошкой, курицей, повидлом, с абрикосом и миндалем, пасхальный кулич, рогалики с корицей, сочники, рулеты с клубникой и грецким орехом, печенье «Курабье», мини-синнабоны, штрудель, торты шоколадный и «Графские развалины». Это, безусловно, свидетельствует о вовлечении испытателей в творческий процесс создания нового ассортимента продукции. При анкетировании все испыталы указали, что приготовление хлебобулочных и мучных кондитерских изделий и их совместное употребление в той или иной степени оказало благотворное влияние на психологический климат в коллективе.

В таблице 3 представлены свидетельства того, что общие показатели положительных изменений психологического состояния экипажа «SIRIUS 23» улучшались по сравнению с экспериментом 2021 года за счет совместного приготовления и последующей дегустации выпеченной продукции.

Таблица 3. Характеристика динамики психологического состояния экипажей «SIRIUS 21 и SIRIUS 23»

Наименование показателей	SIRIUS 2023			SIRIUS 2021		
	Повышение	Без изменения	Понижение	Повышение	Без изменения	Понижение
Активность	0*	3	3	0	4	2
Усталость	1	2	3	2	4	0
Радость	1	3	2	1	1	4
Тревожность	3	1	2	4	2	0
Раздражительность	2	0	4	2	3	1
Тоска	2	3	1	4	1	1
Спокойствие	2	2	2	0	2	4
Внимательность	0	3	3	0	3	3
Положительные	25			15		
Отрицательные	24			35		

Примечание: «Повышение» означает количество участников, у которых значение данного параметра увеличилось от начала до конца периода изоляции; «Без изменения» – количество участников без значимых изменений; «Понижение» – количество участников, у которых наблюдалось снижение данного показателя.

Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований можно предположить, что процесс хлебопечения и употребления хлебобулочных и мучных кондитерских изделий, приготовленных на основе разработанных хлебопекарных смесей с помощью хлебопечек, содействует формированию более благоприятного психологического климата в условиях длительной изоляции. По всей видимости, эта технология заслуживает того, чтобы технически адаптировать ее для условий эксплуатации на лунных базах.

Список литературы

1. Белаковский М.С., Волошин О.В. Международный научный проект Sirius. Этап четвертый: Sirius-23: моногр. М.: ГНЦ РФ-ИМБП РАН, 2024. 30 с.
2. Гущин В., Рюмин О., Карпова О., Розанов И., Швед Д., Юсупова А. Перспективы психологического сопровождения в межпланетных экспедициях // Рубежи физиологии. 2021. № 12. Ст. 750414.
3. Гущин В., Швед Д., Виноходова А., Васильева Г., Ничипорук И., Эйманн Б., Балажс Л. Некоторые психофизиологические и поведенческие аспекты адаптации к моделируемой автономной миссии на Марс // Acta Astronautica. 2012. Т. 70. С. 52-57.
4. Лебедева С., Швед Д., Савинкина А. Оценка психофизиологического состояния женщин-операторов в условиях искусственной микрогравитации // Рубежи физиологии. 2022. № 12. Ст. 51016.
5. Суполкина Н., Юсупова А., Швед Д., Гущин В., Савинкина А., Лебедева С.А., Чекалина А., Кузнецова П. Внешняя коммуникация автономных экипажей при моделировании межпланетных полетов // Рубежи в физиологии. 2021. № 12. Ст. 751170.
6. Швед Д., Суполкина Н., Юсупова А. Коммуникативное поведение российских космонавтов: обобщение результатов «содержательного» космического эксперимента // Aerospacе. 2024. № 11(2). Ст. 136.
7. Юсупова А.К., Гущина В.И., Ушакова И.Б. Коммуникации космических экипажей в реальных и моделируемых космических полетах: моногр. М.: ГНЦ РФ – ИМБП РАН, 2011. 199 с.

The influence of the bread-making process and its inclusion in the diet of the testers on the psychological climate in the experiment with prolonged isolation

Vyacheslav K. Ilyin

Senior Researcher, Head of the Department, Head of the Laboratory, MD, Professor, Laureate of the Russian Government Prize in Science and Technology, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences

Moscow, Russia

piton2004@bk.ru

ORCID 0000-0003-3896-5003

Angelika A. Parfenova

Junior research assistant

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences

Moscow, Russia

angelikaparfenova3@gmail.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Alex A. Nekro

Candidate of Medical Sciences, Junior Researcher

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences

Moscow, Russia

nektoalexspace@gmail.com

ORCID 0000-0003-0325-6397

Dmitry M. Shved

Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher
State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia
d.shved84@gmail.com
ORCID 0000-0002-2973-2155

Mark S. Belakovsky

Doctor of Medical Sciences, Head of the Department
State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia
info@imbp.ru
ORCID 0009-0006-9361-8927

Andrey M. Nosovsky

Leading Researcher, Doctor of Biological Sciences
State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia
nam@imbp.ru
ORCID 0000-0002-2657-2723

Ekaterina A. Burlyaeva

Candidate of Medical Sciences, Head of the laboratory
State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia
vrach1708@gmail.com
ORCID 0000-0001-9290-0185

Ksenia S. Nikitina

Junior research assistant
State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia
nksss@internet.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Alexandra O. Savinkina

Candidate of Psychological Sciences, Researcher
State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia
a.o.savinkina@gmail.com
ORCID 0000-0001-5460-9258

Olga E. Tyurina

Candidate of Technical Sciences, Academic Secretary
Scientific Research Institute of the Bakery Industry
Moscow, Russia
oeturina@yandex.ru
ORCID 0000-0002-6662-7530

Marina N. Kostyuchenko

Candidate of Technical Sciences, Director
Scientific Research Institute of the Bakery Industry
Moscow, Russia
Scientific Research Institute of the Bakery Industry
m.kostyuchenko@gosnihp.ru
ORCID 0000-0001-7854-3513

Received 03.10.2025

Accepted 15.11.2025

Published 30.12.2025

UDC 159.9:613.2:664.6

DOI 10.25726/a1661-4154-9082-z

EDN YVBZPR

VAK 1.5.15. Ecology (biological sciences)

OECD 01.00.00. Natural Sciences

Abstract

In conditions of prolonged isolation, characteristic of space missions and similar experiments, the socio-psychological climate within the crew plays a key role in maintaining participants' psycho-emotional state. This study investigates the impact of the process of independently baking bread products and incorporating them into the diet on the psychological climate of the crew during the one-year isolation experiment SIRIUS-23. Special bread mixes suitable for use in isolation conditions were developed, and an experiment was conducted with six volunteers. The use of bread makers enabled participants to bake various products together, fostering creative engagement and supporting social cohesion. Analysis of questionnaire data showed that the joint preparation and consumption of bread products positively influenced psychological well-being by reducing stress levels and improving mood compared to previous experiments without this activity. The results confirm the importance of organizational and creative resources in optimizing the psychological climate of isolated groups and indicate the potential for adapting this technology for long-duration space missions, including lunar bases.

Keywords

space missions, communication in isolation, monotony, socio-psychological factors, group cohesion, creative resources.

References

1. Belakovsky M.S., Voloshin O.V. Sirius International Scientific Project. Stage four: Sirius-23: monograph. M.: SSC RF-IMBP RAS, 2024. 30 p.
2. Gushchin V., Ryumin O., Karpova O., Rozanov I., Shved D., Yusupova A. Prospects of psychological support in interplanetary expeditions // Frontiers of physiology. 2021. № 12. Art. 750414.
3. Gushchin V., Shved D., Vinokhodova A., Vasilyeva G., Nichiporuk I., Eimann B., Balazhs L. Some psychophysiological and behavioral aspects of adaptation to a simulated autonomous mission to Mars // Acta Astronautica. 2012. Vol. 70. pp. 52-57.

4. Lebedeva S., Shved D., Savinkina A. Assessment of the psychophysiological state of female operators in artificial microgravity // *Frontiers of physiology*. 2022. № 12. Art. 51016.
5. Supolkina N., Yusupova A., Shved D., Gushchin V., Savinkina A., Lebedeva S.A., Chekalina A., Kuznetsova P. External communication of autonomous crews in modeling interplanetary flights // *Frontiers in physiology*. 2021. № 12. St. 751170.
6. Shved D., Supolkina N., Yusupova A. Communicative behavior of Russian cosmonauts: generalization of the results of a «meaningful» space experiment // *Aerospace*. 2024. № 11(2). Art. 136.
7. Yusupova A.K., Guschina V.I., Ushakova I.B. Communications of space crews in real and simulated space flights: monograph. M.: SSC RF – IMBP RAS, 2011. 199 p.

Сетевое издание
«Вопросы экологии»
Том 38 (2025). № 1

ISSN 3034-7319

Реестровая запись о регистрации ЭЛ № ФС 77 - 87289 от 08.05.2024 г.
Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Рукописи подвергаются редакционной обработке. Точки зрения авторов и редакционной коллегии могут
не совпадать. Авторы публикуемых материалов несут ответственность за их научную достоверность.

Адрес редакции: 216783, Россия, с. Понизовье, ул. К.Н. Чибисова, 26-10
е-mail: worldjournals.pro@mail.ru
т.: +7-995-907-64-01 (WhatsApp, Telegram)
веб-сайт: <https://grreview.ru>

Подписано к размещению 30.12.2025.

© Учредитель ИП Подколзин М.М., 2025

Online media
«Voprosy Ekologii»
Volume 38 (2025). Issue 1

ISSN 3034-7319

Registry record of registration ЭЛ № ФС 77 - 87289 dated 08.05.2024.
Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass
Communications (Roskomnadzor).

Manuscripts are exposed to editorial processing. The points of view of authors and an editorial board can not
coincide. Authors of the published materials bear responsibility for their scientific reliability.

Address of the editorial office: 216783, Russia, Ponizovye, Chibisova St., 26-10
е-mail: worldjournals.pro@mail.ru
ph.: +7-995-907-64-01 (WhatsApp, Telegram)
web: <https://grreview.ru>

Signed to placement 30.12.2025.

© Founder Mikhail M. Podkolzin EP, 2025